

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A-Mira de Bejaïa
Département génie électrique

Mémoire de fin d'études

**En vue de l'obtention du Diplôme Master en
Électrotechnique.**

Option : Commande des Systèmes électriques

Thème :

**Commande en puissance d'un système de conversion
d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone
double alimentée**

Réalisé par:

- Slaim Sabrina
- Belalouache Noureddine

Encadré par :

- M^r OUARI KAMEL

Année 2013/2014

Remerciements

Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a peut être réalisé.

On tient à exprimer nos sincères remerciements à notre promoteur Mr.OUARI pour ses conseils et ses aides le long de ce travail.

Enfin, on remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de se travail.

Dédicace

À mes chers parents

À mon cher frère

À mes chères sœurs

À tous mes proches

À mon binôme Sabrina et sa famille

Slaim

À tous mes amis

Ce mémoire est leurs dédier.



Belalouache Noureddine

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail :

❖ *Aux deux êtres qui me sont les plus chères dans ma vie pour leur générosité, leur soutien et leur patience face aux moments difficiles traversés au cours de ma vie : ma mère et mon père.*

❖ *A mes frères, Karim, Toufik, Massinissa, Youba, Billal, à mes cousins et cousines Dihia, Makhlouf, Milissa, Anisse, Danni, Sounedrinne, Alissia, Moussa, et tous le reste.*

❖ *A ma belle-sœur Kamir*

❖ *A tout la famille SLAIM, cousins, cousines, oncles et tantes.*

❖ *A mes amies : Karima, Sabrina, Rachida, et a toutes les filles que je connais.*

❖ *A mon binôme Noureddine et sa famille BELALOUCHE.*

❖ *A toute la promotion 2014 électrotechnique.*

❖ *Enfin à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



Sabrina

Sommaire

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

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens

I.1) Introduction	2
I.2) Définition de l'énergie éolienne	2
I.3) Structure générale d'une éolienne	2
I.3.1) la nacelle	3
I.3.2) Les Pales	4
I.4) Classification des éoliennes.....	4
I.4.1) la taille et la puissance des aérogénérateurs.....	4
I.4.2) le type du capteur	4
I.4.3) Le mode de régulation	5
I.4.4) Le mode de fonctionnement.....	5
I.4.4.1) Définition de la MPPT	6
I.4.4.2) Types de la MPPT	7
I.5) Les machines utilisée dans les systèmes de conversion éolienne.....	7
I.5.1) La machine synchrone	7
I.5.1.1) Machine synchrone à rotor bobiné.....	7
I.5.1.2) Machine synchrone à aimants permanents.....	7
I.5.2) La machine asynchrone.....	7
I.5.2.1) Machine asynchrone à cage	7
I.5.2.2) Machines asynchrone à rotor bobiné.....	8
I.5.2.3) La machines asynchrone à double alimentation (MADA).....	8
I.5.2.3.1) déférentes structures de la MADA	8
I.5.2.3.2) Mode de fonction de la MADA.....	10
I.6) Avantages et inconvénients des machines utilisées.....	11

Sommaire

I.7) Les commandes utilisées	12
I.7.1) Les commandes éloignées.....	12
I.7.1.1) Le régulateur PID	12
I.7.1.2) La commande RST.....	13
I.7.1.3) La commande logique floue	14
I.7.1.4) Le régulateur H infini.....	15
I.7.1.5) La commande LQG	15
I.7.2) Commande rapproché	16
I.7.2.1) La commande MLI.....	16
I.7.2.2) Commande par mode glissant	17
I.7.2.3) Commandes à modèles de référence	17
I.8) Conclusion	20

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de l'aérogénérateur

II.1) Introduction	21
II.2) Description du système a étudié.....	21
II.3) Modélisation du système éolienne	22
II.3.1) Partie mécanique.....	22
II.3.2) Partie électrique	25
II.3.2.1) Modélisation de la MADA	25
II.3.2.2) Modélisation des convertisseurs statiques	30
II.4) Conclusion.....	31

Chapitre III : Stratégies de commande et simulation

III.1) Introduction.....	32
III.2) Structure de système à commander.....	32

Sommaire

III.3) Hypothèses de travail	33
III.4) Synthèse d'un régulateur RST	33
III.4.1) Application à la machine asynchrone double alimentée	36
III.5) Commande de convertisseur coté MADA	37
III.6) Résultats de simulation	38
III.6.1) Test de poursuite de trajectoire	41
III.6.2) Test de robustes vis-à-vis des variations paramétrique	42
III.6.3) Test de l'influence des paramètres de régulateur sur Les grandeurs dynamique de la machine.....	42
III.7) Conclusion	45
Conclusion générale	46

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1 principe de la de la conversion de l'énergie dans une éolienne	2
Figure I.2 les différents éléments constituent une éolienne	2
Figure I.3 les différents éléments constituent une nacelle	3
Figure I.4 Multiplicateur de vitesse.....	3
Figure I.5 caractéristique d'une turbine éolienne.....	6
Figure I.6 Structure du rotor d'une MADA	8
Figure I.7 Structure d'une MADA à énergie rotorique dissipée.....	8
Figure I.8 MADA avec structure de Kramer.....	9
Figure I.9 MADA structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.....	9
Figure I.10 MADA structure de Scherbius avec convertisseur MLI	10
Figure I.11 Mode de fonctionnement de la MADA	10
Figure I.12 structure générale du commande d'un système.....	12
Figure I.13 structure de régulateur PID.....	13
Figure I.14 structure de régulateur RST.....	14
Figure I.15 structure de régulateur H infini	15
Figure I.16 structure de régulateur LQG.....	16
Figure I.17 Mode de fonctionnement de la commande par mode glissant	17
Figure I.18 structure de la commande avec reconstituer d'état.....	18
Figure I.19 structure de la commande adaptative MRAC.....	18
Figure I.20 structure de la commande à modèle interne	19

Liste des Figures

Figure I.21 structure de la commande à modèle de comportement	19
--	-----------

Chapitre II

Figure II.1 schéma du système à étudier	21
Figure II.2 caractéristique de $c_p(\lambda)$	23
Figure II.3 schéma bloc du modèle de la turbine	23
Figure II.4 Représentation de la MADA sur un plan dq	25
Figure II.5 orientation de l'axe d sur le flux statorique	27
Figure II.6 schéma bloc de la MADA	30
Figure II.7 Représentation schématique d'un onduleur	31

Chapitre III

Figure III.1 Schéma bloc de la structure de commande	32
Figure III.2 Modèle simplifié de la MADA.....	33
Figure III.3 schéma bloc régulé par un régulateur RST	34
Figure III.4 Schéma de principe de la MLI naturelle	38
Figure III.5 Allure de la vitesse du vent	38
Figure III.6 Allure de glissement de la MADA.....	38
Figure III.7 Allure de vitesse rotorique	39
Figure III.8 Allure de couple électromagnétique.....	39
Figure III.9 Allure de la puissance active	39
Figure III.10 Allure des courants rotoriques.....	39

Liste des Figures

Figure III.11	Allure de courant et tension rotorique	40
Figure III.12	Allure de la puissance active statorique	41
Figure III.13	Allure de la puissance active transitée au réseau	41
Figure III.14	Allure de la puissance réactive statorique	41
Figure III.15	l'erreur de la puissance en (pu)	41
Figure III.16	Allure des variations paramétriques	42
Figure III.17	Influence des paramètres de régulateur sur la puissance transitée au réseau	43
Figure III.18	Influence des paramètres de régulateur sur l'erreur	43
Figure III.19	influence des paramètres de régulateur sur le couple électromagnétique	44

Liste des symboles

v_v	: vitesse du vent (m/s).
P_v	: la puissance fournie par le vent (watt).
P_t	: la puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur.
ρ	: masse volumique de l'air (kg.m^3).
s	: Surface circulaire balayée par la turbine (m^2).
c_p	: Le coefficient de performance ou coefficient de puissance.
λ	: Le rapport de la vitesse en bout des pales.
β	: L'angle de calage des pales.
Ω_t	: vitesse de rotation de la turbine avant le multiplicateur (tr/mn).
R_t	: rayon de la turbine (m).
c_t	: Couple de la turbine éolienne (N.m).
c_{ar}	: Couple aérodynamique sur l'arbre rapide de la turbine (N.m).
$\Omega_{méc}$: la vitesse mécanique de la génératrice (tr/mn).
G	: gain du multiplicateur.
c_{em}	: Couple électromagnétique (N.m).
J	: inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine (kg.m^2).
f	: Coefficient de frottement dynamique (N.m/rd).
p_{opt}	: La puissance optimale (référence) de la turbine (watt).
cp_{max}	: Coefficient de puissance maximale de la turbine.
λ_{opt}	: La vitesse relative optimale de l'éolienne.
MPPT	: Maximum power point Traching.
MADA	: Machine asynchrone à double alimentation.
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor.
MLI	: Modulation de largeur d'impulsion.
d	: Indice de l'axe direct.
q	: Indice de l'axe quadrature.

Liste des symboles

- v_{ds}, v_{qs} : Tensions statorique dans le repéré de Park (d, q) (v).
- v_{dr}, v_{qr} : Tensions rotorique dans le repéré de Park (d, q) (v).
- i_{ds}, i_{qs} : Courants statorique dans le repéré de Park (d, q) (A).
- i_{dr}, i_{qr} : Courants rotorique dans le repéré de Park (d, q) (A).
- ϕ_{ds}, ϕ_{qs} : Flux statorique dans le repéré de Park (d, q) (wb).
- ϕ_{dr}, ϕ_{qr} : Flux rotorique dans le repéré de Park (d, q) (wb).
- R_s : Résistance statorique (Ω).
- R_r : Résistance rotorique (Ω).
- L_s, L_r : Inductance statorique et rotorique de la machine (H).
- M : Inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et du rotor (H).
- P : le nombre de pair de pôles de la machine.
- S : opérateur de LAPLACE.
- p_s, p_r : La puissance active statorique et rotorique (watt).
- Q_s, Q_r : La puissance active statorique et rotorique (VAR).
- g : Glissement.
- θ_s : L'angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe directe « d » (rd).
- θ_r : L'angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe directe « d » (rd).
- ω_s : Pulsation du champ statorique (rd/sec).
- ω_r : Pulsation du champ rotorique (rd/sec).
- ω_m : vitesse électrique du rotor (rd/sec).
- $v1, v2, v3$: Tension simple à la sortie de l'onduleur (v).
- E : Tension redressée (v).
- Sa, Sb, Sc : Fonction logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.
- T_c : Un horizon de commande.

Liste des symboles

- T_f : Un horizon de filtrage.
- P_c : pôle du polynôme de commande C.
- P_f : pôle du polynôme de filtrage F.
- P_A : pôle du polynôme A.

Indice :

- Réf : indique la valeur de référence.
- més : indique la valeur mesurés
- opt : indique la valeur optimale.

Introduction générale

Introduction Générale

De nos jours l'électricité est devenue une forme d'énergie indispensable dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développées. Vu la multiplication des appareils domestiques, la demande en énergie électrique devient de plus en plus très importante, c'est pour cela que la production d'énergie électrique est important et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire plus. [1]

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Les générateurs éoliens occupent une place particulière, en effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans nombreuses régions dans le monde, et d'autre part cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau ou elle est injectée. [2]

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrone à double alimentation (MADA). Cette génératrice nous permet d'avoir une production d'électricité à vitesse variable.

La principale difficulté qu'on rencontre dans la commande de la machine asynchrone double alimentée réside dans l'absence totale du découplage entre le flux et le couple. Ces deux grandeurs dépendent toutes du courant statorique. L'apparition d'une nouvelle technique dite « commande vectorielle » ou « commande par flux orienté » a rendu la commande de la machine asynchrone possible comme les machine à courant continu. [9]

Notre travail aura donc pour objectif de la commande de la puissance échangé entre MADA et le réseau.il est diviser en trois chapitre :

Le premier chapitre est consacré à présenter un état d'art sur les énergies éolienne, les machines et les commandes utilisées sont présentées avec une brève description. Le second chapitre traitera la modélisation des différentes parties de la chaine de conversion éolienne. On commencera par la partie mécanique en suite la partie électrique. L'élaboration d'une stratégie de commande et la synthèse de régulateur RST et la présentation des résultats de simulation feront l'objet du dernier chapitre. Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale et les perspectives envisagées à la lumière de ce mémoire.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1) Introduction

La production d'énergie électrique liée aux énergies renouvelables, essentiellement celle qui est produite par l'énergie éolienne, joue le rôle de complément aux productions d'énergies classiques. Cette dernière est utilisée depuis des siècles, elle s'est développée en conséquence des problèmes environnementaux posés par les sources d'énergies traditionnelles et des progrès technologiques des aérogénérateurs.

I.2) Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. [3]

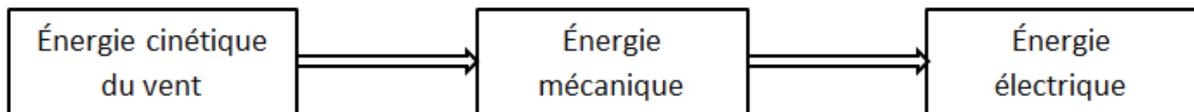


Figure I.1 principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne

I.3) Structure générale d'une éolienne :

La figure (I.2) montre les différents éléments qui constituent une éolienne

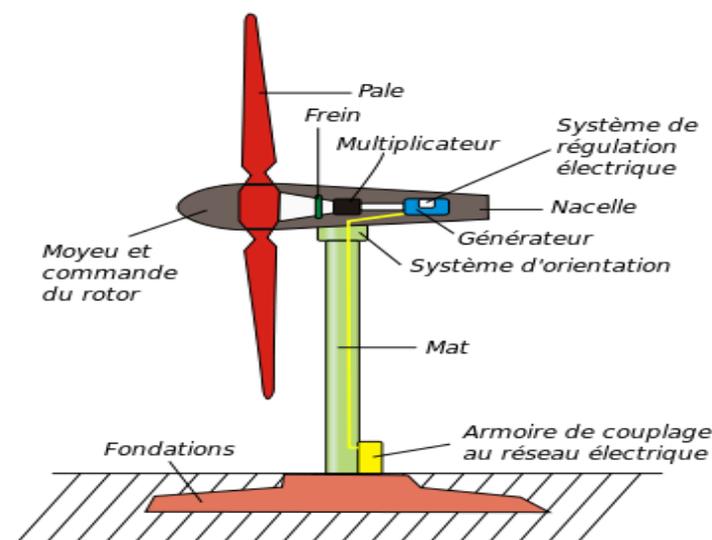


Figure I.2 les différents éléments constituent une éolienne

I.3.1) la nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice à l'arbre de l'éolienne. La figure (I.3) montre les composants de la nacelle. [5]

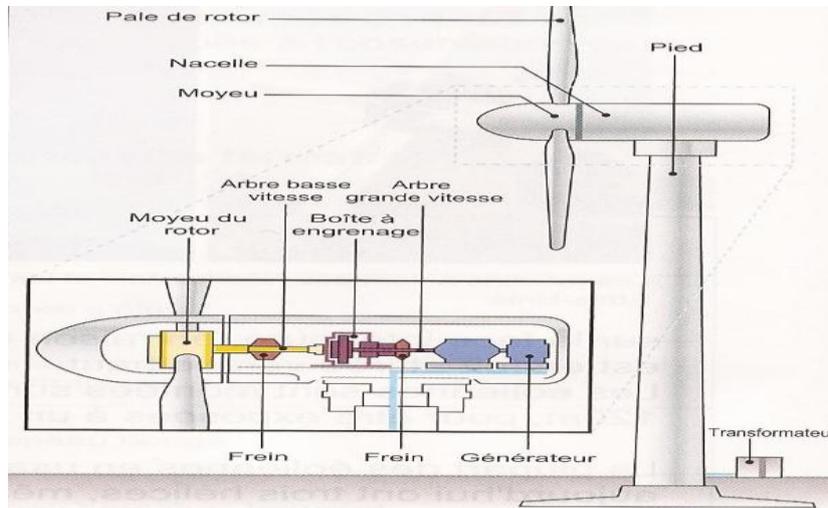


Figure I.3 les différents éléments constituent une nacelle.

➤ **L'arbre lent :**

C'est l'élément qui relie le moyeu au multiplicateur. Sa vitesse est la même que celle du moyeu.

➤ **L'arbre rapide :**

C'est l'élément qui relie le multiplicateur à la génératrice. Sa vitesse est la même que celle de la génératrice.

➤ **Le Multiplicateur :**

C'est une boîte à engrenage sert à adapté la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

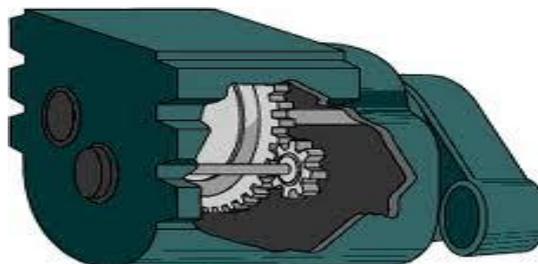


Figure I.4 Multiplicateur de vitesse

➤ **La Génératrice**

C'est l'élément le plus important dans la chaîne de conversion de l'énergie, Elle convertit l'énergie mécanique fournie par la turbine vers une énergie électrique destinée à l'utilisation.

I.3.2) Les Pales

Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor, la plupart des aérogénérateurs comportent trois pales.

I.4) Classification des éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées selon les catégories suivantes :

I.4.1) la taille et la puissance des aérogénérateurs

La classification des éoliennes selon leurs tailles est divisée en trois types. Le tableau suivant présente une classification selon taille des turbines éoliennes : [4]

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

Tableau 1 : la taille et la puissance des éoliennes

I.4.2) le type du capteur

Le rôle de ce capteur est de transformer l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique de rotation qui sera transmise au générateur via l'arbre de transmission. On peut distinguer principalement deux types :

➤ **Aérogénérateur a axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau de sol donc elles sont facilement accessibles. [2]

➤ **Aérogénérateur a axe horizontal**

Les turbine à axe horizontal sont les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontales est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquence, ce type de turbine doit toujours être orientée face au vent. Par comparaison à la turbine à axe verticale, pour la même vitesse du vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance.

➤ **Avantages :**

- ✓ Cout limité.
- ✓ Peu de contrainte mécanique.
- ✓ Grande efficacité.

➤ **Inconvénients :**

- ✓ Bruit important.
- ✓ Vibrations non négligeables.
- ✓ Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

I.4.3) Le mode de régulation

Il existe principalement deux méthodes de contrôle et de régulation aérodynamique :

- ✓ Régulation STALL.
- ✓ Régulation PITCH.

Elles servent particulièrement à limiter la puissance captée pour les vents forts, mais dans certains cas, elles peuvent également intervenir pour faciliter la mise en rotation de la turbine.

I.4.4) Le mode de fonctionnement

Les éoliennes sont regroupées en deux catégories (deux mode de fonctionnement) :

➤ **Fonctionnement à vitesse fixe**

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique. Cette machine est entraînée à travers un multiplicateur, sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système

mécanique d'orientation des pales (pitch control). Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage. [3], [4]

➤ Fonctionnement à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse variable permet de capter la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. Les caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation de générateur pour des différentes vitesses de vent est donné par la figure suivante :

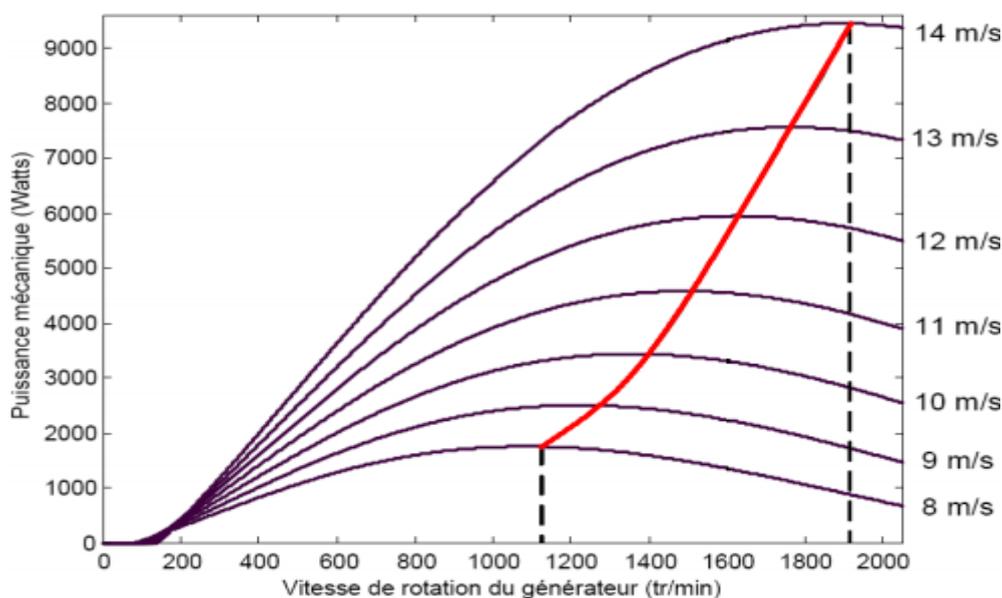


Figure I.5 caractéristique d'une turbine éolienne.

Au vu de ces caractéristiques, il paraît clairement que le point de fonctionnement change avec la variation de la vitesse du vent, ce qui nécessite l'utilisation de la commande MPPT (Maximum power point tracking), qui calcule pour chaque vitesse du vent, la puissance référence.

I.4.4.1) Définition de la MPPT

C'est une stratégie de commande qui permet de calculer la puissance maximale qu'on peut extraire à partir de la vitesse du vent.

I.4.4.2) Types de la MPPT

On peut distinguer deux types de la MPPT :

- La première, considère que la caractéristique du coefficient de puissance (C_p) n'est pas connue.
- La seconde, suppose que la caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

I.5) Les machines utilisées dans les systèmes de conversion éolien

Il existe deux grandes familles des machines utilisées

I.5.1) La machine synchrone

Il existe deux types des machines synchrones :

I.5.1.1) Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machines fait appel plus souvent à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier.

I.5.1.2) Machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimant permanent est composée d'un stator avec un bobinage qui est alimenté en triphasé et qui produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation, et d'un rotor où le champ magnétique est produit par un aimant permanent.

I.5.2) La machine asynchrone

Il existe deux types des machines asynchrones :

I.5.2.1) Machine asynchrone à cage

Ce type des machines est le plus simple à fabriquer et le moins coûteux, il nécessite d'insérer un multiplicateur de vitesse entre la turbine et la machine asynchrone pour adapter la vitesse.

I.5.2.2) Machines asynchrone à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné possède un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones à cage et les machines synchrones, la différence est dans leur rotor qui est composé d'un bobinage triphasé couplé en étoile.

I.5.2.3) La machines asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné, possède un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques, la différence réside dans le rotor qui est composé d'un bobinage triphasé couplé en étoile, accessible par trois bagues munies des contacts glissants, ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques.

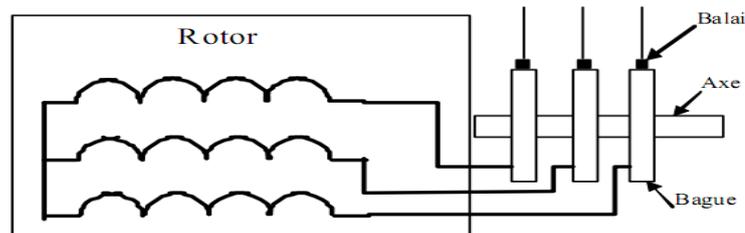


Figure I.6 Structure du rotor d'une MADA.

I.5.2.3.1) différentes structures de la MADA

Il existé plusieurs structures de la machine asynchrone double alimenté :

➤ **Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée**

Dans cette structure le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur, une charge résistive est placée à la sortie de redresseur.

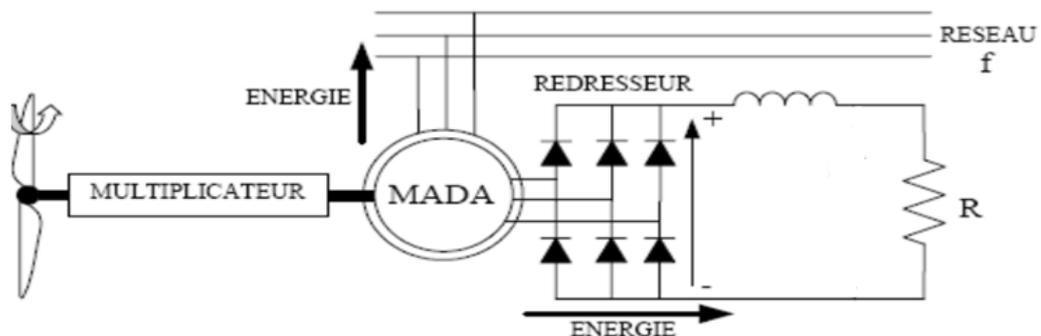


Figure I.7 Structure d'une MADA à énergie rotorique dissipée

➤ **MADA avec structure de Kramer**

Dans cette structure le stator est connecté au réseau et le rotor est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un redresseur et un onduleur et un transformateur.

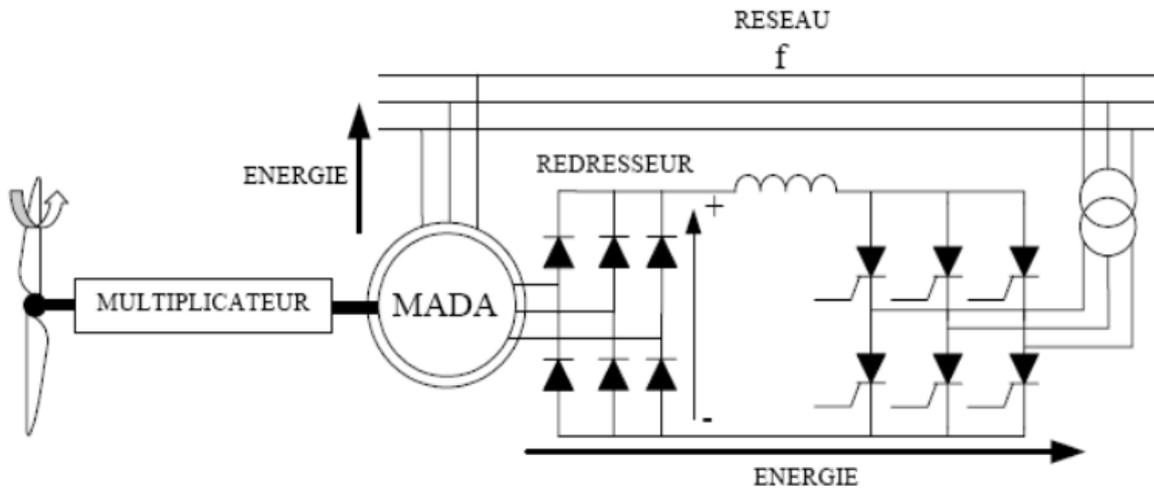


Figure I.8 MADA avec structure de Kramer.

➤ **MADA avec structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur**

Dans cette structure l'ensemble redresseur-onduleur est remplacé par un cyclo-convertisseur.

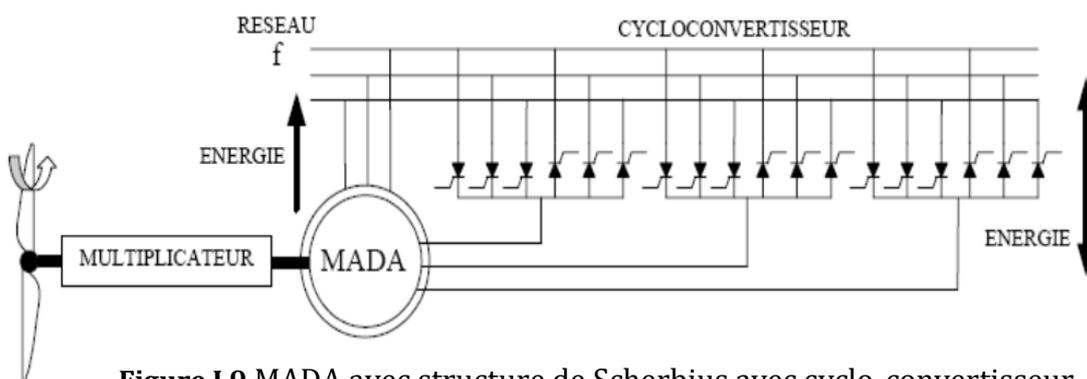


Figure I.9 MADA avec structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

➤ **MADA avec structure de Scherbius avec convertisseurs MLI**

Cette structure est une solution très intéressante dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne, elle consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau électrique à travers l'onduleur MLI et redresseur.

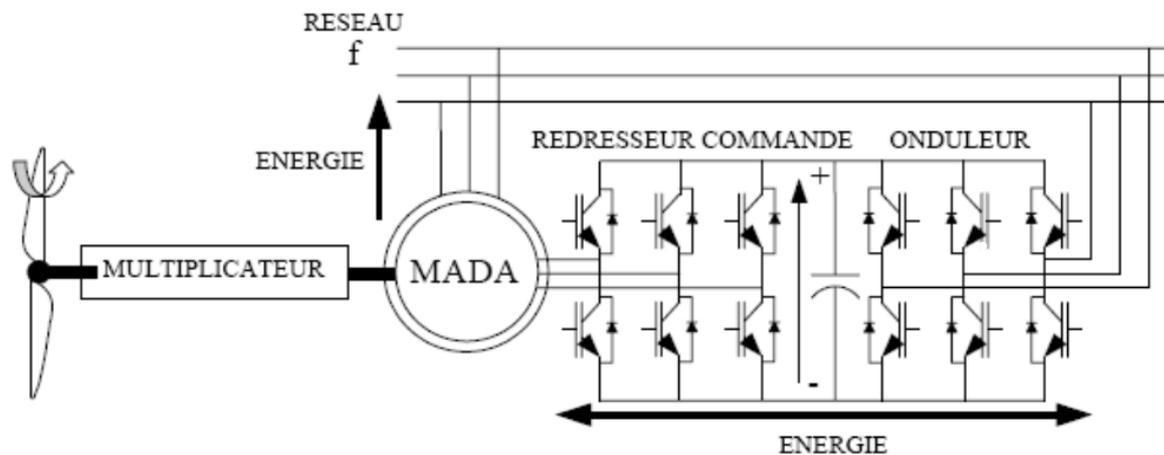


Figure I.10 MADA structure de Scherbius avec convertisseur MLI.

I.5.2.3.2) Mode de fonction de la MADA

Lorsque la machine fonctionne en moteurs, la puissance est fournie par le réseau et absorbé par le stator. Si la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse de synchronisme (fonctionnement hypo synchrone), la puissance de glissement est renvoyée au réseau. En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée de réseau va au rotor et elle est convertie en puissance mécanique. En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l’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 fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance est transmise par le rotor.

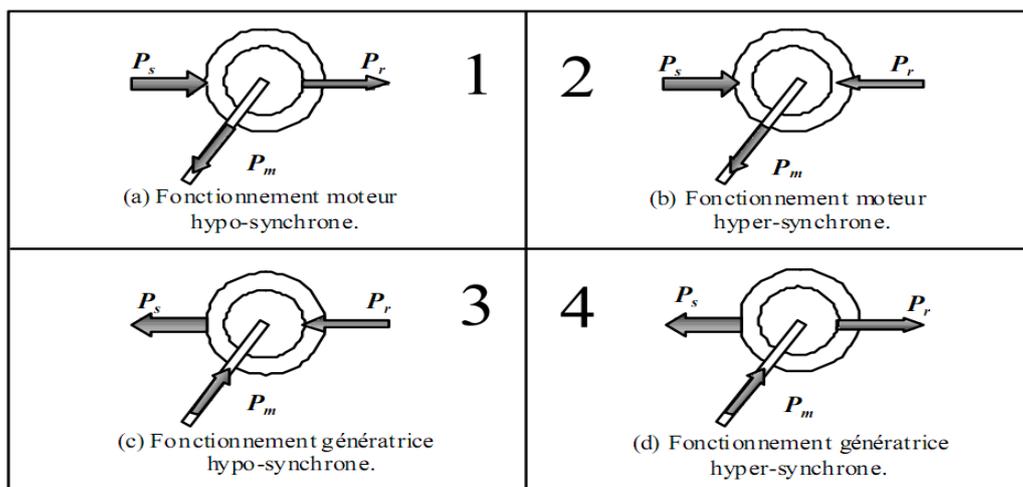


Figure I.11 Mode de fonctionnement de la MADA.

Avec :

- P_s : la puissance électrique disponible au stator.
- P_r : la puissance électrique disponible au rotor.
- P_m : la puissance mécanique disponible sur l'arbre.

I.6) Avantages et inconvénients des machines utilisées

Type des machines	Avantages	Inconvénients
MAS (vitesse Fixe)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Machine robuste ➤ Faible cout ➤ Pas d'électronique de puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Puissance extraite non optimisée ➤ Maintenance boite de vitesse. ➤ Pas de contrôle d'énergie réactive. ➤ Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
MADA (vitesse variable)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fonctionnement à vitesse variable. ➤ Puissance extraite optimisé. ➤ Électronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale. ➤ Machine standard ➤ Connexion de la machine plus facile à gérer. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Maintenance boite de vitesse. ➤ Prix de l'électronique de puissance. ➤ Contrôle-commande complexe. ➤ Contact glissant bagues-balais.
MSAP (vitesse variable)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse. ➤ Puissance extraite optimisée pour le vent faible. ➤ Connexion de la machine facile à gérer ➤ Possibilité d'absence de boite de vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Machine spécifique grand diamètre de machine. ➤ Électronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.

I.7) Les commandes utilisées

En générale on distingue deux catégories des commandes

- Commandes rapproché.
- Commande éloigné.

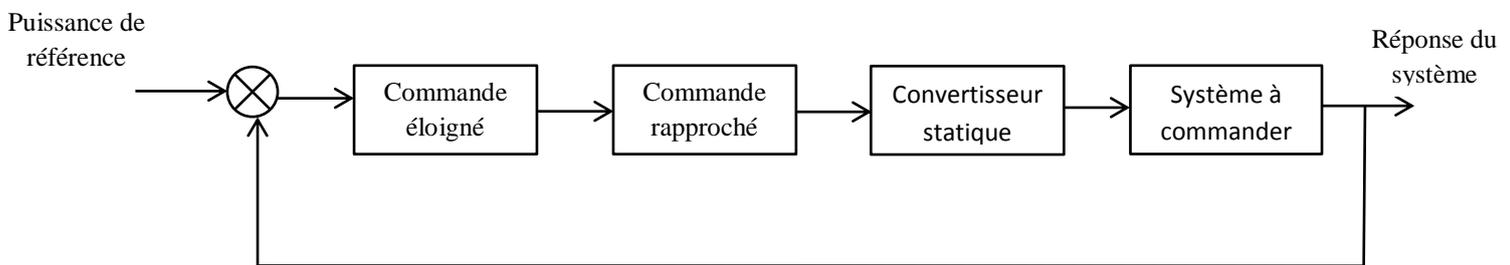


Figure I.12 structure générale du commande d'un système.

I.7.1) Les commandes éloignées (régulateur)

Cette commande a pour objectif de générer les références et garantir le suivie de trajectoire et la robustesse vis-à-vis les variations paramétriques, et parmi ces commandes on trouve :

I.7.1.1) Le régulateur PID

Un régulateur PID ou correcteur PID (proportionnel intégrale dérivé) est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermé d'une grandeur physique, d'un système industriel.

C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie.

Le correcteur PID agit de 3 manières

- ✓ **P (action Proportionnelle)** : l'erreur est multipliée par un gain G .
- ✓ **I (action Intégrale)** : l'erreur est intégrée et divisée par un gain Ti .
- ✓ **D (action Dérivée)** : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain Td .

➤ Les structures de régulateur PID

Il existe trois structures possibles :

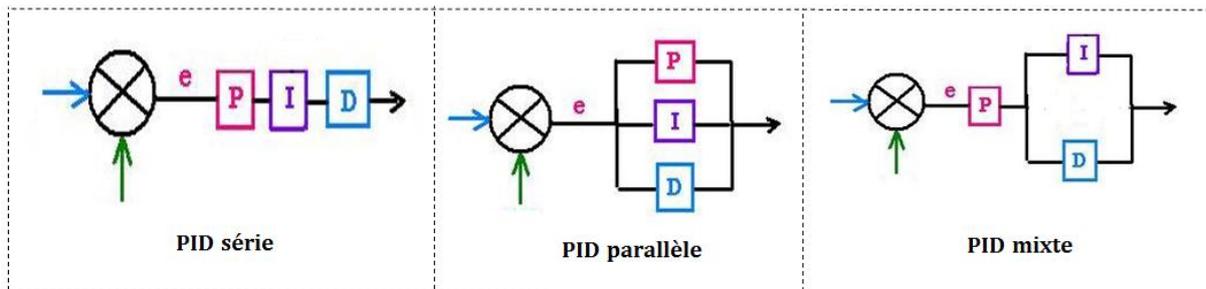


Figure I.13 structure de régulateur PID.

➤ Les effets de PID

Action proportionnel :

- ✓ Permet de corriger les effets d'une perturbation.
- ✓ Déstabilise le système quand on augmente le gain.
- ✓ elle n'annule pas l'erreur.

Action Intégrale :

- ✓ Corrige les effets d'une perturbation.
- ✓ Annule l'erreur statique.
- ✓ Introduit un dépassement.
- ✓ elle n'est pas très rapide.

Action dérivée :

- ✓ Accélère la correction.
- ✓ Stabilise plus rapidement le système.
- ✓ Elle n'annule pas l'erreur statique et est sensible aux vibrations.

I.7.1.2) La commande RST

Un régulateur RST est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un dispositif industriel. C'est un correcteur fréquemment utilisé dans les dispositifs de commande numérique. Ce type de correcteur est intrinsèquement numérique : il n'est pas applicable aux commandes analogiques. Le sigle RST vient du nom des 3 polynômes qui doivent être déterminés afin d'obtenir une commande efficace. La synthèse de ce type de

correcteur s'effectue par placement de pôles. Ce type de régulation offre l'avantage d'améliorer la qualité du filtrage et un rejet des perturbations.

➤ **La structure de régulateur RST**

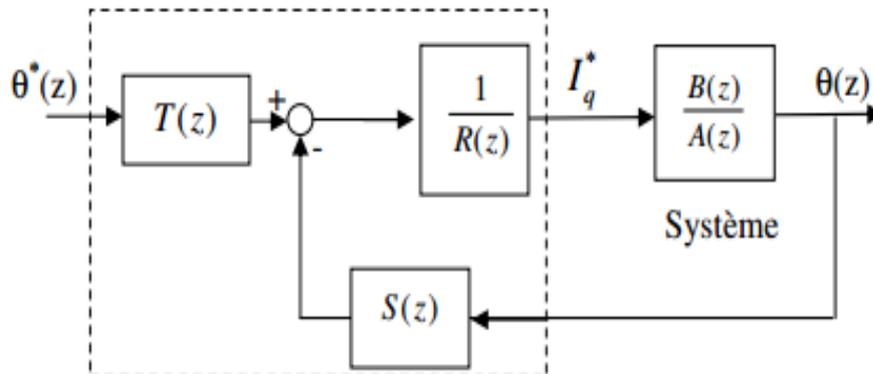


Figure I.14 structure de régulateur RST.

I.7.1.3) La commande logique floue

La logique floue est une commande qui permet la formalisation des imprécisions dues à une connaissance globale d'un système très complexe et l'expression du comportement d'un système par des mots. Cette méthode permet d'obtenir une loi de commande souvent efficace, sans devoir faire appel à des développements théoriques importants. Elle présente l'intérêt de prendre en compte les expériences acquises par les utilisateurs et opérateurs du processus à commander.

➤ **Avantages de la commande floue**

- ✓ La théorie est simple et s'applique à des systèmes complexes
- ✓ Pas de modèles mathématiques requis du procédé à asservir
- ✓ Robustesse de la commande floue vis à vis des incertitudes.
- ✓ Possibilités de commande auto-adaptative aux variations du procédé

➤ **Inconvénients de la commande floue :**

- ✓ Technique de réglage essentiellement empirique.
- ✓ Performances dépendent de l'expertise.
- ✓ Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse. (Difficultés de certification dans le transport, espace...)

I.7.1.4) Le régulateur H infini

La synthèse H_∞ est une méthode qui sert à la conception de commandes optimales. Il s'agit essentiellement d'une méthode d'optimisation, qui prend en compte une définition mathématique des contraintes. La commande H infini a pour principal avantage la capacité d'inclure dans un même effort de synthétisation les concepts liés à la commande classique et à la commande robuste.

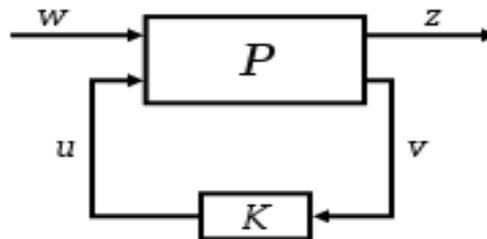


Figure I.15 structure de régulateur H infini.

Le système P possède deux entrées:

- ✓ w : représente les entrées extérieures, notamment le vecteur de consigne de commande, les perturbations et les bruits.
- ✓ u : représente le vecteur de commande.

Et deux sorties :

- ✓ z : les sorties à optimiser pour avoir un bon comportement de la commande
- ✓ v : les mesures disponibles utilisées par le contrôleur pour calculer la commande.

L'objectif c'est de calculer un régulateur K capable de satisfaire les performances désiré.

I.7.1.5) La commande LQG

En automatique, la Commande linéaire quadratique gaussienne dite commande LQG est une méthode qui permet de calculer le gain d'une commande par retour d'état dans un souci particulier de réduire les bruits blancs. La commande LQG réunit un contrôleur LQ (Linear Quadratic) et un estimateur de Kalman pouvant être calculé indépendamment suivant le principe de séparation.

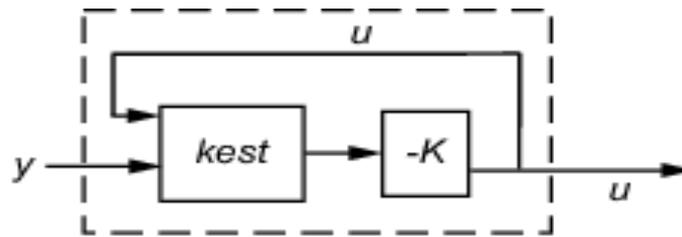


Figure I.16 structure de régulateur LQG.

I.7.2) Commande rapproché

Cette commande a pour objectif de générer les tensions de commande à appliquée au système, et parmi ces commandes on trouve :

I.7.2.1) La commande MLI

La modulation de largeur d'impulsions est une technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux continus, à l'aide de circuits à fonctionnement tout ou rien, ou plus généralement à l'état discrets. Le principe général est qu'en appliquant une succession d'états discrets pendant des durées bien choisies, on peut obtenir la moyenne de certaine durée de n'importe quelle valeur intermédiaire.

Il existe plusieurs types de commande MLI :

➤ MLI intersective

Elle consiste à comparer la modulante (le signal à synthétiser) à une porteuse, généralement triangulaire. Le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse, 0 sinon, le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse.

➤ Vecteur spatial

La MLI dite vecteur spatial est surtout applicable aux variateurs de vitesse triphasés sans neutre. Elle consiste à considérer globalement le système triphasé, et à lui appliquer une transformée de Concordia pour se ramener dans le plan (V_α, V_β) . Ce vecteur n'est pas directement réalisable par les interrupteurs du variateur, mais on peut chercher les trois configurations les plus proches (situées sur les sommets et au centre de l'hexagone), et les appliquer successivement pendant une fraction adéquate de la période d'échantillonnage, de façon à obtenir en moyenne le vecteur recherché.

➤ MLI pré calculée

Elle est surtout utilisée lorsque la fréquence de la porteuse est faible, on a besoin d'optimiser le spectre du signal généré. Le motif du signal de sortie est prédéterminé (hors ligne) et stocké dans des tables qui sont ensuite relues en temps réel. De fait, ces MLI sont toujours synchrones (la fréquence porteuse est exactement multiple de la fréquence de la modulante), c'est la condition nécessaire pour avoir un spectre harmonique constant. En pratique, ce type de MLI ne peut être réalisé qu'en numérique.

➤ Commande par hystérise

Cette méthode consiste à élaborer le signal MLI directement à partir de la grandeur à contrôler par des décisions de type tout ou rien. Les avantages sont la très grande simplicité et le temps de réponse minimal aux perturbations. L'inconvénient majeur est l'absence de contrôle de la fréquence de commutation des transistors, ce qui rend délicat leur dimensionnement.

I.7.2.2) Commande par mode glissant

C'est une commande bien connue pour sa grande robustesse

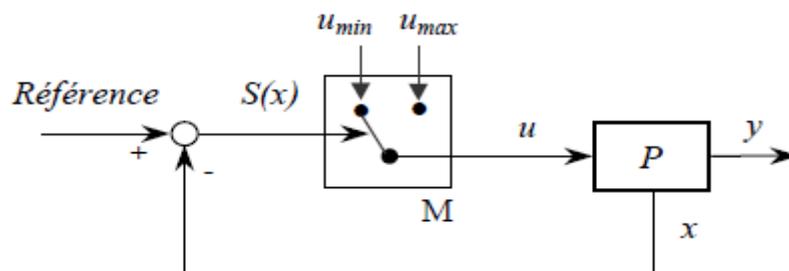


Figure I.17 Mode de fonctionnement de la commande par mode glissant.

Le processus est forcé à glisser sur une trajectoire dans l'espace d'état, malgré les variations paramétriques ou certaines perturbations externes. L'inconvénient de cette commande est la fréquence de commutation du modulateur, elle n'est ni constante ni bornée.

I.7.2.3) Commandes à modèles de référence

On distingue plusieurs type des commandes a modèle référence :

➤ Commande avec des reconSTRUCTEURS d'état (estimateur/observateur) [7]

On inclut les observateurs parmi les commandes à modèle car leurs estimations peuvent servir à rendre le contrôle robuste.

Un observateur est un reconstruteur d'état qui impose au modèle de suivre le processus. L'observateur est bouclé par le bloc d'adaptation, dont la sortie agit sur le modèle. L'erreur entre le modèle et le processus va permettre au modèle de converger vers le processus grâce au traitement par le mécanisme d'adaptation.

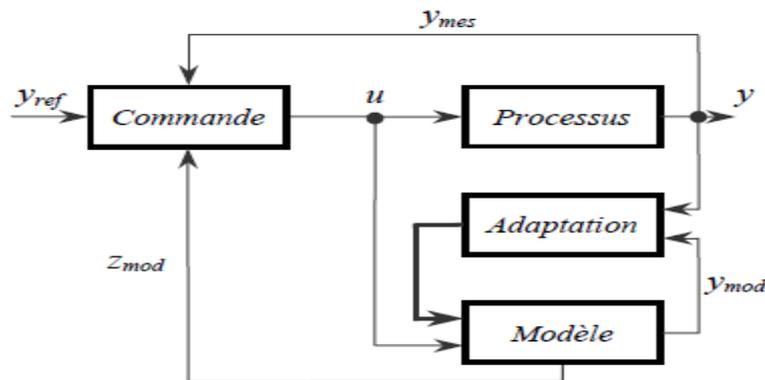


Figure I.18 structure de la commande avec reconstruteur d'état.

➤ La commande adaptative

La commande adaptative directe à modèle de référence (MRAC) a été proposée pour la première fois en 1961, se basant sur la minimisation d'un indice de performances, approche qui sera plus tard connue sous la règle de conception du MIT. La stratégie MRAC spécifie la forme désirée de la réponse du processus à un signal de commande par l'intermédiaire d'un modèle de référence défini paramétriquement, image donc des performances souhaitées en boucle fermée. Ensuite, un mécanisme d'adaptation élabore, à partir de la sortie du processus et de la sortie du modèle, un jeu de paramètres conçu de telle sorte que la différence entre ces deux sorties tend vers zéro.

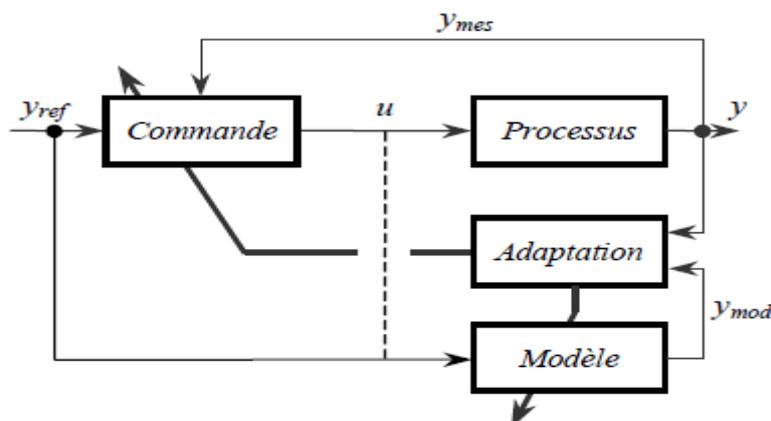


Figure I.19 structure de la commande adaptative MRAC.

➤ **Commande à modèle interne**

La commande à modèle interne est une autre méthode d'augmenter la robustesse d'une commande.

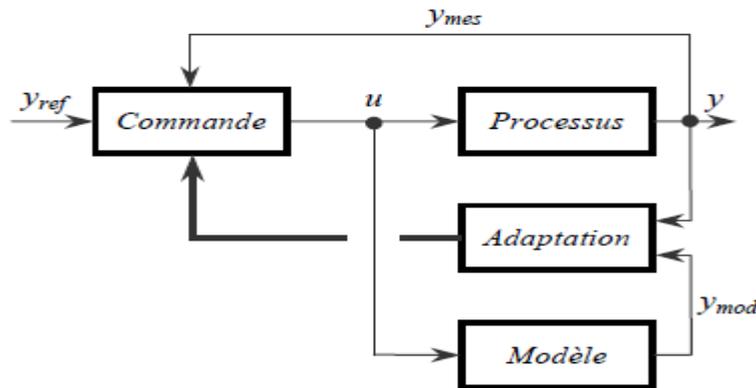


Figure I.20 structure de la commande à modèle interne.

Tout écart par rapport au modèle est ramené à l'entrée du bloc de commande, cet écart est vu comme une perturbation équivalente à compenser. Le bloc de commande agit alors simultanément sur le processus et le modèle pour annuler l'écart. Le mécanisme d'adaptation est un simple gain unitaire.

➤ **Commande à modèle de comportement (CMC)**

L'idée est d'exploiter l'écart entre le modèle et le processus pour modifier les actions du processus réel afin de le forcer à suivre le modèle. Ainsi, on rend robuste la représentation du processus.

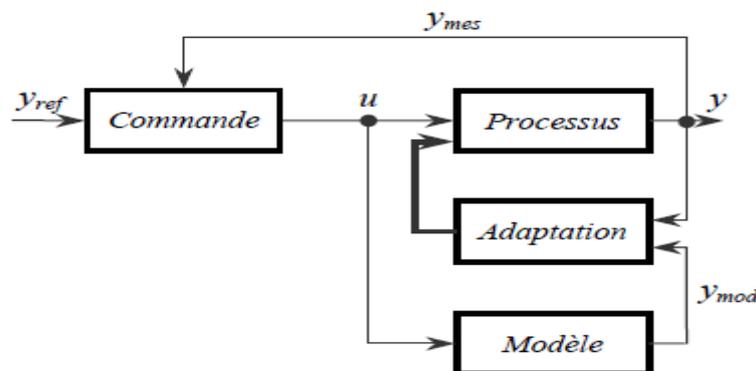


Figure I.21 structure de la commande à modèle de comportement.

Le bloc d'adaptation traite l'écart de comportement et élabore une action corrective, alors superposée à la grandeur d'entrée commune au modèle et au processus et pas au niveau du modèle. L'algorithme du bloc d'adaptation doit faire converger vers zéro l'écart de

comportement en toutes circonstances. Ce qui a bien pour effet de rendre l'évolution du processus conforme à son modèle. Toute perturbation, variation paramétrique et perturbation externe, doit voir son effet sinon annulé au moins fortement limité. Alors la commande sera nécessairement robuste et présentera toutes les performances souhaitées en termes de stabilité et de précision pour tout point de fonctionnement. Toutefois, le concept de robustesse se trouve dans la représentation du processus et non dans l'asservissement des trajectoires de sortie. [7]

I.8) Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, On a donné un aperçu sur les différentes turbines éoliennes utilisées pour la production d'énergie électrique, pour but d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement de ces dernières. Dans la deuxième partie on a cité les deux grandes familles des machines utilisées dans les systèmes de conversion qui sont présentées comme suit :

- ✓ machines synchrones.
- ✓ machines asynchrones.

Par ailleurs, dans la dernière partie on a élaboré une classification des commandes des éoliennes avec une brève description pour chacune d'elles.

Après cette étude on peut conclure que les problèmes de fonctionnement des éoliennes est dans sa commande, surtout dans le cas d'un fonctionnement à vitesse variable ou il faut extraire le maximum de puissance du vent, ce qui exige le bon choix de la commande, dont le but d'atteindre les performances désiré.

Chapitre II

Modélisation des différentes parties du
système éolienne

II.1) Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne consiste à retrouver une représentation de l'ensemble de ses éléments, Cette représentation constitue un instrument fondamental pour l'observation et l'analyse de l'évolution des grandeurs électromagnétique de la machine, d'une part et d'autre part pour prévoir les lois nécessaires au fonctionnement souhaité.

La modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne et l'élaboration de la stratégie de commande fera l'objet de ce chapitre.

II.2) Description du système a étudié

Le système a étudié est représenté sur la figure 2-1 il est constitué de :

- Une turbine éolienne.
- Un multiplicateur de vitesse.
- Une machine asynchrone double alimentée MADA.
- Deux convertisseurs statiques bidirectionnels.
- Un circuit de commande.

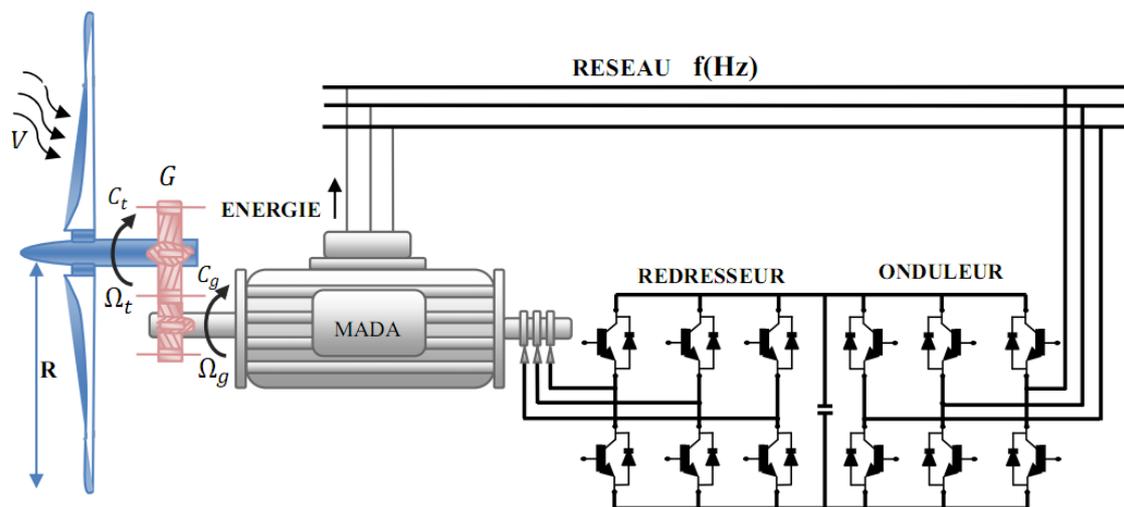


Figure II.1 schéma du système à étudier.

L'arbre de la machine asynchrone double alimentée (MADA) est couplé à celui de l'éolienne à travers d'un multiplicateur de vitesse. Le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplée en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimentée ses enroulements. Le stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage, il est connectée directement au réseau, mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rotoriques, on les connecté au réseau à travers une interface d'électronique de puissance composé d'un

redresseur et d'un onduleur. La puissance à fournie au rotor est faible devant la puissance produite par le stator. De cette manière, il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation variable dans une large plage.

II.3) Modélisation du système éolienne

II.3.1) Partie mécanique

➤ Modélisation du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, ça vitesse est parmi les variables les plus importants dans la modélisation de la chaine de conversion éolienne.

La vitesse de vent généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. $v_v = f(t)$.

➤ Modélisation du la turbine

La puissance fournie par le vent est donnée par :

$$p_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot v_v^3 \quad (\text{II.1})$$

La puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'écrit par :

$$p_t = c_p(\lambda, \beta) \cdot p_v \quad (\text{II.2})$$

Le rapport de la vitesse en bout des pales :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{v_v} \quad (\text{II.3})$$

La turbine permet de convertir une partie de l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique.

Son couple est donné par l'expression suivante :

$$c_t = \frac{p_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} \cdot c_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot s \cdot v_v^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec : $c_p(\lambda, \beta)$ est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

L'expression du coefficient de puissance de la turbine, est généralement décrite par un polynôme, issu de l'interpolation des points en provenance des mesures.

Le tracé de la turbine choisie est représenté sur la figure suivante :

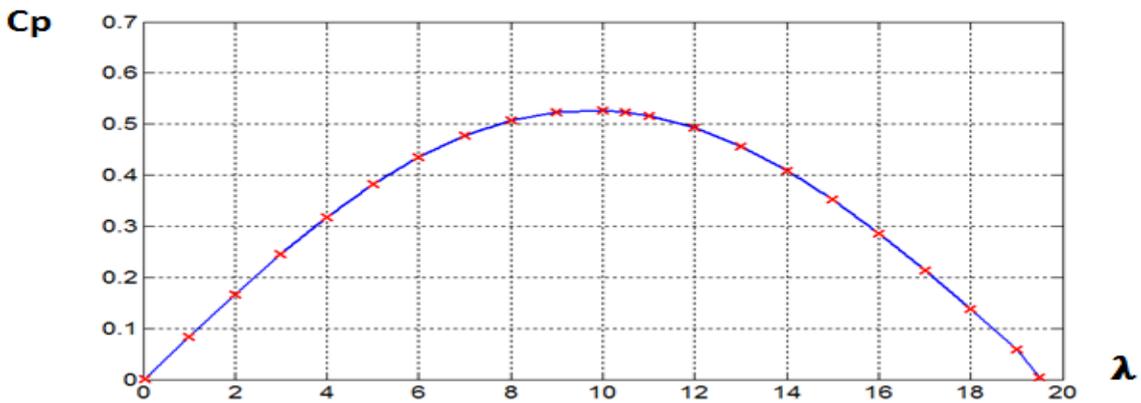


Figure II.2 caractéristique de $c_p(\lambda)$.

ρ : masse volumique de l'air.

s : surface circulaire balayée par la turbine $s = \pi.R_t^2$

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine avant le multiplicateur.

R_t : rayon de la turbine.

c_p : coefficient de puissance.

v_v : vitesse du vent.

c_t : couple de la turbine éolienne.

β : l'angle de calage des pales.

On déduit le modèle de la turbine représenté sur la figure suivante :

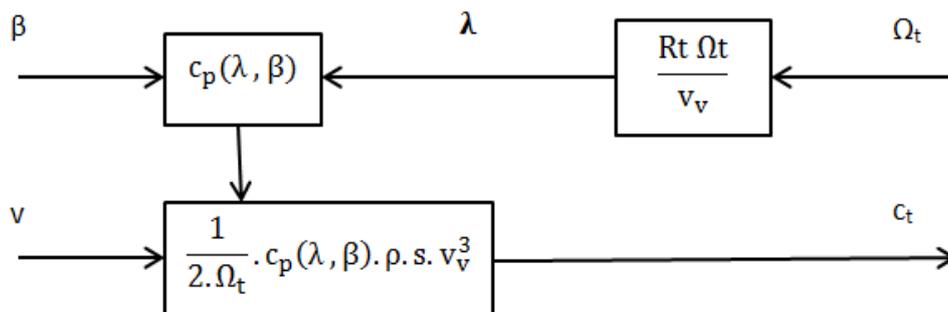


Figure II.3 schéma bloc du modèle de la turbine.

➤ **Modélisation du multiplicateur de vitesse**

Son rôle est d'adapter la vitesse lente de la turbine Ω_t à celle de la génératrice $\Omega_{méc}$.

Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (II.5)$$

$$c_{ar} = \frac{c_t}{G} \quad (II.6)$$

Avec : G est le gain du multiplicateur.

c_t : le couple de la turbine sous l'action du vent.

c_{ar} : couple aérodynamique sur l'axe rapide de la turbine.

Ω_t : la vitesse de la turbine.

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

➤ **Modélisation de l'arbre**

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivante :

$$c_{ar} - c_{em} = f \cdot \Omega_{méc} + J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} \quad (II.7)$$

Avec :

J : l'inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine.

f : coefficient de frottement dynamique.

➤ **Maximisation de la puissance**

Pour capter le maximum de puissance de l'énergie éolienne, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent. La vitesse mécanique optimale de la turbine correspond à λ_{opt} et $\beta=0^\circ$. Ce dernier est utilisé comme une grandeur de référence d'un régulateur.

La puissance optimale (référence) de la turbine est donnée par l'équation suivante :

$$p_{\text{opt}} = -\eta \frac{1}{2} C_{p_{\text{max}}} \rho \pi R^2 v_v^3 \quad (\text{II.8})$$

II.3.2) Partie électrique

II.3.2.1) Modélisation de la MADA

➤ Hypothèses simplificatrices

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

- ✓ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- ✓ Entrefer constant.
- ✓ Effet des encoches négligé.
- ✓ Influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte.
- ✓ Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- ✓ Les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées.

➤ Modèle de la MADA dans le repéré de Park

L'objectif de ce modèle est de simplifier les différentes grandeurs du système et le rendre proche du modèle d'une machine à courant continu à excitation séparée, aussi de réduire la complexité du modèle mathématique régissant le comportement du système.

La représentation de la MADA dans un plan dq est schématisée sur la figure suivante :

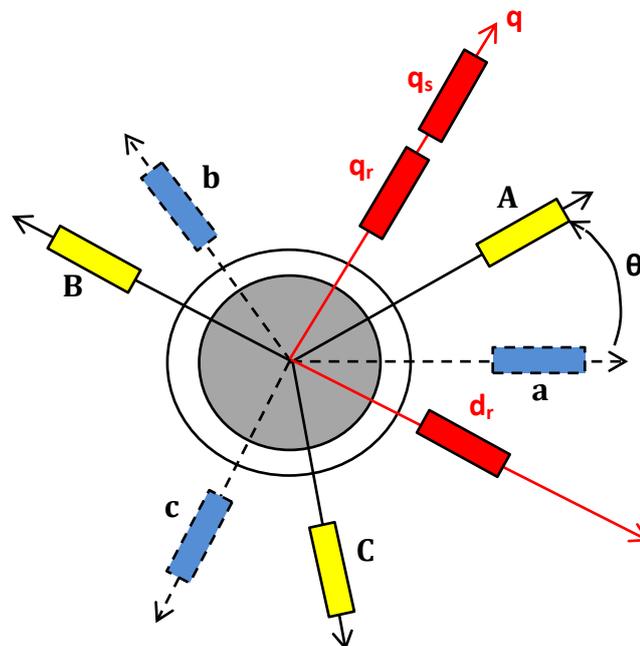


Figure II.4 Représentation de la MADA sur un plan dq.

La machine est représentée par son modèle de Park dont les équations sont établies dans un référentiel où les puissances sont conservées.

Les équations de la MADA dans un repéré tournant à la vitesse électrique ω_s et pour un rotor tournant à la vitesse électrique $p\Omega$ sont données comme suit :

➤ **Équations de tension**

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (II.9)$$

➤ **Équations de flux**

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{array} \right. \quad (II.10)$$

Dans ces équations R_s, R_r, L_s et L_r sont respectivement les résistances et les inductances du stator et du rotor de la MADA.

$v_{ds}, v_{qs}, v_{dr}, v_{qr}, i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \phi_{ds}, \phi_{qs}, \phi_{dr}$ et ϕ_{qr} Représentent respectivement les composantes selon les axes od et oq des tensions statorique et rotorique des courant et des flux.

Le couple électromagnétique est donné par l'équation :

$$c_{em} = p (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (II.11)$$

Avec p : est le nombre de pair de pôles de la machine.

Les puissance active et réactive statorique et rotorique de la MADA sont respectivement :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \\ p_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ Q_r = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \end{array} \right. \quad (II.12)$$

➤ **Modèle de la MADA avec orientation du flux**

Le référentiel diphasé choisi est celui lié au champ tournant. Le vecteur flux statorique est aligné avec l'axe « od » du repéré diphasé. Voir (Figure II.5) d'où :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = \omega_s - \omega_m \\ \phi_{ds} = \phi_s \\ \phi_{qs} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.13})$$

ω_r et ω_s Représentent respectivement les pulsations des tensions rotorique et statorique en rad/s.

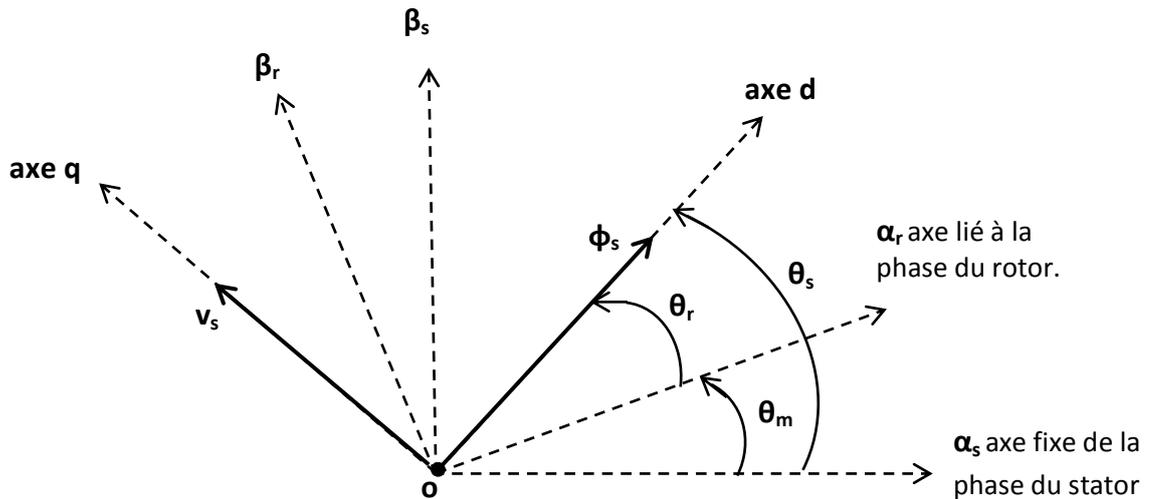


Figure II.5 orientation de l'axe d sur le flux statorique.

Les angles θ_s et θ_r sont obtenus respectivement par intégration de ω_s et ω_r

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_s = \int_0^t \omega_s dt + \theta_{s0} \\ \theta_r = \int_0^t \omega_r dt + \theta_{r0} \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

➤ **Modèle de la MADA avec orientation de l'axe directe sur le flux statorique**

On adoptant l'hypothèse d'une résistance statorique R_s négligeable et que le flux statorique est constant et orienté selon l'axe od, on déduit que :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = \omega_s \phi_{ds} \\ \phi_s = \frac{v_s}{\omega_s} \end{array} \right. \quad (\text{II.15})$$

L'expression du couple devient :

$$c_{em} = p \frac{M}{L_s} \frac{v_s}{\omega_s} i_{qr} \quad (\text{II.16})$$

Les expressions des tensions statoriques et rotorique devient :

$$\begin{cases} v_{qs} = v_s \\ v_{ds} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Les expressions des flux statoriques devient :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

➤ **Relation entre les courants statoriques et rotoriques**

À partir des équations des composantes directes et quadratures du flux statorique, nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

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

Dans un repère diphasé de la machine asynchrone double alimentation, les puissances actives et réactives sont exprimées par :

$$\begin{cases} Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \\ p_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

L'application des hypothèses choisies ainsi que le système d'axes nous permet d'établir la simplification suivante :

$$\begin{cases} Q_s = v_s i_{qs} \\ p_s = v_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

On remplace i_{qs} et i_{ds} par leurs expressions en fonction des courants rotoriques, et après avoir approximer ϕ_s par $\frac{v_s}{\omega_s}$, on trouve :

$$\begin{cases} p_s = -v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -\frac{v_s M}{L_s} i_{dr} + \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

La puissance active et réactive rotorique peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} p_r = g \cdot v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_r = g \cdot v_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

➤ **Expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques**

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leurs expressions, de la façon suivante :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

On injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} v_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{M v_s}{L_s} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

L'étude précédemment établie nous permet de définir le schéma bloc de la machine asynchrone double alimentation suivant :

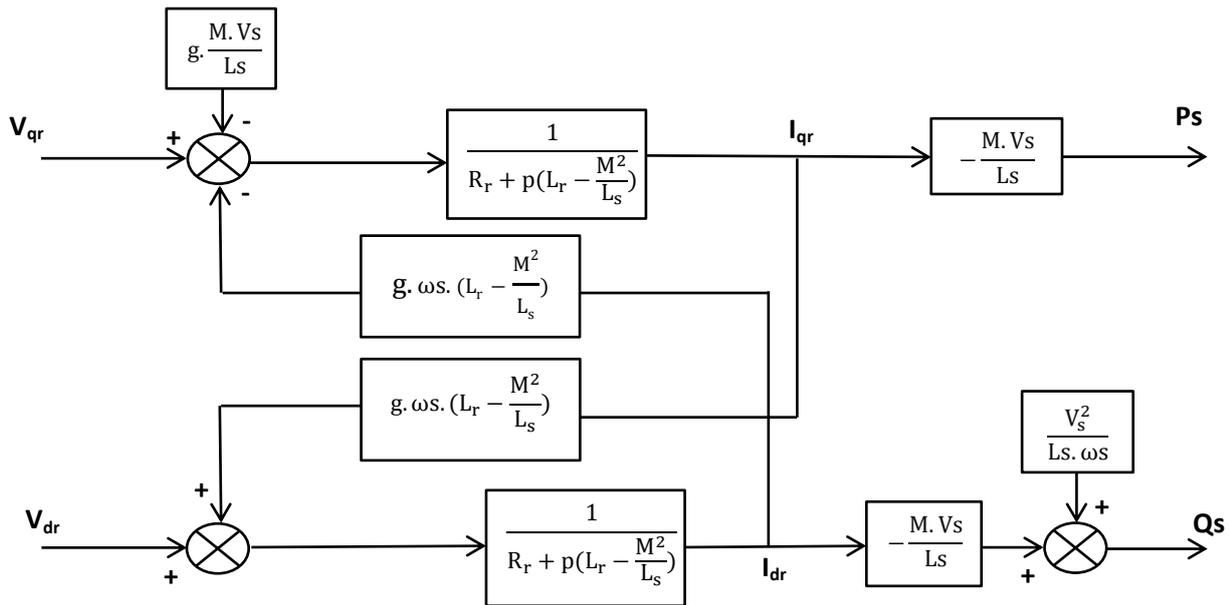


Figure II.6 schéma bloc de la MADA.

II.3.2.2) Modélisation des convertisseurs statiques [8]

Les convertisseurs utilisés sont de type parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et de diodes antiparallèles commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour deux raisons principales :

- ✓ Permet un transfert bidirectionnel de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet les fonctionnements en hypo et hyper synchrone.
- ✓ Réduire les perturbations sur le réseau électrique.

➤ Modélisation de l'onduleur MLI

L'onduleur de tension réalise l'interface entre la source de courant et la source de tension, ce qui impose le respect des règles de fonctionnement suivantes :

- ✓ La source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit jamais être court-circuitée.
- ✓ La source de courant, ne doit jamais être en circuit ouvert. Le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre ou la connexion en antiparallèle d'une diode avec les interrupteurs.

La figure suivante représente le schéma d'un onduleur MLI :

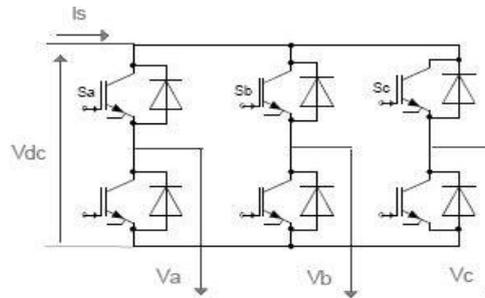


Figure II.7 Représentation schématique d'un onduleur

L'onduleur MLI peut être modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} \tag{II.26}$$

Avec :

S_a, S_b, S_c : Fonction logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.4) Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons élaboré une modélisation de la partie mécanique d'une éolienne à axe horizontal et à vitesse variable. Dans la seconde partie on a élaboré une modélisation de la partie électrique de l'éolienne telle que la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et l'onduleur de tension coté machine. Cette modélisation nous a permis d'établir des schémas bloc qui seront utilisés dans le chapitre suivant pour la simulation, ainsi on a vu l'intérêt de la transformation de Park, et de l'orientation de flux.

Chapitre III

Stratégies de commande et simulation

III.1) Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions les performances de la commande RST appliquée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone double alimentée (MADA). La commande vectorielle par orientation du flux statorique est adoptée. En effet, cette commande permet de simplifier les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ainsi, on peut contrôler les grandeurs statoriques à partir des tensions du rotor. [8]

Comme la commande RST est linéaire, et la MADA est un système non linéaire, alors nous allons procéder en premier lieu à la linéarisation et la simplification du modèle de la MADA, ensuite, le régulateur RST sera synthétisé et calculé d'une façon à commandé la puissance de la MADA. Des résultats de nos travaux seront présentés et discutés.

III.2) Structure de système à commander

L'objectif de cette structure est de contrôler l'échange de puissances, active et réactive, entre la MADA et le réseau.

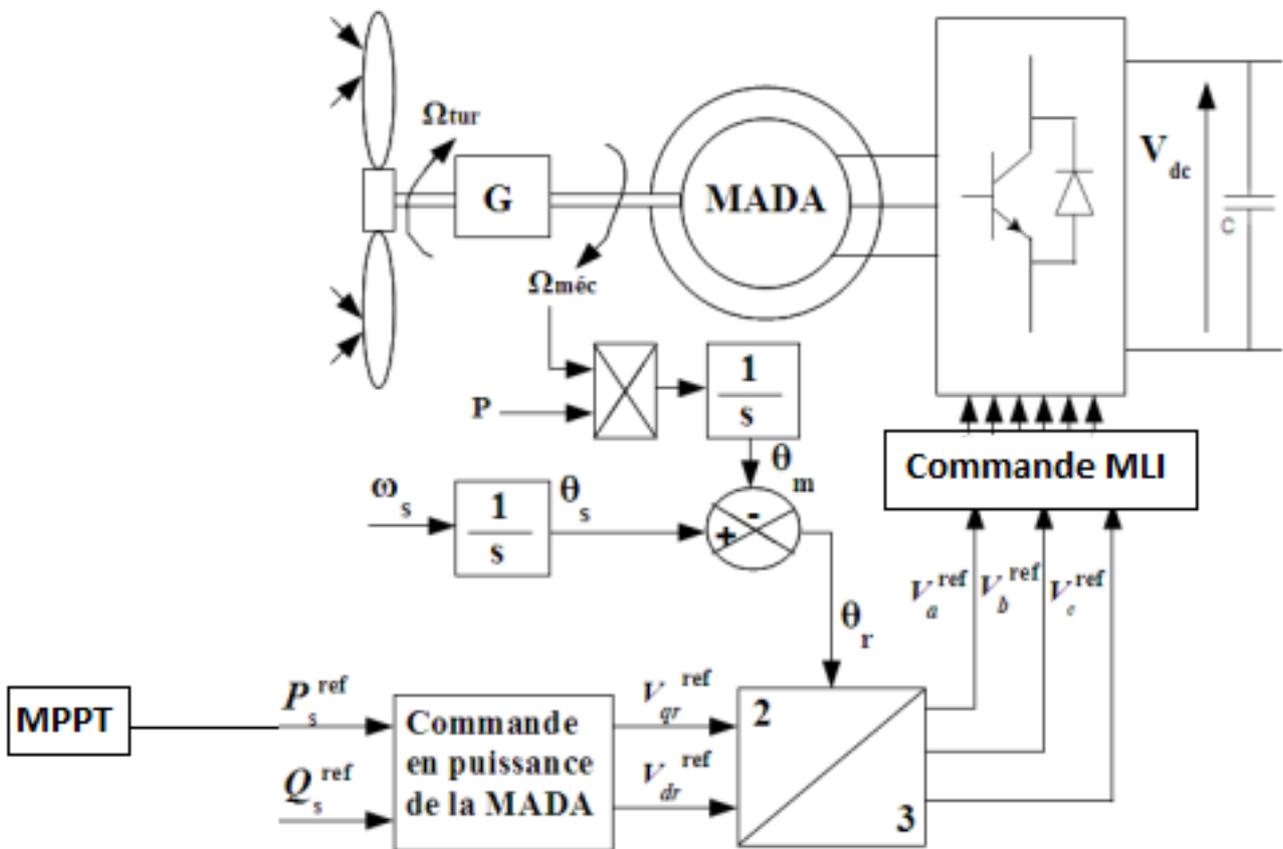


Figure III.1 Schéma bloc de la structure de commande.

III.3) Hypothèses de travail

Dans le souci de simplifier la synthèse de régulateur RST, nous adoptons certain nombre d'hypothèses dans le but de linéariser et de simplifier le modèle de la MADA représenté sur la figure (II.6)

- les termes de couplage sont négligeables, et donc les deux axes seront ainsi considérés comme découplés.
- Le terme $\frac{v_s^2}{L_s \omega_s}$ est constant, qui est considéré comme une perturbation qui devra être rejetée par la loi de commande.

Ces hypothèses permettent de passer d'un problème de commande multi-variable en deux problèmes linéaires mono-variables comme indiqué sur la figure (III.2).

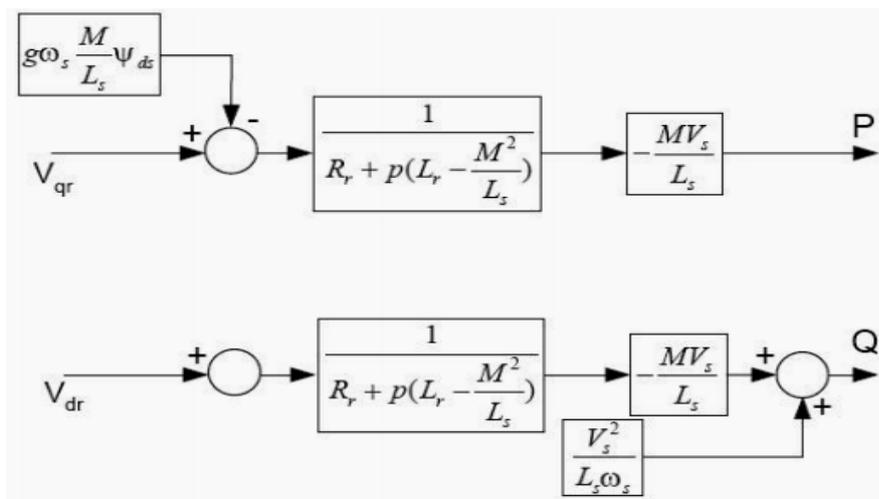


Figure III.2 Modèle simplifié de la MADA.

III.4) Synthèse d'un régulateur RST

Un régulateur de type RST est un régulateur polynomial, il se présente comme une alternative intéressante aux régulateurs de type proportionnel-intégral. Il permet de mieux gérer le compromis de rapidité et de performances. Les éléments R, S et T sont des polynômes dont leurs degré est fixé suivant le degré des fonctions de transferts de poursuite et de régulation en boucle ouverte. Ils sont calculés à l'aide d'une stratégie de placement des pôles robustes. [2]. Cette stratégie a pour objectif de régler les performances de

l'asservissement (temps de réponse, dépassement et réduction de l'effet de la perturbation sur la sortie) à l'aide de deux paramètres de synthèse (T_c , T_f) appelés respectivement horizon de commande et horizon de filtrage.

Nous supposons que la fonction de transfert du système à réguler est sous la forme $\frac{B}{A}$. soit Y_{ref} la référence du système et γ sa perturbation. La régulation du système par placement des pôles robustes consiste à placer une fonction de transfert $\frac{R}{S}$ sur la boucle de retour et une fonction $\frac{T}{S}$ appliquée à la référence, ou R, S et T sont des polynômes à calculer à l'aide d'une stratégie de placement des pôles robustes. Voir la figure (III.3).

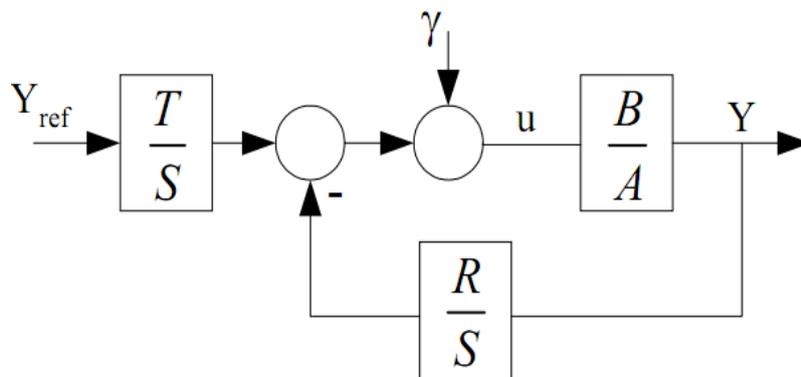


Figure III.3 schéma bloc régulé par un régulateur RST.

Les polynômes $R(p)$, $S(p)$, et $T(p)$ sont respectivement de degré n , m et z :

$$\left\{ \begin{array}{l} R(p) = r_n p^n + r_{n-1} p^{n-1} + \dots + r_0 \\ S(p) = s_m p^m + s_{m-1} p^{m-1} + \dots + s_0 \\ T(p) = t_z p^z + t_{z-1} p^{z-1} + \dots + t_0 \end{array} \right. \quad (III.1)$$

La fonction du transfert en boucle fermée est donnée sous la forme suivante :

$$Y(p) = \frac{BT}{AS+BR} Y_{ref} + \frac{BS}{AS+BR} \gamma \quad (III.2)$$

Le principe du placement des pôles consiste à spécifier un polynôme arbitraire de stabilité $D(p)$ qui correspond au dénominateur des fonctions de transfert en poursuite et régulation, et à calculer $S(p)$ et $R(p)$ conformément à l'équation de Bézout, l'on ait :

$$D = AS + BR \tag{III.3}$$

La fonction de transfert $\frac{B}{A}$ et le régulateur $\frac{R}{S}$ étant strictement propre, le degré de $A.S+B.R$ est déterminé par celui du produit de $A*S$, ce qui donne :

$$\text{deg}(D) = \text{deg}(A.S+B.R) = \text{deg}(A.S) = \text{deg}(A) + \text{deg}(S) \tag{III.4}$$

On suppose que A est de degré n , nous avons :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{deg}(R) = \text{deg}(A). \\ \text{deg}(S) = \text{deg}(A) + 1 \\ \text{deg}(D) = 2.n + 1. \end{array} \right. \tag{III.5}$$

- Le rejet de la perturbation est assuré si et seulement $S(0) = 0$.
- Le rapport entre la référence et la sortie est unitaire si et seulement $T(0) = R(0)$.

Selon le régulateur choisi (strictement propre), on aboutit aux notions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} A(p) = p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n \\ B(p) = b_1 p^{n-1} + \dots + b_n \\ R(p) = r_0 p^n + r_1 p^{n-1} + \dots + r_n \\ S(p) = s_0 p^{n+1} + s_1 p^n + \dots + s_n p \\ D(p) = d_0 p^{2n+1} + d_1 p^{2n} + \dots + d_{2n+1} \end{array} \right. \tag{III.6}$$

L'équation de Bézout permet d'obtenir un système de n équations à n inconnues ou les coefficients de D sont liés aux coefficients de R et de S par la matrice de Sylvester suivante :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a_1 & 1 & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & b_1 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ a_n & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_1 & b_n & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & b_1 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & a_n & \dots & 0 & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \dots \\ s_n \\ r_0 \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \dots \\ d_n \\ d_{n+1} \\ \dots \\ d_{2n+1} \end{bmatrix} \tag{III.7}$$

III.4.1) Application à la machine asynchrone double alimentée

Dans le cas d'une machine asynchrone à double alimentation les termes A et B s'expriment par :

$$\begin{cases} A(p) = L_s R_r + p L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \\ B(p) = M v_s \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Le polynôme A est de degré n=1, ce qui donne :

$$\begin{cases} \text{deg}(R) = 1 \\ \text{deg}(S) = 2 \\ \text{deg}(D) = 3 \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Conformément à la stratégie du placement des pôles robustes, le degré du polynôme D nous oblige à placer trois pôles. Ce polynôme est tout d'abord décomposé en produit de deux polynômes C et F : [2]

$$D = C.F \quad (\text{III.10})$$

Dans ce cas, nous définissons deux paramètres :

- Un horizon de commande T_c .
- Un horizon de filtrage T_f .

$$\begin{cases} T_c = -\frac{1}{P_c} \\ T_f = -\frac{1}{P_f} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

P_c : pôle du polynôme de commande C.

P_f : pôle du polynôme de filtrage F.

Le choix des pôles du polynôme D doit assurer un rejet des perturbations satisfaisant en termes de rapidité et de dépassement. Le rôle du pôle de commande étant d'accélérer le système, on le choisit de façon arbitraire, 16 fois supérieur au pôle du polynôme A, soit :

$$P_c = 16. P_A \tag{III.12}$$

Pour accroître la robustesse de la régulation, les horizons doivent être déséquilibrés. Nous choisissons T_c égale à 12 fois T_f , soit :

$$T_c = 12. T_f \tag{III.13}$$

Pour que la perturbation soit rejetée, il est nécessaire que $S(0)$ soit nul.

L'équation de Bézout permet d'obtenir un système de quatre équations à quatre inconnues ou les coefficients de D sont liés aux coefficients de R et de S par la matrice de Sylvester suivante :

$$\begin{pmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ r_0 \\ r_1 \end{pmatrix} \tag{III.14}$$

Pour avoir le rapport entre la référence et la sortie unitaire (suivi de consigne) il faut prendre $T=R(0)$.

III.5) Commande de convertisseur coté MADA

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on fait appel à la technique MLI (Modulation Largeur D'impulsion), plusieurs types de MLI sont utilisés. On peut citer par exemple, la MLI intersective sinus avec une porteuse triangulaire, la MLI pré calculée et la MLI vectoriel. Toute fois nous adoptons la MLI naturelle à cause de sa simplicité d'élaboration, dont son principe est de comparer trois modultrices sinusoïdales décalées de 120° entre elles, avec une onde triangulaire appelé porteuse. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs de l'onduleur. Le schéma de principe de la MLI naturelle est représenté dans la figure suivante :

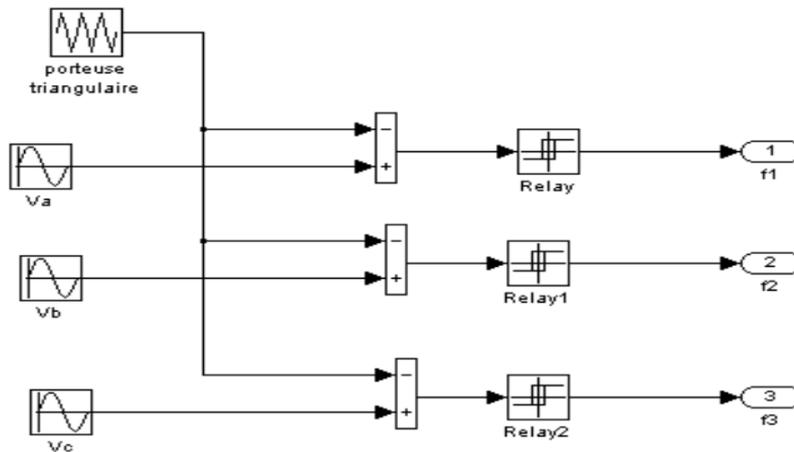


Figure III.4 Schéma de principe de la MLI naturelle.

III.6) Résultats de simulation

On présente les résultats de simulation de la chaîne de conversion avec la commande proposée sous l’environnement MATLAB/SIMULINK. On applique un profil du vent (vitesse variable) illustré dans la figure (III.5) Les figures (III.6), (III.7), (III.8), (III.9), (III.10), et (III.11) présentent, le glissement, la vitesse mécanique, le couple électromagnétique, la puissance active rotorique, les courants rotorique, et les tensions du l’onduleur respectivement. Les paramètres de la MADA et du régulateur sont donnés en annexe.

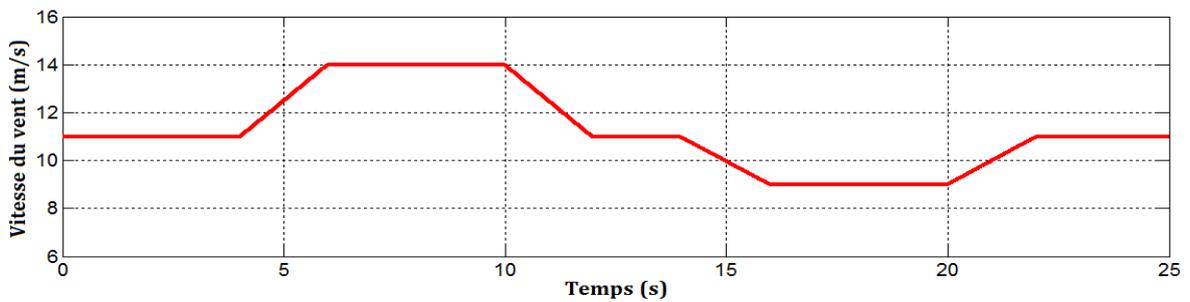


Figure III.5 Allure de la vitesse du vent.

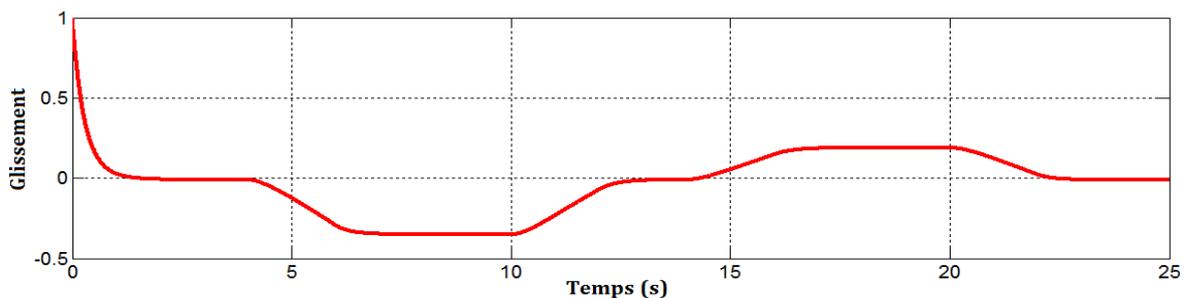


Figure III.6 Allure de glissement de la MADA.

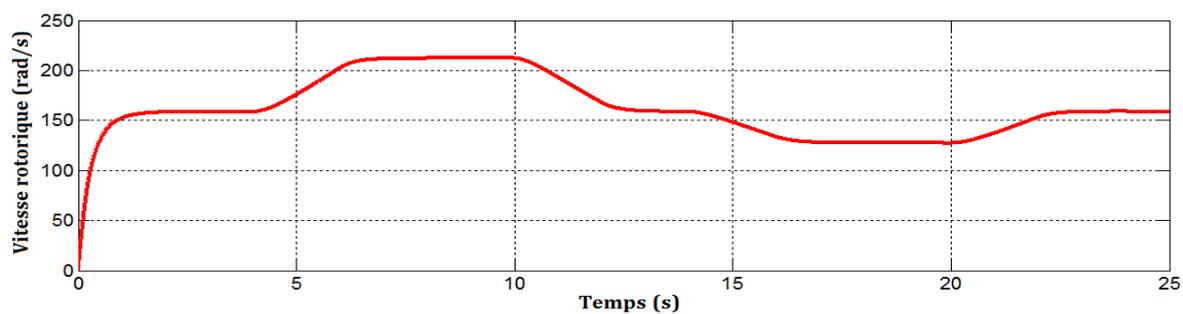


Figure III.7 Allure de vitesse rotorique.

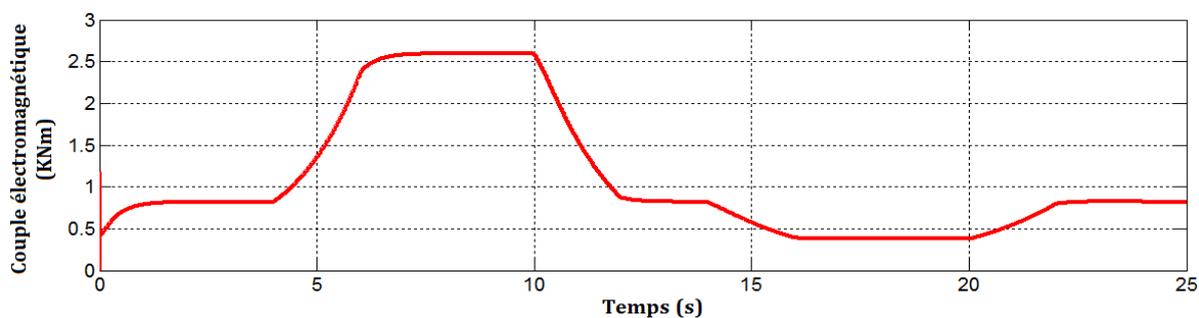


Figure III.8 Allure de couple électromagnétique.

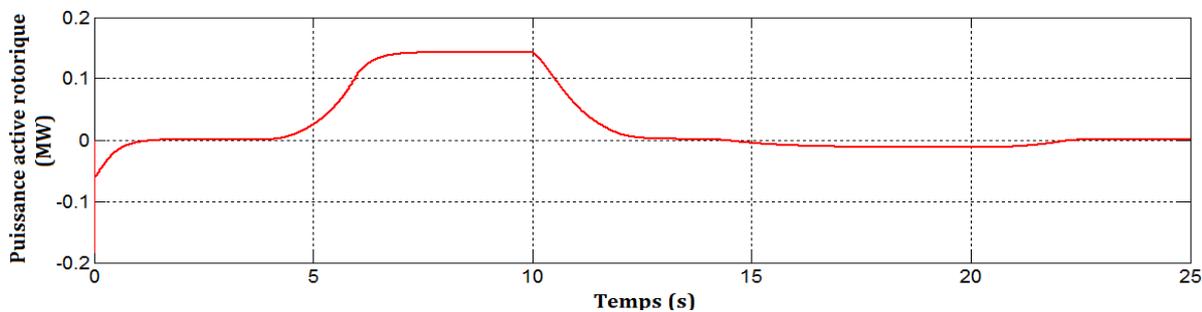


Figure III.9 Allure de la puissance active.

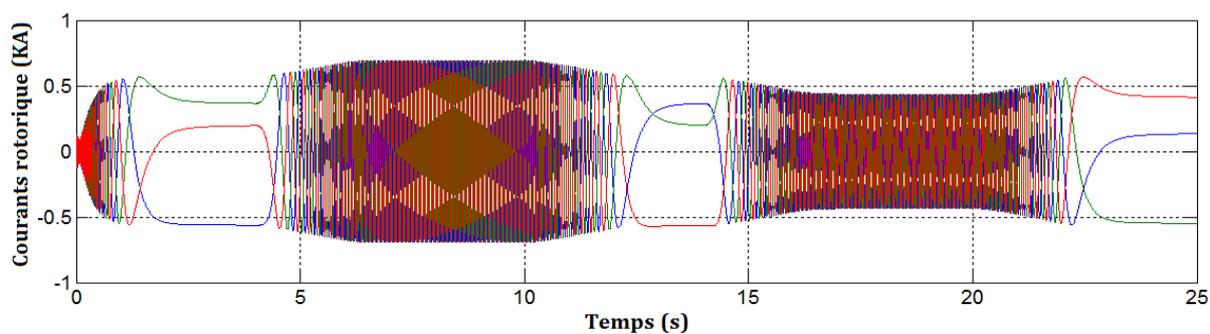


Figure III.10 Allure des courants rotoriques.

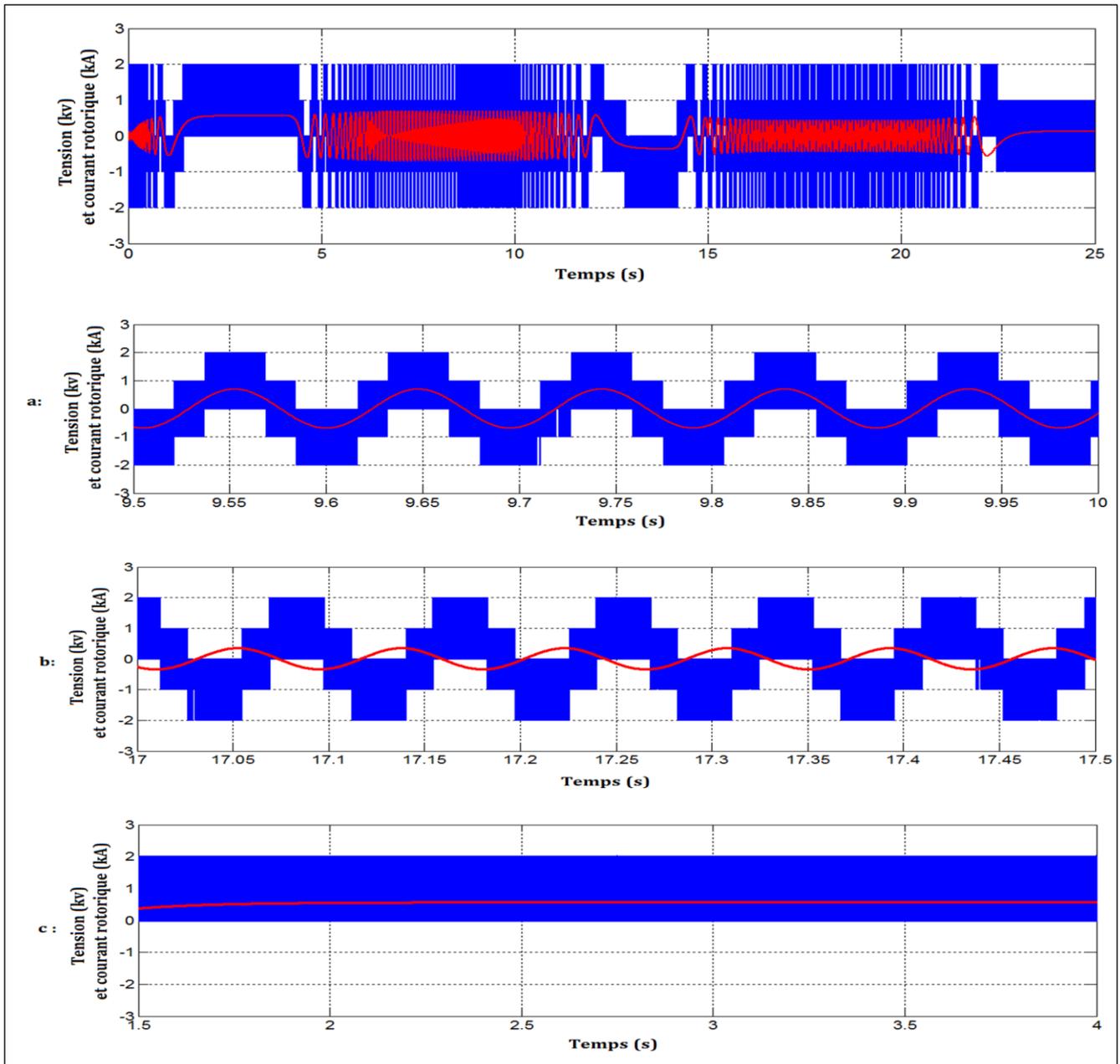


Figure III.11 Allure de courant et tension rotorique.

Avec :

- a : $g < 0$ fonctionnement hyper synchrone.
- b : $g > 0$ fonctionnement hypo-synchrone.
- c : $g = 0$ fonctionnement synchrone.

On constate que pour un fonctionnement hyper synchrone ($g < 0$), la MADA absorbe la puissance active, et pour un fonctionnement hypo-synchrone ($g > 0$) la puissance active rotorique est fournie par la génératrice, Tandis que dans un fonctionnement synchrone ($g = 0$) la puissance active rotorique représente les pertes joule rotorique. Ainsi on remarque qu'il existe un déphasage entre la tension et le courant de l'onduleur.

III.6.1) Test de poursuite de trajectoire

Les résultats obtenus par la simulation de la commande RST montrent que :

- les performances de poursuites de la puissance active statorique et celle transmise au réseau sont très satisfaisantes. voir les figures (III.12) et (III.13).
- La puissance réactive statorique est maintenue nulle. Voir la figure (III.14).

L'erreur est représentée sur la figure (III.15).

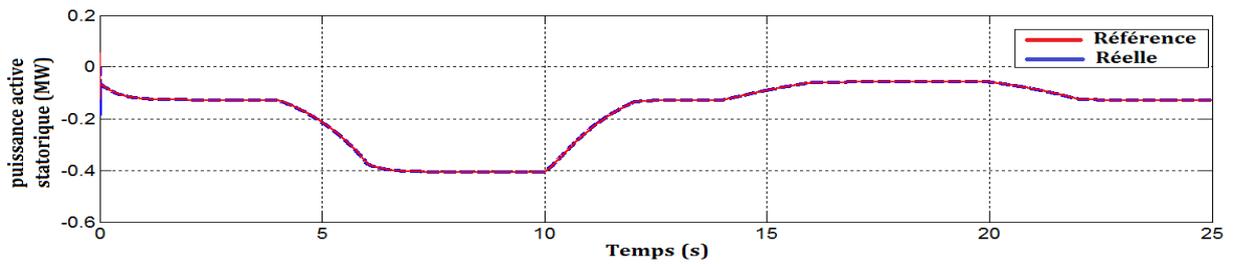


Figure III.12 Allure de la puissance active statorique.

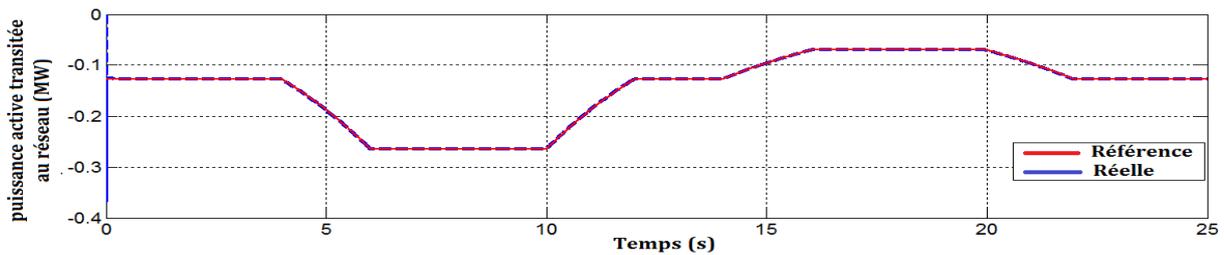


Figure III.13 Allure de la puissance active transmise au réseau.

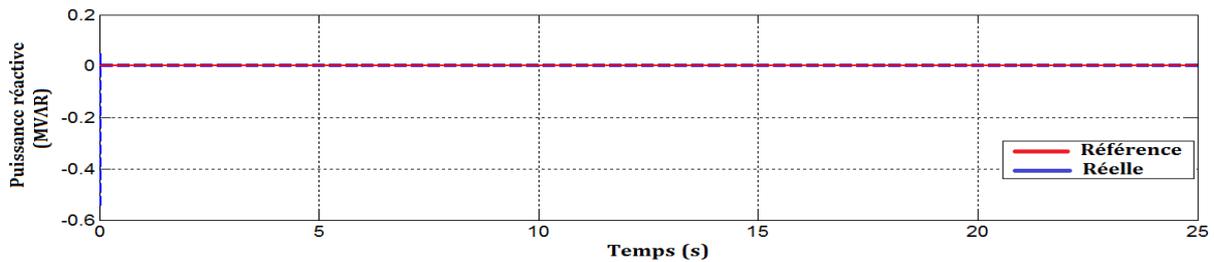


Figure III.14 Allure de la puissance réactive statorique.

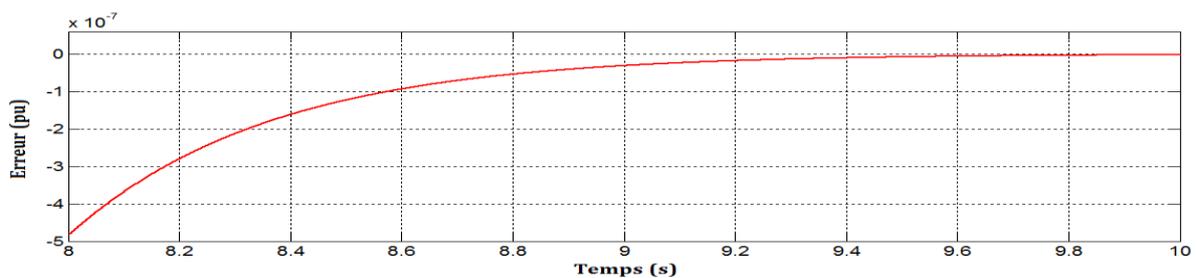


Figure III.15 l'erreur de la puissance en (pu).

III.6.2) Test de robustes vis-à-vis des variations paramétrique

Plusieurs phénomènes physiques (température...) provoquent des variations des paramètres de la machine asynchrone. Pour faire ce test on fait varier les deux paramètres du modèle de la MADA utilisée (résistance rotorique et le coefficient de frottement):

$$\text{À } t = 12.5\text{s} \quad R_r = 0.3 * R_r'$$

$$\text{À } t = 12.7\text{s} \quad f = 0.3 * f'$$

On constat que malgré les variations paramétriques, la performance de poursuite de trajectoire reste satisfaisante. Voir les figures (III.16).

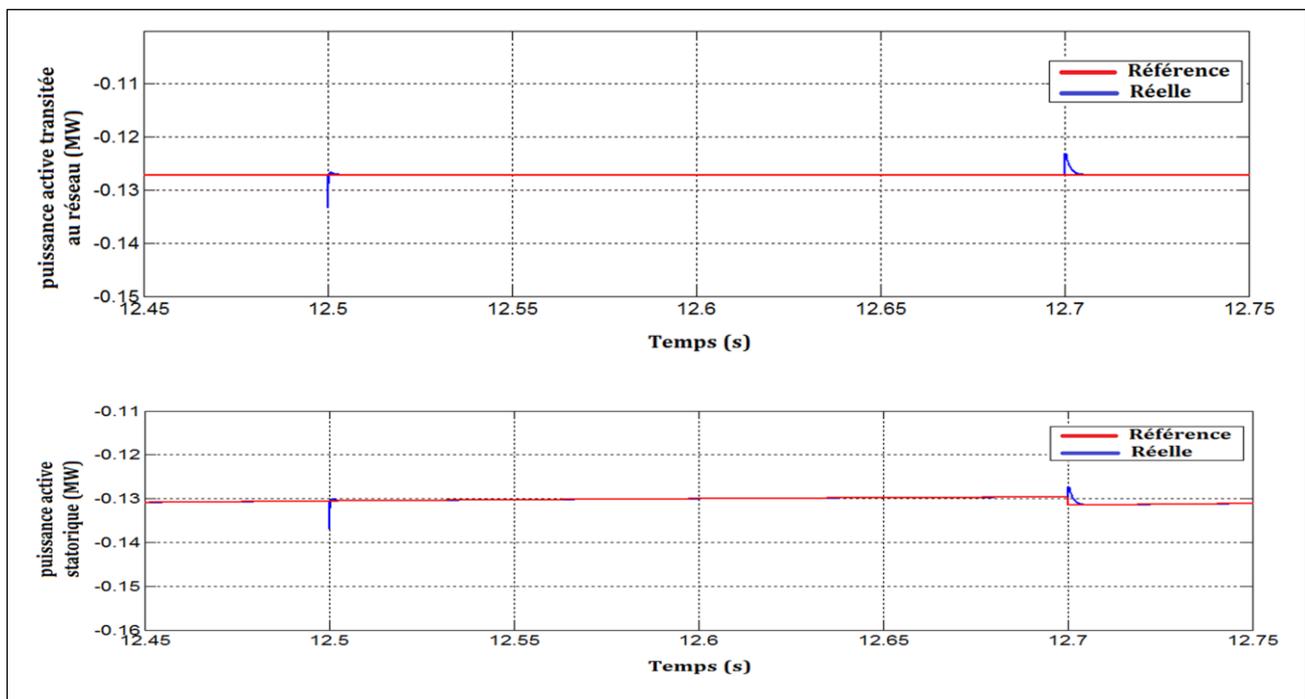


Figure III.16 Allure des variations paramétriques.

III.6.3) Test de l'influence des paramètres de régulateur sur les grandeurs dynamique de la machine

Pour évaluer l'influence des paramètres de régulateur sur la puissance transmise au réseau, l'erreur et le couple électromagnétique de la MADA, nous allons faire varier les deux paramètres T_c et T_f du régulateur. Les résultats du test sont représentés respectivement sur les figures (III.17), (III.18) et (III.19).

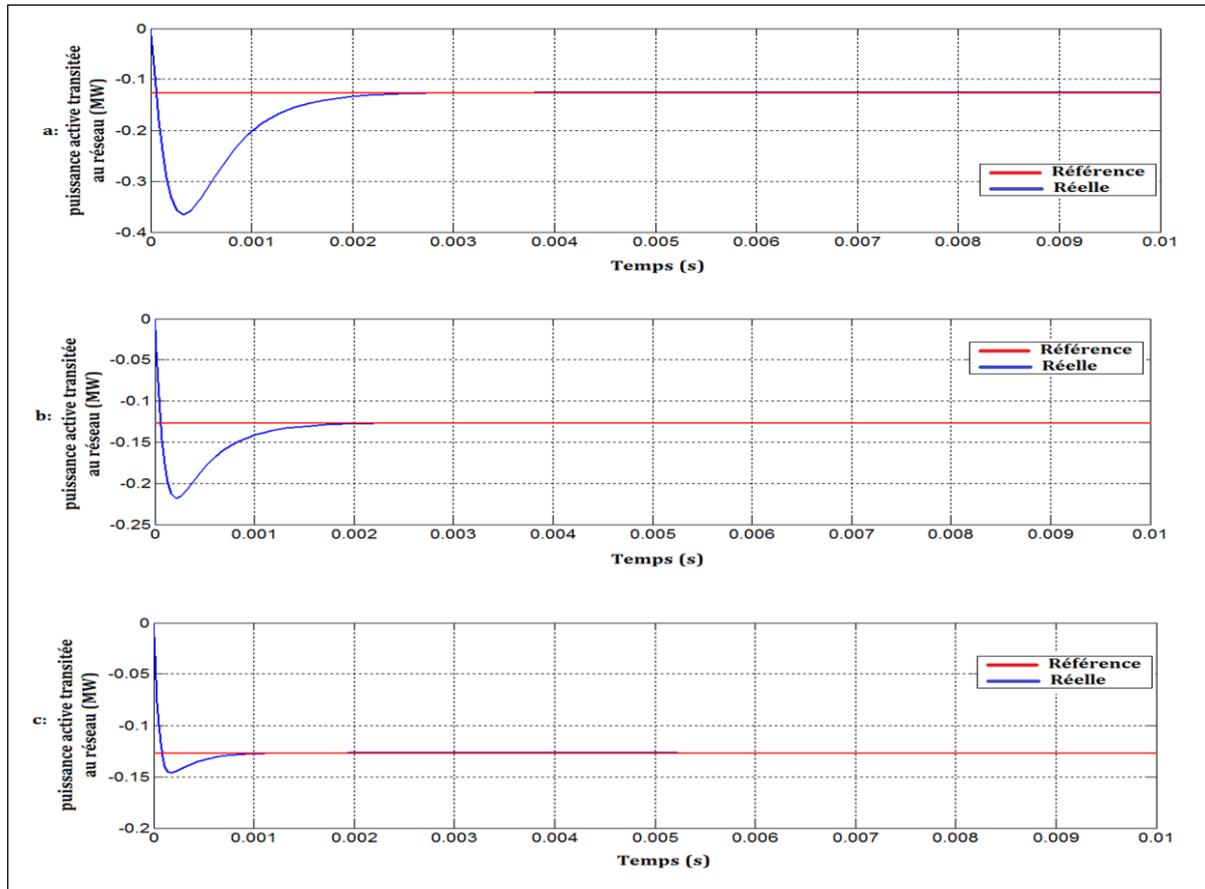


Figure III.17 Influence des paramètres de régulateur sur la puissance transmise au réseau.

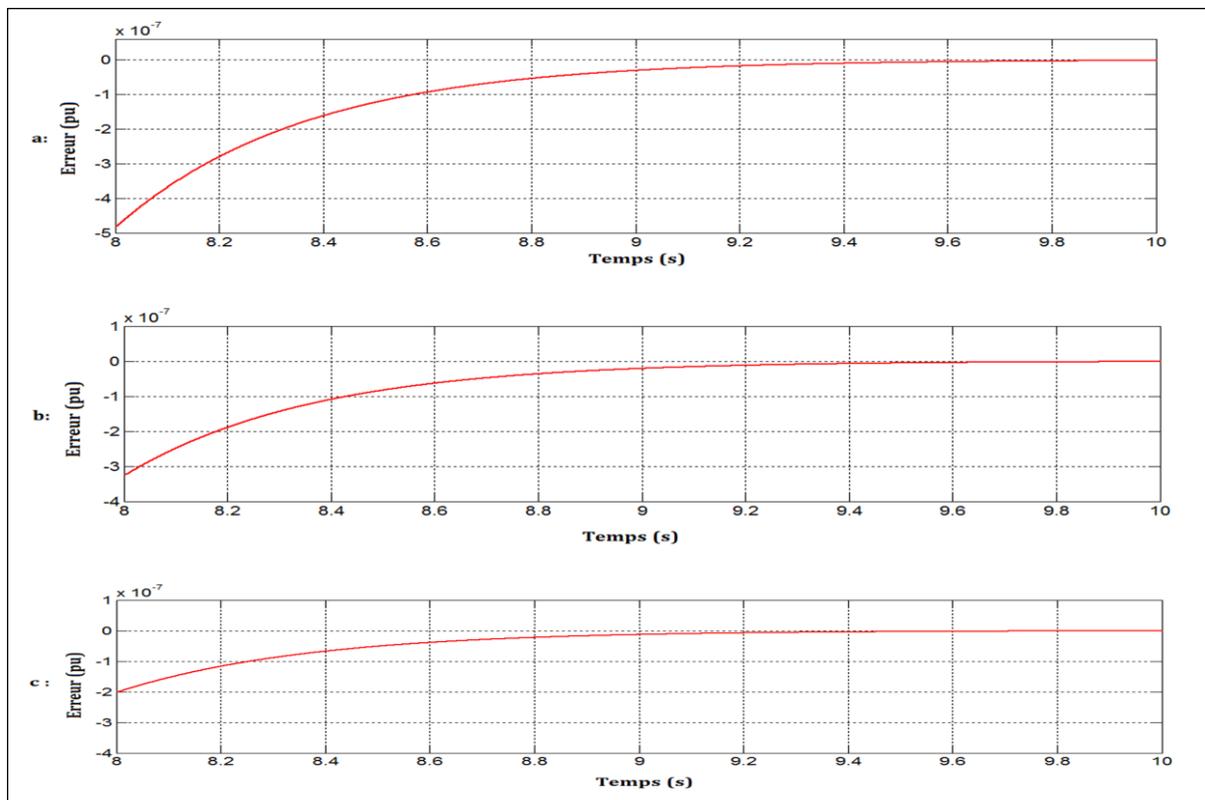


Figure III.18 Influence des paramètres de régulateur sur l'erreur.

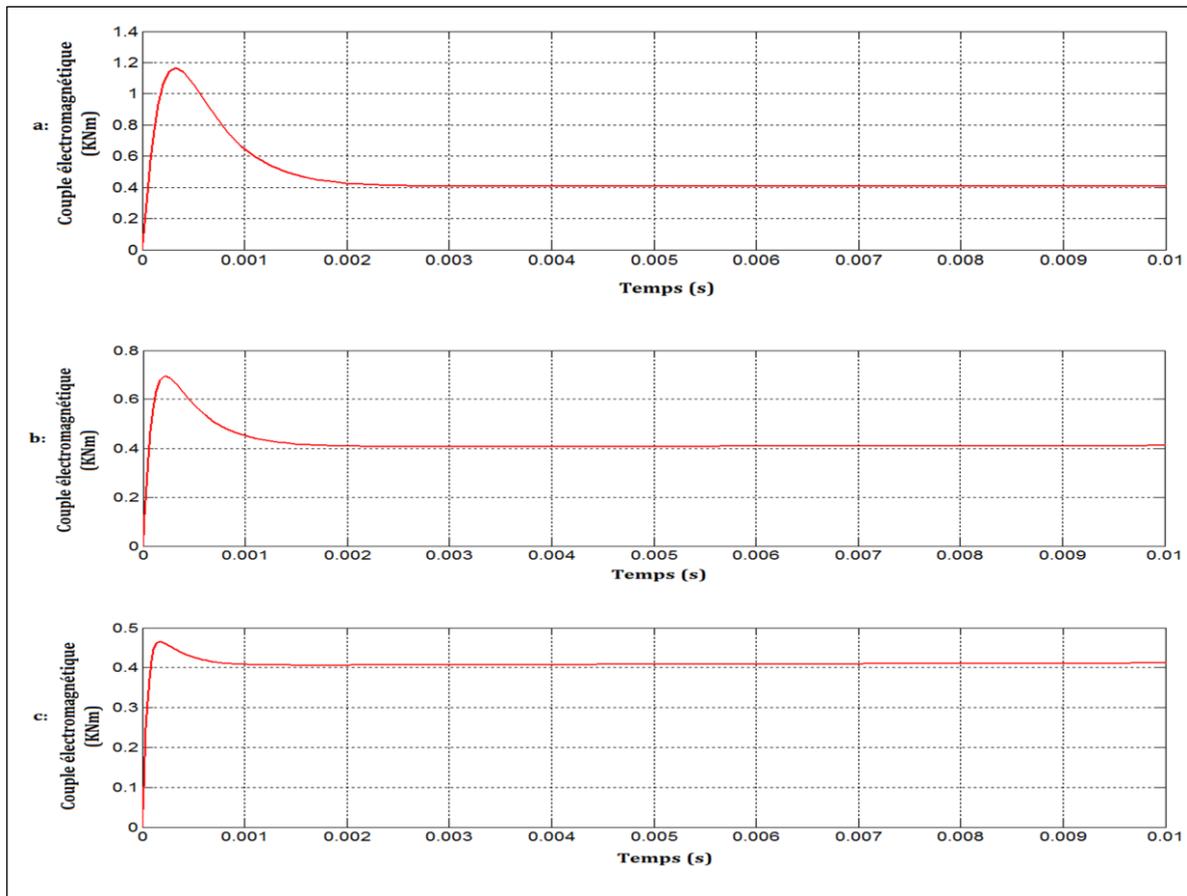


Figure III.19 influence des paramètres de régulateur sur le couple électromagnétique.

Avec :

- **a** : c'est le premier régulateur : $T_c = \frac{-1}{16 \text{ Pa}}$ et $T_f = \frac{-1}{192 \text{ Pa}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(p) = 56804,90027 \\ S(p) = p^2 + 2281.71021p \\ R(p) = 73.48305779p + 56804,90027 \end{array} \right.$$

- **b** : c'est le deuxième régulateur : $T_c = \frac{-1}{20 \text{ Pa}}$ et $T_f = \frac{-1}{360 \text{ Pa}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(p) = 249905.3652 \\ S(p) = p^2 + 41283.78691p \\ R(p) = 247.2483891p + 249905.3652 \end{array} \right.$$

- **c** : c'est le troisième régulateur : $T_c = \frac{-1}{30 \text{ Pa}}$ et $T_f = \frac{-1}{600 \text{ Pa}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(p) = 1041272.355 \\ S(p) = p^2 + 68657.3398 p \\ R(p) = 681.3193685 p + 1041272.355 \end{array} \right.$$

Le tableau suivant récapitule les différentes mesures obtenues par la variation des paramètres de régulateur.

	Dépassement de la puissance (%)	Temps de réponse (ms)	Erreur de la puissance (pu)	Couple de démarrage(KNm)
Régulateur a	66.66	2.1	$-4.8 \cdot 10^{-7}$	1.169
Régulateur b	42.85	1.7	$-3.224 \cdot 10^{-7}$	0.695
Régulateur c	17.86	0.8	$-2.006 \cdot 10^{-7}$	0.4656

À partir des figures (III.17), (III.18) et (III.19), on peut déduire que :

- Pour augmenter le temps de réponse il faut augmenter T_c .
- Pour réduire l'erreur il faut augmenter T_c , ou T_c et T_f au même temps.
- Pour réduire le dépassement il faut augmenter T_c et T_f au même temps.

III.7) Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande en puissance de la machine asynchrone double alimentée, cette stratégie permet de découpler les deux axes directs et quadrature de la machine, ce qui nous a facilité la synthèse de régulateur linéaire RST basé sur la théorie du placement des pôles robustes et qui assure un très bon rejet des perturbations. Le but de ce régulateur est de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la génératrice et le réseau.

L'avantage d'utiliser un régulateur de type RST est la possibilité d'améliorer considérablement les performances de la poursuite de trajectoire et le rejet des perturbations, ainsi l'amélioration de la robustesse vis-à-vis des variations des paramètres de la machine.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif du travail effectué dans ce mémoire est l'application de la commande linéaire RST pour la commande d'une machine asynchrone à double alimentation intégrée dans une chaîne de conversion éolienne. Pour ce faire une modélisation complète du système éolienne global a été réalisée puis simulé à l'aide de logiciel Matlab Simulink.

La mise en œuvre d'un algorithme MPPT, nous a permis d'élaborer les consignes de commande de manière à maximiser la puissance extraite du vent.

Les résultats de simulation de système étudié montrent la possibilité de résoudre le problème de poursuite de trajectoires des puissances actives et réactive, pour les différents modes de fonctionnement de la MADA, le test de variations paramétriques a montré le degré de robustesse de la commande RST.

La commande par régulateur RST présente l'avantage d'une mise en œuvre très simple puisqu'elle repose sur un principe formel de manipulation des polynômes permettant de déboucher sur des fonctions de transfert faciles à traiter.

Ce travail peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble des chaînes de conversion d'éolienne, parmi les perspectives envisagées :

- Etablissement du modèle de la MADA avec la prise en compte de la saturation et de la résistance statorique.
- Étudier et synthétiser la commande de la MADA en utilisant d'autres régulateurs et faire comparaison avec la comparaison avec le régulateur étudié.
- Validation expérimentales de la commande.

Bibliographie

REFERNECES BIBLIOGRAPHIQUE

[1] **A.BOYETTE** : << Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne >> Thèse de doctorat université Nancy 2006.

[2] **F.POITIERS** : << Étude et Commande de Génératrices Asynchrone pour l'utilisation de l'énergie Éolienne >> Thèse de doctorat université du NANTES 2003.

[3] **A. DAVIGNY** : << participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie >> thèse doctorat université Lille 1 2007.

[4] **T.GHENNAM** : << supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation >>. Thèse de doctorat école militaire polytechnique d'Alger 2011.

[5] **A.CHIKHI** : << conception d'une commande floue directe du couple (FDTC) de la machine asynchrone basée sur la SVM >>. Thèse de doctorat université BANTA 2013.

[6] **K.KOUZI** : << contribution des techniques de la logique floue pour la commande d'une machine à induction sans transducteur rotatif >>. Thèse de doctorat université BANTA 2008.

[7] **B.VULTURESCU** : << contribution à la commande robuste des systèmes électromécaniques par la méthode du modèle de comportement >> thèse doctorat université du Lille 2002.

[8] **K.OUARI** : << Commande des machines électriques alimentées par onduleur de tension >> thèse doctorat université Bejaïa 2013.

[9] **N.benyahia, K.Srair, S.M.Mimoune** : << Commande de la machine asynchrone par orientation du flux statorique. >> Courrier du savoir – N°06, juin 2005, pp.147-150.

Annexe A

A.1 Transformation de Park

La complexité et la non linéarité des équations précédentes rendent leur résolution très difficile, alors il est indispensable d'appliquer la transformation de Park pour avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants ce qui va faciliter sa résolution.

Les relations entre les grandeurs triphasées et les grandeurs biphasées s'écrivent matriciellement comme suit :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = A(\theta) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Avec $A(\theta)$: la matrice de transformation de Park donnée par :

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

Et la transformation inverse de Park est donnée par :

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

θ : Est l'angle de rotation électrique entre l'axe d du repéré diphasé et le repéré fixe lié à la phase du stator.

Le transfert biphasé vers triphasé se fait par : $\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [A(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}$

Et le transfert triphasé vers biphasé ce fait par :
$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = [A(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

En appliquant cette transformation aux équations précédentes (tension et flux) de la MADA on obtient :

Equation électrique

La loi de Faraday et la loi d'ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages.

Pour les phases statorique on a :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d \phi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d \phi_{sb}}{dt} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d \phi_{sc}}{dt} \end{cases}$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

Donc l'équation générale du stator est :

$$[v_{sabc}] = [R_s] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}]$$

Avec :

$$[v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de tensions statorique}$$

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de courants statorique}$$

$$[\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de flux d'enroulement statorique}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrices des r\u00e9sistances statorique}$$

Pour les phases rotorique on a :

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d \phi_{ra}}{dt} \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d \phi_{rb}}{dt} \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d \phi_{rc}}{dt} \end{cases}$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Donc l'\u00e9quation g\u00e9n\u00e9rale du rotor est :

$$[v_{rabc}] = [R_r] [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}]$$

Avec :

$$[v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de tensions rotorique}$$

$$[i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de courants rotorique}$$

$$[\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de flux d'enroulement rotorique}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} : \text{Matrices des r\u00e9sistances rotorique}$$

Equation magnétique

Les équations magnétique de la MADA sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{sabc} = [L_{ss}] [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}] \\ \Phi_{rabc} = [L_{rr}] [i_{rabc}] + [M_{rs}] [i_{sabc}] \end{cases}$$

Avec :

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

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

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

$[L_{ss}]$, $[L_{rr}]$: Matrices d'inductances statorique et rotorique.

$[M_{ss}]$: Matrices d'inductances mutuelles, $[M_{sr}]^t = [M_{rs}]$

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

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

M_{sr} : Maximum inductances mutuelles entre une phase statorique et rotorique

D'après les expressions précédentes, on aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{sabc}] \\ [i_{rabc}] \end{bmatrix}$$

Finalement

$$\begin{cases} [v_{sabc}] = [R_s] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [L_{ss}] [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}] \\ [v_{rabc}] = [R_r] [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [L_{rr}] [i_{rabc}] + [M_{sr}] [i_{sabc}] \end{cases}$$

Annexe B

Annexe

Paramètres de la turbine éolienne [8]	
Rayon de l'hélice R	: 35m
Nombre de pales	: 3
Gain de multiplicateur de vitesse G	: 90
Inertie totale J	: 50 kg/m ²
Coefficient de frottement visqueux	: 7.1*10 ⁻³ N ms/rd
Paramètres de la MADA	
Tension d'alimentation Vs	: 690 V 50 Hz
Puissance nominale P _n	: 1.5 MW
Résistance d'enroulement statorique R _s	: 0.012 Ω
Résistance d'enroulement rotorique R _r	: 0.021 Ω
Inductance cyclique statorique L _s	: 13.732 mH
Inductance cyclique rotorique L _r	: 13.703 mH
Inductance magnétisante M	: 13.528 mH
Nombre de paire de pôles p	: 2
Paramètres de Régulateur RST	
$T(p) = 56804 .90027$ $S(p) = p^2 + 22281.71021 p + 0$ $R(p) = 73.48305779 p + 56804.90027$	