

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

*MODÉLISATION D'UN SYSTÈME
ÉOLIEN BASÉ SUR UNE MADA*

Diriger par:

TRIA Fatma Zahra

Réaliser par:

**BELGHIT Asma
BOUTERAA Ahmed
SAHRAOUI med-Elghali**

Soutenu 03-04 Juin

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, je tiens à remercier vivement mon encadreur

M^{lle} :Tria Fatma Zahra

pour les conseils, les encouragements et les efforts qu'il m'a prodigués durant la réalisation de ce travail ainsi durant les études universitaires.

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Généralité sur L'énergie éolienne

I.1 Introduction	2
I.2 Définition de l'énergie éolienne.....	2
I.3 Les différents types des éoliennes.....	2
I.3.1.Les éoliennes à axe vertical.....	2
I.3.2.Les éoliennes à axe horizontal.....	3
I.4 .Principales composantes d'une éolienne.....	3
I.5. Principe de fonctionnement	6
I.6. Contrôle au niveau de la génératrice.....	6
I.6.1. Vitesse fixe.....	6
I.6.2. Vitesse variable.....	7
I.7.Modalisation d'une turbine éolienne.....	7
I.7.1 La puissance du vent disponible	7
I.7.2. La puissance La puissance mécanique	7
I.7.3.Le coefficient de puissance(rendement)	8
I.7.4.Loi du Betz	8
I.7.5. Modèle du Multiplicateur.....	10
I.7.5. Equation dynamique de l'arbre.....	10
I.8.Stratégie de commande de la turbine éolienne.....	11
I.9.Résultats de Simulation et interprétations.....	12
I.10. Conclusion.....	13

CHAPITRE II : La Modélisation et Commande vectorielle de la GADA

II.1.Introduction.....	14
II.2.Modélisation de la MADA.....	14
II.2.1.Application de la transformation de Park à la MADA.....	16
II.2.2.Equations des tensions.....	17
II.2.3.Equation des flux.....	17
II.2.4.Equation du couple électromagnétique.....	17
II.3.Commande vectorielle de la MADA	17

Sommaire

II.3.1.Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	18
II.3.2.Expressions des puissances active et réactive statoriques.....	20
II.3.3.Expressions des tensions rotoriques.....	20
II.4. Contrôle indépendant des puissance active et réactive.....	22
II.4.1. Commande directe	22
II.4.2. Commande indirecte.....	23
II.4. 2.1.Commande indirecte sans boucle de puissance.....	23
II.4.2.2.Commande indirecte avec boucle de puissance.....	24
II.5. Type du régulateur PI.....	24
II.6. Model de l'onduleur de tension a deux niveaux	24
II.6.1. Principe de la MLI.....	26
II.7.Résultats de la Simulation.....	27
II.7.Conclusion.....	28

CHAPITRE III :Résultats de simulation (turbine, GADA)

III.1.Introduction.....	29
III.2. Conditions de la simulation.....	30
III.3. Conclusion	33
Conclusion générale.....	34
Bibliographique.....	35
Annexe.....	37

Notations et symboles

MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation.
C_p	: Le coefficient de puissance.
C_{p_max}	: Le coefficient de puissance maximal de la turbine.
V_{vent} , V	: La vitesse du vent (en m/s).
P vent	: Puissance du vent.
Ω_{mec}	: Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
Ω_s	: Vitesse angulaire de synchronisme.
MPPT	: Maximum Power Point Tracking.
λ	: La vitesse relative de l'éolienne.
λ_{opt}	: La vitesse relative optimale de l'éolienne.
β	: Angle de calage des pales d'un aérogénérateur.
ρ	: Masse volumique de l'air.
S	: Section de la surface active balayée par les pales.
R	: Rayon de la surface balayée par la turbine.
P_{aero}	: La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
P_v	: Puissance du vent.
λ	: Rapport d'avance ou le ratio (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent).
$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine.
C_g	: Couple résistant issue du multiplicateur.
C_{aer}	: Couple aérodynamique de l'éolienne.
G	: Gain du multiplicateur.
C_{vis}	: Couple des frottements visqueux.
C_{mec}	: Couple mécanique.
C_{em} , C_e	: Couple électromagnétique.
$J_{turbine}$: Inertie de la turbine.
f	: Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
J	: Inertie totale de l'arbre.
$J_{turbine}$: Inertie de la turbine.
GADA	: Génératrice asynchrone à double alimentation.
$[V_s]$: Vecteur tension statorique.
$[I_s]$: Vecteur courant statorique.

Notations et symboles

$[I_r]$: Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$: Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$: Vecteur flux rotorique.
$v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}$: Tensions simples triphasées au stator de la machine.
$v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}$: Tensions simples triphasées au rotor de la machine.
$i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}$: Courants dans les enroulements statoriques de la machine.
$i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}$: Courants dans les enroulements rotoriques de la machine.
$\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}$: Flux propres circulant dans les enroulements du stator de la machine.
$\Phi_{ar} \ \Phi_{br} \ \Phi_{cr}$: Flux propres circulant dans les enroulements du rotor de la machine.
$[R_s]$: Matrice résistance statorique.
$[R_r]$: Matrice résistance rotorique.
$[L_s]$: Matrice inductance statorique.
$[L_r]$: Matrice inductance rotorique.
$[M_{rs}]$: Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
R_s	: Résistance statorique.
R_r	: Résistance rotorique.
L_s	: Inductance propre d'une phase statorique.
L_r	: Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	: Inductance mutuelle entre deux phase statorique.
M_r	: Inductance mutuelle entre deux phase rotorique.
M_{sr}	: Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe a_s coïncide avec l'axe.
M_D	: Maximum de l'inductance mutuelle enter une phase du stator et la phase correspondante du rotor.
$V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}$: Tension triphasé rotorique.
$V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}$: Tension triphasé statorique.
$V_{dr} \ \text{et} \ V_{qr}$: Tension biphasé rotoriqu.
ϕ_{ds}	: Flux statorique selon l'axe d .
ϕ_{qs}	: Flux du stator selon l'axe q .
$[P(\theta)]$: Matrice de transformation de Park
$[P(\theta)]^{-1}$: Transformation de Park inverse
θ	: Angle entre le repère statorique et le repère rotorique.
d, q	: Composantes de <i>Park</i> directe et en quadrature.
ω	: Pulsation mécanique du rotor.

Notations et symboles

$[v_{sdqo}]$: Vecteurs tensions statorique et rotorique dans le repère de Park.
$[i_{sdqo}], [i_{rdqo}]$: Vecteurs courants statoriques et rotoriques dans le repère de Park.
$[\phi_{sdqo}], [\phi_{rdqo}]$: Vecteurs flux statoriques et rotoriques dans le repère de Park.
Φ_s	: Flux statorique
Φ_r	: Flux rotoriques
Φ_m	: Flux d'entrefer
θ_s	: L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d.
θ_r	: L'angle électrique entre l'axe a_r et l'axe d.
ω_s	: Pulsation électrique statorique.
M	: Inductance mutuelle cyclique entre les enroulements statorique et rotorique.
P_s	: Puissance active échangée entre le stator de la machine et le réseau.
Q_s	: Puissance réactive échangée entre le stator de la machine et le réseau.
v_s	: Tension instantanée des phases statoriques.
g	: Glissement du rotor par rapport au stator de la machine.
PI	: Proportionnelle intégrale.
V_a, V_b, V_c	: Tensions simples statoriques.
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	: Tensions composées statoriques.
S_a, S_b, S_c	: Etat des commutateurs de puissance.
V_{dc}	: Tension continu.
MLI	: Modulation de largeur d'impulsion.
p	: Nombre de paires de pôles.
t	: Temps.
m	: Indice de modulation.
r	: Taux de modulation.
f	: Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
f_p	: Fréquence de la porteuse.
U_p	: Amplitude de la porteuse.

Liste des figures

Figure		Page
I.1	éoliennes à axe vertical et à axe horizontal.	3
I.2	Conversion de l'énergie éolienne	4
I.3	Eléments constituant une éolienne.	5
I.4	Eolienne à vitesse fixe.	6
I.5	Schéma de la turbine éolienne.	7
I.6	Le coefficient de puissance en fonction de λ et β .	8
I.7	Tube de courant autour d'une éolienne	9
I.8	Schéma bloc du modèle de la turbine.	11
I.9	La puissance électrique en fonction de la vitesse d'une éolienne de 1.5 MW.	11
I.10	Profil du vent	12
I.11	Coefficient de puissance.	13
I.12	Vitesse mécanique	13
I.13	Couple électromagnétique	13
I.14	Puissance électrique	13
II.1	Modèle de PARK de la MADA	16
II.2	Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu	18
II.3	Vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.	19
II.4	Schéma bloc du système à réguler.	21
II.5	Commande directe.	22
II.6	Commande indirecte sans boucle de puissance.	23
II.7	Commande indirecte avec boucle de puissance.	24
II.8	Onduleur de tension à deux niveaux.	25
II.9	Principe de la MLI triangule sinusoïdale.	26
II.10	Courbe du courant statorique avec zoom	27
II.11	Courbe du courant rotorique avec zoom.	27
II.12	La puissance réactive statorique	28
II.13	La puissance active statorique	28
III.1	Schéma bloc de système complet.	29

Liste des figures

III.2	MPPT avec l'asservissement de la vitesse de la turbine.	30
III.3	Vitesse de vent en fonction du temps.	30
III.4	Variation de la vitesse mécanique.	31
III.5	Puissance active statorique et sa référence.	31
III.6	Puissance réactive statorique et sa référence.	31
III.7	La vitesse spécifique.	32
III.8	Le coefficient de puissance.	32
III.9	Courant triphasé rotorique.	32
III.10	Courant triphasé statorique.	32
III.11	Le flux statorique selon l'axe d et q.	32

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Parmi ces énergies on trouve l'énergie dite éolienne. L'objet de ce mémoire est l'étude d'un système éolien. La multiplication des éoliennes dans le monde a conduit les recherches de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et à optimiser la qualité d'énergie produite, et dont le nombre des publications, des applications et des brevets en témoigne. Ainsi plusieurs pays se sont résolument tournés vers ce type d'énergie, à l'exemple de l'Allemagne, L'Espagne, le Danemark, ...etc.

Il ya plusieurs machines vont être utilisé dans les systèmes éolien tel que **MS**, **MSAP**, **MAS** et **MADA**, dans notre travail nous avons utilisé dans le système éolien la machine asynchrone à double alimentation. Cette machine peut être fonctionnée à vitesse variable, donc possibilité de fournir de l'énergie quelque soit la vitesse de vent.

Dans le premier chapitre nous avons présenté un état de l'art actuel des différents types des systèmes éoliens, et le principe de fonctionnement de l'éolienne, ainsi le modèle de la partie mécanique de l'éolienne y compris le multiplicateur assurant la liaison entre la turbine et la génératrice. Et en enfin nous avons présenté la commande de la turbine éolienne.

Dans le deuxième chapitre nous développerons s'attache au modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation, de l'élaboration de sa commande ainsi le convertisseur coté rotor permettant un contrôle indépendant des puissances par les tensions rotoriques .

Dans le troisième chapitre nous avons présenté la chaîne de conversion éolienne globale (la turbine avec la machine). Ce chapitre se termine par les résultats de simulations d'un système éolien globale. Enfin le mémoire se termine par une conclusion générale.



Généralité sur L'énergie éolienne

Chapitre I

I.1.Introduction :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique .Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons donc choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement la modélisation de la turbine éolienne.

I.2.Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, 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 mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [1].

I.3.Les différents types des éoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles : celle à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.3.1.Les éoliennes à axe vertical :

Ces types d'éoliennes a fait l'objet de nombreuses recherches .Dans ce type l'arbre est perpendiculaire au sol, il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol donc pas besoin de munir la machine d'une tour, facilitant ainsi les interventions de maintenance, mais elle

présente certaines caractéristiques pénalisantes : elle ne peut pas démarrer seule (nécessité d'un dispositif de lancement), les pales sont plus chères à construire et engendrent un niveau de bruit important; faible rendement aérodynamique, et grande sensibilité de C_p à la vitesse et provoque des fluctuations importantes de puissance [2].

I.3.2. Les éoliennes à axe horizontal:

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [2].



a :éoliennes à axe vertical.



b :éoliennes à axe horizontal.

Figure. I.1 :éoliennes à axe vertical et à axe horizontal.

I.4. Principales composantes d'une éolienne:

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique .

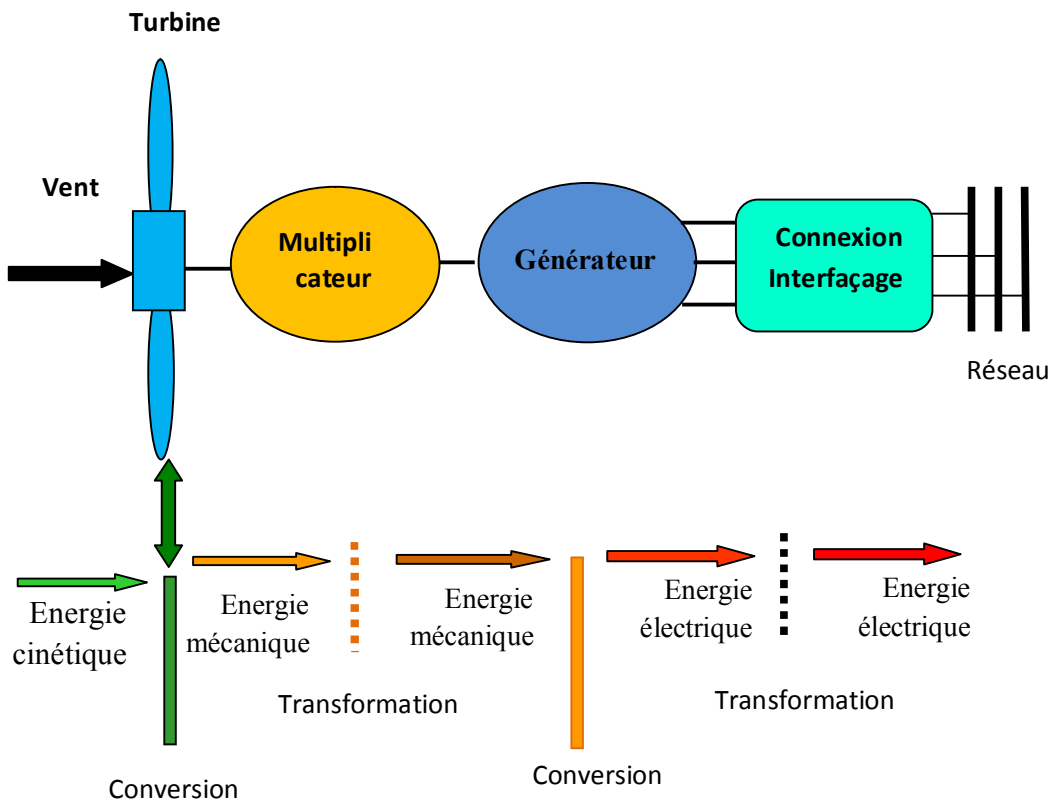


Figure. I.2 : Conversion de l'énergie éolienne.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. Le fonctionnement général est illustré par la figure (I.2).

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateur qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée des quatre éléments principaux [3, 4] :

- **La tour**: c'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol [5, 4]. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Le compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [4]. La tour est dotée des câbles de transport de l'énergie électrique, des éléments de contrôle, des appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle [5, 6].

- **La nacelle:** qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent)[4, 5, 6, 7, 8].
- **Les pales:** qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales qui sont fixées sur le rotor a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines unies et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité [5]. Dans notre travail nous avons utilisé type d'éolienne à 3 pâles.
- **Le moyeu:** c'est le support des pales. Le moyeu doit être capable de supporter des coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé, et non réalisé par soudure, bien que sa forme soit ainsi plus difficile à réaliser. Tous ces éléments sont représentés sur la figure (I.3) :

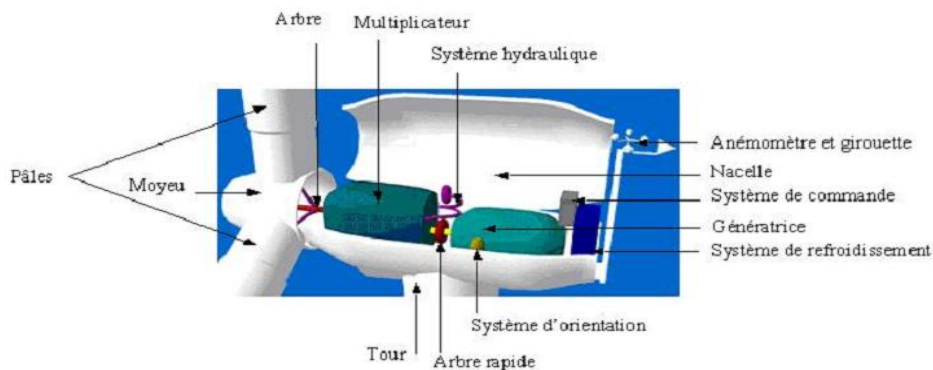


Figure. I.3: Eléments constituant une éolienne.

I.5.Principe de fonctionnement :

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse V_{vent} . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolienne et commence à tourner. Une puissance P_{vent} est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine. On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques)[5, 9].

I.6. Contrôle au niveau de la génératrice :

Le contrôle au niveau de la génératrice permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens. La génératrice peut être liée directement ou indirectement au réseau.

I.6.1. Vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice figure (I.4) :

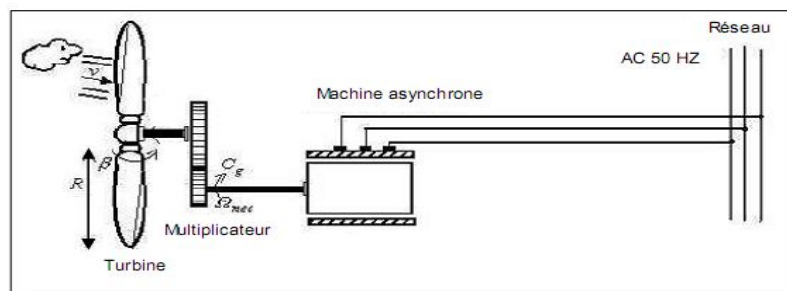


Figure. I.4: Eolienne à vitesse fixe.

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance

électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500tr/min$ ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [8].

I.6.2. Vitesse variable:

L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique [11]. Dans notre travail nous avons appliqué cette technologie sur la génératrice asynchrone à double alimentation.

I.7. Modalisation d'une turbine éolienne:

I.7.1 La puissance du vent disponible :

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante [5, 12] :

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

I.7.2 La puissance mécanique :

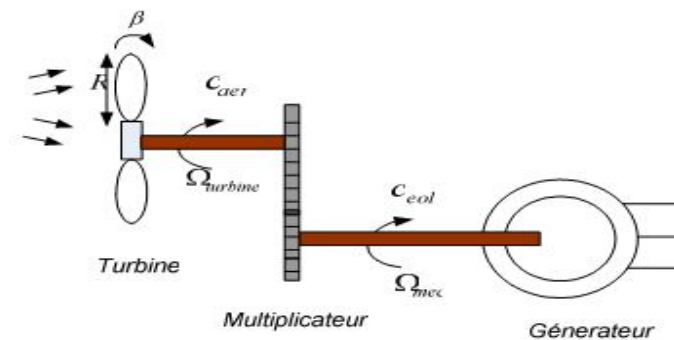


Figure. I.5: Schéma de la turbine éolienne.

Nous remarquons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

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

λ : est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales $\Omega_{turbine} \cdot R$, et la vitesse du vent V .

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (I.3)$$

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de la turbine.

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

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (I.4)$$

I.7.3. Le coefficient de puissance (rendement):

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [6] :

$$C_p = 0.5 - 0.167(\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{(18.5 - 0.3 \cdot \beta)} \right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (I.5)$$

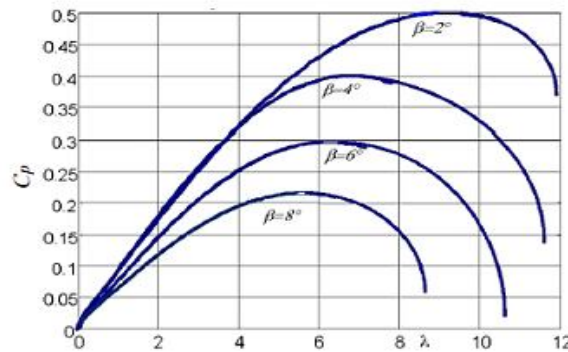


Figure 1.6. Le coefficient de puissance en fonction de λ et β .

I.7.4. Loi du Betz:

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 1.5 sur lequel on a représenté la vitesse du vent 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 est:

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I.6})$$

La puissance $P_{a\acute{e}r}$ 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) :

$$P_{a\acute{e}r} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.7})$$

Soit en remplaçant l'expression de m :

$$P_{a\acute{e}r} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.8})$$

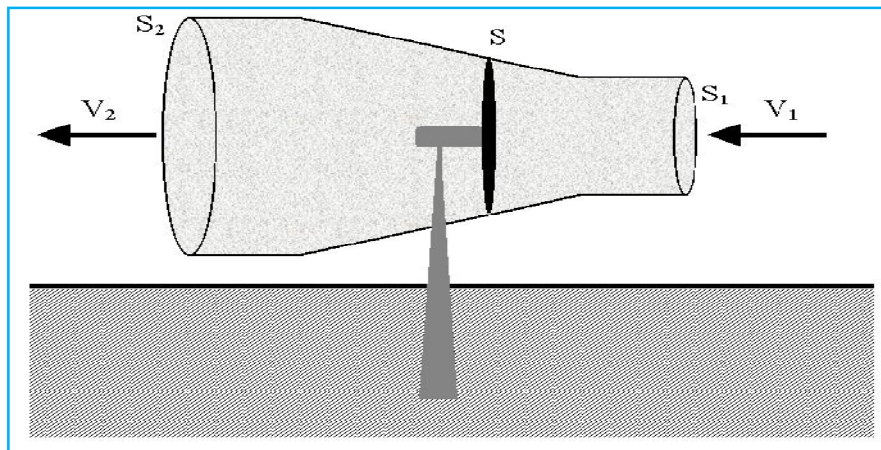


Figure. I.7 Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_v correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{I.9})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_{a\acute{e}r}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (\text{I.10})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure.1.6), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{a\grave{e}r}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ 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 .

I.7.4. Modèle du Multiplicateur:

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice elle est modélisée mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{a\acute{e}ro}}{G} \quad (I.11)$$

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I.12)$$

I.7.5. Equation dynamique de l'arbre:

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum des\ couple = C_{mec} \quad (I.13)$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.14)$$

Le couple résistant qui résulte des frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (I.15)$$

Basée sur les équations présentées précédemment, la figure (I.7) peut définir un modèle physique de la turbine ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

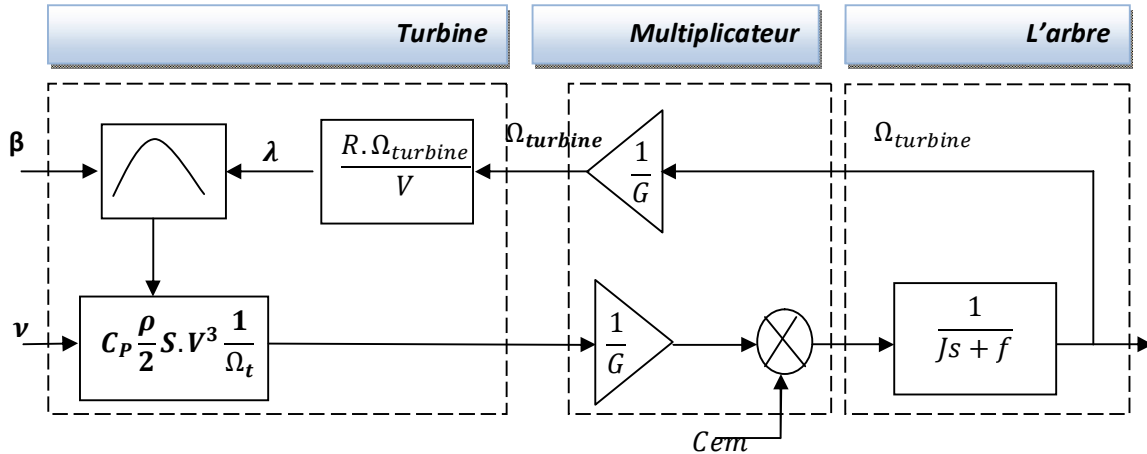


Figure. 1.8: Schéma bloc du modèle de la turbine.

I.8.Stratégie de commande de la turbine éolienne:

On distingue quatre zones de fonctionnement des turbines à vitesse variable comme l'indique la figure (I.8) concernant une éolienne de 1.5 MW. La première zone concerne la période de démarrage, la deuxième est la zone d'extraction de la puissance maximale "MPPT", la troisième zone est destinée à la limitation de la vitesse autour de la vitesse nominale et la quatrième à la limitation de la puissance.

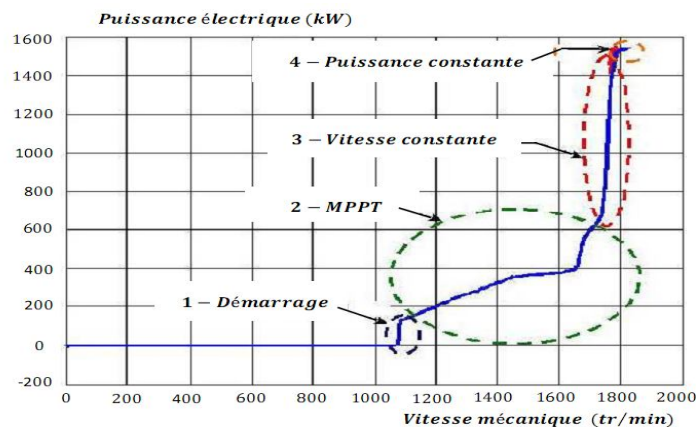


Figure. I.9: La puissance électrique en fonction de la vitesse d'une éolienne de 1.5 MW.

Puisque nous sommes intéressés à la deuxième zone de fonctionnement, on va chercher l'extraction de la puissance maximale en temps réel par optimisation de la conversion énergétique. L'angle de calage des pales β étant fixe, on ajuste rotoriquement le couple électromagnétique de la génératrice afin de régler la vitesse de rotation et de rapprocher la vitesse spécifique de l'éolienne λ à sa valeur optimale et le coefficient de puissance C_p à sa valeur maximale[10].

I.9. Résultats de Simulation et interprétations

Nous présenterons la Simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. les Simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Cet environnement nous permet de développer les schémas blocs de régulation et de les associer aux modèles de machine. Nous allons donc nous fixer une couple référence et utiliser le profil de vent de la figure. I.9 pour valider le modèle établi précédemment. Nous observerons l'allure de la Vitesse mécanique et de la puissance de référence en fonction de l'évolution du vent. Où les composants électriques utilisés donnés en l'annexe.

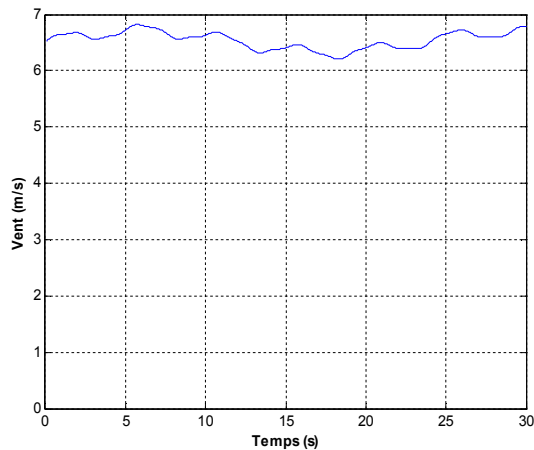


Figure. I.10. Profil du vent

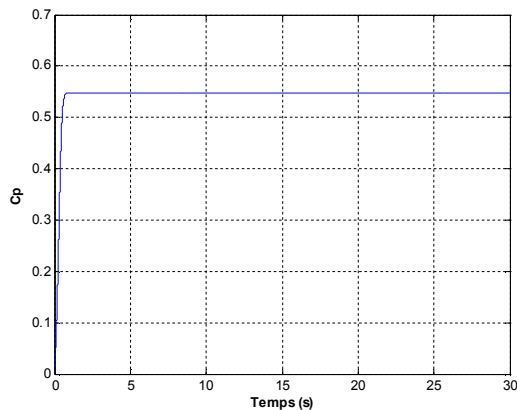


Figure. I.11. Coefficient de puissance.

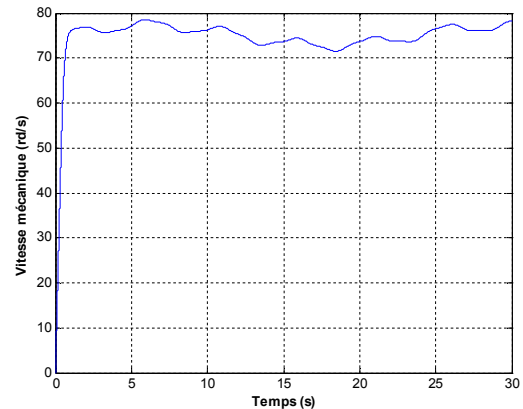


Figure. I.12. Vitesse mécanique

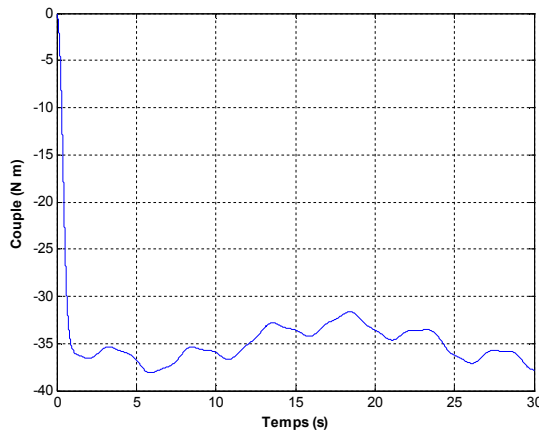


Figure. I.13. Couple électromagnétique

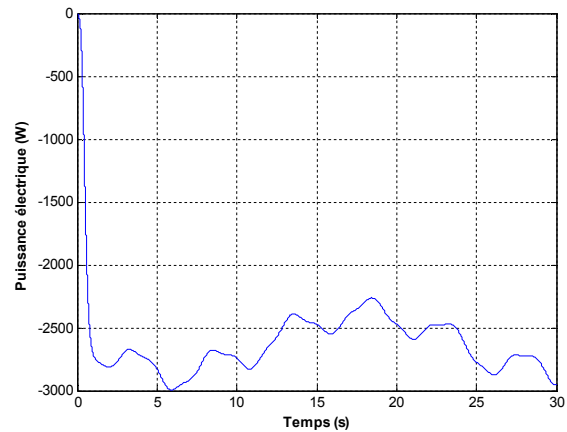


Figure. I.14. Puissance électrique

I.10. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, son différents types des éoliennes, son principe de fonctionnement. On a présenté aussi le stratégie de l'éolienne à vitesse fixe et celle à vitesse variable. En fin de ce chapitre, on a présenté la modélisation du système éolien, basé sur la turbine. Dans le deuxième chapitre, l'étude va traiter la commande vectorielle de la machine et le convertisseur électronique assurant la commande rotorique de la MADA pour exploiter au mieux l'énergie disponible dans le vent en cherchant le point de fonctionnement à puissance maximale, dit en anglais maximum power point tracking (MPPT).



La Modélisation et Commande de la GADA

Chapitre II

II.1. Introduction:

Une grande partie des éolienne installée dans nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable. La commande en double alimentation va nous permettre de réaliser un contrôle indépendant de la puissance active et réactive de la MADA. Parce que l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse mécanique. Dans ce chapitre, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau.

II.2. Modélisation de la MADA:

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court-circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles.

Comme toutes les autres machines, la machine asynchrone double alimentée (MADA) est une machine réversible qui peut fonctionner en mode génératrice (GADA). En cas où on inverse son couple en injectant un couple moteur au lieu d'un couple résistant au niveau de son arbre, elle garde toujours son propre modèle. On peut exprimer le modèle de cette machine en se basant sur les relations suivantes :

Les Grandeurs statoriques :

$$\begin{cases} [V_S] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T \\ [I_S] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T \\ [\Phi_S] = [\phi_{as} \ \phi_{bs} \ \phi_{cs}]^T \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Les Grandeurs rotoriques :

$$\begin{cases} [V_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T \\ [I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T \\ [\Phi_r] = [\phi_{ar} \ \phi_{br} \ \phi_{cr}]^T \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Voici alors les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Où :

R_S, R_r : sont respectivement la résistances statorique et rotorique ;

L_S, L_r : inductances propres statorique et rotorique ;

M_{sr} : inductances mutuelles entre le stator et le rotor ;

M_S : inductances mutuelles entre les phases statoriques

M_r : inductances mutuelles entre les phases rotoriques ;

Avec :

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

M_0 :Maximum de l'inductance mutuelle enter une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

II.2.1. Application de la transformation de Park à la MADA:

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système biphasé (repère d, q, o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution [7]. Cette transformation peut être appliquée sur le courant, tension et flux.

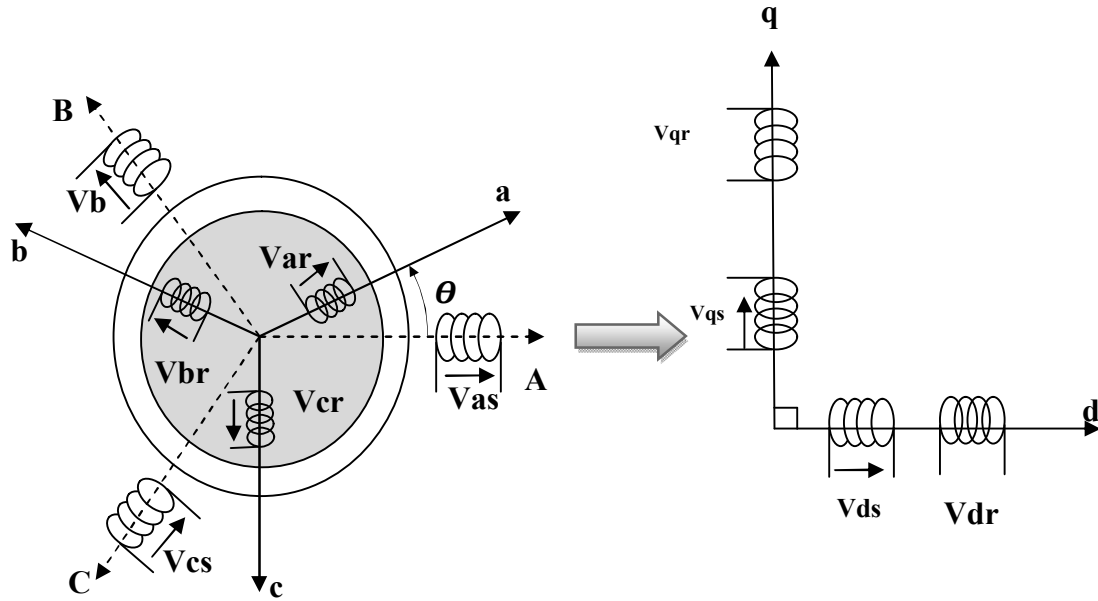


Figure II.1 :Modèle de PARK de la MADA.

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

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)][x_{abc}] \quad (\text{II.8})$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T \quad (\text{II.9})$$

II.2.2. Equations des tensions:

Après l'application de la transformation de Park pour l'équation (II.3) du stator et l'équation (II.4) du rotor. Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au champs tournant pour la modelisation et commande de la MADA. Les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

ω_s : vitesse du champs tournant.

ω : pulsation mécanique du rotor.

II.2.3. Equation des flux:

Appliquons la transformation de Park à les expressions (II.5) ,(II.6) :

$$\begin{aligned} \phi_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} &= L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} &= L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

II.2.4. Equation du couple électromagnétique:

Parmi les différentes méthodes qui nous permettent d'exprimer l'équation du couple électromagnétique, deux méthodes sont distinguées. La méthode des travaux virtuels [11], et la méthode du bilan des puissances instantanées. Ainsi grâce à cette dernière, nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$C_e = p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.12})$$

II.3. Commande vectorielle de la MADA :

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la figure (II.2).[5]. Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone ϕ_s , ϕ_r ou ϕ_m au choix, afin d'obtenir

un découplage flux-courant et couple-courant ce qui nous permet de faire un contrôle du couple indépendamment du flux figure(II.2)[13].

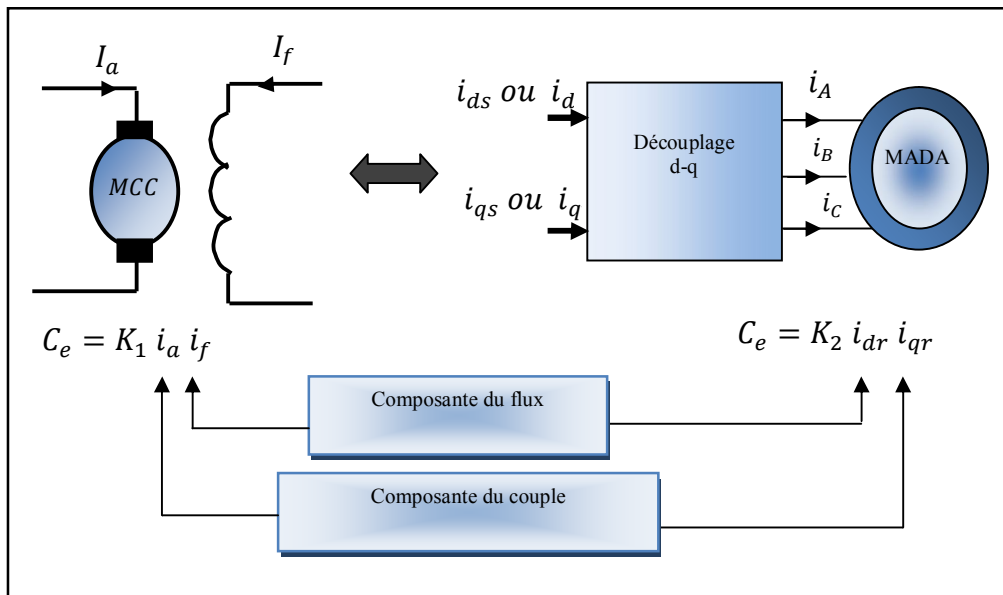


Figure. II.2: Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.

II.3.1. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité, nous allons nous intéresser à un contrôle indépendant des puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions et des courants rotoriques générées par un onduleur, aux puissances active et réactive statoriques [3]. L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (II.3).

On oriente le flux statorique selon l'axe d pour que la composante suivant l'axe q soit constamment nulle ($\phi_{qs} = 0$, $\phi_{ds} = \phi_s$) [3, 13], et le modèle de la machine sera plus simple comme il est présenté dans les équations(II.15).

L'expressions du couple électromagnétique présenté dans l'équation suivante :

$$C_e = p(\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (II.13)$$

Si on suppose que le flux statorique est orienté suivant l'axe d du repère de Park, on aura :

$$\phi_s = \phi_{ds} \quad \Rightarrow \quad \phi_{qs} = 0$$

Donc l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_e = p\phi_{ds} \cdot i_{qs} \quad (\text{II.14})$$

Cette expression du couple ressemble bien à l'expression du couple d'un moteur à courant continu à excitation séparée. Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, le couple électromagnétique peut être contrôlé indépendamment du flux par action sur le courant i_{qs} , ce qui est l'objectif de la commande vectorielle [13].

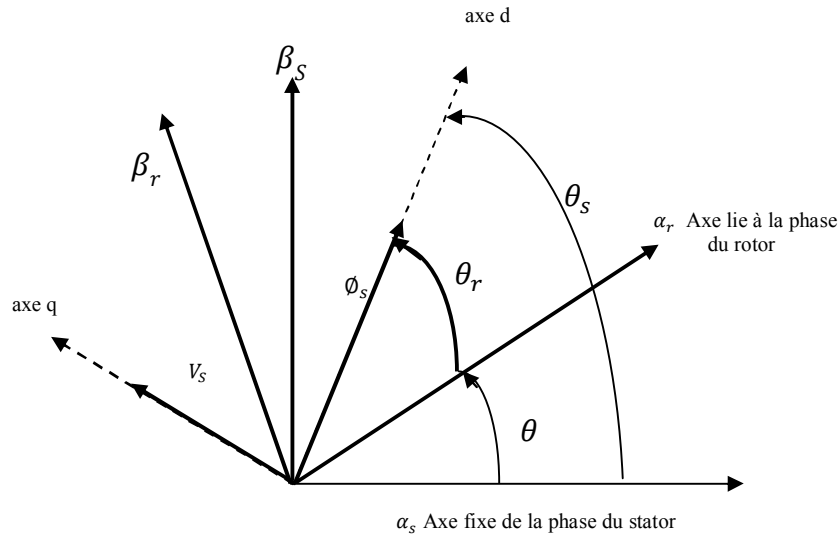


Figure II.3 : Vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante[13, 4] :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = \omega_s \phi_s \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ 0 = L_s \cdot i_{qs} + M i_{dr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

II.3.2. Expressions des puissances active et réactive statoriques:

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P_S = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \\ Q_S = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme [4, 7, 13] :

$$\begin{cases} P_S = v_S i_{qs} \\ Q_S = v_S i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Les puissances active P_S et réactive Q_S sont donc fonction des courants statoriques i_{qs} et i_{ds} respectivement, sur les quels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire [7] :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{v_S}{\omega_S \cdot L_S} - \frac{M}{L_S} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_S} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{cases} P_S = -\frac{v_S \cdot M}{L_S} \cdot i_{qr} \\ Q_S = \frac{v_S^2}{\omega_S \cdot L_S} - \frac{v_S \cdot M}{L_S} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Il ressort de l'expression (II.20) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{v_S^2}{\omega_S \cdot L_S}$ imposée par le réseau [13].

II.3.3. Expressions des tensions rotoriques:

A partir du système d'équation (II.19) les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M \cdot v_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (II.21)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (II.15), on trouve :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.22)$$

A partir des systèmes d'équations (II.20) et (II.22), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

L'expression $g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé. Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre. L'étude précédemment établie nous permet de définir le schéma bloc du système à réguler (Figure II.4).

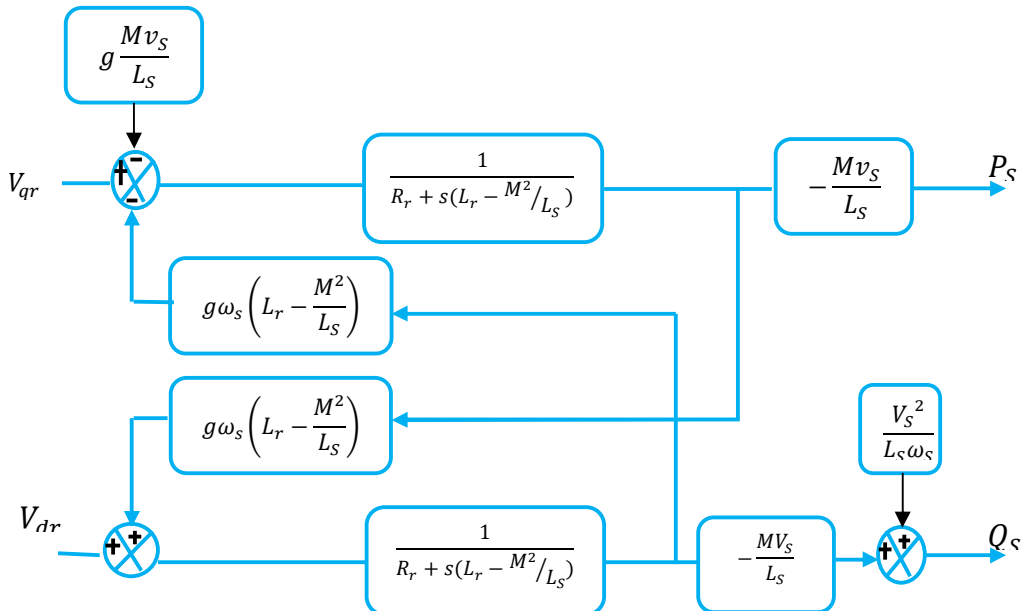


Figure II.4 : Schéma bloc du système à réguler.

II.4. Contrôle indépendant des puissance active et réactive:

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA il suffit maintenant d'inverser ses bloc pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

II.4.1. Commande directe :

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour assurer une commande découplée des puissance de la génératrice. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine[3] . Si l'on observe les équations (II. 20), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{M.v_S}{L_S}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (II.22) disparaissent en régime permanent. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) \cdot i_{dr} + g \frac{M \cdot v_S}{L_S} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

v_{dr} et v_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus [13].

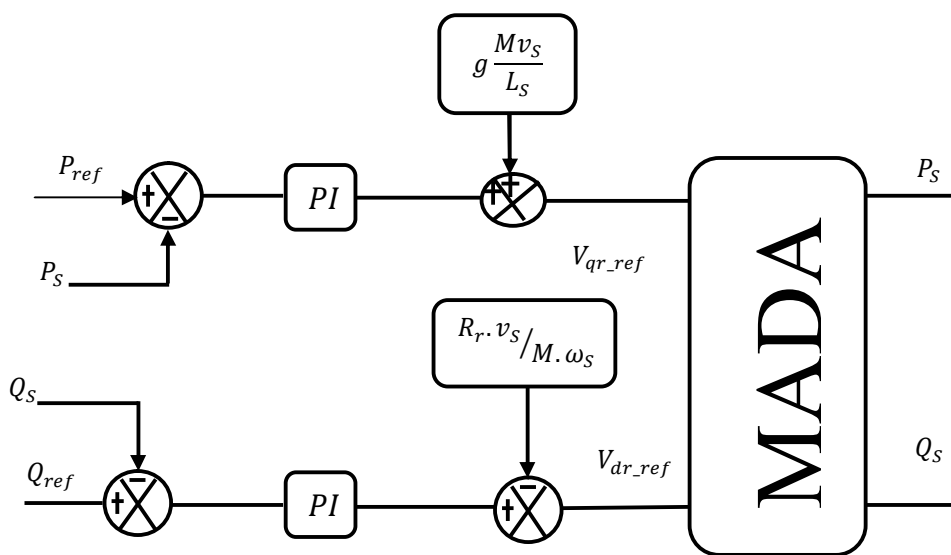


Figure II.5 : Commande directe.

II.4.2. Commande indirecte:

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances actives et réactives. Ainsi, les courants rotoriques seront réglés indirectement. Cette démarche aboutit à un modèle qui correspond à celui de la MADA mais dans le sens inverse [3].

Nous aurons donc un bloc de commande constitué de deux sous systèmes. Le premier calcule les courants de référence à partir des consignes (Puissances actives et réactives), le deuxième calcule les tensions de référence à partir des courants rotoriques calculés par le premier sous système.

A partir du bloc de commande nous pouvons élaborer deux structures, l'une utilise une boucle régulant le courant, et l'autre se base sur la première en lui ajoutant une boucle régulant les puissances.

II.4.2.1. Commande indirecte sans boucle de puissance:

Cette commande consiste à réguler les courants par une boucle dans chaque axe. Les consignes de régulation sont déduites à partir des valeurs de références telles qu'illustrées dans la (figure II.6).

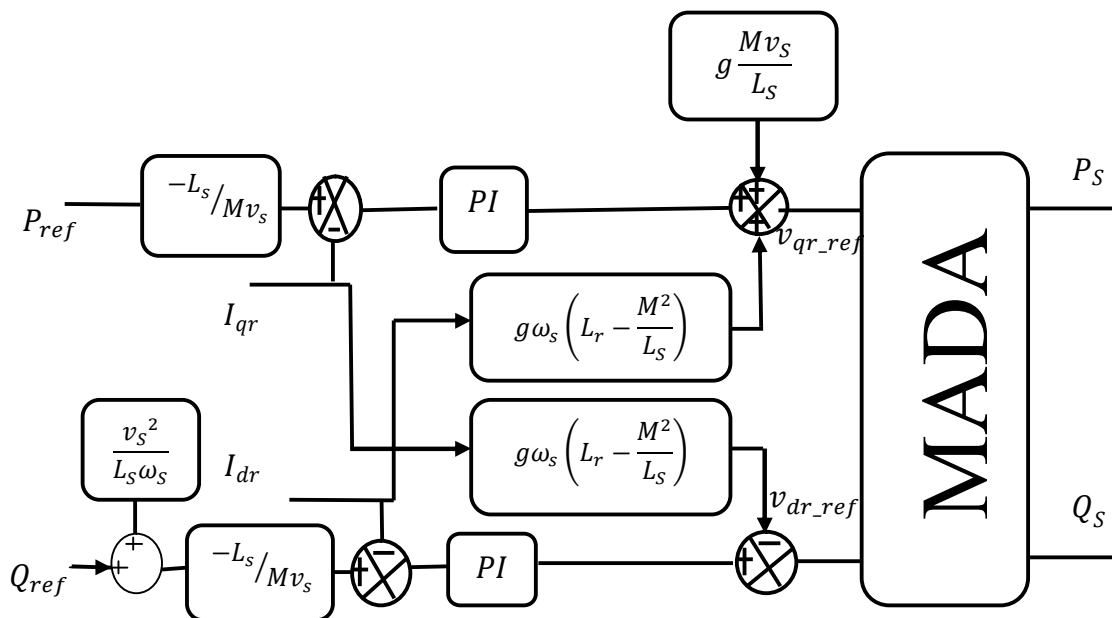


Figure II.6 : Commande indirecte sans boucle de puissance.

II.4.2.2. Commande indirecte avec boucle de puissance:

Ce type de structure (Figure II.7) est composé de deux boucles, la première est celle du courant tel qu'effectuée dans la section précédente, et la deuxième boucle est celle des puissances. Ainsi on aboutit à une régulation de la puissance à partir de consignes que l'on impose.

Les régulateurs intervenants dans la boucle de puissance sont de type proportionnel intégral, car celui-ci offre des résultats suffisamment probants.

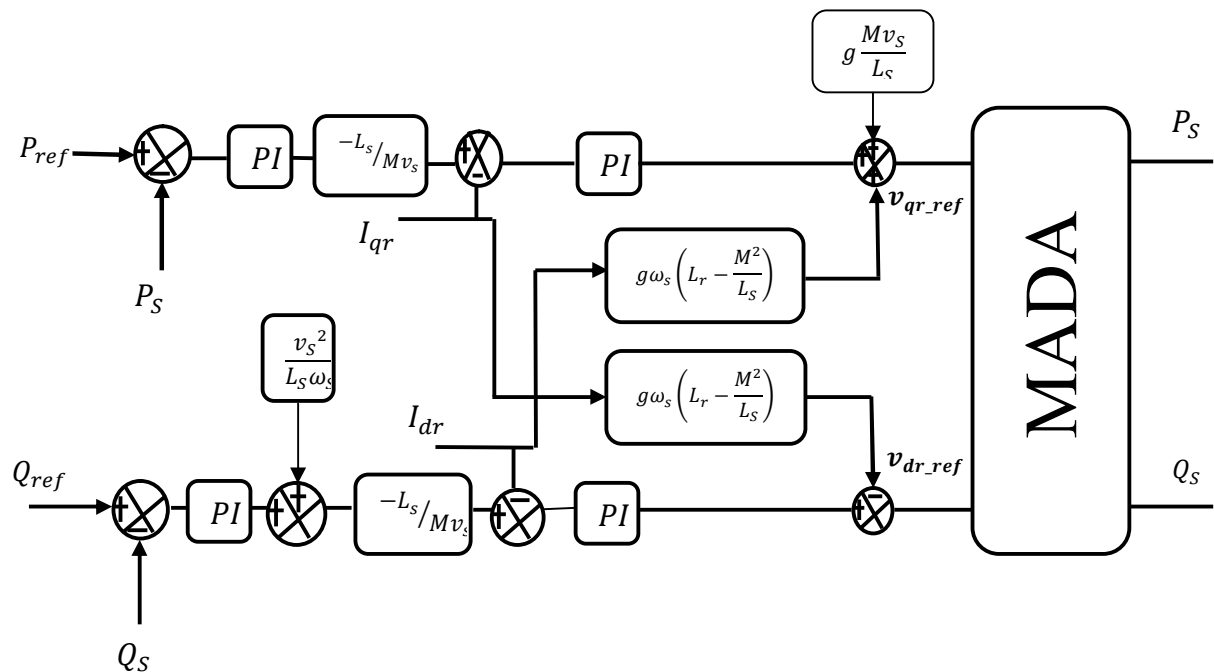


Figure II.7 : Commande indirecte avec boucle de puissance.

II.5. Type du régulateur PI:

Les régulateur *PI* utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{dr} i_{qr} . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en oeuvre, ainsi qu'il offre des performance acceptables à la régulation du système considéré[14]. Les gains du régulateur est présenté dans l'annexe dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

II.6. Model de l'onduleur de tension a deux niveaux :

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour facilité

la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semiconducteurs sont parfait figure (II.8).

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables S_a, S_b, S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

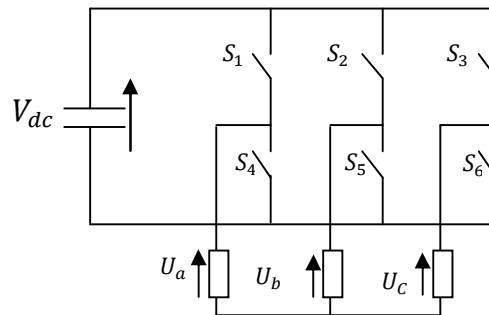


Figure. II.8 : Onduleur de tension à deux niveaux.

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$U_a + U_b + U_c = 0 \quad (\text{II.25})$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} U_a = \frac{V_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ U_b = \frac{V_{dc}}{3}(S_a - 2S_b - S_c) \\ U_c = \frac{V_{dc}}{3}(S_a - S_b - 2S_c) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

II.6.1. Principe de la MLI :

La technique de modulation de largeur d'impulsion triangulo sinusoïdale consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire $W(t)$ de fréquence f_b , que nous appellerons porteuse, à trois signaux de commande, notés U_a , U_b et U_c . Ces signaux U_i sont les images des tensions que l'on souhaite appliquer sur chaque phase. Les commutations des interrupteurs ont lieu quand on a une égalité du type[3] :

$$U_i(t) = W(t) \quad (\text{II.28})$$

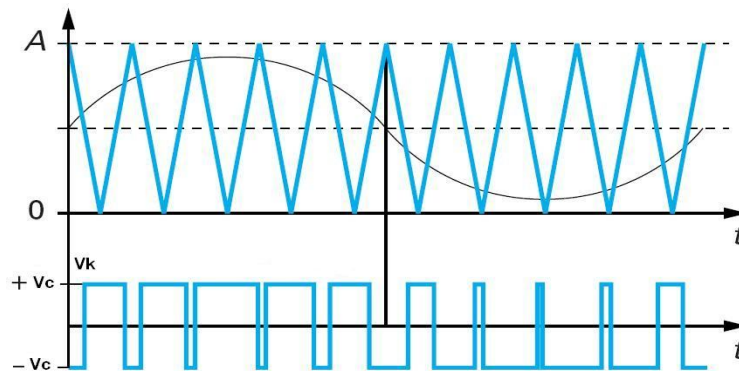


Figure.II.9 : Principe de la MLI triangulo sinusoïdale.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_P sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_P}{f} \quad (\text{II.29})$$

- Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_P) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (II.30)$$

Le choix d'un indice de modulation « m » multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation « r » varie suivant la référence imposée [5].

II.7.Résultats de la Simulation

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 4KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1455 tr/min.

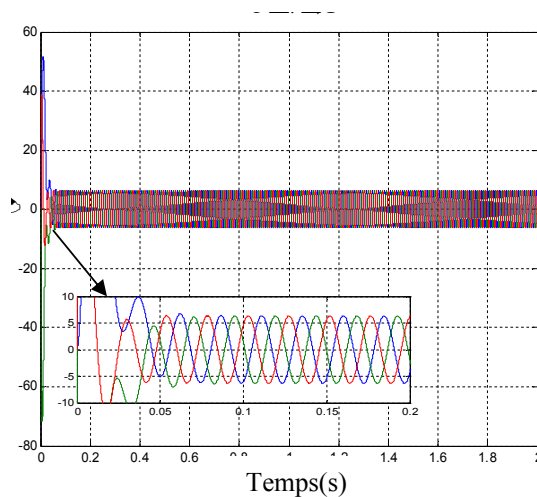


Figure. II.10 Courbe du courant statorique avec zoom.

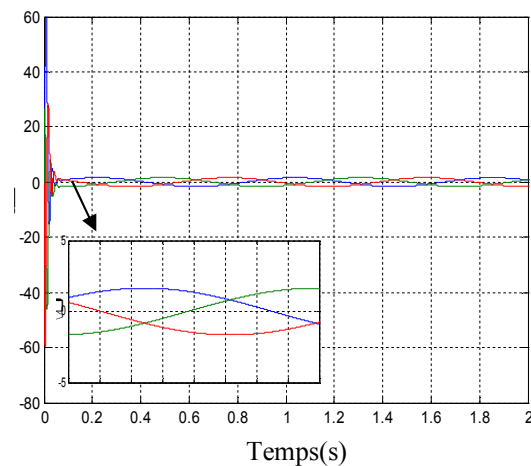


Figure. II.11 Courbe du courant rotorique avec zoom.

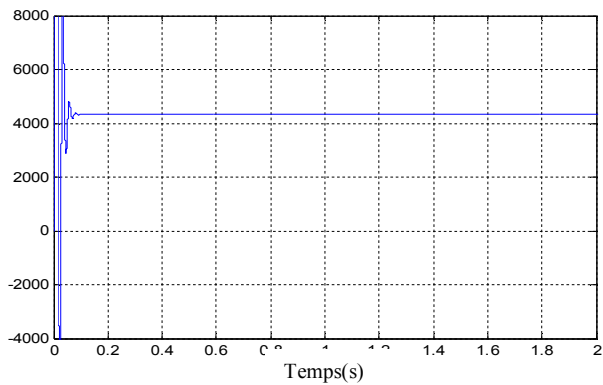


Figure. II.12 La puissance réactive statorique

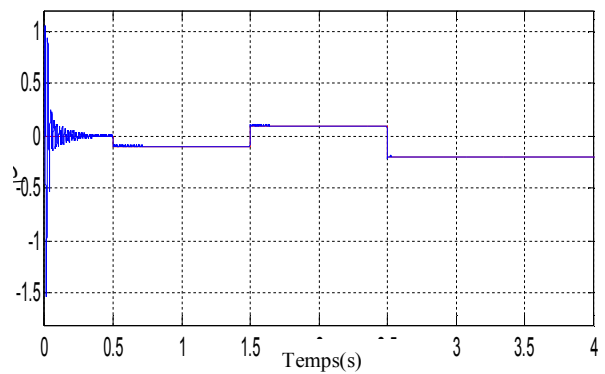



Figure. II.13 La puissance active statorique.

II.8.Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation et la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de cette génératrice. L'étude de modélisation nous a permis d'élaborer un modèle mathématique simple et adéquat pour commander la génératrice asynchrone à double alimentation.

Pour contrôler la MADA nous avons présenté la commande vectorielle par un système d'orientation de flux statorique dans ce type de control nous avons présenté des différentes types de commande vectorielle directe, indirect en boucle fermé et indirect en boucle ouvert par un système d'orientation de flux statorique.



Résultats de simulation (turbine, GADA)

Chapitre III

III.1.Introduction

La chaîne de conversion éolienne est constituée de la turbine éolienne et de la machine asynchrone à double alimentation associée à un onduleur de tension pour assurer son alimentation au rotor, la chaîne de conversion éolienne est donnée par la figure.III.1. A partir de l'étude de modélisation du système de génération complet (turbine, GADA) et leur structure de commande il est intéressant de réaliser une simulation numérique sous l'environnement Matlab/Simulink du système complète est présenté sur la figure.III.1, afin d'analyser et interpréter ces résultats obtenus. La technique d'extraction de maximum de la puissance MPPT est appliquée. Nous avons travaillé dans la zone2 dans la figure.I.7, lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire $\beta=2^\circ$.

Les paramètres mécaniques et électriques de la turbine éolienne de 1.5MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation, sont illustrés dans l'annexe :

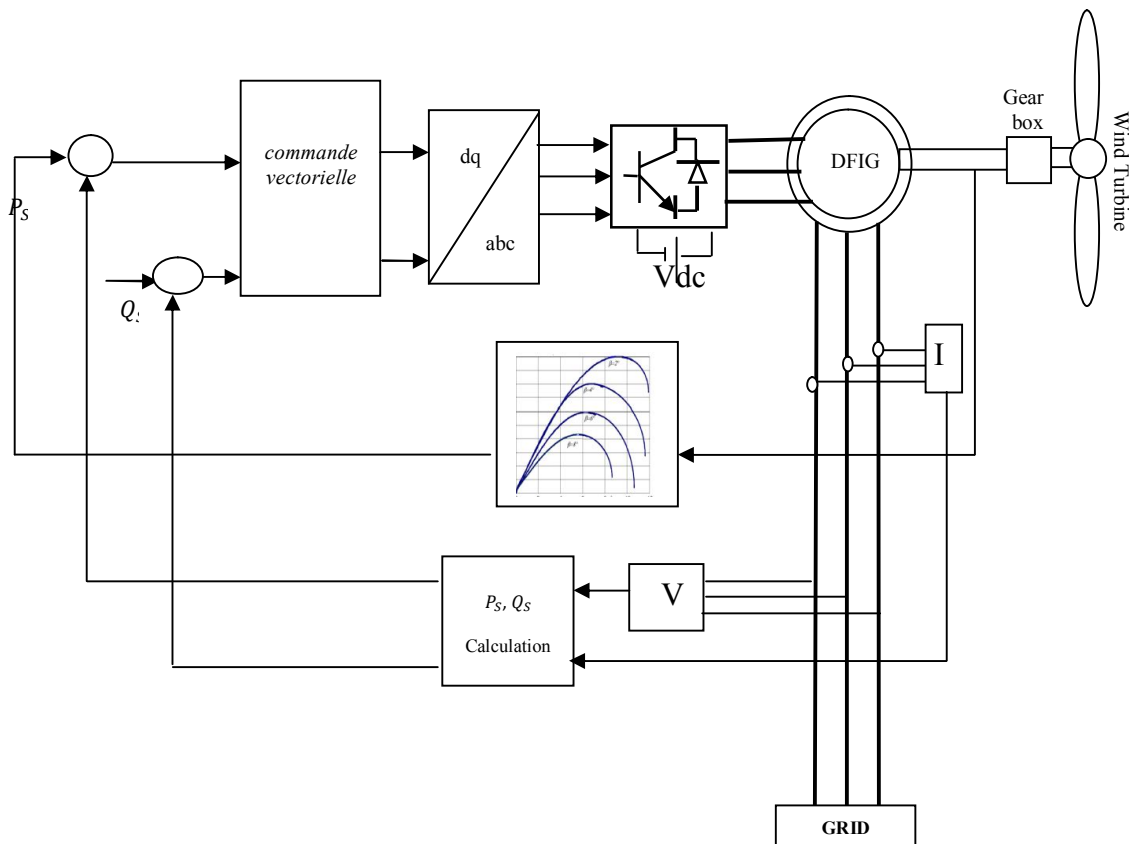


Figure III.1 Schéma bloc de système complet.

La variation de vitesse du vent est donnée par la figure III.3, ainsi la vitesse de la MADA et sa référence, figure III.4 est proportions a le vent qui entraînant l'éolienne Figures III.3.

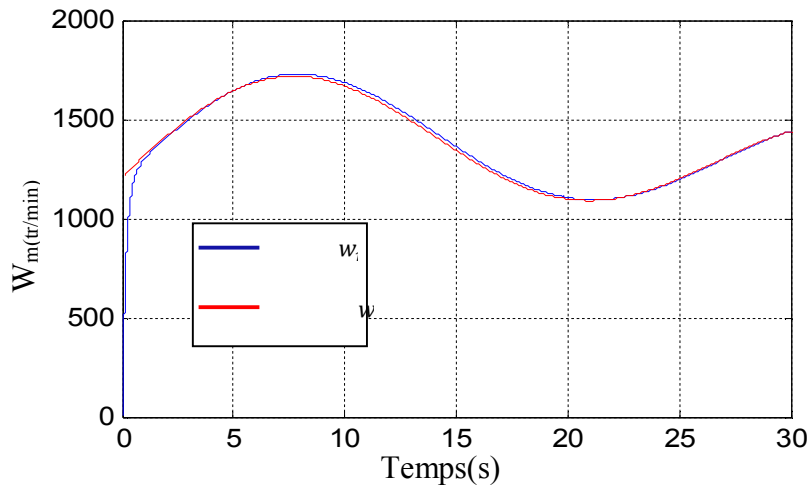


Figure III.4 Variation de la vitesse mécanique et sa référence (tour/min)

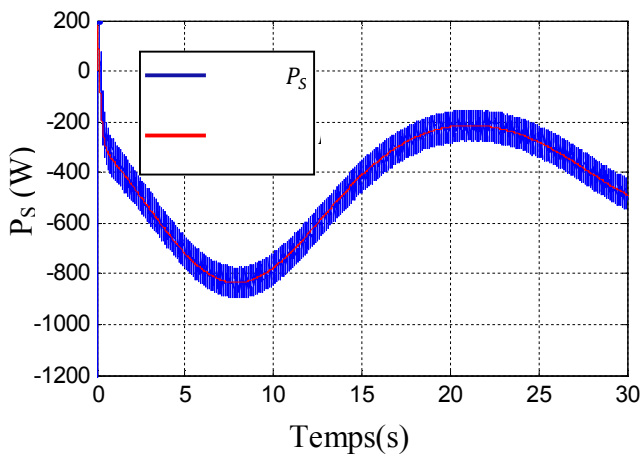


Figure III.5 Puissance active statorique et sa référence(W).

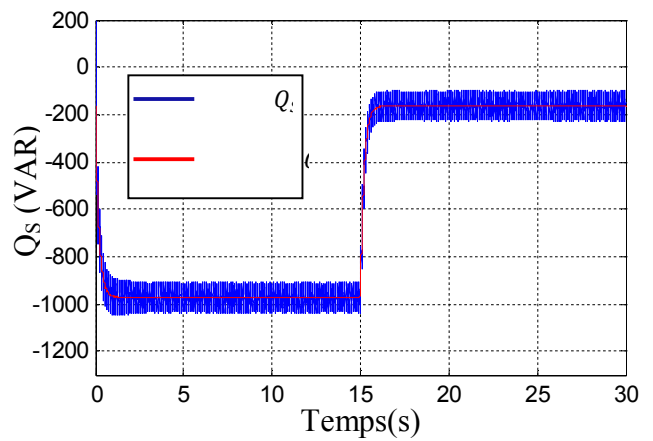


Figure III.6 Puissance réactive statorique et sa référence(VAR).

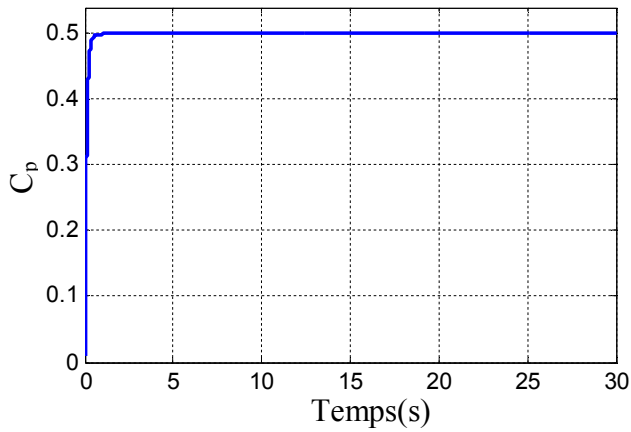


Figure III.7 La vitesse spécifique.

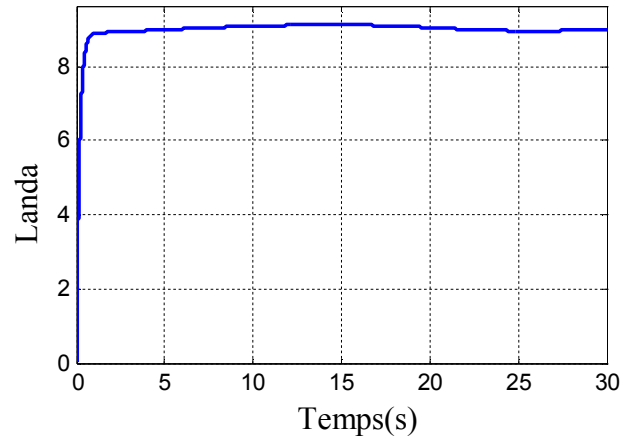


Figure III.8 le coefficient de puissance.

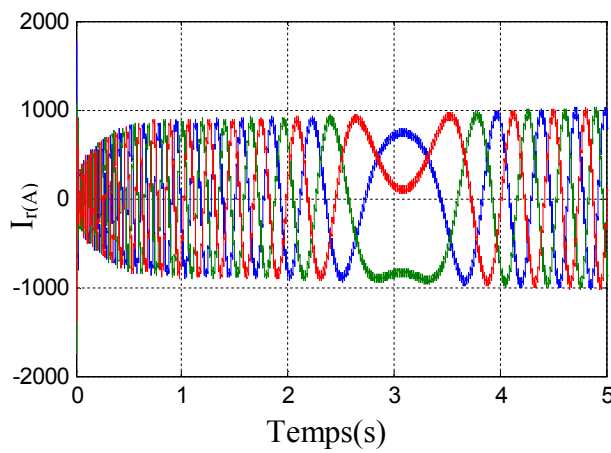


Figure III.9 Courant triphasé rotorique(A).

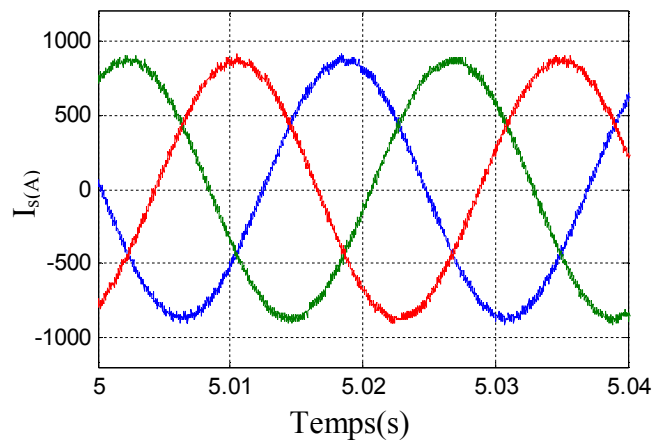


Figure III.10 Courant triphasé statorique(A).

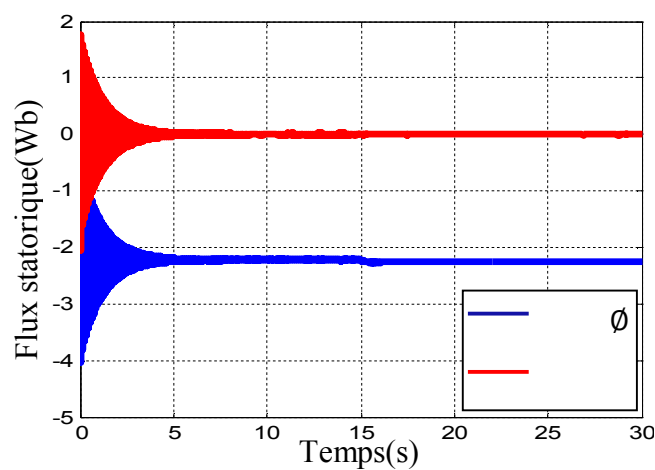


Figure III.11 Le flux statorique selon l'axe d et q(W).

Nous pouvons constater que :

- La puissance active statorique figure(III.5), suite sa référence optimale et possède la même allure que le profile du vent appliqué sur le système éolien.
- Un bon suivi de consigne pour la puissance réactive statorique figure (III.6).
- La vitesse spécifique λ figure (III.8). et le coefficient de puissance C_p figure (III.7) ne change pas beaucoup des valeurs. ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 9 et 0.5 successivement.
- Les courant rotorique figure(III.9), ont pris leur forme sinusoïdale et la fréquence rotorique dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.
- La figure(III.9), montre le courant rotorique durant une transition du régime hypo-synchrone au régime hyper-synchrone. Ce résultat confirme que la GADA peut fonctionner dans les deux régimes.
- Le flux statorique figure(III.11), suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.

III.3. Conclusion

Les résultats obtenus montrent les hautes performances et la robustesse des algorithmes de contrôle appliqués au niveau de la turbine, tel que celui de maximisation et de limitation de la puissance générée par le système complète, ainsi que au niveau de la GADA tel que la commande vectorielle .

CONCLUSION GÉNÉRALE

Nous avons étudié dans ce mémoire un système éolien pour génération d'électricité basé sur une MADA, la modélisé la turbine et ainsi un algorithme de maximisation de la puissance captée du vent a été mis en œuvre. La valeur de la puissance active statorique de référence est estimée à partir de la vitesse mécanique de rotation. Dans ce travail on suppose que l'alimentation de l'onduleur est constante.

A travers cette étude nous pouvons noter que le rôle de la MADA dans la conversion électromécanique et son efficacité dans les conditions aux quelles nous l'avons soumise, cela prouve la viabilité de son application dans un système éolien.

Dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables:

- 1-L'adaptation d'autres techniques de commande pour la MADA .
- 2-Utilisation d'un autre algorithme de maximisation de la puissance captée
- 3-Développement d'un contrôle vectoriel sans capteurs de vitesses mécanique

Bibliographie

- [1] F.Brihmat,"L'Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien " , Mémoire de Magister Université de Mouloud Mammeri , Tizi- Ouzou,2012.
- [2] F. Poitiers , " Etude et Commande de Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation de L'énergie Eolienne : Machine Asynchrone à Cage Autonome , Machine Asynchrone à Double Alimentation Reliée au Réseau " , Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [3] F.Akel , "Etude et Realisation d'un Emulateur de Turbine Eolienne " , Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique,2009.
- [4] G.Aggoun,"Etude Qualitative de l'Association Convertisseur Machine Pour l'Entrainement Electrique d'un Système de Génération Eolienne " , Mémoire de Magister Université de Mouloud Mammeri , Tizi- Ouzou.
- [5] I. Hamzaoui , "Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation en Vue de Son Utilisation Comme Aérogénérateur " Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique,2008.
- [6] S. El Aimani," Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension " , Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.
- [7] F.Merrahi , "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) ",Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [8] Y. Djeriri , " Commande Par Réseaux de Neurones d'une MADA Intégrée à un Système Eolien " , Mémoire de Magister Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbés ,2009.
- [9] N.Hamdi , "Modélisation et Commande des Génératrices Eoliennes " , Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine , 2008.

Bibliographie

- [10] B.Toual , " Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable ", Mémoire de Magister Université de Batna 2010 .

- [11] B. Beltran , "Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation :Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant D'ordre Supérieur " Thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale , 2010.

- [12] A.Davigny,"Participation Aux Services Système de Fermes d'Eoliennes à Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d'Energie " , Thèse doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille.2007.

- [13] S. Metatla," Optimisation et Régulation des Puissances d'une Eolienne à Base d'une MADA " , Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique.2009.

Annexe

Annexe

1. Donnée de la machine à induction double alimentée :

Les paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée, et ceux de la turbine:

- Les paramètres de la MADA(4KW) sont :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale	4KW
Résistance statorique	1.2 (Ω)
Résistance rotorique	1.8 (Ω)
Inductance mutuelle	0.1554 (H)
Inductance statorique	0.1568 (H)
Inductance rotorique	0.15 (H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	220V

- Les paramètres de la MADA(1.5MW) sont :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale	1.5MW
Résistance statorique	0.012 (Ω)
Résistance rotorique	0.021 (Ω)
Inductance mutuelle	0.0135 (H)
Inductance statorique	0.0137 (H)
Inductance rotorique	0.0136 (H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	690 V
Fréquence du réseau	50 Hz

Annexe

- Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pale	3
Diamètre d'une pale	35.25 m
Gain du multiplicateur	90
Inertie de l'arbre	1000 Kg.m ²
Coefficient de frottement	0.0024 N.m.s/rad
C_{Pmax}	0.5
$\lambda_{optimale}$	9

2.Paramètres du régulateurs PI classique :

<i>Régulateurs des puissances</i>	<i>Régulateurs des courants</i>	<i>Régulateur de vitesse</i>
$K_p=3.75e-5$	$K_p=4.0808$	$K_p=50000$
$K_i=-0.0084$	$K_i=307.63$	$K_i=10$