

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOHAMMED KHIDER - BISKRA -
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire de magister
En Electrotechnique

Option : Electricité industrielle

Préparé au Laboratoire : **LGEB** (Labo. de Génie Electrique de Biskra)

Thème

**Modélisation d'une chaîne de conversion
basée sur une machine asynchrone
à double alimentation**

Présenté par

TAMAARAT Azzouz

Ingénieur en Electrotechnique, Option : Réseau Electrique

Soutenu le : 15/03/2009

Devant le Jury composé de :

ZOUZOU Salah Eddine	Professeur	Univ. Biskra	Président
BENAKCHA Abdelhamid	Maitre de conférences	Univ. Biskra	Rapporteur
ABDESSEMED Rachid	Professeur	Univ. Batna	Examineur
BOUREK Amor	Maitre de conférences	Univ. Biskra	Examineur

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

MADA :	Machine asynchrone à double alimentation.
M.L.I :	Modulation de largeur d'impulsions.
CCS :	Convertisseur côté statorique.
CCR :	Convertisseur côté rotorique.
IGBT:	Insulated Gate Bipolar Transistor.
f.m.m :	Force magnétomotrice.
R_d :	Régulateur proportionnel intégral PI selon l'axe d .
R_q :	Régulateur PI selon l'axe q .
MPPT:	Maximum Power Point Tracking.
HT :	Haute Tension.
THT :	Très Haute Tension.
R_s :	Résistance des enroulements statoriques.
R_r :	La résistance des enroulements rotoriques.
l_s :	Inductance propre d'une phase statorique.
l_r :	Inductance propre d'une phase rotorique.
L_r :	Inductance cyclique d'un phase rotorique.
L_s :	Inductance cyclique d'un phase statorique.
M :	Inductance mutuelle cyclique entre les enroulements statorique et rotorique.
M_s :	Inductance mutuelle entre deux phases du stator.
M_r :	Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.
M_{sr} :	Inductance mutuelle maximale entre le stator et le rotor.
R_f	Résistance d'un filtre.
L_f :	Inductance d'un filtre.
r :	Résistance de la ligne.
x :	Réactance de la ligne.
Z_{ch} :	Impédance d'une charge.

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

f_r :	Fréquence rotorique.
f_s :	Fréquence statorique.
C :	Valeur de la capacité sur le bus continu.
i_c :	Courant traversant le condensateur.
i_{red} :	Courant à la sortie du redresseur MLI.
i_{ond} :	Courant à l'entrée de l'onduleur MLI.
u_c :	Tension aux bornes du condensateur (tension du bus continu).
f_1, f_2, f_3 :	Séquences pour les signaux de commande des interrupteurs.
v_{md} et v_{mq} :	Composantes directe et en quadrature des tensions modulées à la sortie de l'onduleur.
ϕ_{ds} :	Flux statorique selon l'axe d .
ϕ_{qs} :	Flux du stator selon l'axe q .
P_v :	Puissance du vent.
P_m :	Puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur.
ρ :	Densité de l'air.
S :	Section de la surface active balayée par les pales
V_v :	Vitesse du vent
λ :	Rapport d'avance ou le ratio (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent).
β :	Angle de calage des pales d'un aérogénérateur.
R :	Rayon des pales de l'aérogénérateur.
K :	Gain du multiplicateur.
f :	Frottements mécaniques.
$J_{turbine}$:	Moment d'inertie de l'arbre de la turbine.
J_g :	Moment d'inertie de l'arbre de la génératrice.
J :	Moment d'inertie total sur le rotor de la génératrice.
C_p :	Coefficient de puissance.
C_{pmax} :	Coefficient maximal de puissance.

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

λ_{opt} :	Vitesse spécifique optimale pour un rendement aérodynamique maximal.
C_C :	Coefficient de couple.
C_T :	Couple théorique produit par l'éolienne.
ω_s :	Pulsation du réseau (pulsation statorique).
Ω_s :	Vitesse angulaire de synchronisme.
$\tilde{\Omega}_{Turb}$:	Vitesse angulaire estimée de la turbine
ω_r :	Pulsation des grandeurs électriques au rotor.
Ω_{mec} :	Vitesse angulaire du rotor de la MADA.
θ :	Angle entre le repère statorique et le repère rotorique.
g :	Glissement du rotor par apport au stator de la machine.
N :	Vitesse de rotation en (tr/min).
p :	Nombre de paires de pôles.
t :	Temps.
P :	Opérateur de Laplace (p)
v_s :	Tension instantanée des phases statoriques.
C_{em} :	Couple électromagnétique.
C_r :	Couple résistant.
C_g :	Couple sur l'arbre du générateur.
C_{turb} :	Couple sur l'arbre de l'hélice.
\tilde{C}_{turb} :	Couple estimé de la turbine.
C_{mec} :	Couple mécanique.
C_{vis} :	Couple des frottements visqueux.
C_{em-reg} :	Couple électromagnétique de réglage.
P_{aer} :	Puissance aérodynamique.
P_s :	Puissance active échangée entre le stator de la machine et le réseau.
P_r :	Puissance active transmise par le rotor de la machine électrique.
P_{sr} :	Puissance active échangée entre le système de la conversion éolienne globale et le réseau.

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

P_{s-ref} :	Puissance active de référence à travers le stator.
P_{sr-ref} :	Puissance active de référence totale échangée entre la machine et le réseau.
Q_s :	Puissance réactive échangée entre le stator de la machine et le réseau.
Q_r :	Puissance réactive échangée entre le rotor de la machine et le réseau.
Q_{sr} :	Puissance réactive échangée entre le système global de conversion éolienne et le réseau.
Q_{s-ref} :	Puissance réactive de référence à travers le stator.
Q_{sr-ref} :	Puissance réactive de référence totale échangée entre la machine et le réseau.
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} :	Tensions simples triphasées au stator de la machine.
v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} :	Tensions simples triphasées au rotor de la machine.
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} :	Courants dans les enroulements statoriques de la machine.
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} :	Courants dans les enroulements rotoriques de la machine.
$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$:	Flux propres circulant dans les enroulements du stator de la machine.
$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$:	Flux propres circulant dans les enroulements du rotor de la machine.
$[P(\psi)]$:	Matrice de transformation de <i>Park</i> .
d, q :	Composantes de <i>Park</i> directe et en quadrature.
$[v_{sdqo}]$:	Vecteurs tensions statorique et rotorique dans le repère de <i>Park</i> .
$[i_{sdqo}], [i_{rdqo}]$:	Vecteurs courants statoriques et rotoriques dans le repère de <i>Park</i> .
$[\phi_{sdqo}], [\phi_{rdqo}]$:	Vecteurs flux statoriques et rotoriques dans le repère de <i>Park</i> .
Ω_{ref} :	Vitesse de référence.
C_{em-ref} :	Couple électromagnétique de référence.
C_{Ω} :	Correcteur de vitesse.
\tilde{C}_g :	Couple estimé sur l'arbre de la génératrice.
$\tilde{\Omega}_{nurb}$:	Vitesse estimée de l'aérogénérateur.
\tilde{V}_v :	Vitesse estimé du vent.

Sommaire

Notations

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

Chapitre I : Principes de conversion de l'énergie éolienne et bref historique sur les aérogénérateurs

I.1 Introduction	5
I.2 - Descriptif et qualités de l'énergie éolienne	5
I.2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	5
I.2.2 Principaux composants d'une éolienne (à axe horizontal)	7
I.3 Notions théoriques sur l'éolienne	9
I.3.1 La conversion aérodynamique et loi de <i>Betz</i>	9
I.3.2 Production d'énergie mécanique	11
I.3.3 Systèmes de régulation mécanique de la vitesse de rotation d'une éolienne.....	12
I.3.4 Les différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable	13
I.4 Les systèmes de conversion électromagnétique de l'énergie éolienne	15
I.4.1 Machines Asynchrones à cage (MAS)	15
I.4.2 Génératrices synchrones	15
I.4.3 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)	16
I.5 Description du fonctionnement de la MADA	18
I.5.1 Structure de la machine.....	18
I.5.2 Mode de fonctionnement de la MADA.....	18
I.6 La connexion au réseau	21
I.7 Conclusion	22

Chapitre II: Modélisation des éléments de la chaîne de conversion

II.1 Introduction	24
II.2 La MADA	24
II.2.1 Modèle généralisé d'une MADA	24
II.2.1.1 Rappel sur la loi de <i>Faraday</i>	25
II.2.1.2 Mise en équation de la partie électrique dans le plan a, b, c	25
II.2.1.3 Modèle de la machine dans le repère de <i>Park</i>	29
II.2.2 Calcul du couple électromagnétique.....	32
II.2.3 La simulation.....	33

II.2.3.1 Essai de la machine asynchrone	33
II.2.3.2 Essai de la machine double alimentée	34
II.3 La partie mécanique	36
II.3.1 La modélisation	37
II.3.1.1 La modélisation du vent	37
II.3.1.2 Modélisation de la turbine	38
II.3.1.3 Modèle du multiplicateur	39
II.3.1.4 Equation dynamique de l'arbre	39
II.3.2 Approximation numérique	41
II.4 Modèles des convertisseurs de puissance	45
II.4.1 Modulation de largeur d'impulsion (MLI)	45
II.4.2 Construction du convertisseur bidirectionnel	47
II.4.2.1 Modèle des convertisseurs de puissance dans le repère naturel	48
II.4.2.2 Modèle du convertisseur de puissance dans le repère effectif (d, q)	50
II.4.3 Modèle du filtre	51
II.4.3.1 Modèle du filtre dans le repère naturel	51
II.4.3.2 Modèle de filtre dans le repère effectif (d, q)	52
II.4.4 Modélisation du bus continu	54
II.5 Conclusion	55
Chapitre III: Commande des puissances active et réactive de la MADA par des régulateurs PI	
III.1 Introduction	57
III.2 Stratégie de commande de la MADA	57
III.3 Contrôle des puissances active et réactive	58
III.3.1 Commande vectorielle de la MADA (en génératrice)	58
III.3.1.1 Rappel du modèle diphasé de la MADA	58
III.3.1.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	60
III.3.1.3 Relations entre tensions et courants rotoriques	61
III.3.1.4 Principe général et simplifié de la commande	63
III.3.2 Commande vectorielle par le convertisseur CCR	65
III.4 Les tests de la commande	66
III.4.1 Premier essai (vitesse de rotation fixe)	66

III.5 Fonctionnement dans la deuxième partie des zones de fonctionnement	69
III.5.1 Optimisation de la conversion énergétique : Zone II - (<i>charge partielle</i>)	70
III.5.2 Le contrôle avec asservissement de la vitesse	70
III.5.3 deuxième essai (vitesse du vent variable avec introduction de la MPPT)	72
III.5.4 Troisième essai (La robustesse de la commande)	78
III.5.4.1 Robustesse vis-à-vis de la vitesse du vent	78
III.5.4.2 Robustesse vis-à-vis le changement de l'inertie	82
III.5.5 Quatrième essai (correction du facteur de puissance)	85
III.6 Conclusion	90
Conclusion générale	91
Annexe	94
Résumé	97
Bibliographie	98

Introduction générale

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années [Chi 2008] [Ack 2002 a]. En effet, des moulins à vent à axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres afghanes (7 siècles A.C) pour moulinier du grain. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. [Cam 2003].

La première production de l'énergie électrique à partir de la vitesse du vent a été faite en 1887 par *Charles Brush*. Cette production est basée sur une génératrice à courant continu de puissance 12 kW pour charger les batteries. La machine d'induction a été utilisée la première fois en 1951 dans la production de l'énergie éolienne [Sot 0000].

A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie durant les 1^{ère} et 2^{ème} guerres mondiales pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2^{ème} guerre mondiale. C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes [Mul 2002 a]. Aujourd'hui, cette filière d'énergie connaît un développement rapide sur le plan technique et économique. La capacité de cette dans le monde est estimée être plus de 160 GW [Chi 2008].

Le coût de l'énergie éolienne est en baisse constante depuis plusieurs années. Ce prix dépend de nombreux facteurs et est, par conséquent, différent d'un pays à l'autre. Malgré tout, on peut dire que le coût de cette énergie est amélioré ces dernières années [Cam 2003].

Actuellement les aérogénérateurs produisent environ 0,4 % de l'électricité mondiale selon les sites, peut être plus, mais le taux de croissance est élevé et 2,5 % de l'énergie électrique pourraient être d'origine éolienne vers 2010 [Mul 2002] et 10 % vers 2020 [Mul 2002 a]. La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

- L'avantage principal des systèmes éoliens est le fait que l'énergie primaire est gratuite.
- L'énergie éolienne est une énergie qui respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- C'est une source d'énergie locale.
- C'est l'énergie la moins chère de toutes les énergies renouvelables [Avi 1999].

Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut prendre en compte [Cam 2003]:

- l'impact visuel,

- le bruit,
- l'impact sur les oiseaux.

Le système étudié ici est constitué d'un aérogénérateur tripales, à axe horizontal, connecté au réseau par une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Cette machine est donc un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé, alors que les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance AC-AC bidirectionnels en courant.

On peut résumer notre travail à trois objectifs à atteindre :

– *La réduction du coût de l'aérogénérateur:*

Avec des éoliennes à vitesse variable connectées au réseau à travers une seule voie par des convertisseurs de puissance, l'inconvénient principal est le surcoût introduit par l'incorporation de ses convertisseurs. Ce coût dépend de la taille des convertisseurs de fréquence ainsi que de leurs systèmes de refroidissement. L'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné permet de minimiser ces facteurs car la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et autour de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor [Iov 2003]. Les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la puissance rotorique qui représente 20 à 30 % de la puissance nominale, ce qui présente un intérêt économique par la minimisation des pertes et le coût [Abd 2003 a] et par conséquent la minimisation du coût de ce type d'énergie.

– *Maximisation du rendement énergétique :*

Ce facteur est directement lié à la stabilité du système mécanique, et par conséquent, la minimisation de sa fatigue. L'objectif en charge partielle est donc de capter le maximum d'énergie possible. Un rendement énergétique maximal est assuré pour un rendement aérodynamique maximal. Ce rendement dépend de la vitesse spécifique, c'est à dire du rapport entre la vitesse en bout de pale (proportionnelle à la vitesse de rotation de l'aéroturbine) et de la vitesse du vent. Pour optimiser le captage de l'énergie contenue dans le vent dans cette zone (charge partielle), la commande de l'éolienne doit se faire de sorte que la vitesse de rotation du rotor s'adapte à la vitesse du vent afin que la vitesse spécifique soit optimale.

– *Amélioration de la qualité de la puissance électrique :*

Jusqu'il y a quelques années, la plupart des aérogénérateurs fonctionnaient à vitesse fixe, avec un générateur asynchrone à cage d'écureuil. Ce type de générateur consomme de la

puissance réactive. L'installation de parcs éoliens posait des problèmes pour le réseau électrique, notamment pour des réseaux faibles qui ne pouvaient pas fournir cette énergie réactive [Ack 2002 a]. La machine électrique de l'aérogénérateur (MADA) étudié ici permet de contrôler l'échange de puissance réactive avec le réseau.

Ce travail est structuré comme indiqué ci-dessous.

La première partie du premier chapitre rappelle les notions élémentaires de fonctionnement d'un système éolien et les principales équations pour décrire la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les stratégies de fonctionnement d'une éolienne sont également décrites. Ces rappels sont suivis par un bref résumé sur la conversion électromagnétique à travers les différents types des génératrices utilisées et les convertisseurs qui leurs sont associés.

Le deuxième chapitre consiste en la modélisation séparée des éléments de la chaîne de conversion (la partie mécanique, la MADA et les convertisseurs électroniques). Des résultats de simulation sont obtenus. Cette simulation est importante car elle permet de tester chaque partie du modèle indépendamment afin de comprendre le comportement des éléments face au système général.

Le troisième et dernier chapitre analyse l'ensemble de cette chaîne pour la première zone de fonctionnement avec une commande mécanique fixée à un angle de calage $\beta = 1$. Nous commençons ce chapitre par présenter la commande vectorielle qui nous permet de commander de façon indépendante les puissances active et réactive de la chaîne de conversion éolienne. Les consignes de la puissance active sont directement liées à la vitesse de rotation de l'éolienne selon l'algorithme d'extraction du maximum de puissance (MPPT : Maximum Power Point Tracking) dans cette zone de fonctionnement. Les consignes de la puissance réactive sont données dans le but d'avoir un facteur de puissance constant afin de fournir au réseau ou absorber de ce dernier une puissance réactive réglable pendant toute la durée de fonctionnement.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale et des perspectives de ce travail.

Chapitre I

**Principes de conversion de
l'énergie éolienne et bref
historique sur les aérogénérateurs**

I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [Car 2001 a]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. [Poi 2003 a].

I.2 - Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

I.2.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. 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 [Poi 2003 a].

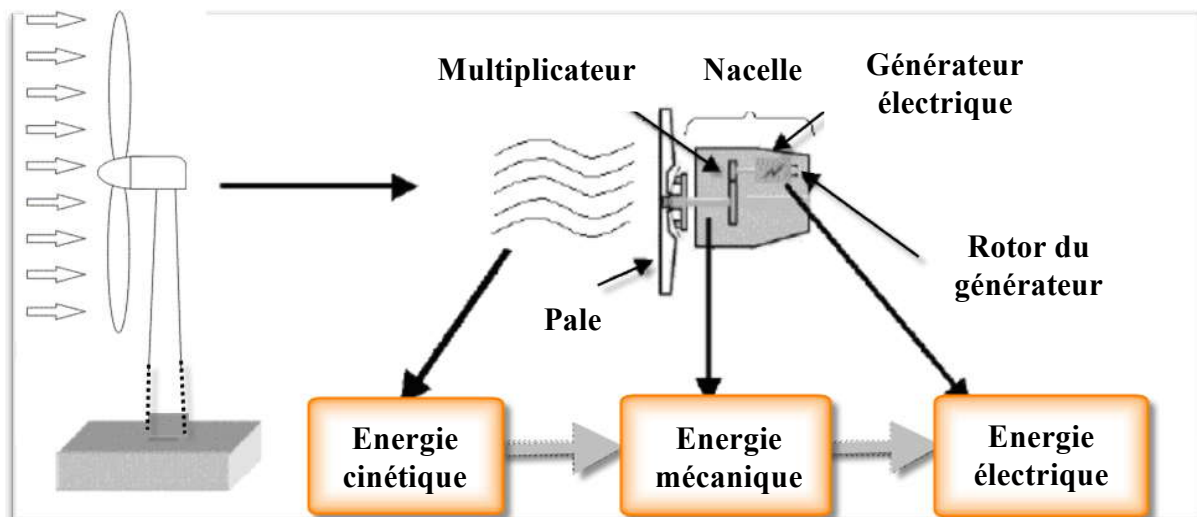


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

On distingue deux grands types d'éoliennes :

-Les éoliennes à axe vertical : ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

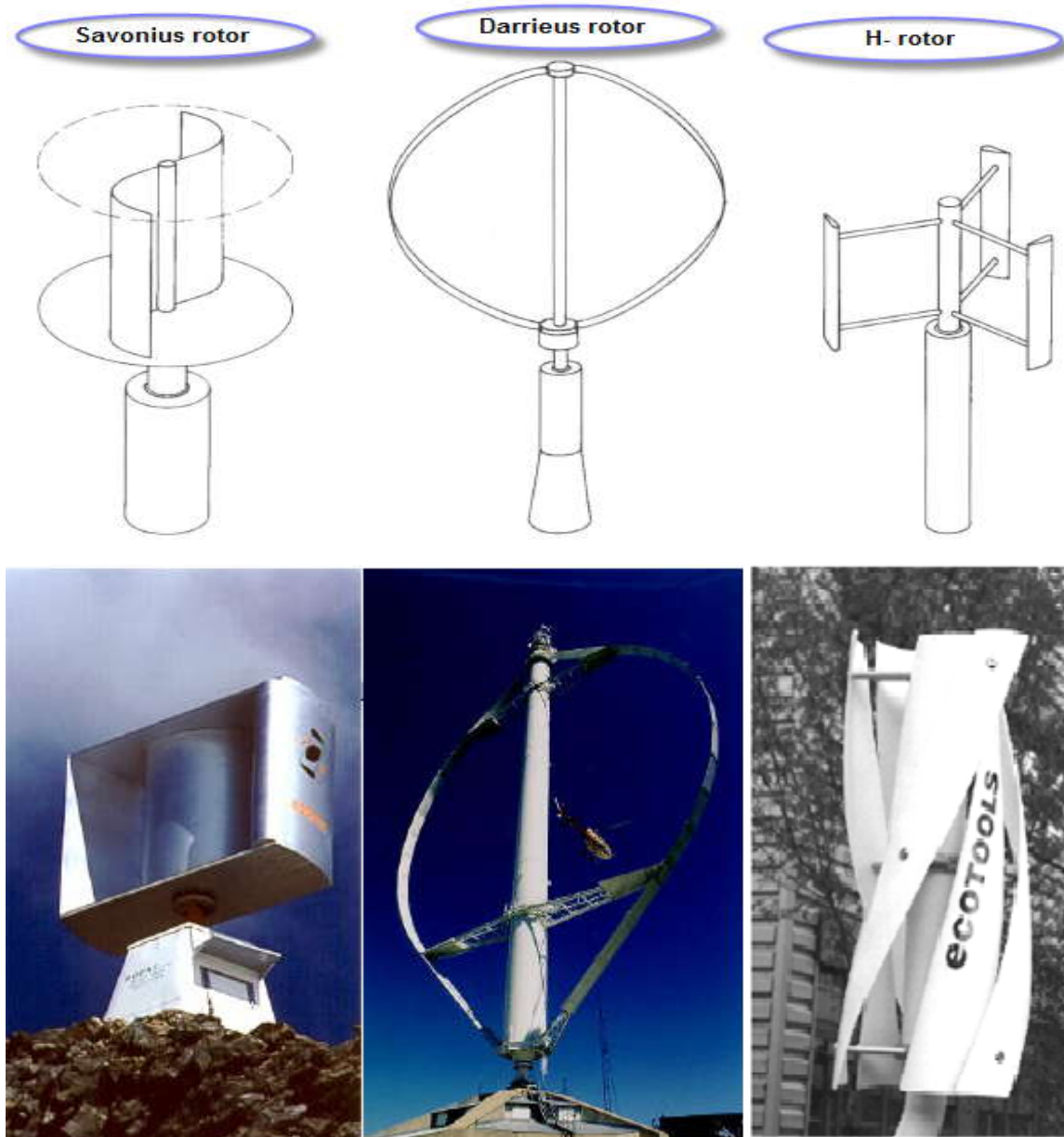


Figure I.2 : Eoliennes à axe vertical [Ger 2002]

-Les éoliennes à axe horizontal : Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent, qui sont beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales. Elles présentent un rendement aérodynamique élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Actuellement la plupart des nouvelles turbines du vent sont à axe horizontal [Hok 2004].



Figure I. 3: Eoliennes à axe horizontal [Abd 2007]

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

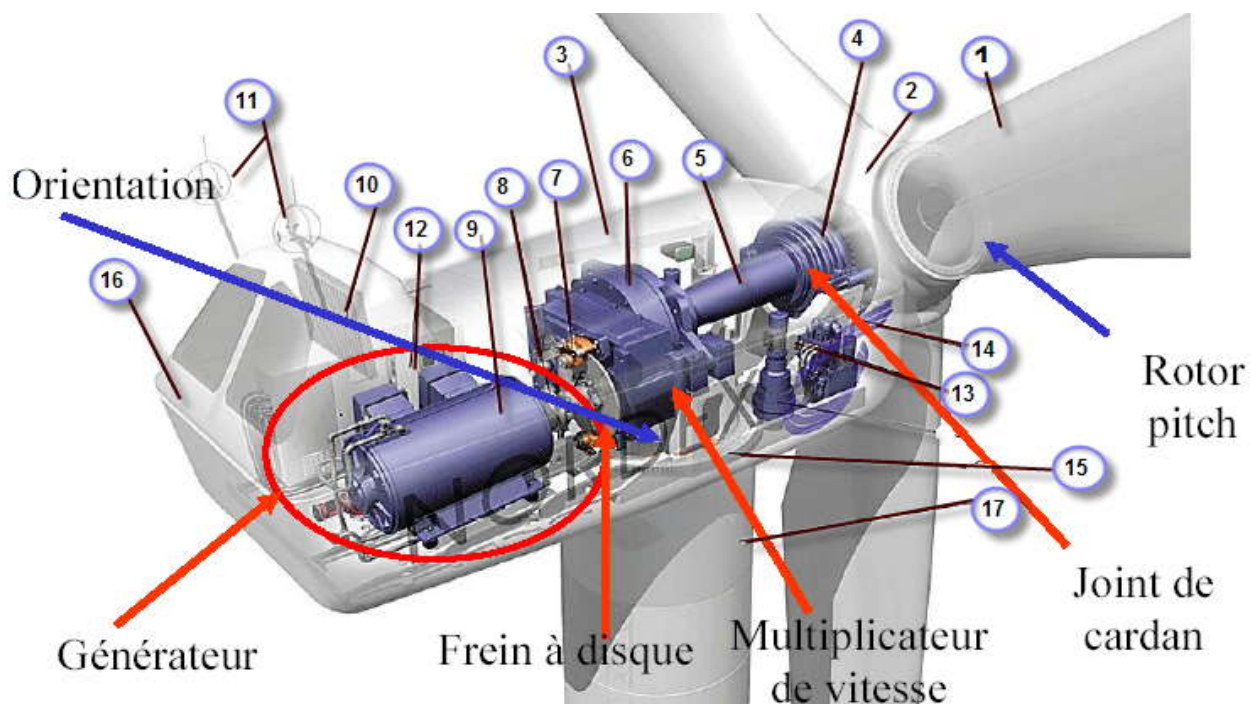
Echelle	Diamètre des pales	Valeurs de puissance
Petite puissance	<12 m	< 40 kW
moyenne puissance	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
grande puissance	> 46 m	> 1 MW

Tableau I.1 : Les catégories des éoliennes selon leurs puissances [Mul 2002 a]

I.2.2 Principaux composants d'une éolienne (à axe horizontal)

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

- **Le mât** : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.
- **La nacelle** : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. 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).
- **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripales étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.



-1 : pales, -2 : moyeu rotor, -3 : nacelle, -4 : cardan, -5 : transmission, -6 : multiplicateur de vitesse, -7 : frein à disque, -8 : accouplement, -9 : génératrice, -10 : radiateur de refroidissement, -11 : centrale de mesure du vent, -12 : contrôle, -13 : centrale hydraulique, -14 : mécanisme d'orientation des pales, -15 : paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, -16 : capot, -17 : mat.

Figure I. 4: Les composantes d'une éolienne *Nordex N60* (1300 kW) [Mul 2002 a]

I.3 Notions théoriques sur l'éolienne

I.3.1 La conversion aérodynamique et loi de *Betz* (années 1920)

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre. L'énergie cinétique des particules d'air d'une masse m et qui se déplacent à une vitesse V_v est donnée par:

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_v^2 \quad (\text{I.1})$$

La masse d'air qui traverse la surface S de l'éolienne est donnée par expression suivante [Mat 2004] :

$$m = \rho \cdot S \cdot \frac{dx}{dt} \quad (\text{I.2})$$

ρ : La densité de l'air, égale à 1,225 kg/m³.

En remplaçant cette expression dans la relation (I.1) pour trouver l'énergie récupérable P_v du vent à travers la surface balayant par les pales d'une éolienne, cette relation qui devient :

$$p_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{I.3})$$

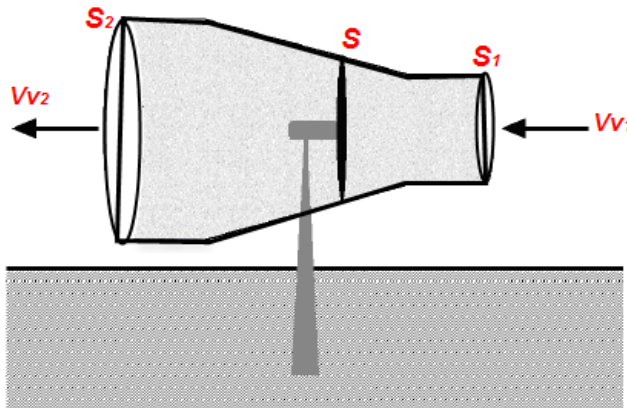


Figure I.5: Tube de courant autour d'une éolienne

Selon la loi de *Betz*, cette puissance ne peut pas être récupérée dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de *Betz* :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot p_v = 0.59 \cdot p_v \quad (\text{I.4})$$

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

$$C_p^{opt} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2 \cdot p_{\max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \leq 0.59 \quad (I.5)$$

La performance aérodynamique d'une turbine éolienne à axe horizontal s'exprime par le coefficient de puissance C_p . La valeur maximale théorique possible de ce coefficient, appelé limite de *Betz*, est de $16/27$ [Lec 2004], il est variable, il dépend donc de la caractéristique de la turbine et la vitesse du vent. Souvent il est représenté en fonction du ratio de la vitesse λ ; définie comme étant la vitesse périphérique des pales rapportée à la vitesse du vent V_v . Cette grandeur est utilisée pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, il est définie par cette expression :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_1}{V_v}$$

λ : rapport d'avance ou le ratio (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent).

Ω_1 : vitesse de rotation avant le multiplicateur.

R : rayon des pales de l'aérogénérateur.

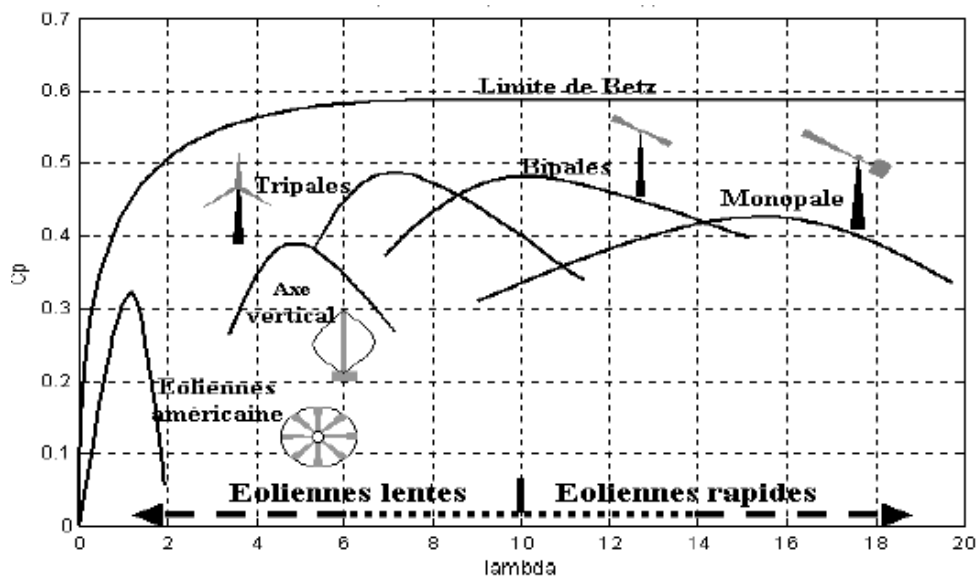


Figure I.6: Coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ pour différents types d'éoliennes [Poi 2003 a]

Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les « axes horizontaux » à faible nombre de pales (1, 2,3) (voire figure I.6) par rapport aux « axes verticaux » ou aux multiples. Elles sont donc moins sensibles aux variations de λ autour de λ_{opt} [Abd 2007].

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent égale à 3 m/s [Poi 2003 a]. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales [Cam 2003].

I.3.2 Production d'énergie mécanique [Poi 2003 a]

En combinant les équations (I.3), (I.4) et (I.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_v} \cdot P_v = C_p(\lambda) \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (I. 6)$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{R \cdot \Omega_2}{k V_v} \right) \cdot \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (I.7)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir pour la suite de cette étude un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses du vent.

Le couple C_{turb} produit par cette éolienne (couple théorique) est alors déduit:

$$C_{turb} = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2} \left(\frac{C_p(\lambda)}{\Omega} \right) \cdot \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (I. 8)$$

En introduisant le terme $C_c(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$, appelé coefficient du couple, on obtient la relation suivante :

$$C_{turb} = \frac{1}{2} C_c(\lambda) \rho \pi R^3 V_v^2 \quad (I.9)$$

I.3.3 Systèmes de régulation mécanique de la vitesse de rotation d'une éolienne

Si le vent est trop faible, la turbine n'est pas entraînée. Les pales sont immobiles. Un anémomètre mesure la vitesse du vent et dès qu'elle est assez élevée, supérieure à la vitesse qui permettra à l'éolienne pour démarrer, l'angle des pales va se fixer sur une valeur pour laquelle la puissance extraite est maximale. Puis, si le vent est trop élevé, on fait varier l'angle des pales pour ralentir la machine puisque le coefficient de puissance C_p se dégrade pour limiter la puissance à sa valeur nominale.

Dans les cas plus généralisés la variation de ce coefficient coefficient est représenté en fonction du ratio λ de vitesse et l'angle de l'orientation de la pale β la figure I.7.

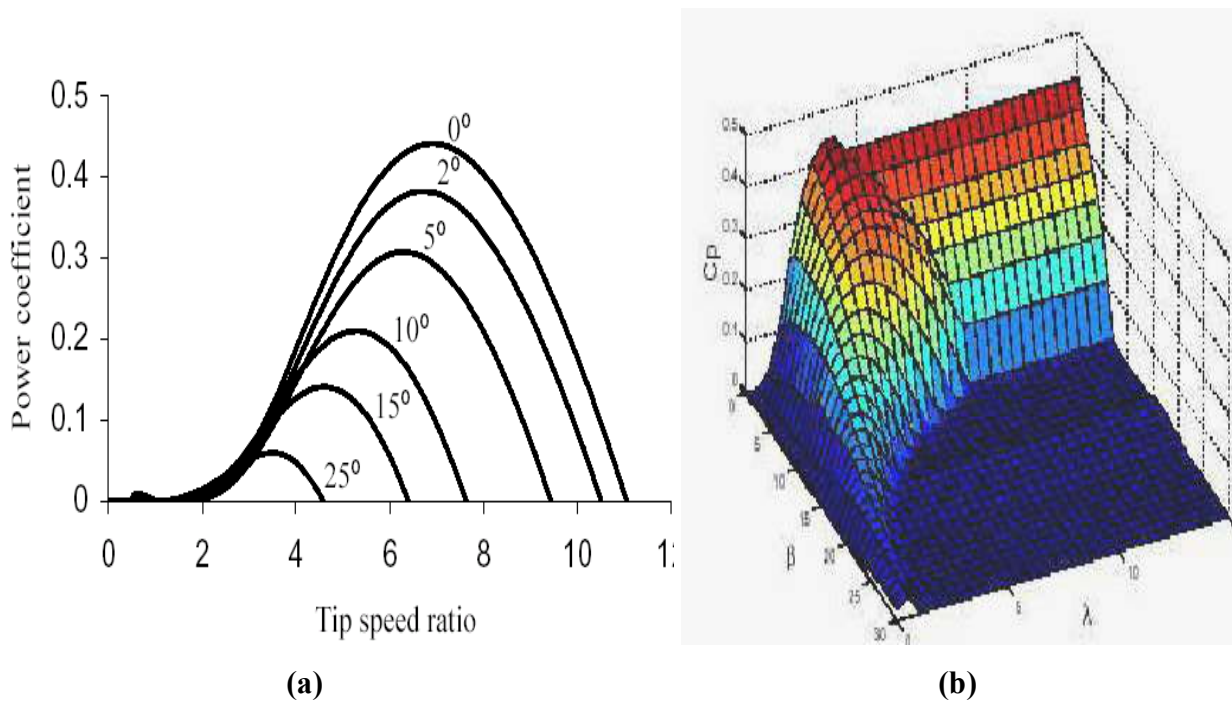


Figure I.7: Représentation de coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ en fonction de ratio λ et d'angle de calage β (a) ; dans le plan 2D [Mel 0000], (b) ; dans le plan 3D [Hok 2004].

I.3.4 Différentes phases (zones) de fonctionnement d'éolienne à vitesse variable (la régulation mécanique de la puissance)

Il y a quatre zones de fonctionnement d'une éolienne intégrant une MADA, d'après [Mul 2002 a] et [Ger 2002], dont les deux sont à la plage de la production d'éolienne qui sont la fonctionnement à charge partielle (*partial load*) et à pleine charge (*full load*). Les deux zones qui restent sont alors hors de cette plage.

- ❖ **ZONE (I), ($N < N_{dém}$, $P = 0$)** : pour des vitesses du vent plus petites que la vitesse de démarrage $V_{dém}$, l'énergie contenue dans le vent n'est pas suffisante pour entraîner la turbine et la puissance captée est nulle.

- ❖ **ZONE (II), (λ_{opt} , C_{pmax} , $\beta = 1^\circ$)** : pour des vitesses supérieures à celle de démarrage $V_{dém}$, et inférieures à celle nominale V_{nom} , dans cette zone que l'on nomme *partial load*, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de λ_{opt} . Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale C_{pmax} .
Nous avons fixé l'angle de calage à 1 dans toute la zone de fonctionnement en *partial load* pour cette étude.

- ❖ **ZONE (III), (N_{max} , $P = P_{nom}$)** : pour des vitesses du vent supérieures à celle nominale V_{nom} et plus petites que celle maximale V_{max} , la puissance captée est limitée à celle nominale P_{nom} . Cette zone correspond au régime de charge complète (*full load*). Le contrôle à pleine charge vise à conserver la puissance produite constante à cette valeur nominale en modifiant l'angle de calage des pales.

- ❖ **ZONE (IV), ($N=0$, $P = 0$)** : pour des vitesses supérieures à la vitesse extrême d'opération V_{max} , la turbine éolienne s'arrête, la puissance fournie s'annule.

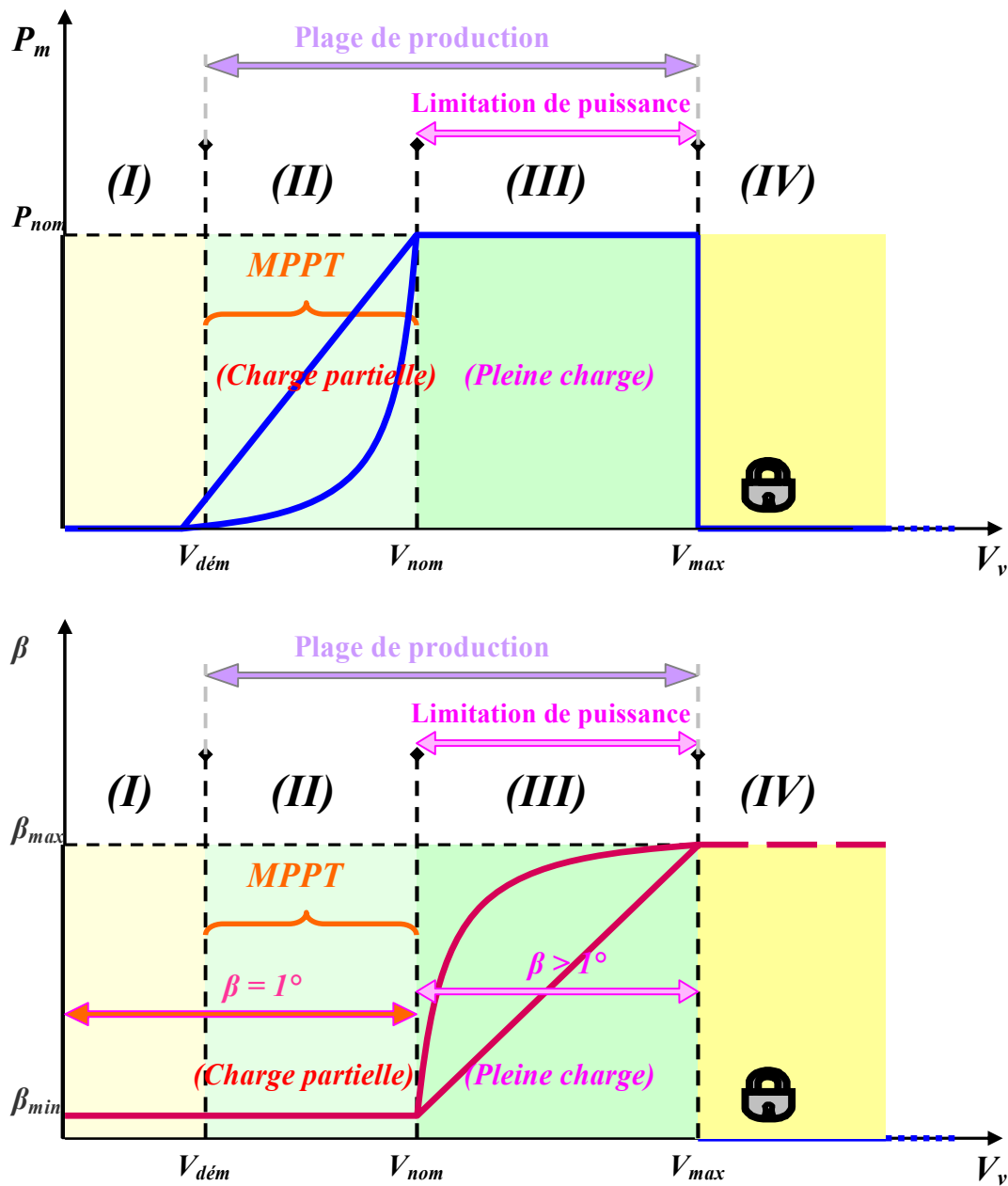


Figure I.8: les zones de fonctionnement avec contrôle de l'angle de calage (pitch control)

I.4 Les systèmes de conversion électromagnétique de l'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types des machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont décrites dans les paragraphes qui suivent en tenant compte de leurs spécificités.

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des Machine Asynchrones Doublement Alimenté (à rotor bobiné). C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans cette thèse [Int 1].

I.4.1 Machines Asynchrones à cage (MAS) [Int 2]

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien.

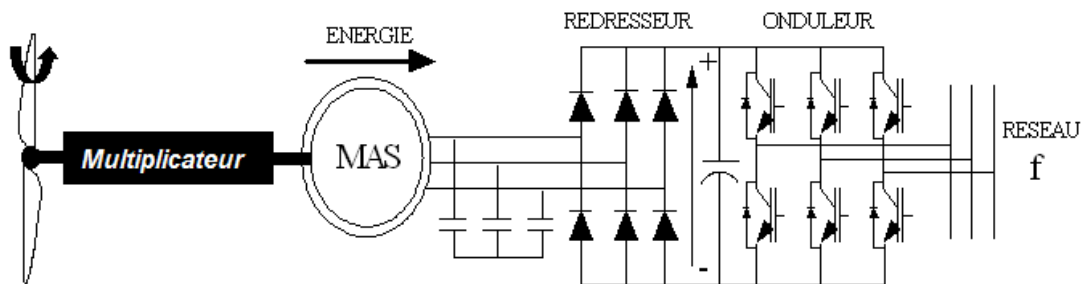


Figure I.9: configurations électriques utilisant la MAS

I.4.2 Génératrices synchrones

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 (kW) à 2 (MW) sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de

rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance [Cam 2003].

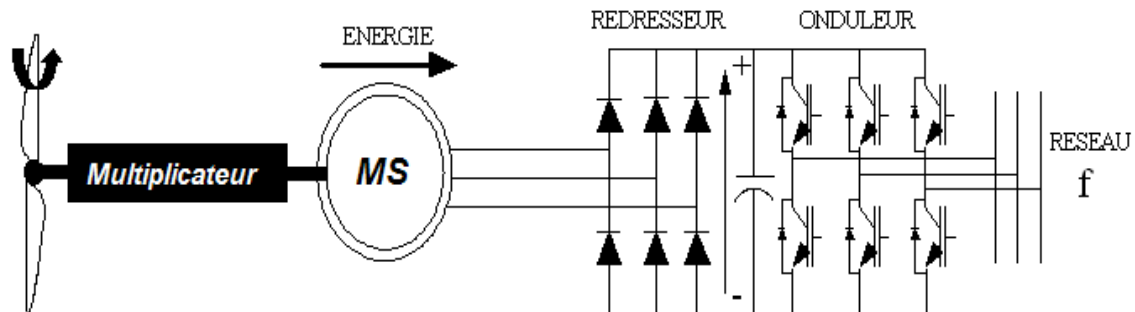


Figure I.10 : Système éolien basé sur la machine synchrone

I.4.3 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) [Poi 2003 a]

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants.

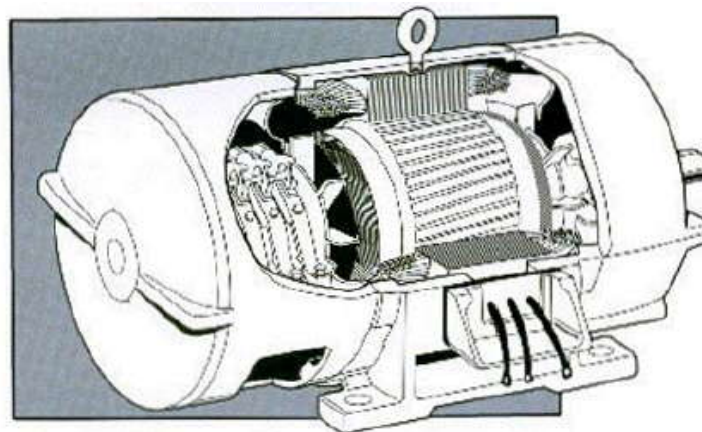


Figure I.11: Machine asynchrone à rotor bobiné [Poi 2003 a]

Intégrée dans un système éolien, la machine à généralement son stator connecté au réseau sans aucune interface électronique, par contre son rotor est lié avec le réseau à l'intermédiaire des convertisseurs de puissances (*back to back* en Anglais) [Hok 2004]. L'énergie rotorique varie selon les différents régimes (modes) de fonctionnement. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par

la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur. Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée dans cette mémoire.

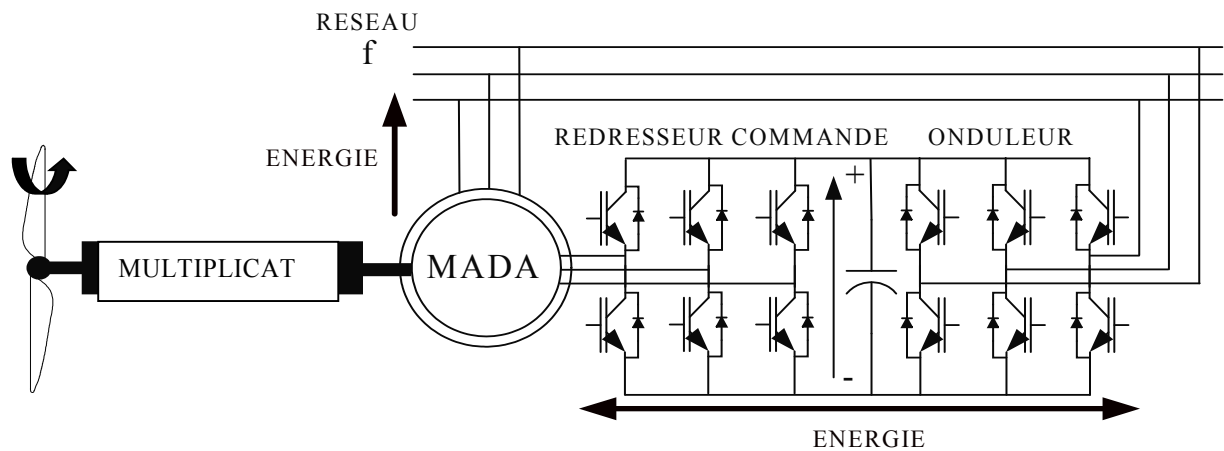


Figure I.12: Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné intégrée dans le système éolienne

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) [Ela 2004].

I.5 Description du fonctionnement de la MADA

I.5.1 Structure de la machine

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la figure I.13 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courant de rotor.

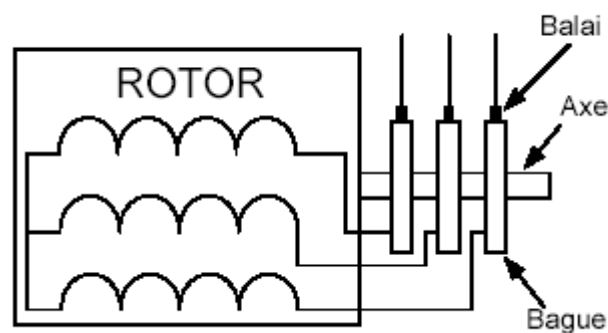


Figure I.13: Structure de la machine [Boy 2006]

I.5.2 Mode de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, la MADA, permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et en dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [Boy 2006].

1) **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone** : La figure I.14 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur au dessous de la vitesse de synchronisme. Ce régime est généralement connu comme de mode de récupération de l'énergie de glissement [Dri 2005]. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

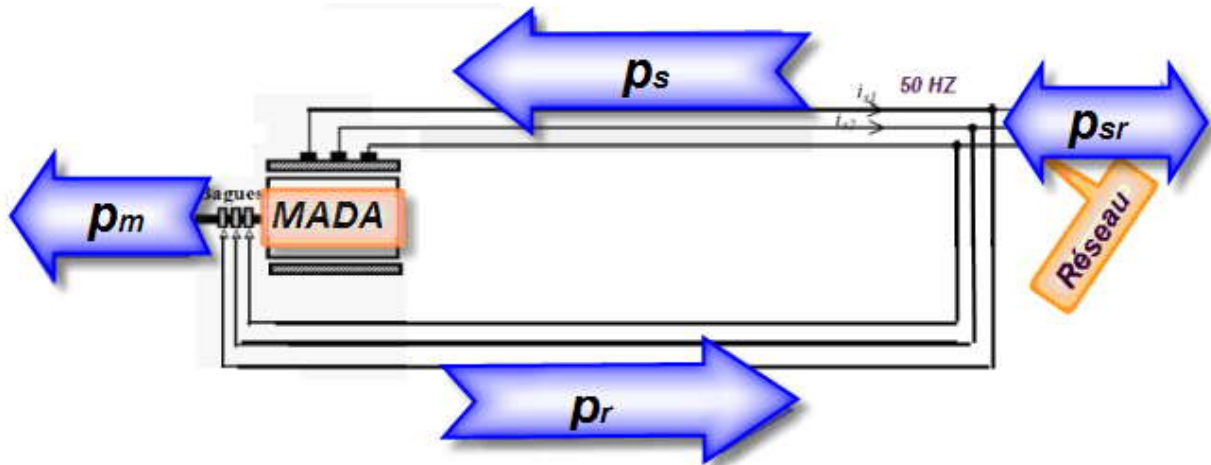


Figure I.14: Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

2) **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone** : La figure I.15 montre que la puissance est fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement.

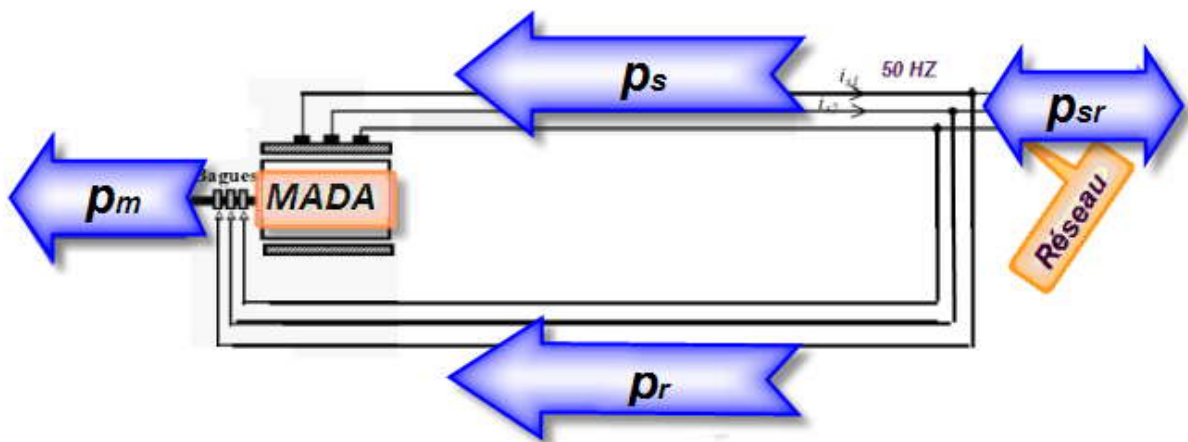


Figure I.15: Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

3) **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone** : La figure I.16 montre que la puissance fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

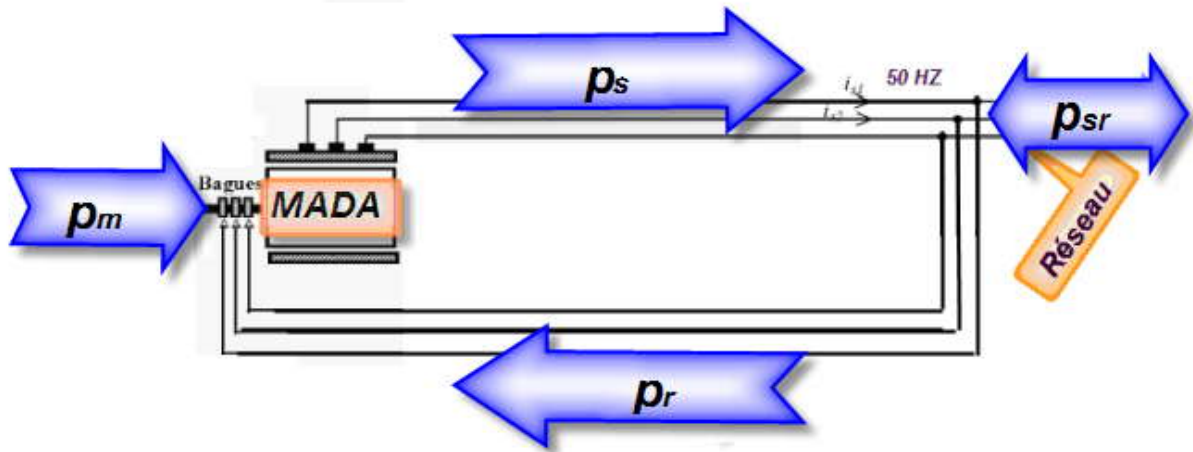


Figure I.16: Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

4) **Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone** : La figure I.17 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator est la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en perte Joule dans le rotor.

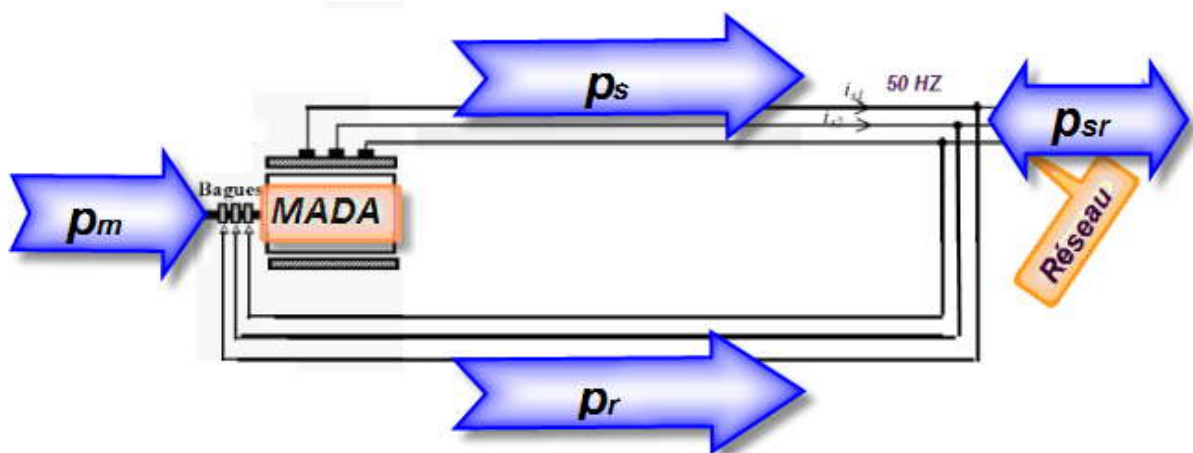


Figure I.17: Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

On peut remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique: la production de puissance électrique quelle que soit la vitesse de rotation (hypo ou hyper synchrone) et la récupération de la puissance de glissement.

Pour une utilisation dans un système éolien, le mode 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage [Poi 2003 a].

1.6 La connexion au réseau

Le réseau de distribution impose la stabilité de la tension et de la fréquence. Il faut donc gérer les phases transitoires de fonctionnement de l'éolienne, tels que le démarrage, l'arrêt ou l'absorption de rafales. On va alors réaliser un démarrage progressif de l'éolienne à l'aide des thyristors. Ces thyristors jouent le rôle d'interrupteurs assurant une connexion ou une déconnexion graduelle au réseau [Int 2]. Ces processus ne sont pas pris en compte pour cette étude.

- ***Le transformateur élévateur de tension*** : Les générateurs de turbine d'éolienne ont en général une tension de sortie de l'ordre de 690 (V). Le transformateur permet d'élever la tension pour le raccord au réseau de distribution « par exemple 20 (kV) ». Actuellement, il n'y a pas d'éolienne directement connectée sur le réseau de transport [Tap 2003].

- ***Les batteries de condensateurs*** : Pour les systèmes de conversion éolienne basant sur la machine asynchrone améliorer le facteur de puissance de l'installation peut améliorer en connectant au réseau trois batteries monophasées de condensateurs couplées en triangle. En mode autonome, les batteries de condensateurs deviennent indispensables pour la magnétisation de la machine asynchrone [Int 2]. Ces batteries ne sont pas obligatoires pour la MADA.

I.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude globale d'une chaîne de conversion éolienne. Nous avons donné l'architecture de la turbine du vent à axe horizontal, ainsi que le système de conversion électromagnétique. Ce chapitre nous a permis, d'une part, d'appréhender les principales idées sur les lois de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et, d'une autre part, de donner des schémas représentatifs pour décrire les zones de fonctionnement avec les différentes valeurs de la vitesse du vent. La zone qui nous intéresse dans notre étude est celle où l'on a le maximum de rendement aérodynamique. Nous avons ensuite établi un comparatif entre les systèmes de conversion électromécanique. A partir de cette comparaison, nous nous sommes intéressés à la MADA car elle présente un avantage par rapport aux machines asynchrone et synchrone dans le domaine de la génération de l'électricité à partir des éoliennes à vitesse variable.

Le chapitre suivant est consacré à la modélisation des éléments de la chaîne de conversion.

chapitre II

**Modélisation des éléments
de la chaîne de conversion**

II.1 Introduction

Dans cette partie, on modélise la chaîne de conversion éolienne alimentée par le rotor au moyen de deux convertisseurs de puissance commandés par des MLI.

Nous présentons dans un premier temps le modèle de la MADA dans le repère naturel, puis dans le repère de *Park* (d, q). De même, les modèles des convertisseurs, du filtre et du bus continu seront explicités dans ces mêmes repères et modélisés en utilisant ce formalisme. Le modèle complet de l'éolienne est ensuite donné. Les résultats des simulations sont donnés à la fin de chaque modélisation.

II.2 La MADA

II.2.1 Modèle généralisé d'une MADA

Connue depuis 1899 [Dri 2005]. La machine asynchrone triphasée est formée d'un stator fixe et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator a 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et sont alimentés par un système triphasé de tensions. Il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine (Théorème de *FERRARIS*) [Ela 2004]. La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{II.1})$$

ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé statorique et p est le nombre de bobines de chaque enroulement et également le nombre de paires de pôles du champ magnétique apparaissant au stator.

Le rotor de la machine supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôles que celui du stator couplé en étoile. Ce type de rotor est dit bobiné. Le rotor tourne par rapport au stator à la vitesse :

$$\Omega_{mec} = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.2})$$

θ : étant l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique.

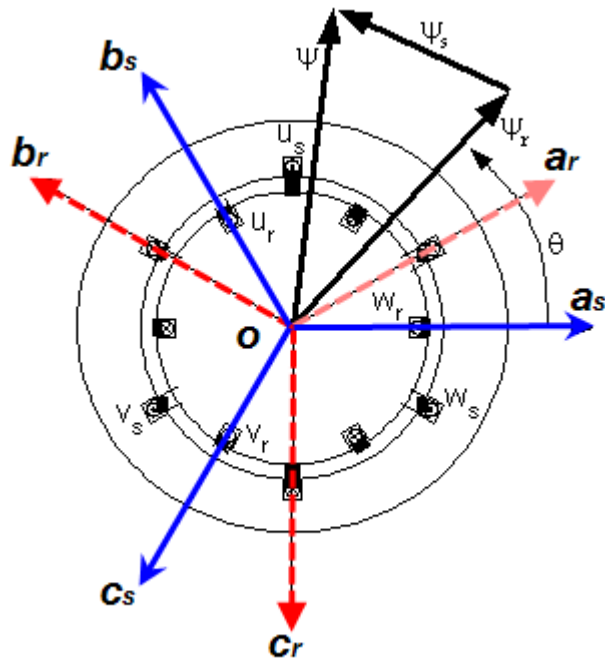


Figure II.1: Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

II.2.1.1 Rappel sur la loi de *Faraday*

La loi de *Faraday* exprime la relation entre la tension v aux bornes d'une bobine de résistance R_B et d'inductance L_B , le courant i et la variation du flux totalisé Φ_t :

$$\frac{d\phi_t}{dt} = v - R_B \cdot i \quad (\text{II.3})$$

Avec $\Phi_t = \Phi + \Phi_c$, où Φ_c est un flux de couplage magnétique avec d'autres enroulements, et Φ est le flux propre de l'enroulement.

II.2.1.2 Mise en équation de la partie électrique dans le plan a, b, c

Dans cette partie, on propose un modèle généralisé de la machine asynchrone à rotor bobiné en supposant que les tensions rotoriques sont non nulles.

❖ *Hypothèses simplificatrices*

Le modèle utilisé repose sur les hypothèses simplificatrices classiques suivantes :

- entrefer constant,
- effet des encoches négligé,
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,
- l'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte,
- circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante,
- pertes ferromagnétiques négligeables,

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

En appliquant la loi de *Faraday* aux enroulements de la machine, on détermine les équations différentielles exprimant les différents flux.

- **Au stator :**

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

- **Au rotor :**

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Où :

- v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} et v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} : sont les tensions simples triphasées au stator et au rotor de la machine.
- i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} et i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : sont les courants au stator et au rotor de la machine.
- $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$ et $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: sont les flux propres circulant au stator et au rotor de la machine.
- R_s est la résistance des enroulements statoriques.
- R_r est la résistance des enroulements rotoriques.

On définit les vecteurs flux suivant :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Ainsi que les vecteurs courants :

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

Les flux sont exprimés également d'une façon matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Où :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} = l_s \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- * l_s : inductance propre des enroulements statoriques
- * m_s : inductance mutuelle des enroulements statoriques ;

$$m_s = -\frac{1}{2}l_s$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} = l_r \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- * l_r : Inductance propre des enroulements rotoriques ;
- * m_r : inductance mutuelle des enroulements rotoriques ;

$$m_r = -\frac{1}{2}l_r$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(p\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(p\theta) & \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Où M_{\max} représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator-Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

Sous forme matricielle, les équations de la machine deviennent :

$$\frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] = [v_{sabc}] - [R_s] [i_{sabc}] \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] = [v_{rabc}] - [R_r] [i_{rabc}] \quad (\text{II.11})$$

$$[v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}$$

II.2.1.3 Modèle de la machine dans le repère de *Park*

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant et dont l'orientation est a priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en machine diphasée équivalente [Ela 2004].

La transformation de *Park* définie par la matrice de rotation $[P(\psi)]$ permet de ramener les variables du repère triphasé $(a; b; c)$ sur les axes d'un repère tournant $(d; q; o)$. Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Le produit matriciel définissant la transformation de *Park* est donnée par :

$$[x_{dqo}] = [P(\Psi)][x_{abc}] \quad (\text{II.12})$$

Où :

$$[P(\Psi)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(p\Psi) & \cos(p\Psi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p\Psi - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(p\Psi) & -\sin(p\Psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(p\Psi - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- * $\psi = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques.
- * $\psi = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques.

La figure II.2 montre alors la disposition des systèmes d'axes dans l'espace électrique. Respectivement $(O_{sa}, O_{s\beta})$ et $(O_{ra}, O_{r\beta})$ sont les axes du repère diphasé obtenu avec la transformation de *Concordia* correspondant aux tensions (statoriques et rotoriques).

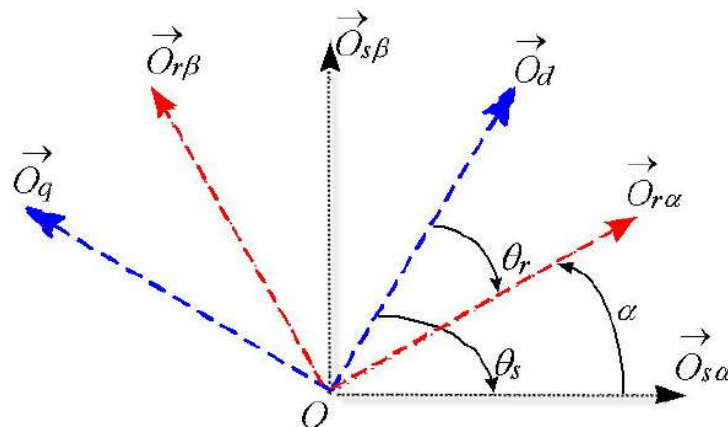


Figure II.2: Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique

Le rotor et le stator de la machine, alors désignée machine de *Park*, tournent à la même vitesse de sorte que les flux et les courants sont liés par une expression indépendante du temps.

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en machine diphasée équivalente (transformation de *Concordia* suivie de la transformation de *Park* [Vid 2004]. Le système (d, q) sera utilisé dans la commande vectorielle des machines électriques. Dans ce système les grandeurs électriques sont de type continues, ce que donne la possibilité de faire une commande similaire à la commande des machines à courant continu [Cim 2003].

Un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires :

$$[v_{sdqo}] = [R_s][i_{sdqo}] + \frac{d}{dt}[\phi_{sdqo}] + [\lambda][\phi_{sdqo}]\frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{II.14})$$

$$[v_{rdqo}] = [R_r][i_{rdqo}] + \frac{d}{dt}[\phi_{rdqo}] + [\lambda][\phi_{rdqo}]\frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Où :

- $[v_{sdqo}]$, $[v_{rdqo}]$ sont les vecteurs tensions statoriques et rotoriques dans le repère de *Park*.
- $[i_{sdqo}]$, $[i_{rdqo}]$ sont les vecteurs courants statoriques et rotoriques dans le repère de *Park*.
- $[\phi_{sdqo}]$, $[\phi_{rdqo}]$ sont les vecteurs flux statoriques et rotoriques dans le repère de *Park*.

Dans le repère de *Park*, les flux et les courants statoriques et rotoriques sont liés par :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sdqo} \\ \Phi_{rdqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sdqo} \\ i_{rdqo} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r - m_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{bmatrix}$$

$$M = \frac{3}{2} M_{\max}$$

La figure II.3 donne alors une représentation interprétée de la machine de *Park* dans l'espace électrique.

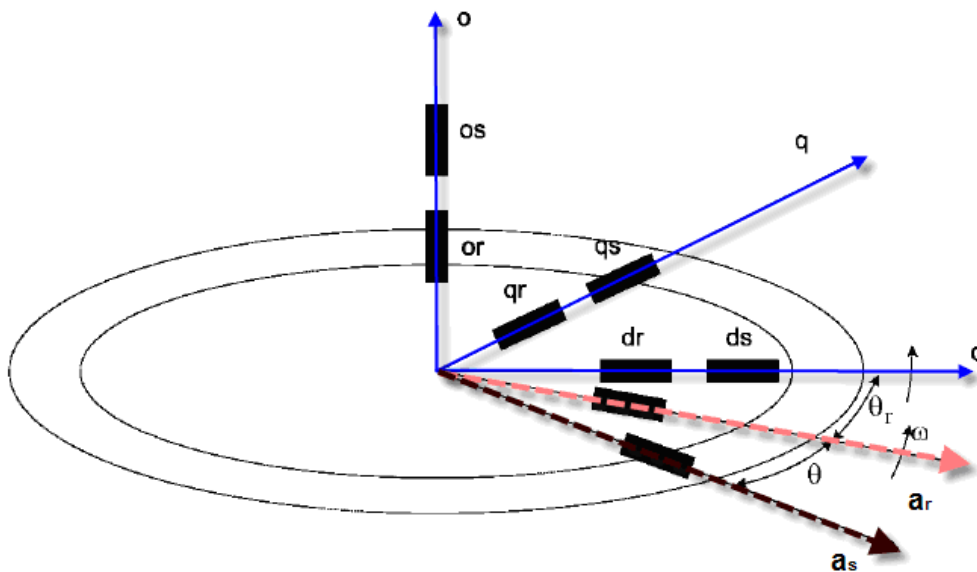


Figure II.3: Représentation des enroulements de la machine de *Park*

La composante homopolaire est nulle puisque le system est équilibré. On obtient donc [Akt 2006], [Poi 2003 a] :

$$\begin{aligned}
 v_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\
 v_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\
 v_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\
 v_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd}
 \end{aligned} \tag{II.17}$$

$$\begin{aligned}
 \phi_{sd} &= L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{sq} \\
 \phi_{sq} &= L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rd} \\
 \phi_{rd} &= L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\
 \phi_{rq} &= L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq}
 \end{aligned} \tag{II.18}$$

II.2.2 Calcul du couple électromagnétique

On obtient la puissance instantanée absorbée par la machine en calculant la somme des produits de chaque f.e.m avec son courant :

$$p_m = (e_{sd} \cdot i_{sd} + e_{sq} \cdot i_{sq}) + (e_{rd} \cdot i_{rd} + e_{rq} \cdot i_{rq}) \tag{II.19}$$

En exprimant cette puissance en fonction des courants et des flux statoriques et rotoriques en factorisant par rapport aux vitesses angulaires, on obtient :

$$p_m = (\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd}) \omega_s + (\phi_{rd} \cdot i_{rq} - \phi_{rq} \cdot i_{rd}) \omega_r \tag{II.20}$$

En exprimant les flux en fonction des courants à partir des équations (II.18), on constate que :

$$\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd} = -(\phi_{rd} \cdot i_{rq} - \phi_{rq} \cdot i_{rd}) \tag{II.21}$$

Dans ces conditions, on obtient deux expressions pour le couple électromagnétique :

$$C_{em} = p(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd}) \tag{II.22}$$

Ou :

$$C_{em} = p(\phi_{rq} \cdot i_{rd} - \phi_{rd} \cdot i_{rq}) \tag{II.23}$$

II.2.3 La simulation

Nous avons fait quelques essais de simulation en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK dans le but de voir le comportement de la génératrice doublement alimentée par rapport à la machine asynchrone.

II.2.3.1 Essai de la machine asynchrone

Dans cet essai, on démarre la machine asynchrone à vide, après l'établissement de la vitesse, on charge la machine par un couple $C_r = 3000$ Nm à $t = 2$ s. Et à $t = 5$ s on charge cette machine par un couple résistant négatif $C_r = -6000$ Nm.

-La tension statorique (valeur efficace) : $V_s = 690$ V. -La fréquence statorique : $f_s = 50$ Hz.

-La tension rotorique : $V_r = 0$ V.

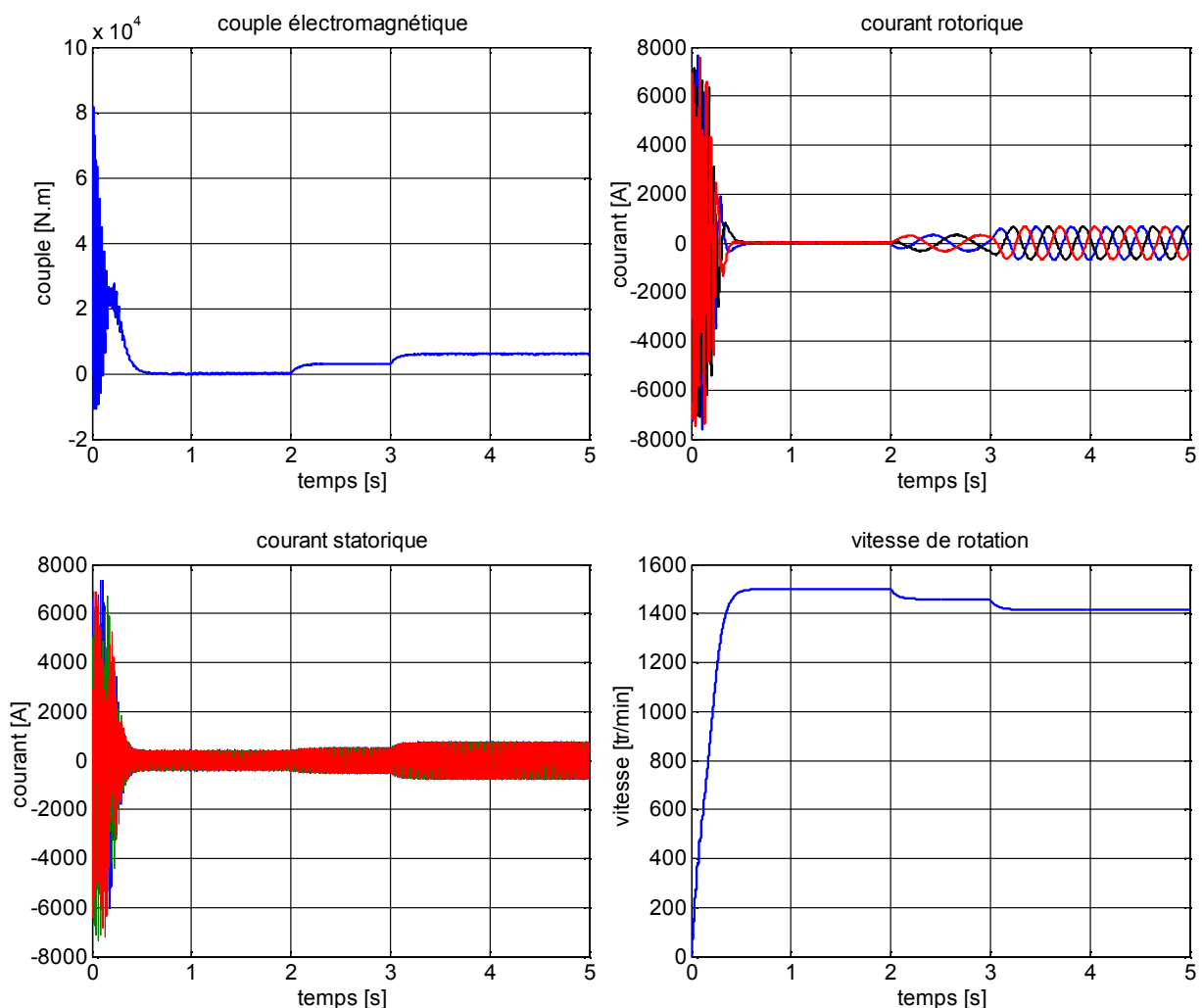


Figure II.4: Résultats de simulation pour le fonctionnement d'une machine asynchrone.

On peut remarquer que la vitesse à vide est presque 1500 tr/min, mais après le chargement, la vitesse de la machine se diminue. Les courants statoriques et rotoriques sont variés selon le niveau de la charge. On remarque aussi que le régime de fonctionnement de la machine (moteur ou génératrice) est dépend de la vitesse de rotation hypo ou hyper synchronisme.

II.2.3.2 Essai de la machine double alimentée

La tension statorique (valeur efficace) est $V_s = 690$ V. La fréquence statorique est: $f_s = 50$ Hz.

- On démarre la machine avec l'injection de tension alternative au niveau du rotor V_r (valeur efficace) = 35 V, $f_r = 2$ Hz. Ensuite, à $t = 2$ s, on charge cette machine par un couple $Cr = 3000$ Nm.
- Après 2s de ce chargement (à $t = 4$ s), on injecte une tension à la même amplitude que la première mais d'une fréquence 1 Hz.
- A $t = 5$ s, on charge la machine par un couple résistant négatif $Cr = -6000$ Nm.

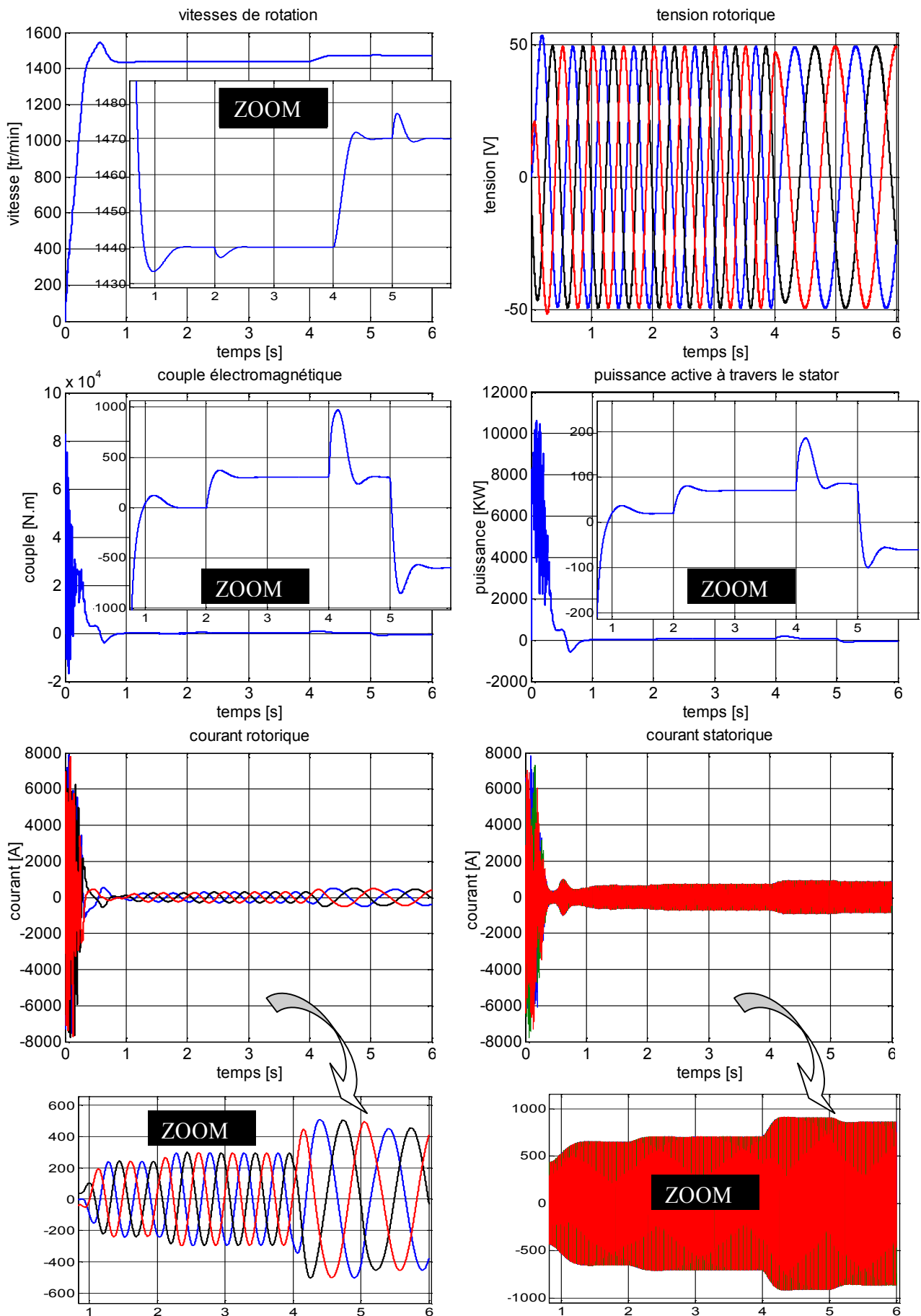


Figure II.5: Résultats de simulation de fonctionnement d'une MADA moteur et générateur.

Pour $f_s = 50$ Hz et $f_r = 2$ Hz, la vitesse $N = 1440$ tr/min.

Pour $f_s = 50$ Hz et $f_r = 1$ Hz, la vitesse $N = 1470$ tr/min.

On remarque que la vitesse de rotation est imposée par la fréquence d'alimentation de la machine soit au niveau du stator ou à celui du rotor.

Si C_{em} est positif, la valeur de la puissance active de la machine est positive aussi (fonctionnement en moteur puisque la machine absorbe cette puissance à partir du réseau).

Si C_{em} est négatif, la valeur de la puissance active de la machine est négative. Dans ce cas la puissance est fournie au réseau par le stator ; la machine fonctionnant comme une génératrice. Ce mode de fonctionnement imposé même avec une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme (régime hypo - synchrone).

La vitesse et la puissance active de la machine sont fixées à travers la variation de la fréquence rotorique, à condition que cette fréquence reste dans des limites tolérées, puisque la machine à induction double alimentée a un caractère très instable en boucle ouverte [Dri 2003].

On retiendra en conclusion que :

- Si le rotor de la machine est alimenté par une tension alternative, la vitesse de rotation de cette machine est gouvernée par les deux fréquences de la machine.

$$\Omega = (\omega_s \pm \omega_r) / p$$

- Le fonctionnement en mode génération de la MADA pour des vitesses en dessus et en dessous du synchronisme donne à cette machine un avantage par rapport à la machine asynchrone en production de l'énergie électrique à partir d'un système d'entraînement à vitesse variable autour du point de synchronisme.

II.3 La partie mécanique

L'intérêt de l'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur, est de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne. Cette caractéristique montre que pour chaque vitesse du vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance C_p) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale, à vitesse du vent donnée, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est-à-dire une puissance active débitée par la MADA.

II.3.1 La modélisation

II.3.1.1 La modélisation du vent

La vitesse du vent peut être modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [Mir 2005] :

$$V_v(t) = f(t) \quad (\text{II.24})$$

Cette vitesse fait apparaître deux composantes : une composante lente correspondant à la vitesse moyenne du vent V_m et une composante rapide dite de turbulence V_t [Poi 2003 a].

$$V_v(t) = V_m(t) + V_t(t) \quad (\text{II.25})$$

La figure II.6 représente un résultat de simulation qui montre un profil du vent avec des vitesses entre 7 m/s et 14 m/s.

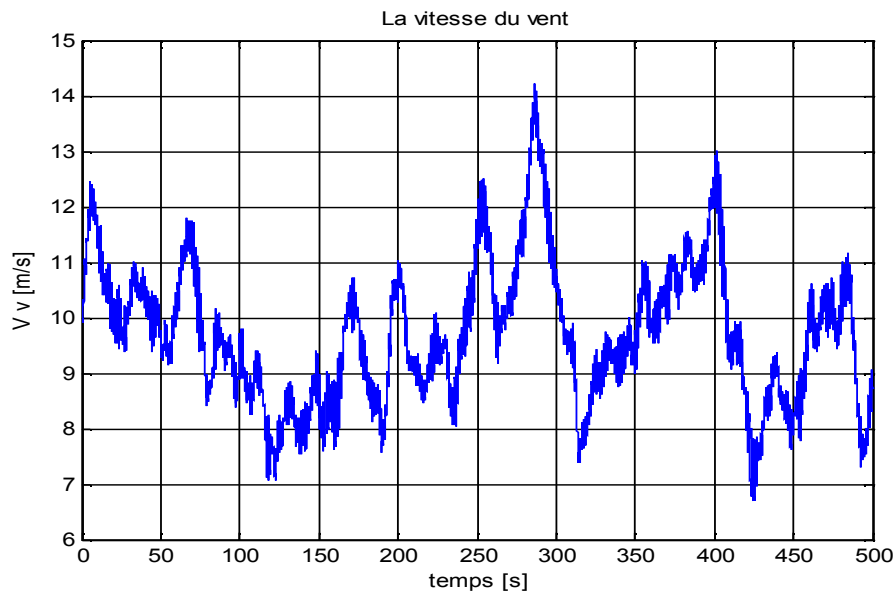


Figure II.6 : profil du vent pour une durée de 500 s

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie, en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. Le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sont effectués sur la modélisation du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer (Van der Hoven en 1957, Shinozuka et Nichita en 2002) [Cam 2003]. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et du vent [Lar 1997].

II.3.1.2 Modélisation de la turbine

Un système éolien transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique.

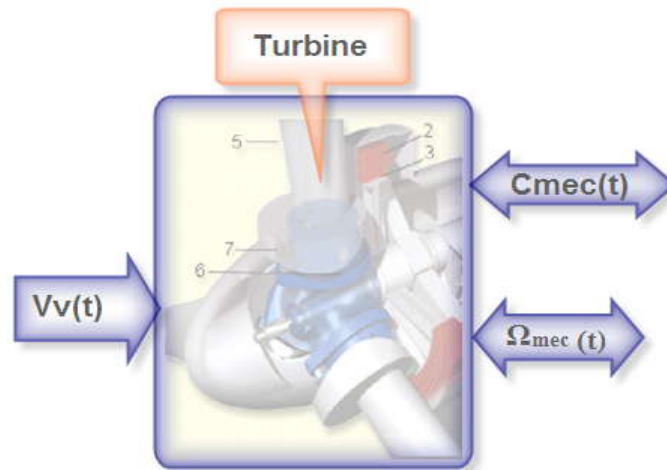


Figure II.7: Entrées – sorties du modèle de la turbine éolienne

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain K (Figure II.8).

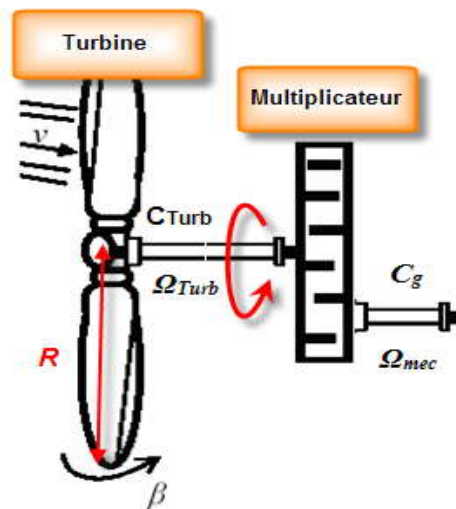


Figure II.8: Schéma de la turbine éolienne

L'équation (II.26) donne la valeur du couple qui est créé sur les pales de l'éolienne par la masse d'air ayant une vitesse V_v .

$$C_{turb} = \frac{1}{2} C_c(\lambda) \rho \pi R^3 V_v^2 \quad (\text{II.26})$$

En réalité, ce couple éolien n'est pas égal au couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine surtout à cause de l'inertie conséquente de la turbine J et, dans une moindre mesure, des frottements mécaniques f . Il est donc impossible de considérer la turbine vue de l'arbre mécanique comme une source de couple liée directement à la vitesse du vent.

II.3.1.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice figure II.8. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} C_g &= \frac{C_{turb}}{K} \\ \Omega_{mec} &= K.\Omega_{turb} \end{aligned} \quad (II.27)$$

Avec Ω_{mec} la vitesse de la génératrice.

Le multiplicateur présente des inconvénients, comme la nécessité d'une maintenance, un taux de panne élevé, des pertes énergétiques supplémentaires, un bruit acoustique parfois gênant et un encombrement important.

II.3.1.4 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{turb} et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J_{total} constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [Ela 2004].

$$J_{total} = \frac{J_{turb}}{K^2} + J_g \quad (II.28)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne *Vestas* de 2 MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [Vri 2003].

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

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

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.30}$$

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.31}$$

Il est plus logique de le considérer comme une source de vitesse. L'équivalence électrique d'un tel système inertiel est montrée sur le schéma de la figure II.9 [Mir 2005] :

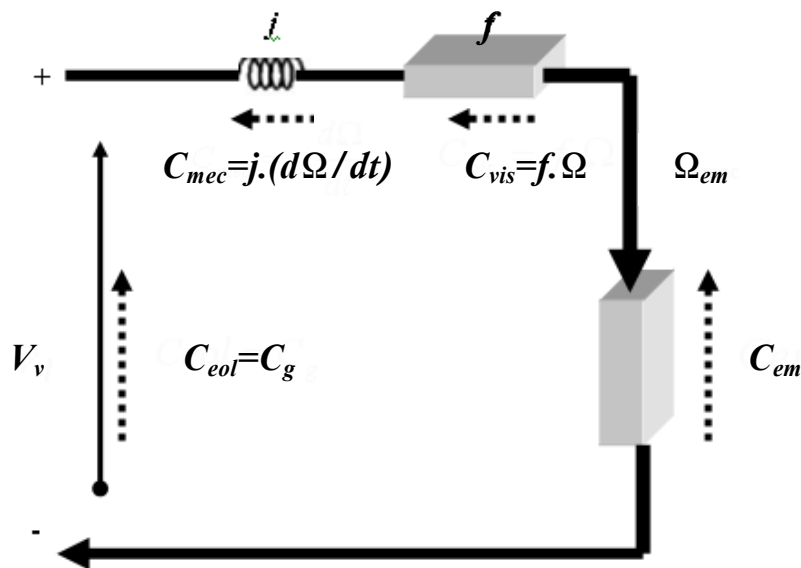


Figure II.9: Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit des équations précédentes et est représenté sur la figure II.10.

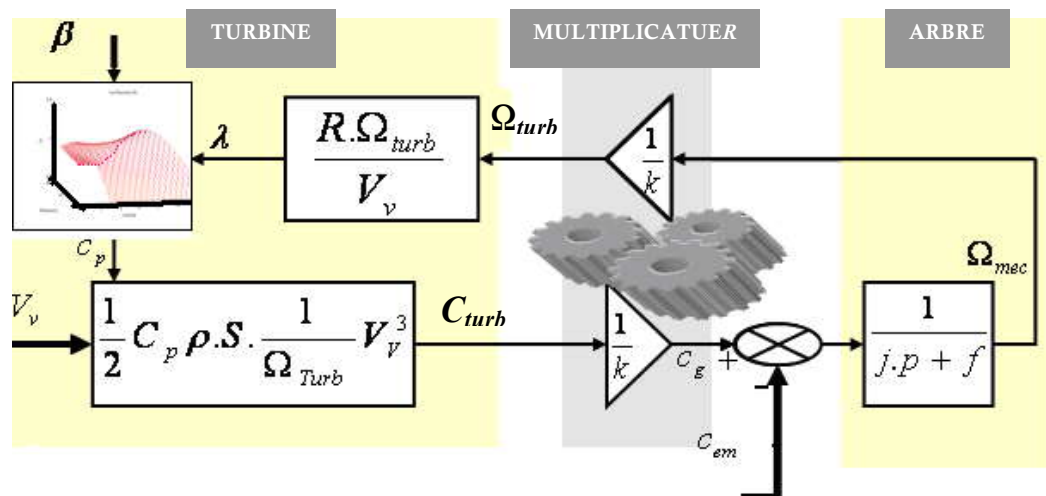


Figure II.10: Schéma bloc du modèle de la turbine

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur (relations II.27). Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique fourni par la génératrice. Le schéma bloc montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- l'angle d'orientation de la pale,
- le couple électromagnétique de la génératrice.

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice de ce système.

II.3.2 Approximation numérique

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser. Cependant, des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés.

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées. Nous présentons ci-dessous trois formes :

- Première forme [Abd 2000 b] :

$$C_p = (0,44 - 0,0167 \cdot \beta) \cdot \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0,3\beta}\right] - 0,00184(\lambda - 3)\beta \quad (\text{II.32})$$

- Deuxième forme [Per 2004] :

$$C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda'} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot \exp\left(\frac{-12,5}{\lambda'} \right) \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$$

- Troisième forme [Mel 0000] :

$$C_p = [0,73 \cdot \left(\frac{151}{\lambda'}\right) - 0,002\beta - 0,58\beta - 13,2] \exp\left(\frac{-18,4}{\lambda'}\right) \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$$\lambda' = 1 / \left(\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\lambda^3 + 1} \right)$$

Généralement les publications présentent le coefficient C_p par des graphiques. Le coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre. En effet, les courbes du coefficient de puissance des turbines à vent commerciales sont fournies dans la documentation produite par le fabricant et peuvent être utilisées pour définir une approximation mathématique de la courbe de puissance à l'aide de méthodes d'optimisation numériques.

On suppose que la vitesse de la turbine n'est pas réglable et l'angle de calage variable. Nous allons donc prendre en compte l'approximation définie par la troisième équation. Dans ce sens nous présentons la courbe de variation du coefficient de puissance C_p et celle de la puissance mécanique P_m , en fonction de λ (rapport de vitesse périphérique) et ce pour différentes valeurs de l'angle d'attaque de l'éolienne.

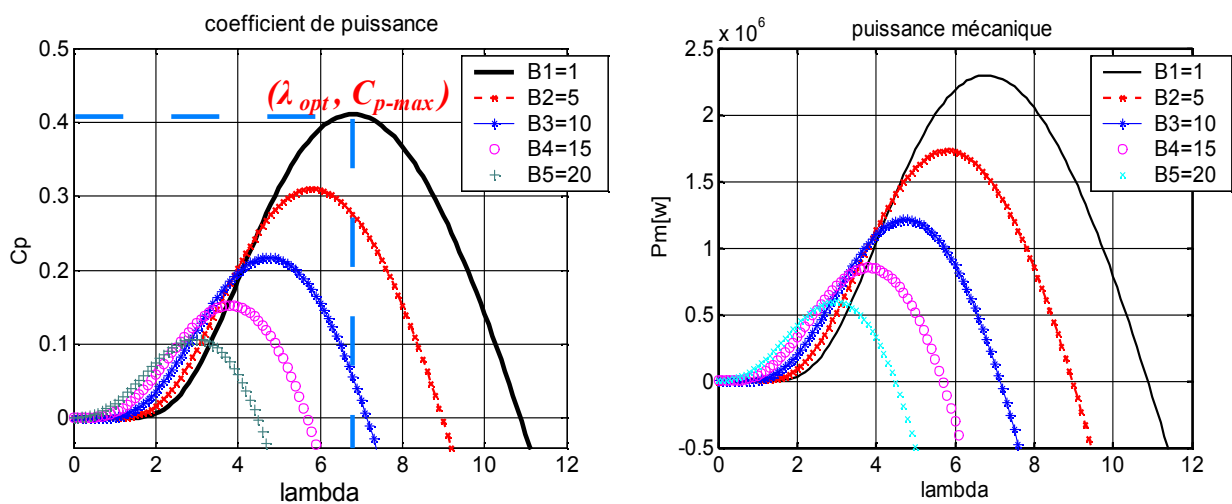


Figure II.11: Résultats obtenus à partir de la 3^{em} approximation numérique

Nous constatons d'après ces courbes que le coefficient de puissance C_p diminue quand l'angle (β) augmente. Il en est de même de la puissance mécanique à la sortie de la turbine.

Nous remarquons aussi que la variation de la puissance est très sensible aux variations de l'angle de calage β . Les objectifs de la régulation de cette grandeur mécanique (β) sont limiter la puissance et d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts.

Dans les grandes machines (au-delà de quelques 100 kW), on rencontre deux familles de systèmes de limitation de la puissance aérodynamique : les systèmes « *pitch* » (à pas variable) dans lesquels on règle l'orientation des pales pour réduire C_p et les systèmes « *stall* » (à décrochage aérodynamique naturel) où les pales ont un profil optimisé pour obtenir le décrochage (chute de C_p) [Abd 2007].

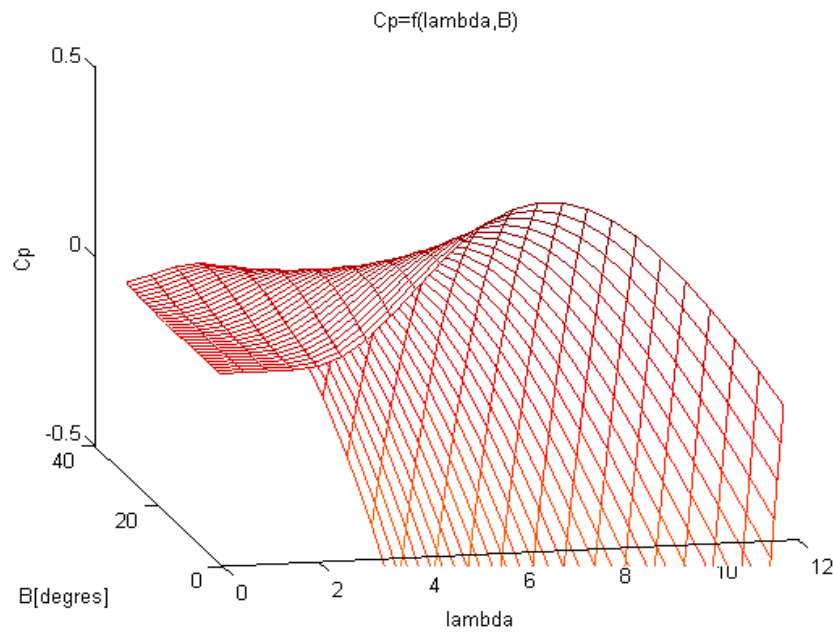


Figure II.12: Représentation de la variation du coefficient de puissance dans l'espace $C_p(\lambda, \beta)$

À partir de l'expression numérique (II.31), la fonction non - linéaire C_p est implémentée sous Matlab - Simulink pour calculer le couple du vent comme montré sur les courbes de la figure II.12).

Nous présentons la simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. L'environnement Matlab - Simulink nous permet de développer les schémas blocs de régulation pour les associer aux modèles électriques.

Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à la génératrice. Nous observons donc l'allure de la vitesse mécanique, du coefficient de puissance, du rapport d'avance du couple et de la puissance mécanique en fonction de l'évolution du vent avec les conditions suivantes :

- un angle de calage fixe $\beta=1^\circ$.
- rapport du multiplicateur $K=90$.
- rayon des pales $R=41$.

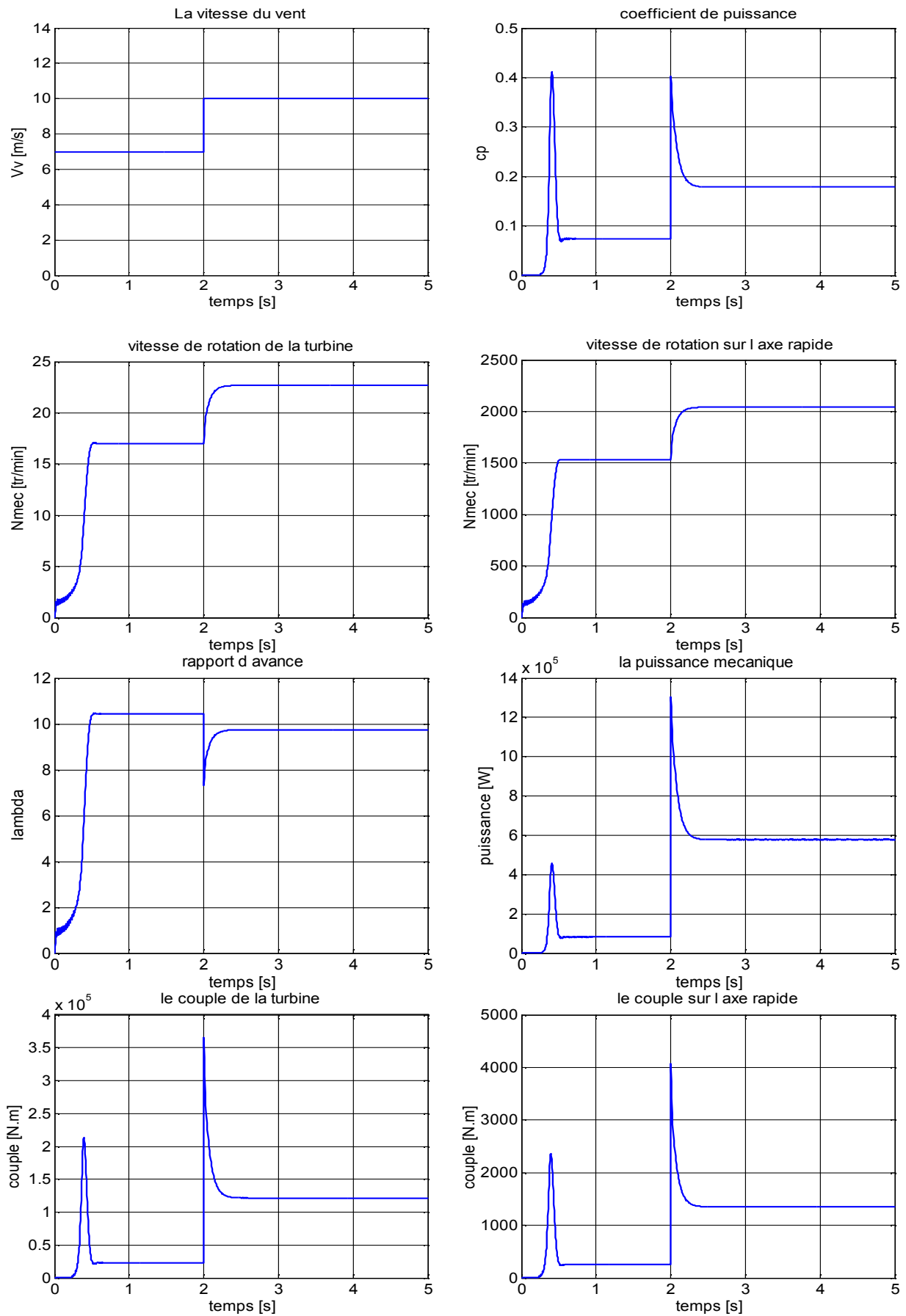


Figure II.13: Courbes de simulation obtenues à l'aide du modèle de la fig II.12

La figure II.13 montre l'état au démarrage du système de l'éolienne pour un angle d'attaque des pales : $\beta=1^\circ$. La vitesse du vent est considérée constante et égale à 7 m/s jusqu'à l'instant : $t=2$ s. A cet instant, une vitesse du vent $V_v=10$ m/s est appliquée.

Les résultats montrent aussi qu'une petite variation de la vitesse du vent induit une grande variation de la puissance.

Des faibles valeurs de coefficient de puissance C_p , le rapport d'avance donc n'est pas optimale et la puissance extraite n'est pas maximale, ce que réduit le rendement aérodynamique de système mécanique.

II.3.3 Conclusion

Dans cette partie du chapitre, nous avons modélisé la partie mécanique d'un système de conversion (l'hélice et le multiplicateur). Cette partie est un élément essentiel dans la conversion éolienne, puisque elle permet l'interconnexion au système de transformation électromécanique « génératrice ».

Elle comporte sa propre commande afin de contrôler la puissance extraite du vent par le réglage permanent de l'angle de calage des pales.

II.4 Modèles des convertisseurs de puissance

II.4.1 Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau de commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation de forme triangulaire).

Représentation de la porteuse et des modulantes

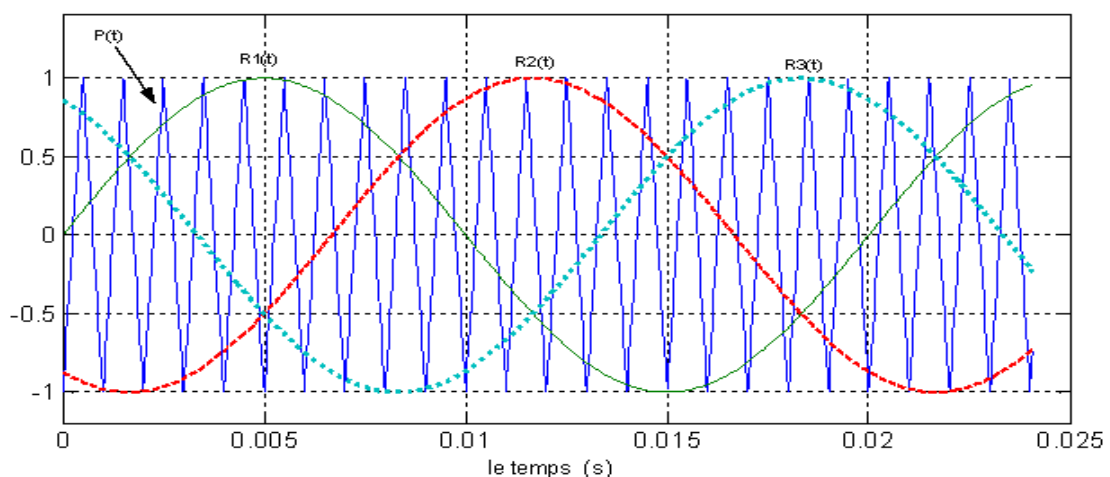


Figure II.14: le signal de porteuse et les signaux de référence (modulantes)

Les interrupteurs de puissance sont commandés aux instants d'intersection de ces 2 ondes, instants déterminés par des comparateurs (figure II.15).

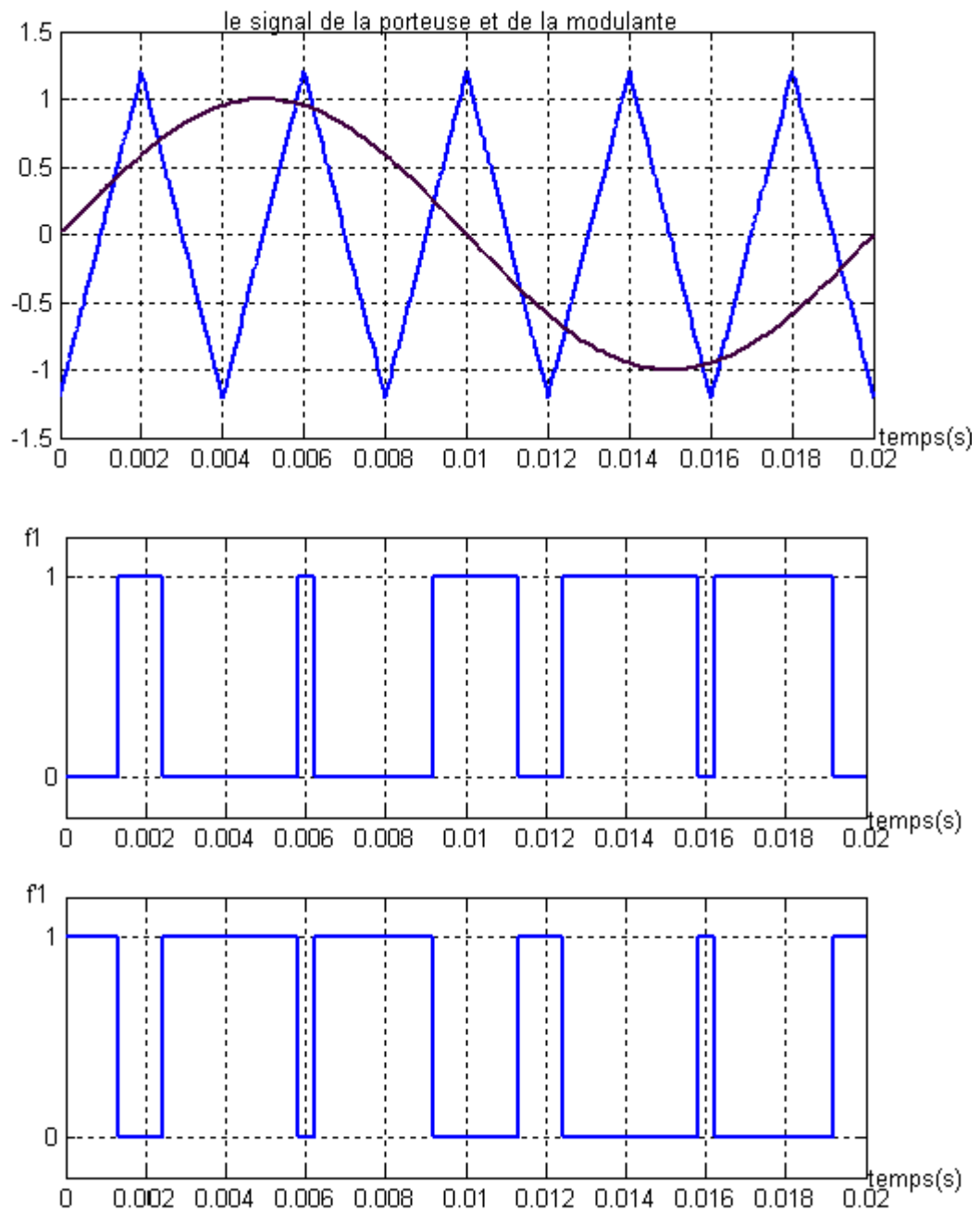


Figure II.15: Commande MLI par modulation « sinus - triangulaire »

II.4.2 Construction du convertisseur bidirectionnel

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur de puissance l'onduleur ou le redresseur (constitués des diodes en anti-parallèles et d'IGBT commandés en ouverture et en fermeture par la technique MLI) dans le repère triphasé naturel.

- ♣ L'onduleur de tension à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) est un convertisseur statique DC-AC constitué des cellules de commutation généralement à transistors IGBT ou à thyristors GTO pour les grandes puissances. Il permet, après redressement, d'imposer soit à la machine soit au réseau des ondes de tension à amplitudes et fréquences variables à partir d'une tension continue.
- ♣ Un redresseur triphasé à (MLI) est un convertisseur statique AC-DC. Son circuit principal est similaire à celui d'un onduleur. Il est constitué par des interrupteurs statiques bidirectionnels en courant, unidirectionnels en tension. La partie continue est connectée à un condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie, monté en parallèle avec l'onduleur.

Le convertisseur considéré dans notre étude est celui relié soit au réseau par l'intermédiaire d'un filtre (R_f, L_f) soit au rotor de la MADA.

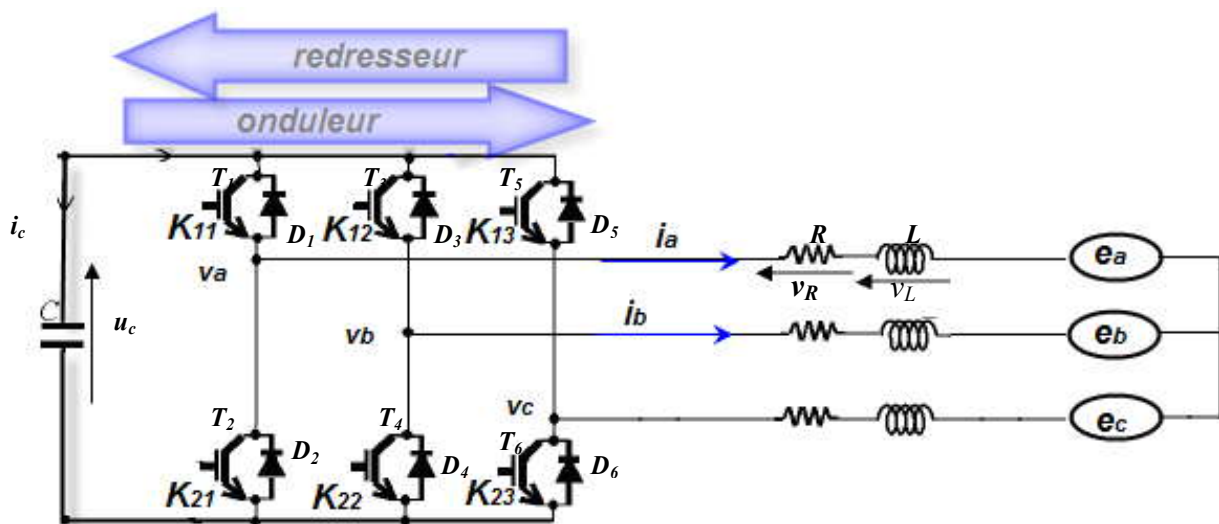


Figure II.16: Schéma électrique d'un convertisseur MLI triphasé

Les couples d'interrupteurs (K_{11} et K_{21}), (K_{12} et K_{22}), (K_{13} et K_{23}) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part.

- i_c : est le courant traversant le condensateur.

- u_c : est la tension aux bornes du condensateur (tension du bus continu).
- T_i, D_i avec $i \in \{1,2,3,4,5,6\}$ désignent respectivement les transistors IGBT et les diodes en antiparallèle sont des diodes de roue libre assurant la protection des transistors.
- v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} : sont les tensions composées modulées par le convertisseur MLI.
- v_{an}, v_{bn}, v_{cn} : sont les tensions simples.

En supposant un mode de fonctionnement continu, chaque ensemble transistor - diode peut être considéré comme un interrupteur idéal (bidirectionnel en courant, unidirectionnel en tension). Le convertisseur de la figure II.16 est commandé en boucle ouverte par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

L'emploi de la technique MLI pour déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs permet de régler de manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions u_{an}, u_{bn}, u_{cn} sur chaque période de commutation. Dans ce cas les instants de commutation sont déterminés par la comparaison de trois ondes de référence déphasées d'un tiers de période les unes par rapport aux autres avec une onde porteuse qui fixe la fréquence de commutation.

Cette comparaison fournit trois signaux logiques f_1, f_2 et f_3 , qui valent 1 quand les interrupteurs du côté haut sont en conduction et ceux de côté bas sont bloqués et valent 0 dans le cas contraire.

A partir de ces signaux l'électronique de commande élabore les signaux de commande des interrupteurs.

II.4.2.1 Modèle des convertisseurs de puissance dans le repère naturel

Les tensions de sortie des trois phases d'un convertisseur (les tensions composées) sont:

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = u_c \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

On aura alors trois tensions possibles aux bornes des phases : $0, -u$ et $+u$

- f_1, f_2, f_3 : sont les valeurs d'état des interrupteurs K_{11}, K_{12}, K_{13} .
- f'_1, f'_2, f'_3 : sont les valeurs d'états des interrupteurs $K'_{21}, K'_{22}, K'_{23}$.

Les interrupteurs de chaque bras sont commandés de manière complémentaire.

Donc $f_1 + f' = 1$

$f_1 = 1$: l'interrupteur à l'état fermé.

$f_1 = 0$: l'interrupteur à l'état ouvert.

Si les références forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales, on obtient à la sortie de l'onduleur des ondes de tension dont les « valeurs moyennes » forment elles aussi un système triphasé équilibré. On parle dans ce cas d'une modulation sinus - triangle (tableau II.1). Le vecteur des tensions simples à la sortie de l'onduleur s'écrit donc comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} u_c \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Etat	Vecteurs de commutation			Les tensions composées			Les tensions simples		
	f_1	f_2	f_3	v_{ab}	v_{bc}	v_{ca}	v_{an}	v_{bn}	v_{cn}
V ₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V ₁	1	0	0	1	0	-1	2/3	-1/3	-1/3
V ₂	1	1	0	0	1	-1	1/3	1/3	-2/3
V ₃	0	1	0	-1	1	0	-1/3	2/3	-1/3
V ₄	0	1	1	-1	0	1	-2/3	1/3	1/3
V ₅	0	0	1	0	-1	1	-1/3	-1/3	2/3
V ₆	1	0	1	1	-1	0	1/3	-2/3	1/3
V ₇	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Tableau II.1: Table de vérité d'un onduleur commandé par MLI [Khe 1997]

Si i_a, i_b, i_c sont les courants à la partie alternative, le courant dans la partie continue peut être obtenu à partir de la loi de conservation de puissance. En utilisant l'expression de celle-ci ($P = v i^T$) [Car 1998] :

$$u_c \cdot i_c = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (\text{II.37})$$

En remplaçant les tensions v_a, v_b, v_c par leur expression, on trouve [Vec 2005] :

$$i_c = [f_1 f_2 f_3] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

II.4.2.2 Modèle du convertisseur de puissance dans le repère effectif (d, q)

v_{ed} et v_{eq} sont les composantes directe et en quadrature des tensions modulées à la sortie de l'onduleur et à l'entrer du filtre.

Ces tensions sont déterminées en utilisant une transformée de *Park*.

$$\begin{bmatrix} v_{ed} \\ v_{eq} \end{bmatrix} = [P(\psi)] \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$$\begin{bmatrix} v_{ed} \\ v_{eq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(p.\psi) & \cos(p.\psi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p.\psi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(p.\psi) & -\sin(p.\psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(p.\psi + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

La tension simple d'une phase à la sortie de l'onduleur est représentée ci-dessous :

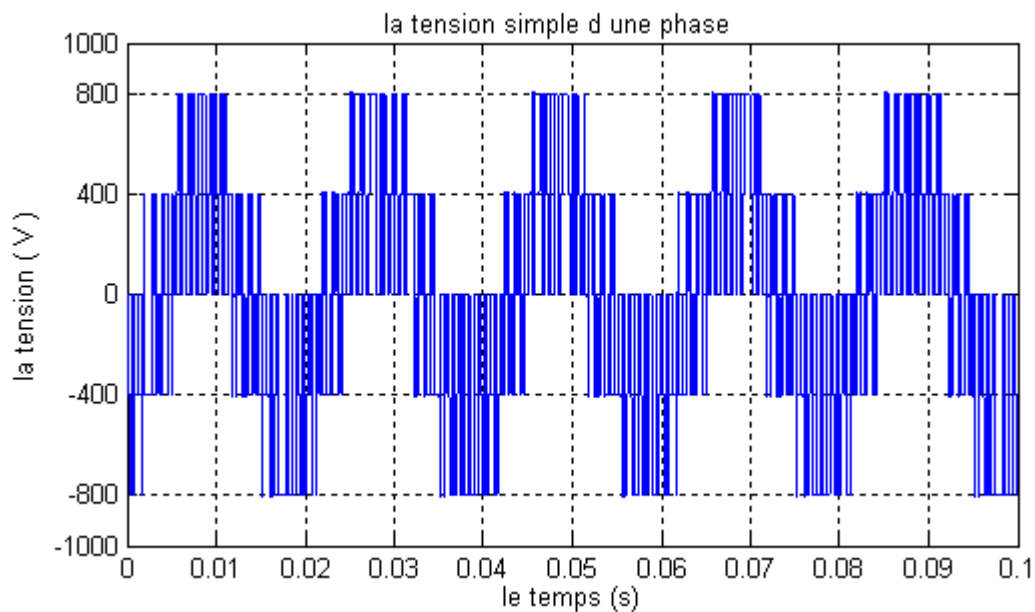


Figure II.17: Tension simple d'une phase à la sortie de l'onduleur

La tension composée d'une phase à la sortie de l'onduleur est représentée sur la figure II.18.

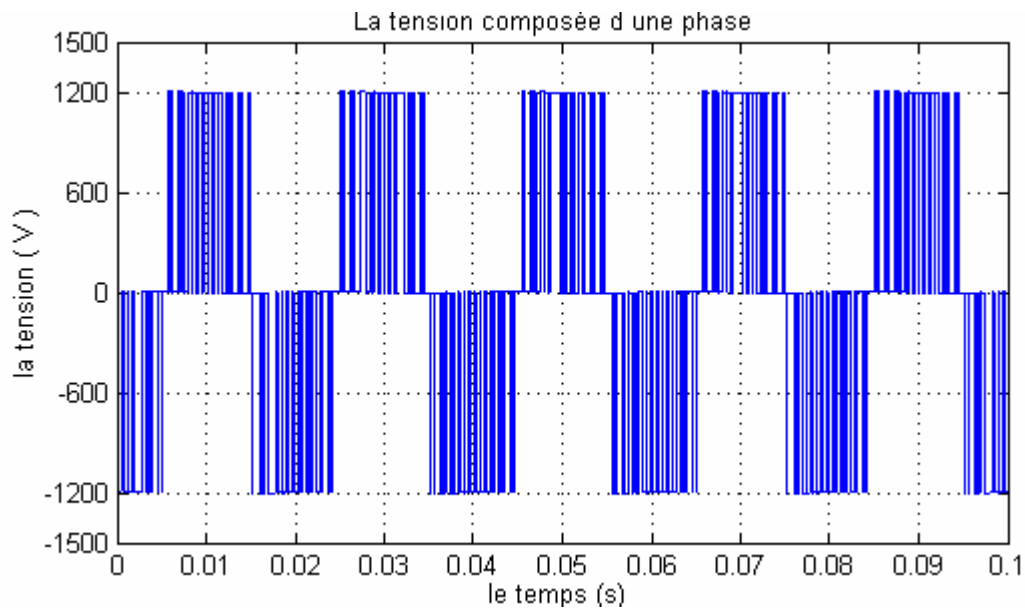


Figure II.18: Tension simple d'une phase à la sortie de l'onduleur

Le signal électrique en sortie des convertisseurs n'est pas sinusoïdal. Pour rendre le courant i_a sinusoïdal on introduit un filtrage de la tension générée par le convertisseur à l'aide du filtre (R_f, L_f).

II.4.3 Modèle du filtre

II.4.3.1 Modèle du filtre dans le repère naturel

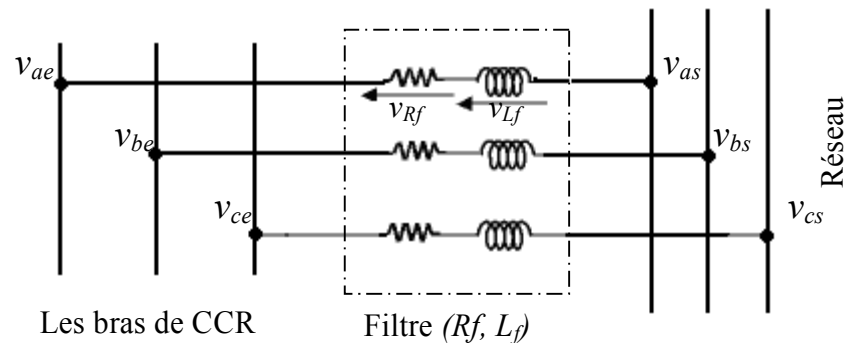


Figure II. 19: Représentation du filtre (R, L)

L'ensemble complet des équations de tension des phases a, b et c peut être mis sous la forme compacte suivante [Pie 2004] :

$$[\Delta v(t)]_{abc} = L_f \frac{d[i(t)]_{abc}}{dt} + R_f [i(t)]_{abc} \quad (\text{II.41})$$

$$[\Delta v(t)]_{abc} = [v_s(t)]_{abc} - [v_e(t)]_{abc} \quad (\text{II.42})$$

II.4.3.2 Modèle de filtre dans le repère effectif (d, q)

L'équation (II.41) peut être réécrite dans le repère (α, β). On obtient l'équation qui suit :

$$L_f \frac{d[i(t)]_{\alpha\beta}}{dt} = -R_f [i(t)]_{\alpha\beta} + [\Delta v(t)]_{\alpha\beta} \quad (\text{II.43})$$

En utilisant ensuite la transformation $\alpha\beta - dq$, on obtient [Bir 2003] :

$$\begin{aligned} [K][i(t)]_{\alpha\beta} &= [i(t)]_{dq} \\ [i(t)]_{\alpha\beta} &= [K]^{-1}[i(t)]_{dq} \\ \frac{d[i(t)]_{\alpha\beta}}{dt} &= \left\{ \frac{d[K]^{-1}}{dt} \right\} [i(t)]_{dq} + [K]^{-1} \frac{d[i(t)]_{dq}}{dt} \end{aligned}$$

Avec:

$$[K]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}$$

Et :

$$\frac{d[K]^{-1}}{dt} = \omega \begin{bmatrix} -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \end{bmatrix}$$

Donc :

$$\begin{aligned} K \frac{d[K]^{-1}}{dt} &= \omega \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \end{bmatrix} \\ K \frac{d[K]^{-1}}{dt} &= \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

L'équation (II.41) peut être réécrite dans le repère (d, q).

En partant de la forme :

$$L_f [K] \frac{d[i(t)]_{\alpha\beta}}{dt} = -R_f [K][i(t)]_{\alpha\beta} + [K][\Delta v(t)]_{\alpha\beta}$$

On a alors la forme suivante:

$$L_f \frac{d[i(t)]_{dq}}{dt} = -R_f [i(t)]_{dq} + [\Delta v(t)]_{dq} - \begin{bmatrix} 0 & \omega L_f \\ -\omega L_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix}$$

L'ensemble des équations de tension modélisant le système peut être écrit dans le repère (d, q) de la façon suivante:

$$\begin{aligned} L_f \frac{di_d(t)}{dt} &= -R_f i_d(t) - \omega_s L_f i_q(t) + v_{sd}(t) - v_{eq}(t) \\ L_f \frac{di_q(t)}{dt} &= -R_f i_q(t) + \omega_s L_f i_d(t) + v_{sq}(t) - v_{eq}(t) \end{aligned} \tag{II.44}$$

La transformation de *Laplace* donne :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f + pL_f & \omega_s L_f \\ -\omega_s L_f & R_f + pL_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ed} \\ v_{eq} \end{bmatrix} \tag{II.45}$$

D'où le schéma équivalent simplifié du système modélisé dans le repère (d, q) :

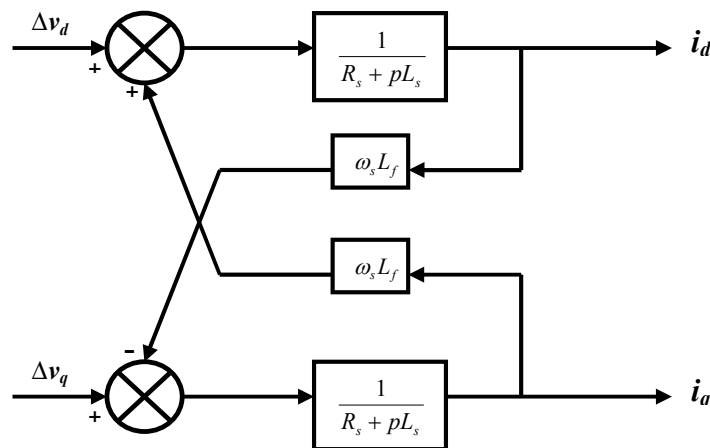


Figure II.20: Schéma équivalent d'un filtre dans le repère (d, q)

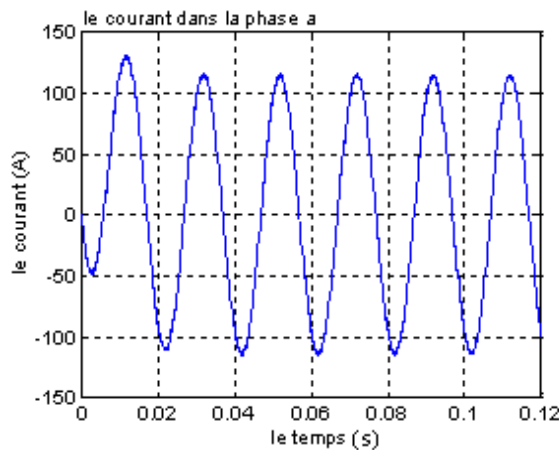


Figure II.21: Courant de la phase (a) après filtrage

A partir du bus continu, on doit réaliser la connexion au réseau grâce à un convertisseur continu/alternatif ou onduleur avec un filtre passif à la sortie. La fréquence doit rester très proche de 50 (Hz) pour adaptée à celles du réseau et elle doit comporter le moins d'harmoniques possible. Ces contraintes obligent à utiliser un onduleur à modulation de largeur d'impulsions (MLI).

II.4.4 Modélisation du bus continu

Le bus continu est la partie se trouvant entre le redresseur et l'onduleur.

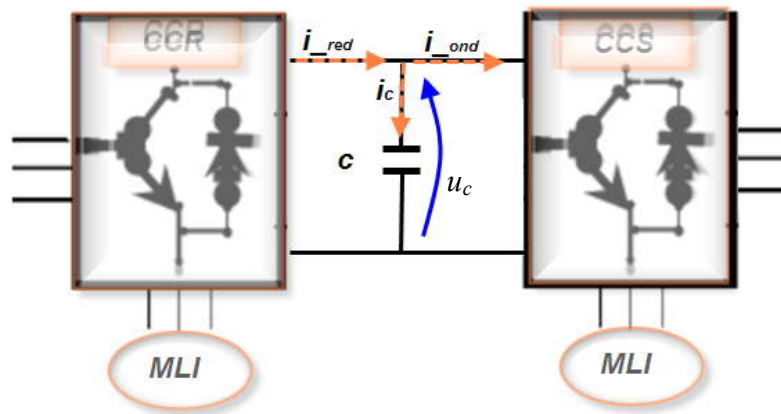


Figure II.22: Schéma simple pour le circuit du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif i_c [Car 1998]:

$$\frac{du_c(t)}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_c(t) \quad (\text{II.46})$$

Le courant du condensateur est issu d'un noeud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur (figure II.22):

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{II.47})$$

On a également :

$$u_c = \int \frac{du_c}{dt} + u_c(t_0) \quad (\text{II.48})$$

Où $u_c(t_0)$ est la valeur de la tension à l'instant initial t_0 .

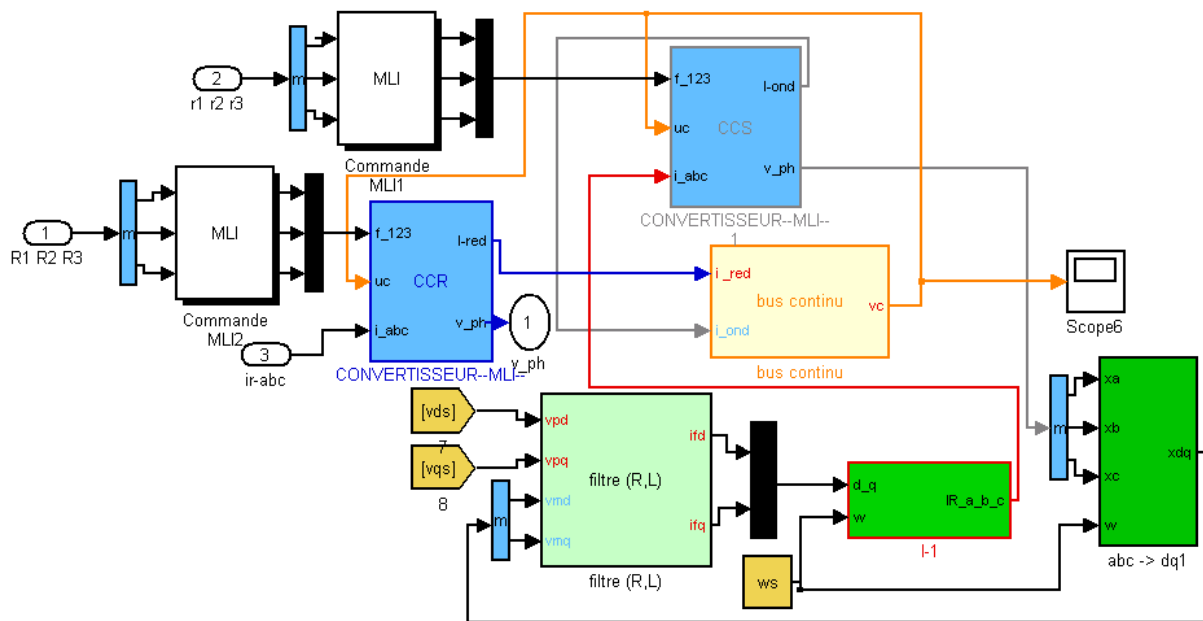


Figure II.23: Structure des convertisseurs de puissance et le filtre passif (R, L) sous l'environnement (MALAB_SIMULINK)

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différentes parties de la chaîne étudiée :

- sous-système aérodynamique (le rotor de la turbine) qui capte l'énergie cinétique du vent et qui fait tourner l'axe lent du système;
- sous-système de transmission mécanique (le multiplicateur de vitesse) qui transfère la puissance vers la génératrice électrique, tournant sur l'axe rapide du système;
- sous-système électromécanique, comprenant la génératrice électrique;
- sous-système électrique (l'électronique de puissance), les deux convertisseurs avec le bus continu pour permettre le couplage du rotor au réseau électrique.

Les résultats de la simulation sont présentés après chaque modélisation pour décrire quelques comportements des éléments des sous-systèmes. Ceci nous permettra de faire la simulation pour la chaîne de conversion globale. Ces modèles seront donc utilisés pour la suite de notre étude.

Chapitre III

***Commande des puissances
active et réactive de la
MADA par des régulateurs PI***

III.1 Introduction

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté d'une façon indépendante les différents éléments d'une chaîne de conversion éolienne : le vent, le système de conversion aérodynamique, le multiplicateur, la MADA et les convertisseurs de puissance. Tous ces éléments doivent être intégrés et associés au système de contrôle pour former un système complet de la conversion. La chaîne de conversion est modélisée et simulée à l'aide du logiciel Matlab / Simulink. Les paramètres de cette chaîne sont donnés dans (l'annexe A).

III.2 Stratégie de commande de la MADA

Pour fonctionner correctement, toute la chaîne de conversion a besoin d'algorithmes de commande. Il faut élaborer des lois de commande pour piloter le redresseur et l'onduleur à MLI. Un algorithme est mis au point pour générer la consigne de vitesse qui permettra de travailler à puissance maximale. En principe, la consigne de vitesse de rotation de la turbine pourrait être déduite de la vitesse du vent. Cela suppose donc de disposer d'un anémomètre. Dans la pratique, pour des raisons de fiabilité, on préfère autant que possible ne pas utiliser d'anémomètre. Pour la recherche du point de puissance maximale, on utilise donc un algorithme pour estimer la vitesse du vent ou lieu de la mesurer. Nous allons donc essayer de faire un contrôle qui nous permettra de commander les puissances active et réactive de façon indépendante grâce au convertisseur connecté sur le circuit électrique du rotor.

La figure III.1 illustre la configuration mécanique et électrique du système. L'aéroturbine capte une partie P_m de la puissance P_v contenue dans le vent. La machine électrique la transforme ensuite en puissance électrique. La plus grande partie de celle-ci est transférée au réseau directement par le stator de la machine, alors que le reste y est transféré à travers le rotor et les deux convertisseurs CCR et CCS.

Le convertisseur CCR est commandé par une MLI dont les consignes proviennent d'une commande vectorielle de la MADA. Cette commande permet de contrôler le couple électromagnétique C_{em} de la machine en contrôlant indépendamment la puissance active P_s et la puissance réactive Q_s échangées entre le stator et le réseau [Poi 0000]. La commande par MLI du convertisseur CCR contrôle la tension dans l'étage continu u_c [Hok 2004].

La commande du convertisseur CCR consiste à donner les références de puissance active selon des critères d'optimisation et la référence de puissance réactive selon les critères du réseau.

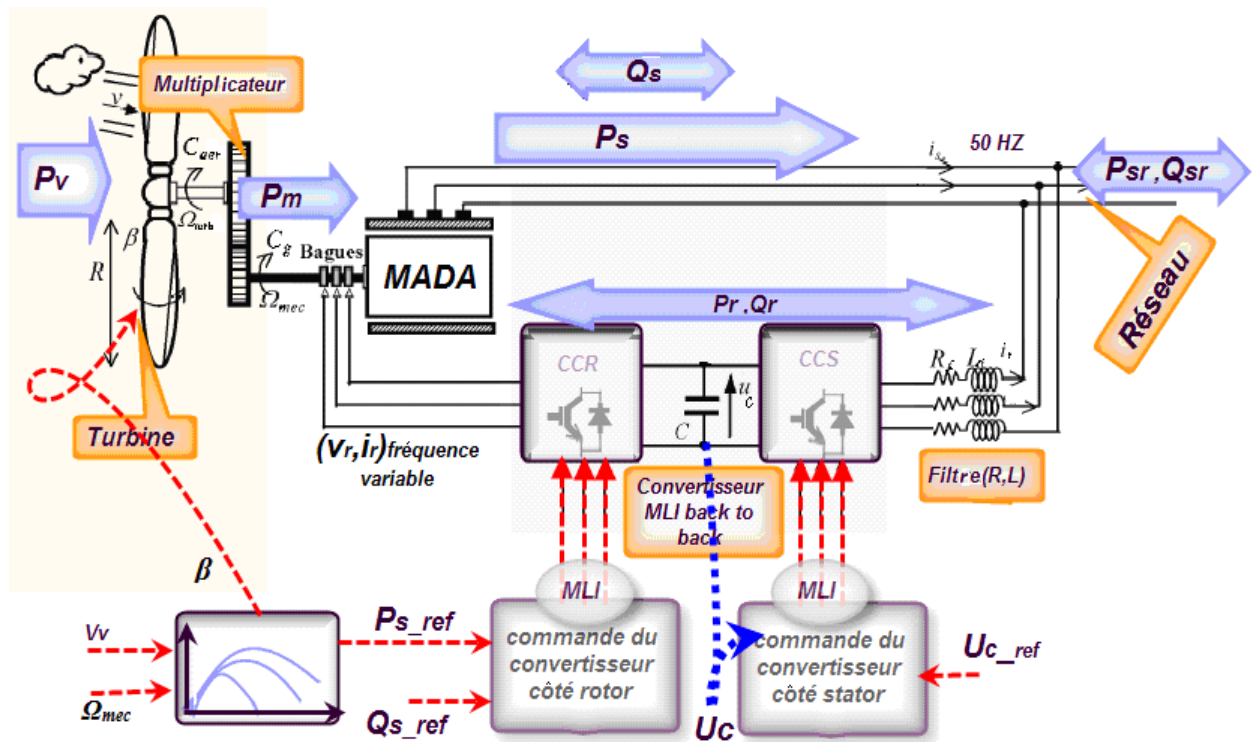


Figure III. 1: Schéma synoptique pour le modèle d'une commande de la chaîne de conversion étudiée

Le fonctionnement à vitesse variable demande la définition d'une stratégie de commande globale de l'aéroturbine; c'est à dire qu'il faut, d'une part, indiquer quelles sont les variations de vitesse de rotation, couple ou puissance souhaitées en fonction des variations du vent et, d'autre part, par l'indication d'un facteur de puissance global côté réseau. Nous allons donc, dans le paragraphe suivant, déterminer les équations qui lient les puissances active et réactive statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

III.3 Contrôle des puissances active et réactive

III.3.1 Commande vectorielle de la MADA (en génératrice)

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques à ces puissances.

III.3.1.1 Rappel du modèle diphasé de la MADA

Les relations électriques et magnétiques régissant le fonctionnement de la MADA d'après [Ack 2003 b], [Vid 2004] et [Akt 2006] sont :

$$\begin{aligned}
v_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\
v_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\
v_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\
v_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd}
\end{aligned} \tag{III.1}$$

$$\begin{aligned}
\phi_{sd} &= L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{sq} \\
\phi_{sq} &= L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rd} \\
\phi_{rd} &= L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\
\phi_{rq} &= L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq}
\end{aligned} \tag{III.2}$$

En choisissant un référentiel diphasé (d, q) lié au champ tournant statorique et en alignant le vecteur flux statorique ϕ_s avec l'axe d , nous pouvons écrire [Poi 2003 a] [Boy 2006] :

$$\phi_{sd} = \phi_s \text{ et } \phi_{sq} = 0 \tag{III.3}$$

Le couple électromagnétique de l'équation (II.22) s'écrit alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} i_{rq} \phi_{sd} \tag{III.4}$$

Les expressions des flux statoriques de la machine deviennent :

$$\begin{aligned}
\phi_{sd} &= L_s i_{sd} + M i_{rd} \\
0 &= L_s i_{sq} + M i_{rq}
\end{aligned} \tag{III.5}$$

Dans l'hypothèse où le flux ϕ_{sd} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix du repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et, par conséquent, la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q .

Dans le repère triphasé a, b, c , la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{sn} = R_s i_{sn} + \frac{d\Phi_{sn}}{dt} \tag{III.6}$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyennes et fortes puissances utilisées dans l'énergie éolienne, cette relation devient :

$$v_{sn} = \frac{d\Phi_{sn}}{dt} \quad (\text{III.7})$$

La relation (III.7) montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statorique et qu'il est en avance de $\pi/2$ sur ce même vecteur.

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant) :

$$\begin{aligned} v_{sd} &= 0 \\ v_{sq} &= v_s = \omega_s \phi_{sd} \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

$$\begin{aligned} \Phi_s &= L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ 0 &= L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

A partir de l'équation (III.2), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{aligned} i_{sd} &= \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} &= -\frac{M}{L_s} i_{rq} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

III.3.1.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent [Reg 2005] [Vid 2004] :

$$\begin{aligned} P &= v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \\ Q &= v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($v_{sd} = 0, v_{sq} = v_s$) donne :

$$\begin{aligned} P &= v_{sq} i_{sq} \\ Q &= v_{sq} i_{sd} \end{aligned} \quad (III.12)$$

En remplaçant i_{sd} et i_{sq} par leurs expressions données par les expressions (III.10), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{aligned} P_s &= -v_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s &= \frac{v_s \Phi_s}{L_s} - \frac{v_s M}{L_s} i_{rd} \end{aligned} \quad (III.13)$$

En approximant ϕ_s par $\frac{v_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q_s = \frac{v_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{v_s M}{L_s} i_{rd} \quad (III.14)$$

III.3.1.3 Relations entre tensions et courants rotoriques

Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les expressions (III.2) en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans les expressions (III.10):

$$\begin{aligned} \Phi_{rd} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rd} + \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{rq} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rq} \end{aligned} \quad (III.15)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (III.1). Nous obtenons alors :

$$\begin{aligned} v_{rd} &= R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rq} \\ v_{rq} &= R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rd} + g \omega_s \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \end{aligned} \quad (III.16)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent. Nous pouvons donc écrire :

$$v_{rd} = R_r i_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \tag{III.17}$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \omega_s \frac{M v_s}{\omega_s L_s}$$

v_{rd} , v_{rq} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

Les équations (III.13), (III.16) et (III.17) permettent d'établir des schémas bloc du système électrique à réguler la figure (III. 2) et de la figure (III. 3):

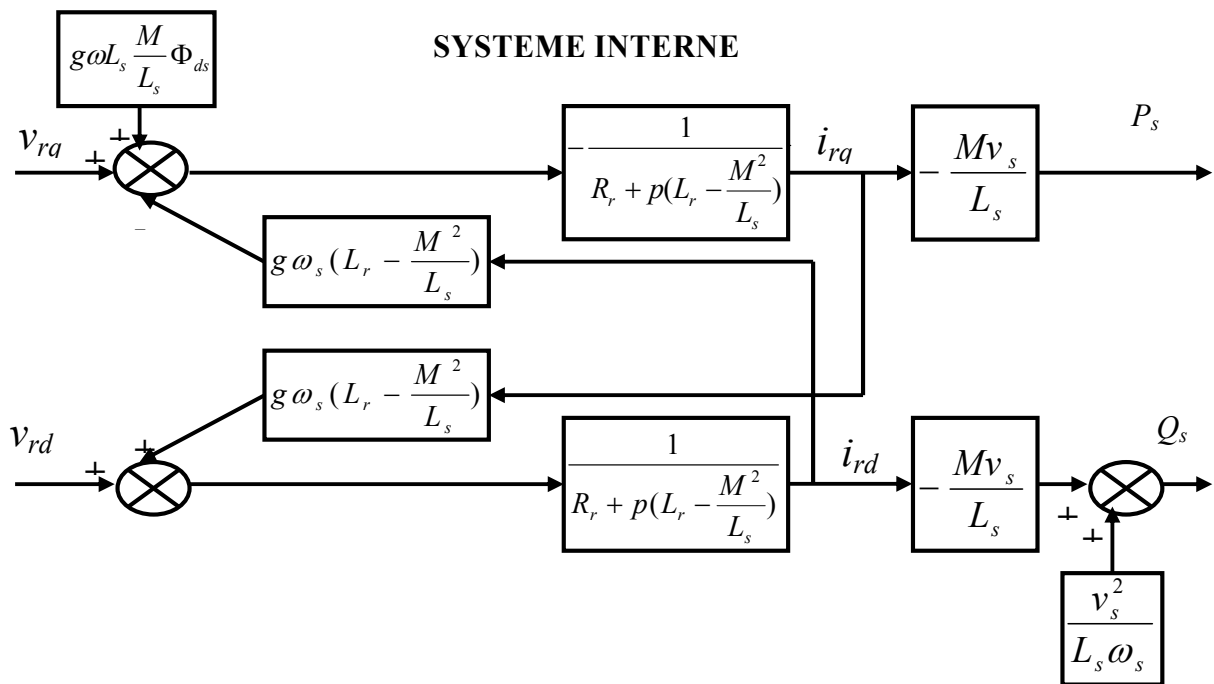


Figure III. 2: Schéma - bloc du système à réguler

L'influence des termes de couplage $L_r - \frac{M^2}{L_s}$ entre les deux axes est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. Le système précédent devient [Poi 2003 a] :

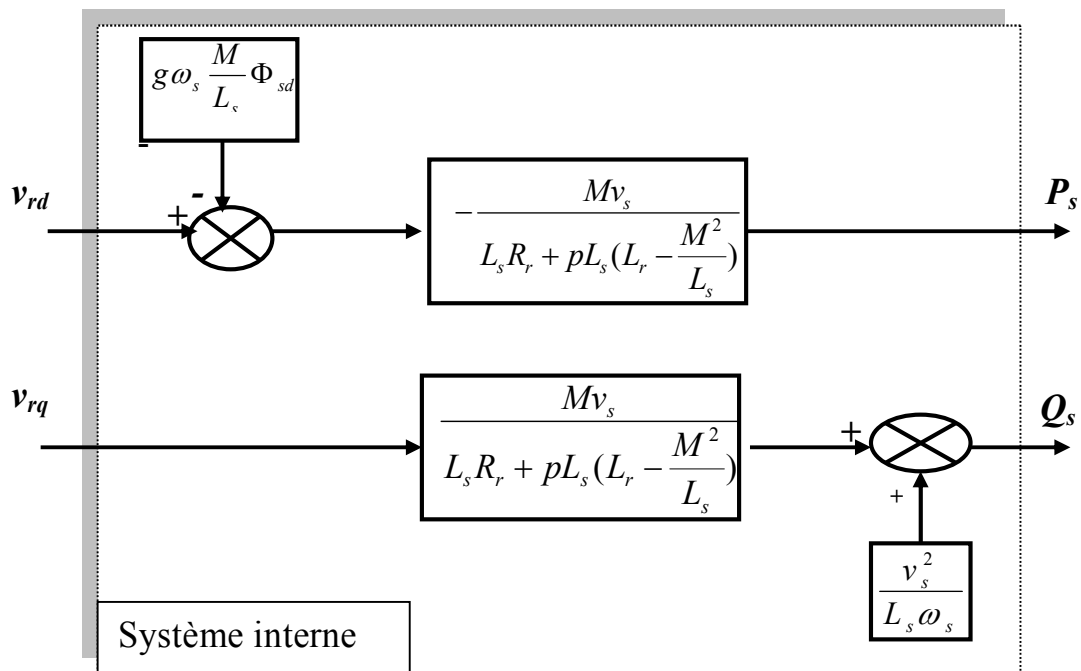


Figure III. 3: le système interne si le terme de couplage est négligeable

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné que, à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur.

Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive est réglée selon les caractères du réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

III.3.1.4 Principe général et simplifié de la commande

Le principe général de la commande vectorielle en puissances active et réactive est donné sur la figure III. 4.

Nous pouvons constater la présence de deux régulateurs sur chaque axe : (R_{d1} et R_{d2}) pour l'axe d et (R_{q1} et R_{q2}) pour l'axe q .

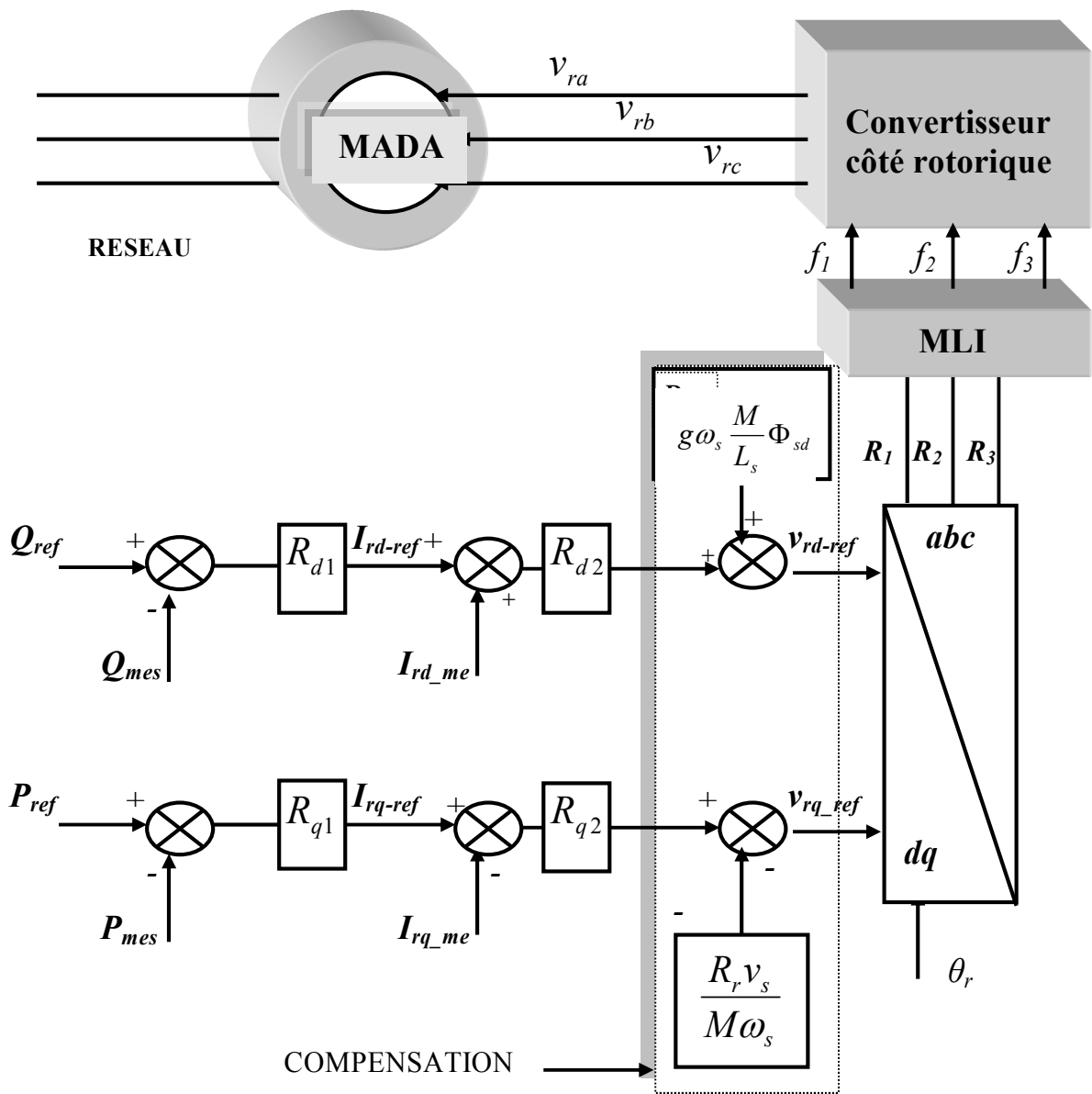


Figure III. 4: Principe général de la commande vectorielle en P et Q de la MADA

Lorsque la machine fonctionne en autonome ou lorsque le réseau auquel le stator de la machine est connecté présente des variations importantes, le terme v_s est variable et la présence des régulateurs R_{d2} et R_{q2} se justifie. Dans notre cas, nous considérons que la machine est connectée sur un réseau stable, la tension v_s est par conséquent constante et les régulateurs R_{d2} et R_{q2} sont inutiles. Chaque axe comporte donc un seul régulateur PI comme indiqué sur la figure III.5.

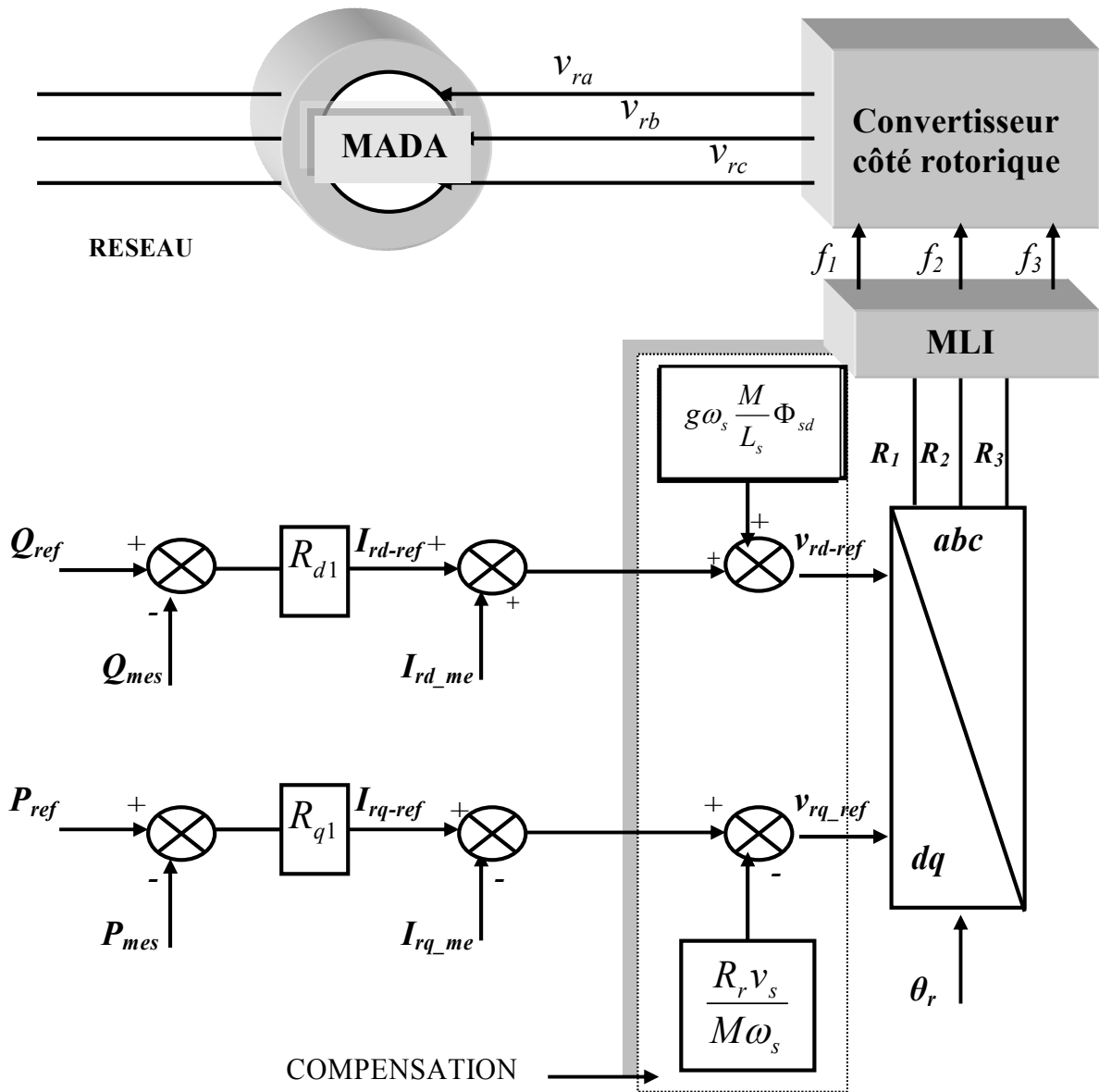


Figure III. 5: Commande vectorielle avec un seul régulateur

III.3.2 Commande vectorielle par le convertisseur CCR

Pour cette commande, les équations du générateur (MADA) sont données par rapport au système de référence lié au flux du stator. Ce système de référence correspond aux axes (d, q) de la figure III.5. Il permet de découpler les expressions de la puissance active et réactive du générateur ou encore celles du flux et du couple. La composante quadratique du rotor v_{qr} contrôle le couple électromagnétique et la composante directe v_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau. On retrouve ainsi le découplage si avantageux des moteurs à courant continu. Les deux composantes du courant au rotor sont commandées par deux régulateurs PI donnant les références de la tension au rotor. Cette tension est ensuite commandée par une MLI.

III.4 Les tests de la commande

La modélisation de la machine, de la partie mécanique du système et de la commande à été implantée dans l'environnement MATLAB afin d'effectuer des tests de la régulation.

Nous avons donc soumis le système à des variations de puissance active et des échelons de puissance réactive afin d'observer le comportement de la régulation.

III.4.1 Premier essai (vitesse de rotation fixe)

Le premier essai consiste à réaliser des échelons de puissance active et réactive pour le stator alors que la machine est entraînée à vitesse fixe.

Les conditions de l'essai :

- La machine est entraînée à 1600 tr/min.
- Les échelons de puissance active : à $t = 2$ s, P_s passe de - 1000 kW à - 500 kW,
à $t = 4$ s, P_s passe de - 500 kW à - 1500 kW.
- Les échelons de puissance réactive : à $t = 1,5$ s, Q_s passe de - 500 kVAR,
à $t = 3$ s, Q_s passe de 0 kVAR à 500 kVAR.

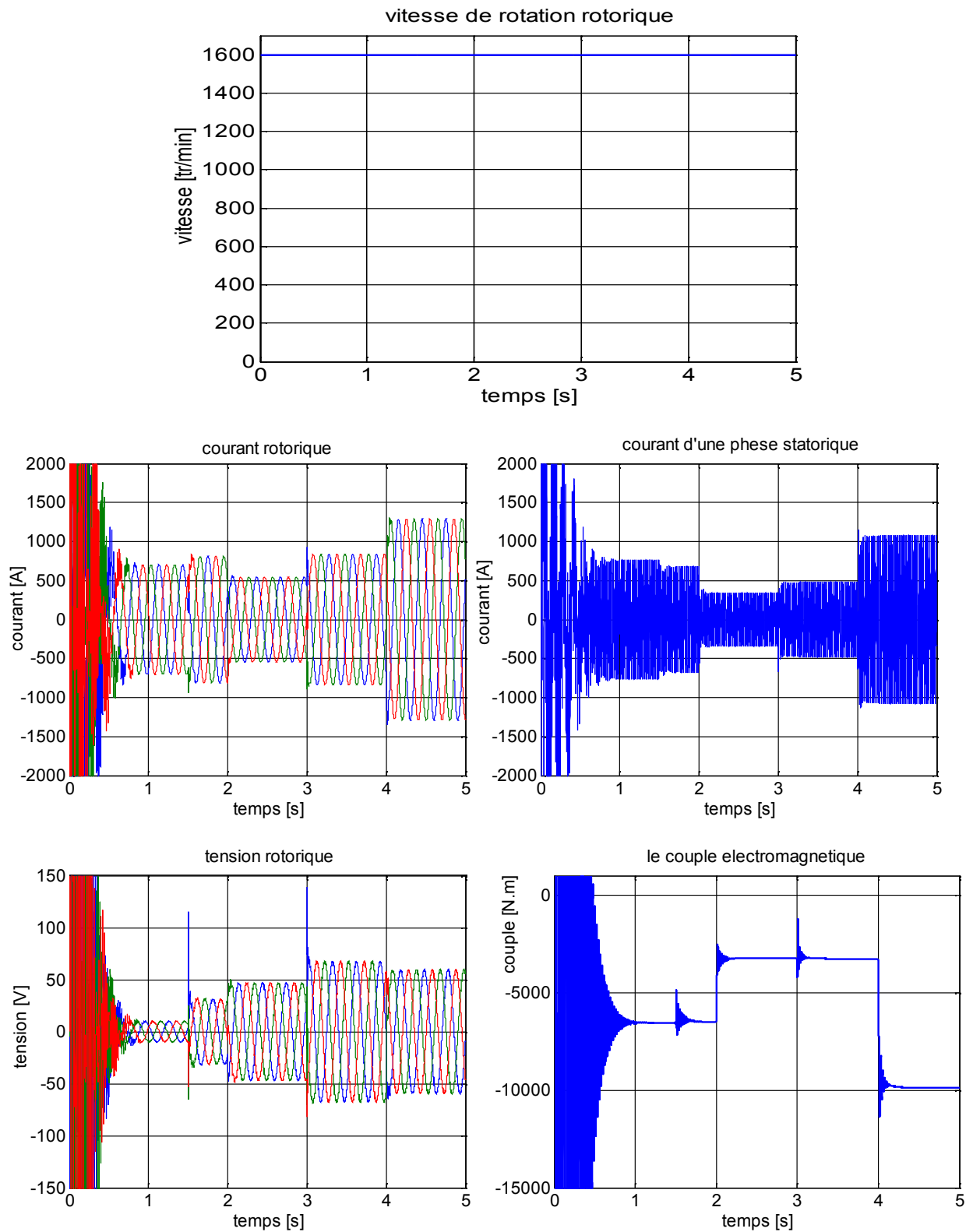


Figure III. 6: Résultats de simulation pour la vitesse de rotation 1600 (tr/min)

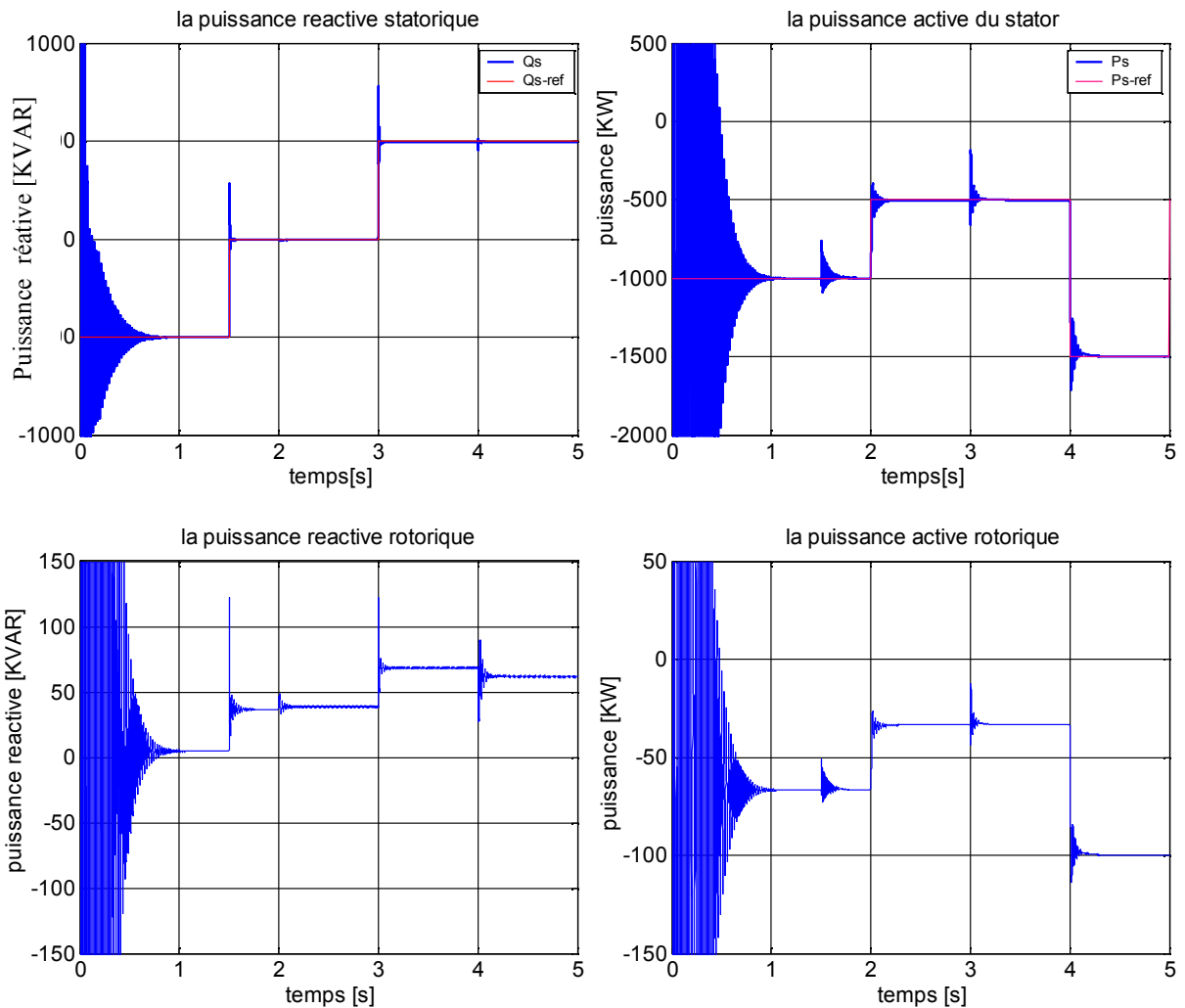


Figure III. 7: Résultats de simulation pour les puissances actives et réactive à la vitesse de rotation 1600 tr/min

On observe une dynamique qui réagit rapidement pour les puissances statoriques. La puissance réactive Q_s qui suit bien sa référence Q_{s_ref} . On peut remarquer aussi un faible dépassement avec un temps de réponse qui est acceptable pour la puissance active.

On peut observer aussi sur la courbe de puissance active rotorique que cette dernière est négative et sa valeur est justifiée le régime de fonctionnement hyper – synchrone de la machine. Dans ce cas la génératrice fournit la puissance active au réseau à travers le rotor, ce qui donne un avantage à la MADA en régime hyper - synchrone.

III.5 Fonctionnement dans la deuxième partie des zones de fonctionnement

sur (la figure I.8)

L'objectif de la stratégie de commande est visualisé les caractéristiques statiques représentant la puissance développée par la turbine éolienne par rapport à la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent. La courbe de puissance maximale est représentée sur la figure III.8 en reliant les points de la puissance maximale de chaque caractéristique statique.

Ainsi, l'objectif de la commande est de suivre la courbe de puissance maximale entre la vitesse de rotation de démarrage (vitesse à partir de laquelle l'éolienne commence à produire l'énergie) et la vitesse du vent nominale 11,5 m/s, avec laquelle la vitesse de rotation est maximale et la puissance extraite est nominale. A partir de la vitesse de démarrage et en suivant la courbe de la puissance maximale, l'éolienne tourne à la vitesse de rotation liée à la vitesse spécifique optimale λ_{opt} pour laquelle le coefficient de puissance C_p est maximal.

Pour toutes les vitesses du vent supérieures à 11,5 m/s, la puissance de l'éolienne doit être maintenue constante (vitesse de rotation nominale)

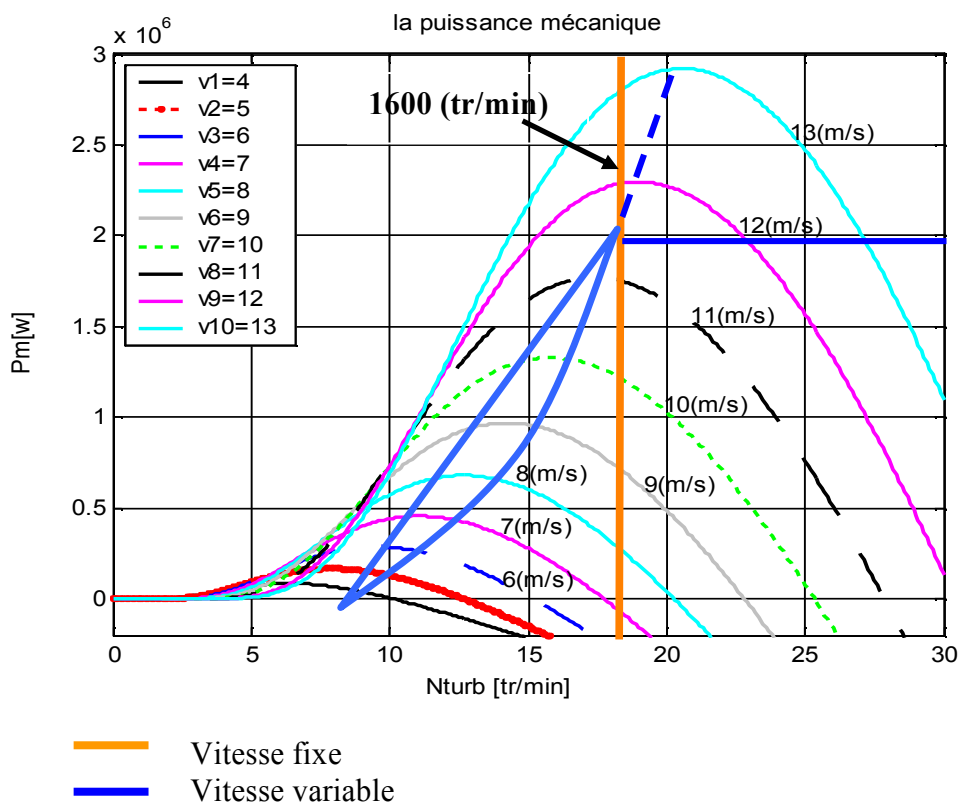


Figure III.8: puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation de son axe lent

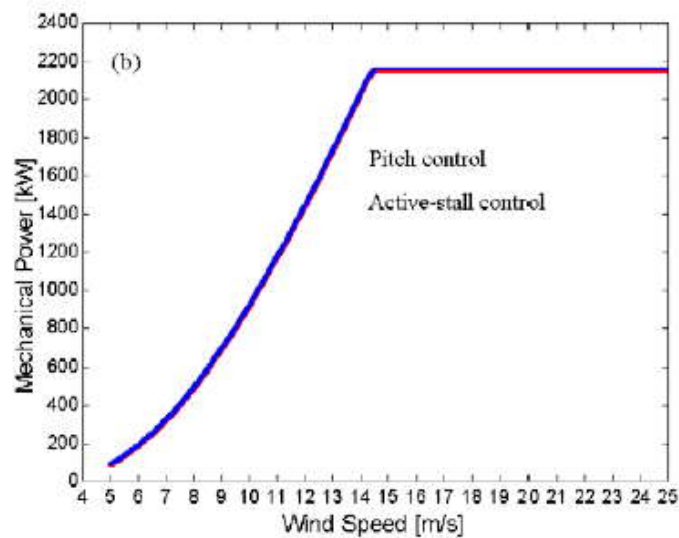


Figure III.9: La puissance générée en fonction de la vitesse du vent pour une éolienne de puissance nominale 2 MW [Ack 2003 b]

La figure III. 9 montre un exemple d'une caractéristique de la puissance en fonction de la vitesse du vent d'une éolienne de puissance nominale 2 MW. On constate à partir de cette figure que la puissance est limitée à sa valeur nominale pour une vitesse du vent $V_{v-nom} = 15$ m/s.

III.5.1 Optimisation de la conversion énergétique : Zone II - (charge partielle)

Dans cette partie, nous présentons la stratégie MPPT pour contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. La structure de commande employée est le contrôle par asservissement de la vitesse.

III.5.2 Le contrôle avec asservissement de la vitesse

Dans la zone II, on cherche à maintenir la valeur du coefficient de vitesse spécifique à son optimum. Cette vitesse est notée λ_{opt} . Une boucle de régulation de la vitesse de rotation est alors mise en œuvre et sa valeur de référence Ω_{ref} , En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc : $\Omega_{mec-ref} = K.\Omega_{turb-ref}$

$$\text{A partir de l'expression : } \lambda_{opt} = \frac{R\Omega_{turb-ref}}{V_v}$$

On déduit la vitesse de référence de la turbine :

$$\Omega_{turb-ref} = \frac{\lambda_{opt}.V_v}{R} \quad (III.18)$$

Si le fait du couple des frottements visqueux est négligeable, la vitesse de rotation donc n'est plus régie que par l'action de deux couples : le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} \tag{III.19}$$

Le contrôle de la vitesse de rotation peut être réalisé en agissant sur le couple C_{em} . L'architecture de la commande peut être issue de l'inversion du graphe de la figure II.10. La première relation à inverser est la relation (II.30) [Rog 2004].

$$C_{mec_reg} = C_g - C_{em-ref} \tag{III.20}$$

L'asservissement de vitesse nécessite l'emploi d'un correcteur de vitesse C_Ω . Le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} , permettant d'obtenir la vitesse mécanique de la génératrice, est donné par:

$$C_{em-ref} = C_\Omega \cdot (\Omega_{ref} - \Omega) \tag{III.21}$$

La représentation sous forme d'un schéma bloc se déduit comme suit :

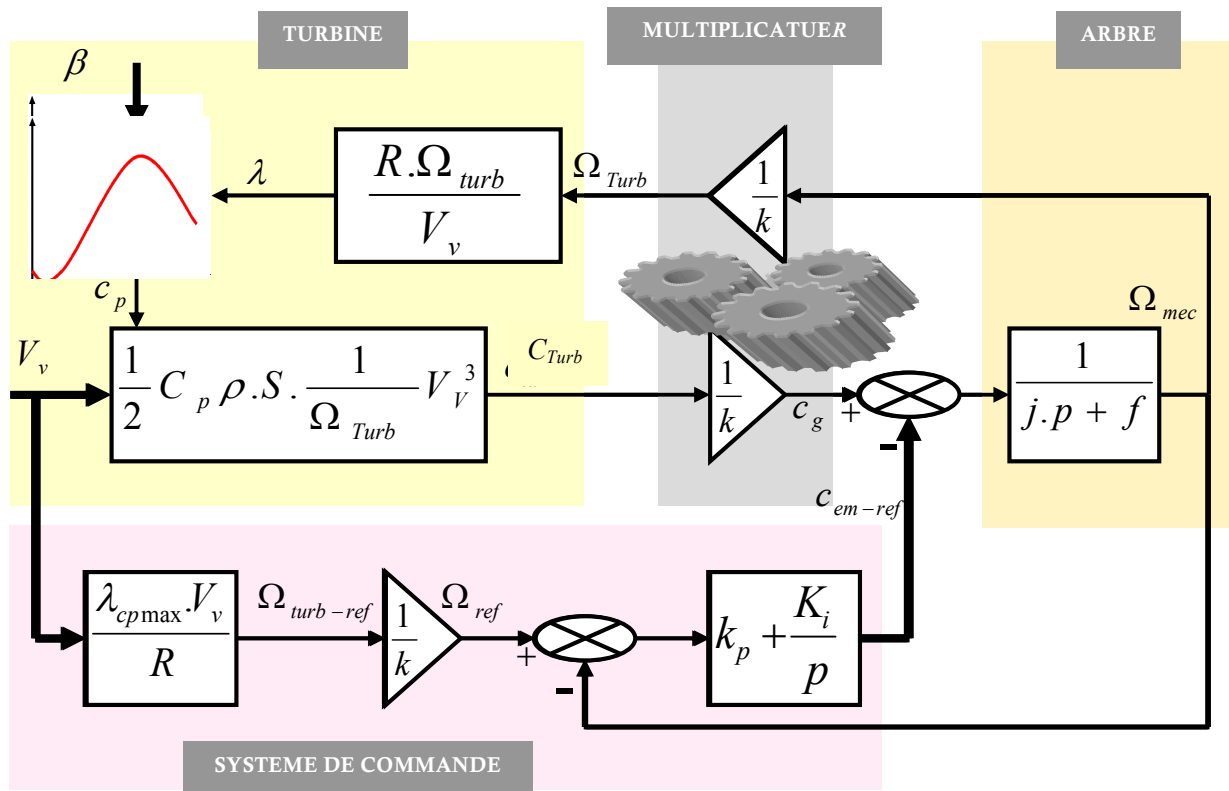


Figure III.10: Schéma fonctionnel de commande avec asservissement de la vitesse

III.5.3 deuxième essai (vitesse du vent variable avec introduction de la MPPT)

Les conditions de l'essai sont:

- le vent utilisé dans la simulation a une valeur entre 11,5 m/s et 9 m/s,
- l'angle de calage β est fixée a 1° ,
- la référence de puissance active est choisie selon la stratégie MPPT,
- les échelons de puissance réactive:
 - à $t = 3$ s, Q_S passe de -600 kVAR à 0 kVAR,
 - à $t = 5$ s, Q_S passe de 0 kVAR à 400 kVAR.

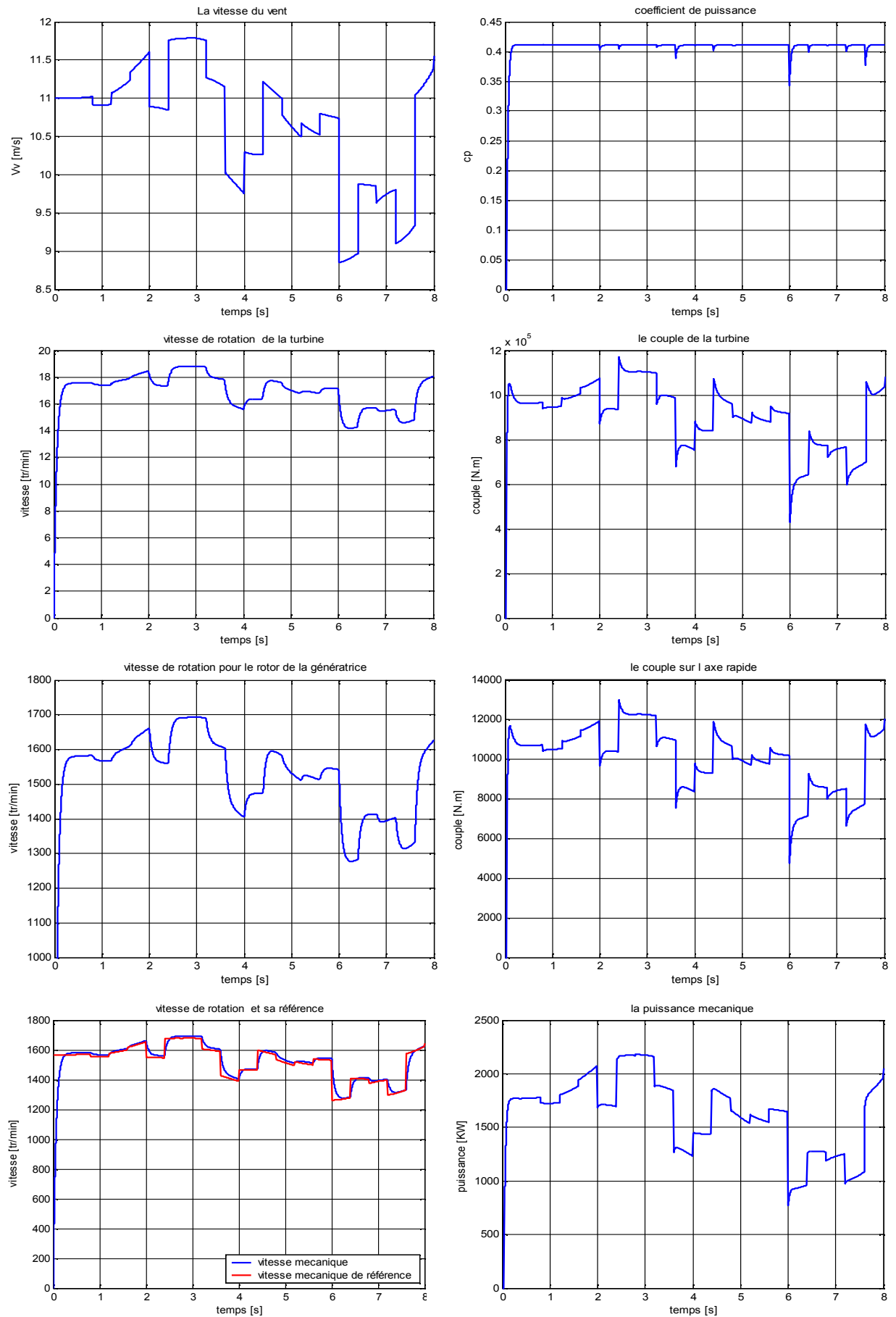


Figure III.11: Evolution des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion.

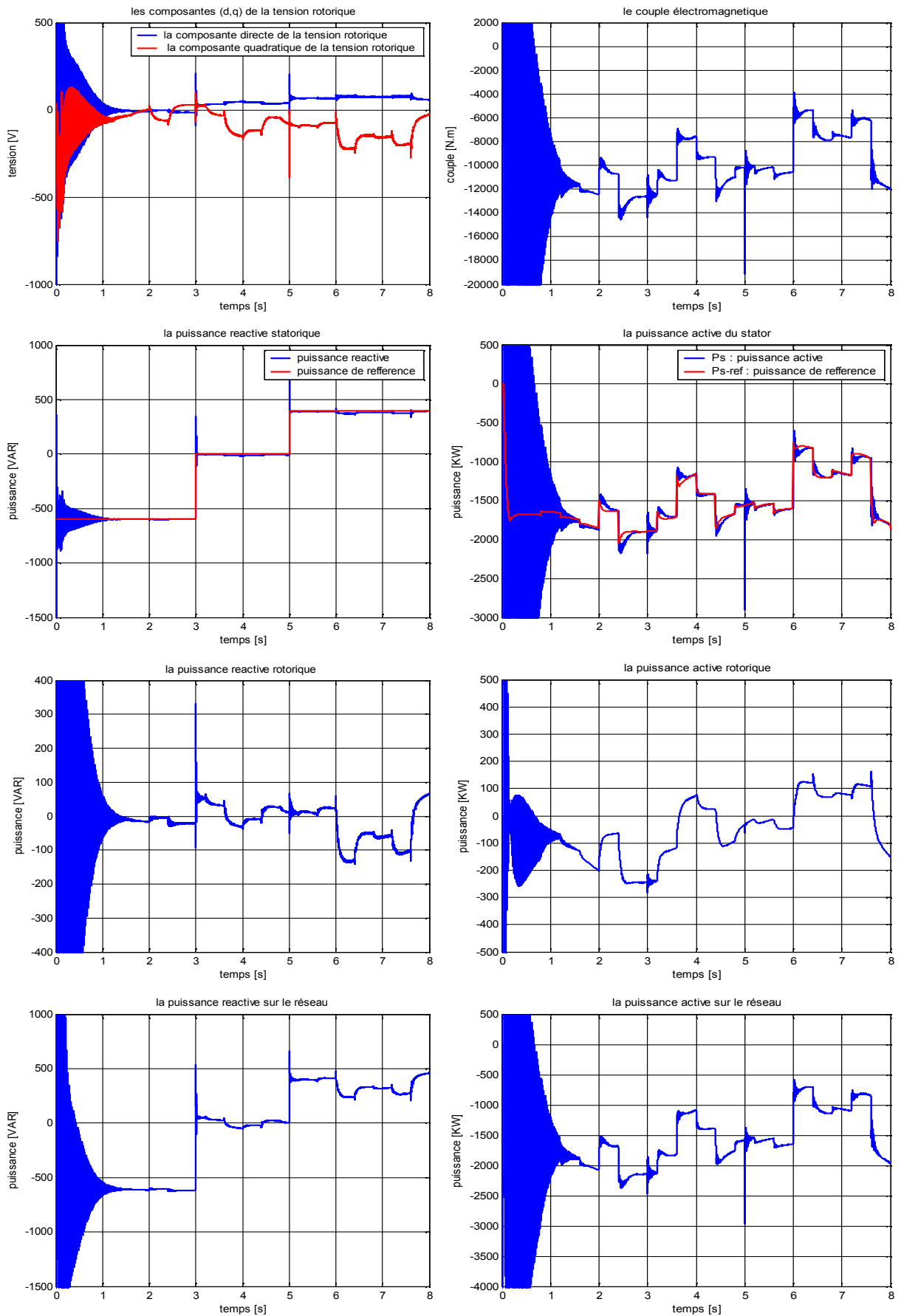


Figure III.12: Evolution suivant (v_d , v_q) des puissances active et réactive dans le système de conversion éolien

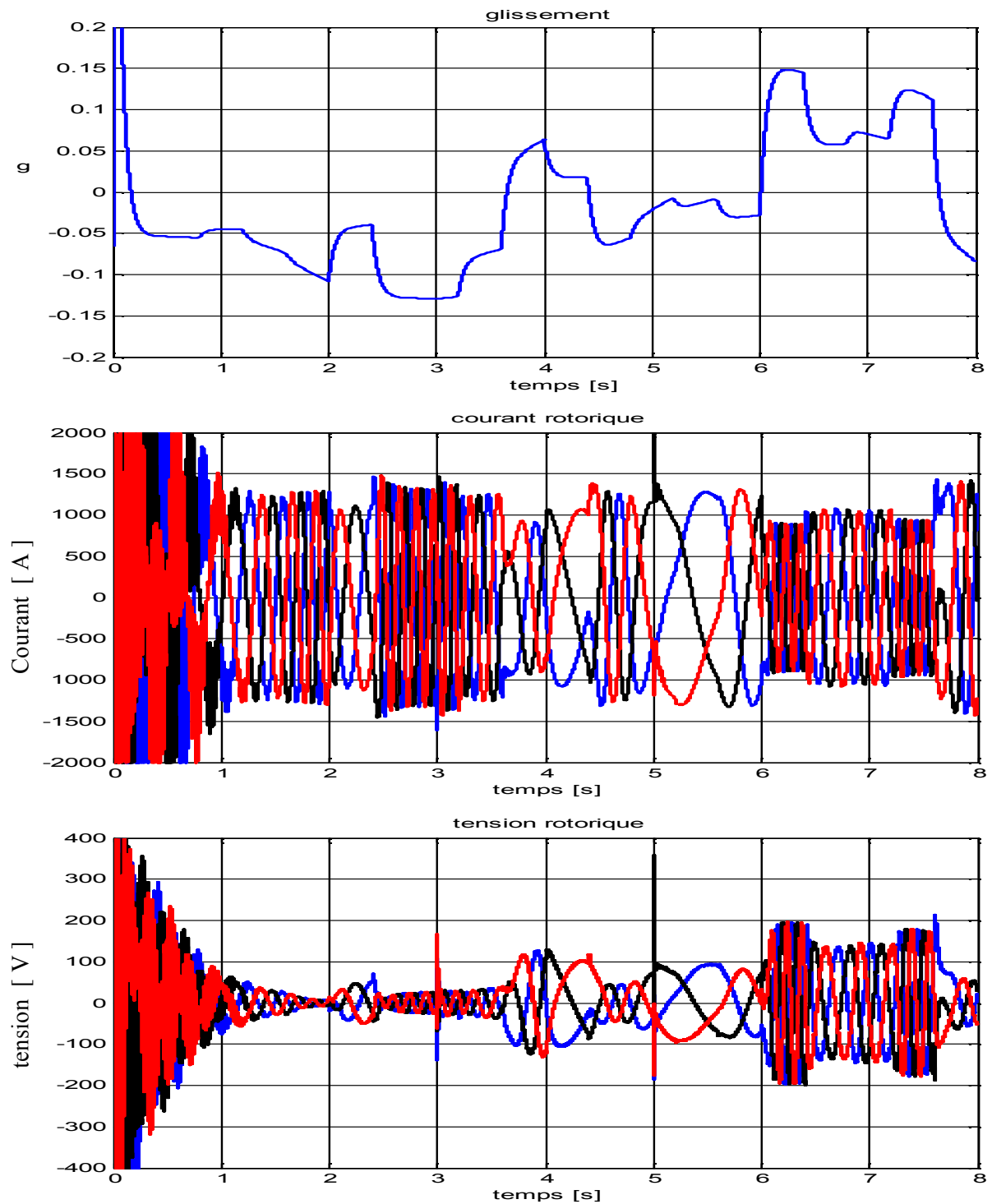


Figure III.13: Evolution des tensions et courants rotoriques suivant le glissement de la machine.

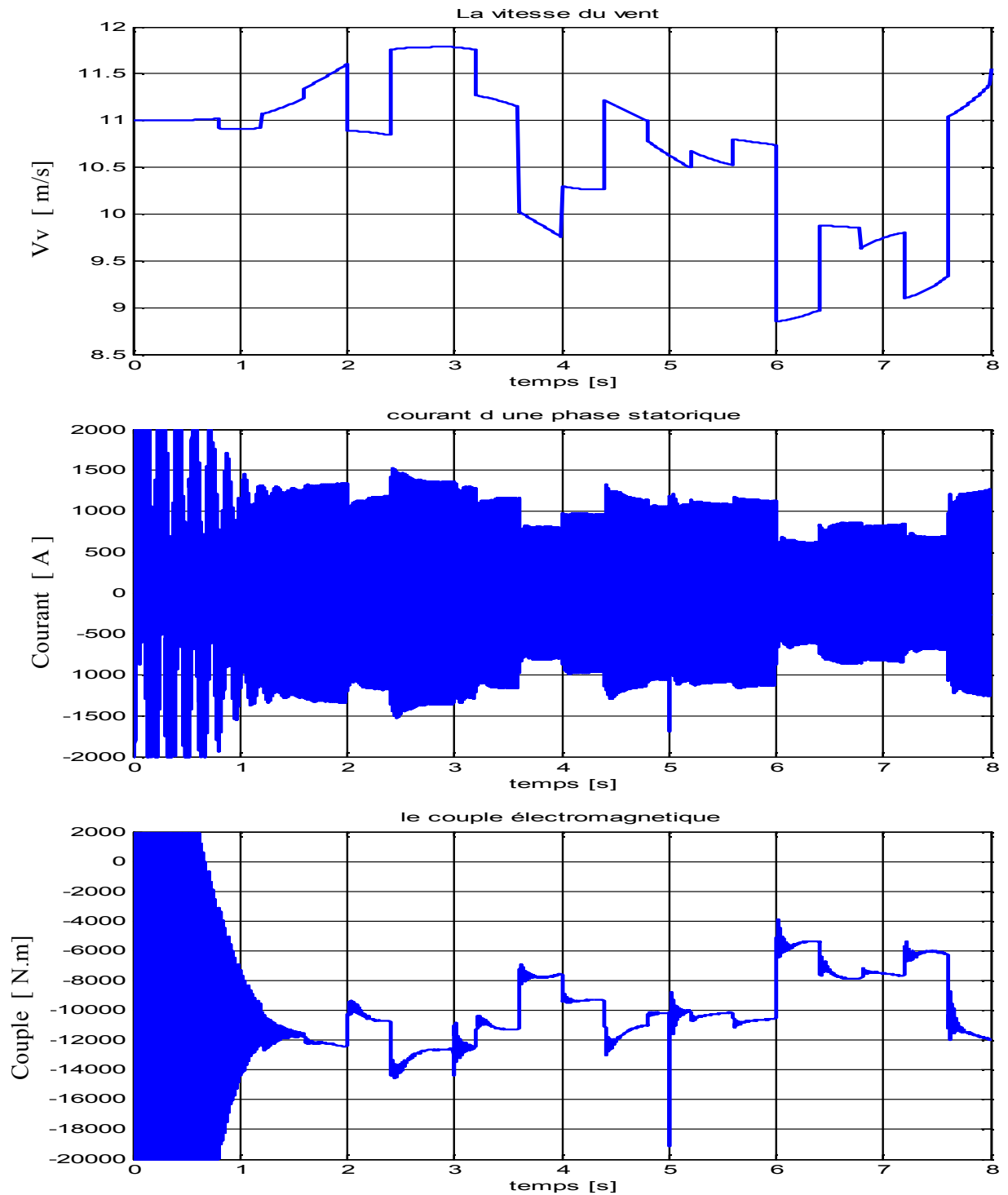


Figure III.14: Variation du couple électromagnétique et de courant statorique suivant le profil du vent

Sur la première courbe de la figure III.11, nous avons représenté le profil du vent auquel est soumise cette éolienne pendant un temps $t = 8$ s. Les courbes des caractéristiques mécaniques (le coefficient de puissance C_p , la vitesse de la turbine N_{turb} tr/min, celle de la génératrice N_g tr/min ainsi que le couple après et avant le multiplicateur (C_{turb} , C_g) et la puissance mécanique P_m (kW)) sont également représentés sur cette figure. Nous avons ensuite représenté les différentes puissances active et réactive de ce système, le couple électromagnétique de la MADA, C_{em} (N.m) et les composantes des tensions rotoriques dans le système diphasé (d , q) dans la figure III.12.

Le glissement, les grandeurs électriques rotoriques (le courant i_r (A) et la tension v_r (V)), le courant statorique i_s (A) et le couple électromagnétique sont montrés sur les figures III.13 et III.14. L'analyse de ces courbes nous permet de faire quelques observations et remarques.

- * Comme une première observation, les résultats de simulation présentés sur la figure III.12 nous montrent qu'une petite variation de vent peut induire une grande variation de la puissance extraite (puissance mécanique), à cause de la proportionnalité de cette dernière à la valeur moyenne de la vitesse cubique du vent.
- * On constate sur la même figure III.11 de la puissance mécanique que, à certains moments, cette puissance peut dépasser sa valeur nominale. Ceci explique le passage d'un mode de fonctionnement à un autre (passage de la zone II à la zone III). Ce basculement nécessite la mise en œuvre des autres stratégies de commande et un superviseur pour le changement de ces modes selon la vitesse du vent.
- * D'après la figure III.12 On peut remarquer que les puissances active et réactive statoriques sont suivies d'une façon acceptable leurs références pendant la durée de cette simulation. On peut, cependant, observer l'effet de couplage entre les deux axes de commande (d , q), car un échelon sur l'un de ces deux axes ou une variation sur le second peut induire des oscillations sur l'autre. Ces oscillations apparaissent clairement si le changement touche la puissance réactive.
- * Nous pouvons observer aussi que la grande variation de la vitesse du vent influe sur la régulation de la puissance réactive.
- * La puissance active statorique suit donc sa référence pour permettre à l'éolienne de fonctionner dans des conditions optimales. Cette manière de fonctionner est justifiée par la valeur maximale du coefficient de puissance ($C_p \approx 0,41$).
- * Comme le montre la courbe de la puissance active rotorique, cette puissance évolue en fonction de la puissance active dans le stator et la valeur de glissement g ; ce qui vérifie l'expression : $P_r = -g.P_s$.

- * Nous avons également représenté les variations des tensions et des courants rotoriques afin de mettre en évidence la variation de vitesse et le fait que la fréquence des signaux rotoriques correspond à la différence entre la fréquence du réseau et celle de la vitesse de rotation mécanique.
- * Nous constatons sur la figure III.14 que le courant statorique est une image du couple électromagnétique qui évolue selon la vitesse du vent.
- * D'une façon globale, nous constatons que la plupart des variables ont suivi l'évolution du vent.

III.5.4 Troisième essai (La robustesse de la commande)

La robustesse peut être obtenue par rapport aux perturbations externes comme la vitesse et la densité du vent ou la fluctuation de la fréquence sur le réseau, mais aussi par rapport aux changements des caractéristiques de l'éolienne. En effet, ces caractéristiques sont modifiées avec l'usure ou les conditions climatiques par exemple. L'hiver, dans certaines régions, des blocs de glaces peuvent par exemple se former sur les pales [Cam 2003], ce qui peut modifier l'inertie totale de l'éolienne. De plus, on peut parler aussi de robustesse par rapport aux changements des paramètres de la machine.

Le but de ce test est de valider avec une simulation numérique la robustesse de la commande PI vis-à-vis des perturbations représentées ici par le vent et le changement inertiel de système.

III.5.4.1 Robustesse vis-à-vis de la vitesse du vent

Dans l'objectif de tester la robustesse de la commande, nous allons étudier le comportement du système en utilisant un autre profil du vent. Cette structure de commande a été simulée en considérant un profil du vent autour de 8 m/s au lieu de la vitesse 11 m/s prise précédemment.

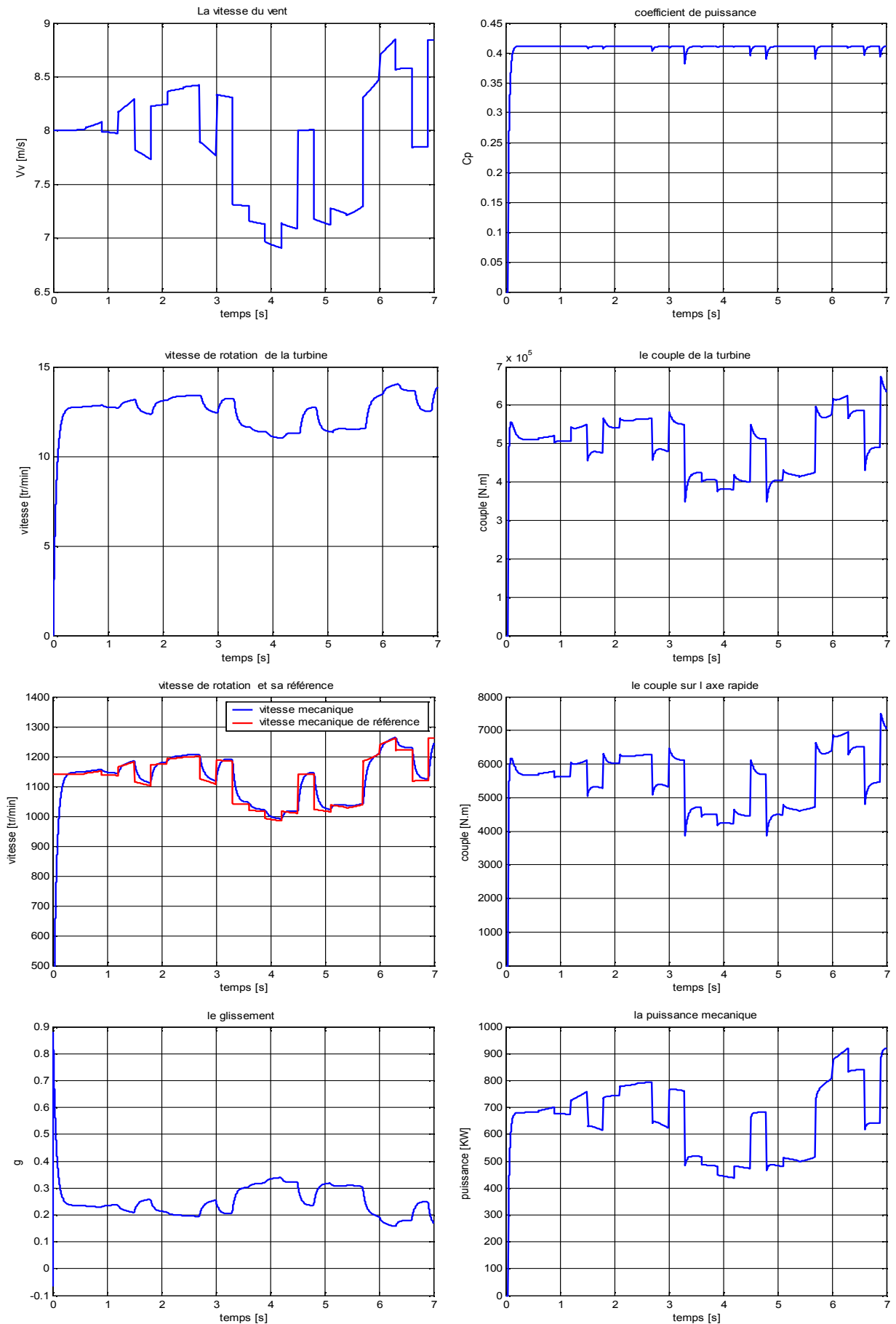


Figure III.15: Evolution des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion globale.

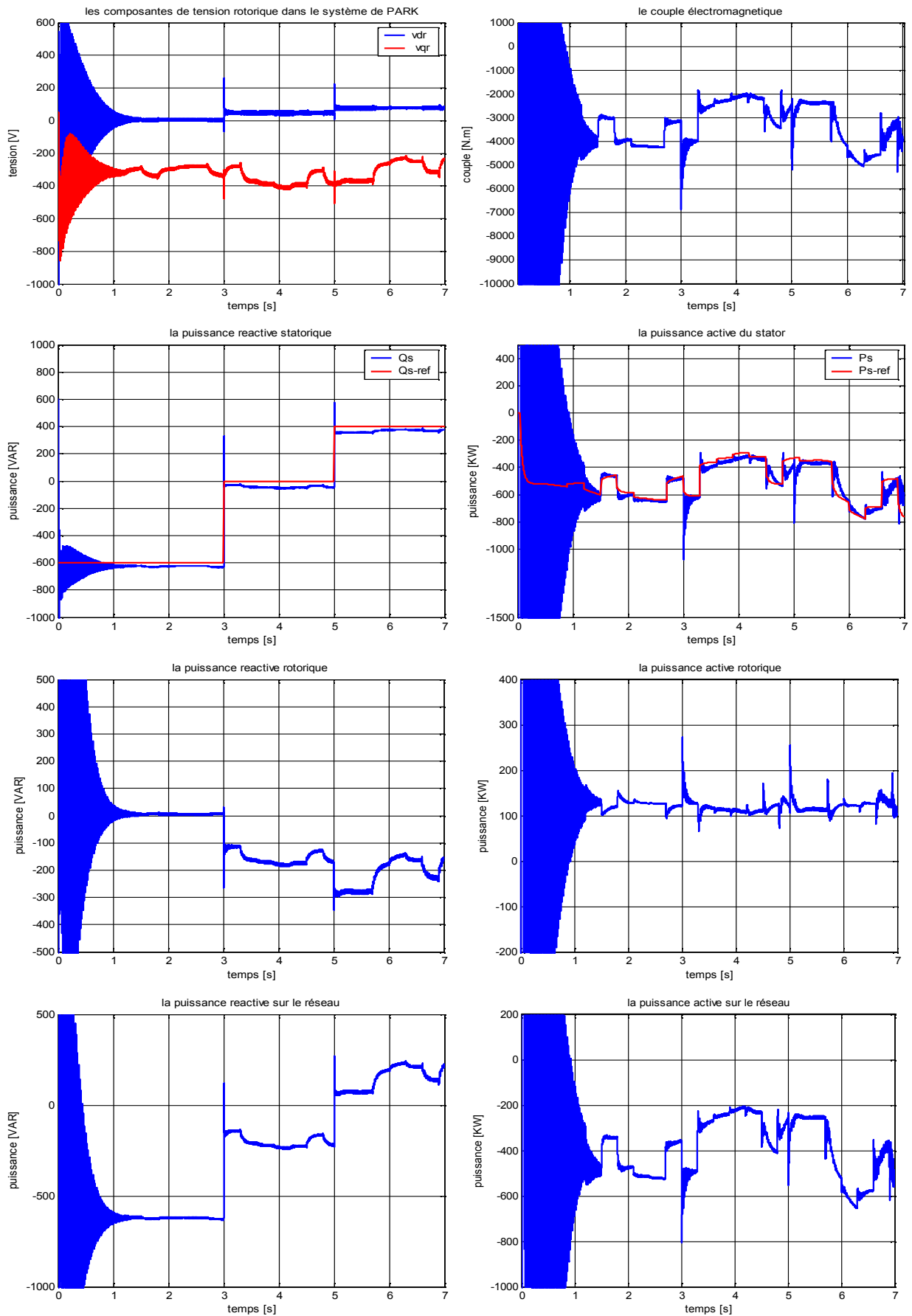


Figure III.16: Evolution suivant (v_d , v_q) des puissances active et réactive dans le système de conversion éolien

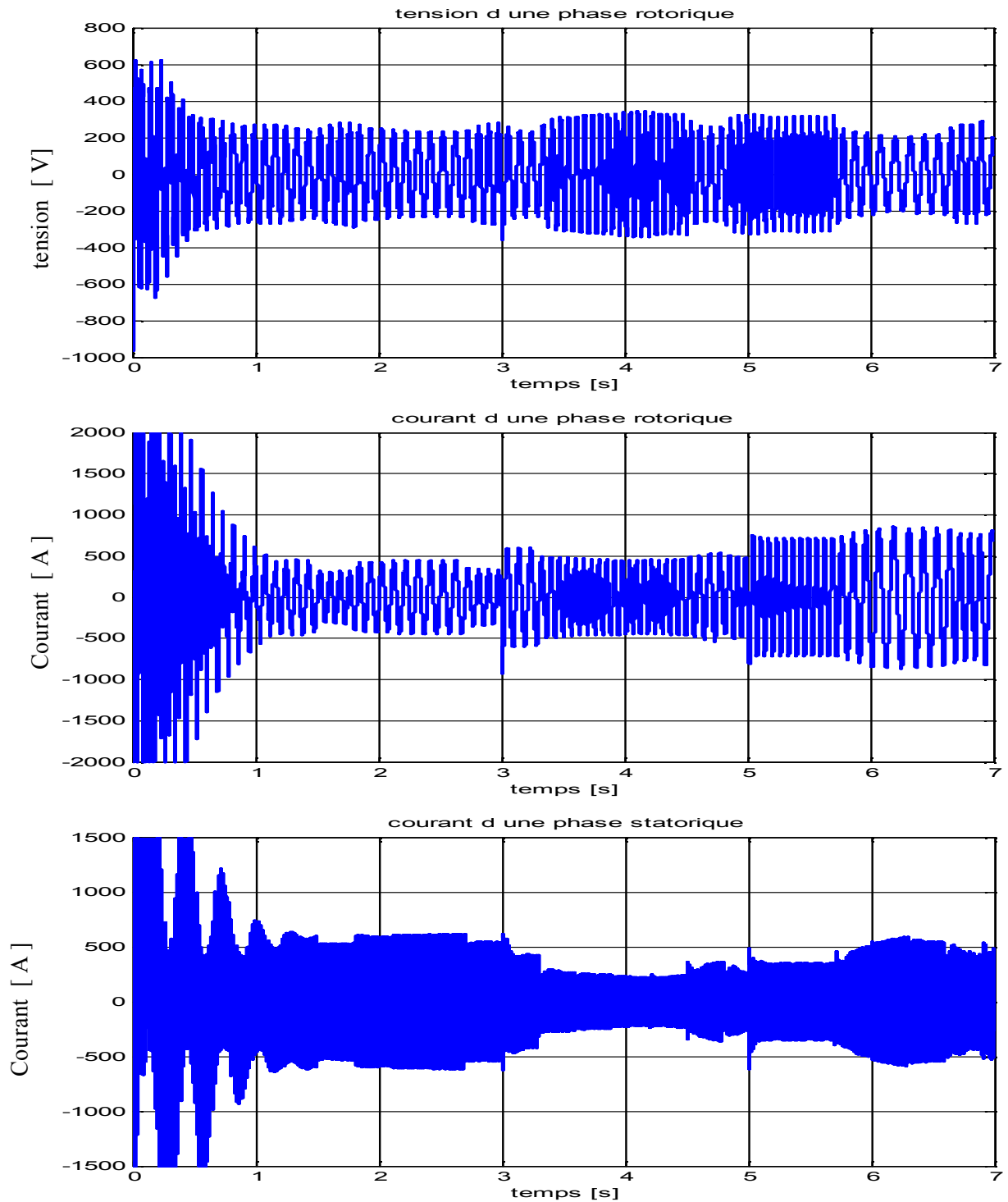


Figure III.17: Variation des grandeurs électriques pour le rotor et le stator de la machine suivant la variation de la vitesse du vent.

En comparant les résultats obtenus pour ce profil du vent (autour de 8 m/s) avec ceux obtenus pour une vitesse du vent (autour de 11 m/s), on peut remarquer que l'amplitude du courant rotorique a diminué pour les faibles vitesses du vent. Par contre, l'amplitude de la tension rotorique a augmenté.

A partir des résultats illustrés sur la figure III.16, comme il est montré sur les courbes des puissances, on a remarqué une très légère différence concernant les puissances active et réactive statoriques et leurs références respectives. Ceci, nous permet de souligner une assez bonne robustesse de la commande PI vis-à-vis de la variation de la vitesse du vent.

III.5.4.2 Robustesse vis-à-vis le changement de l'inertie

Ici, on traitera le second problème, c'est à dire celui de la robustesse face au changement de l'inertie totale du système.

Moment d'inertie de la machine (J_g):	90 kg.m ²
Moment d'inertie de la turbine (J_{turb}):	90.105 kg.m ²
Moment d'inertie totale (J_t):	1201 kg.m ²

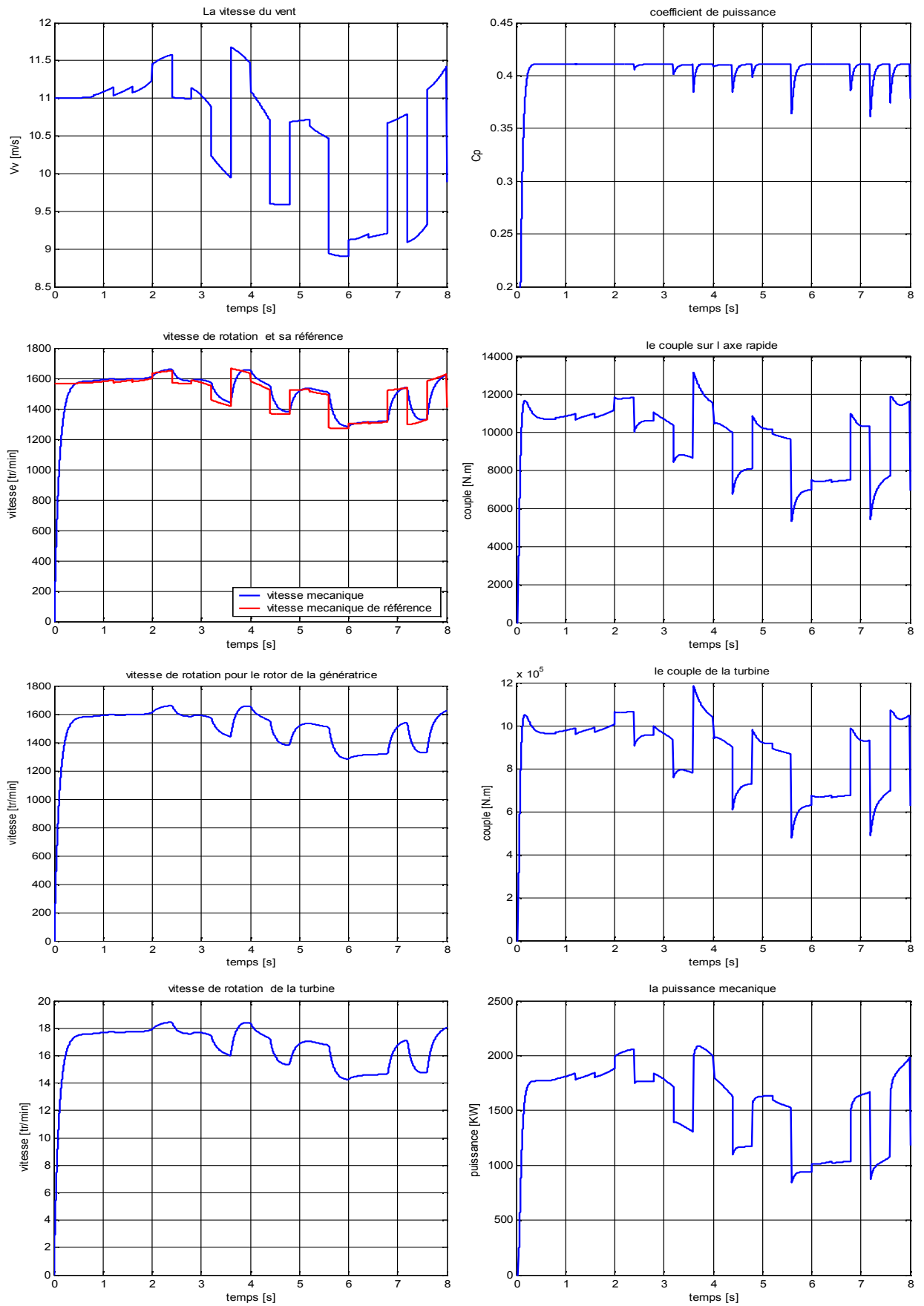


Figure III.18: Evolution des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion globale avec le changement de l'inertie.

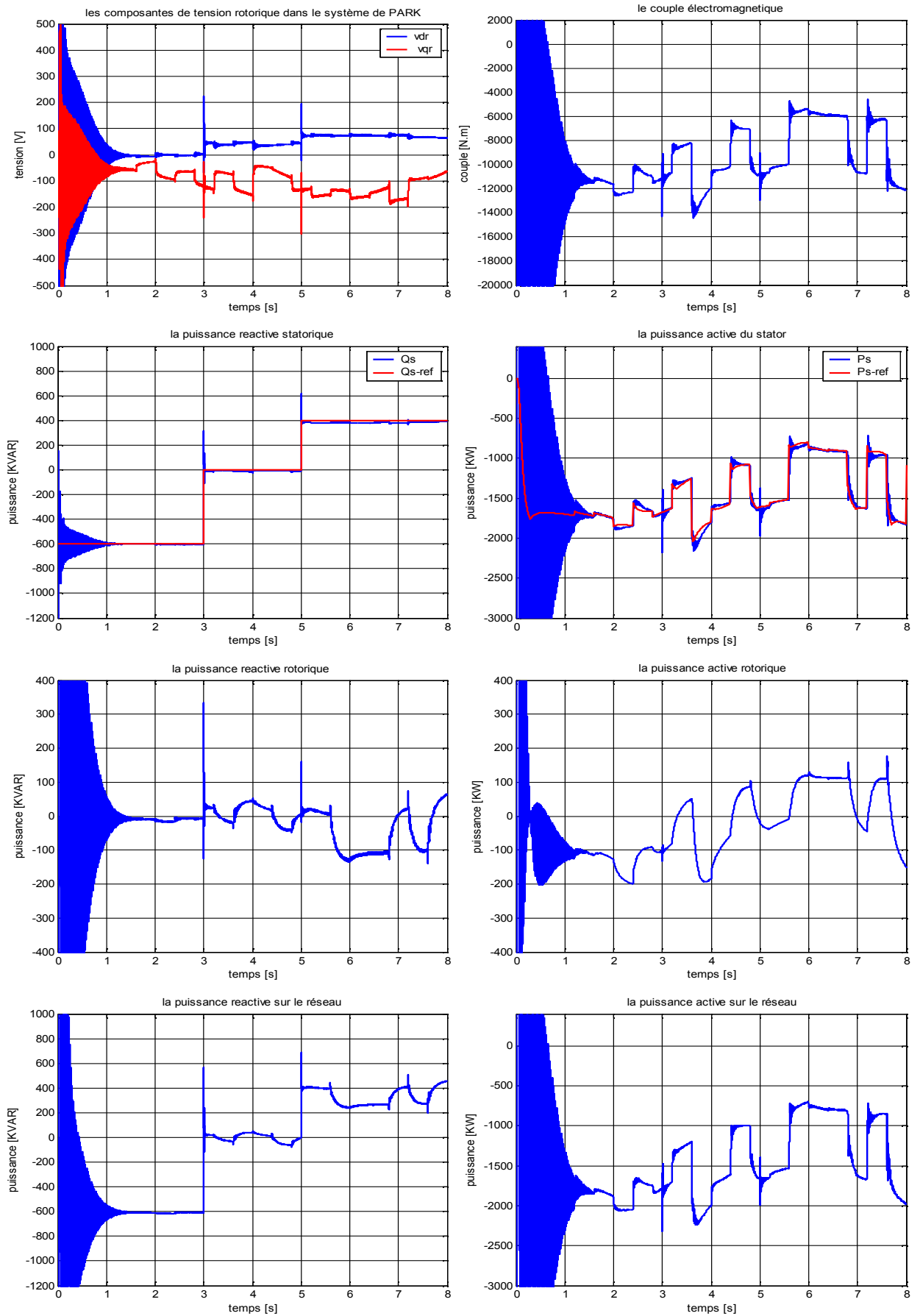


Figure III.19: Evolution suivant (v_d, v_q) des puissances active et réactive dans le système de conversion éolien

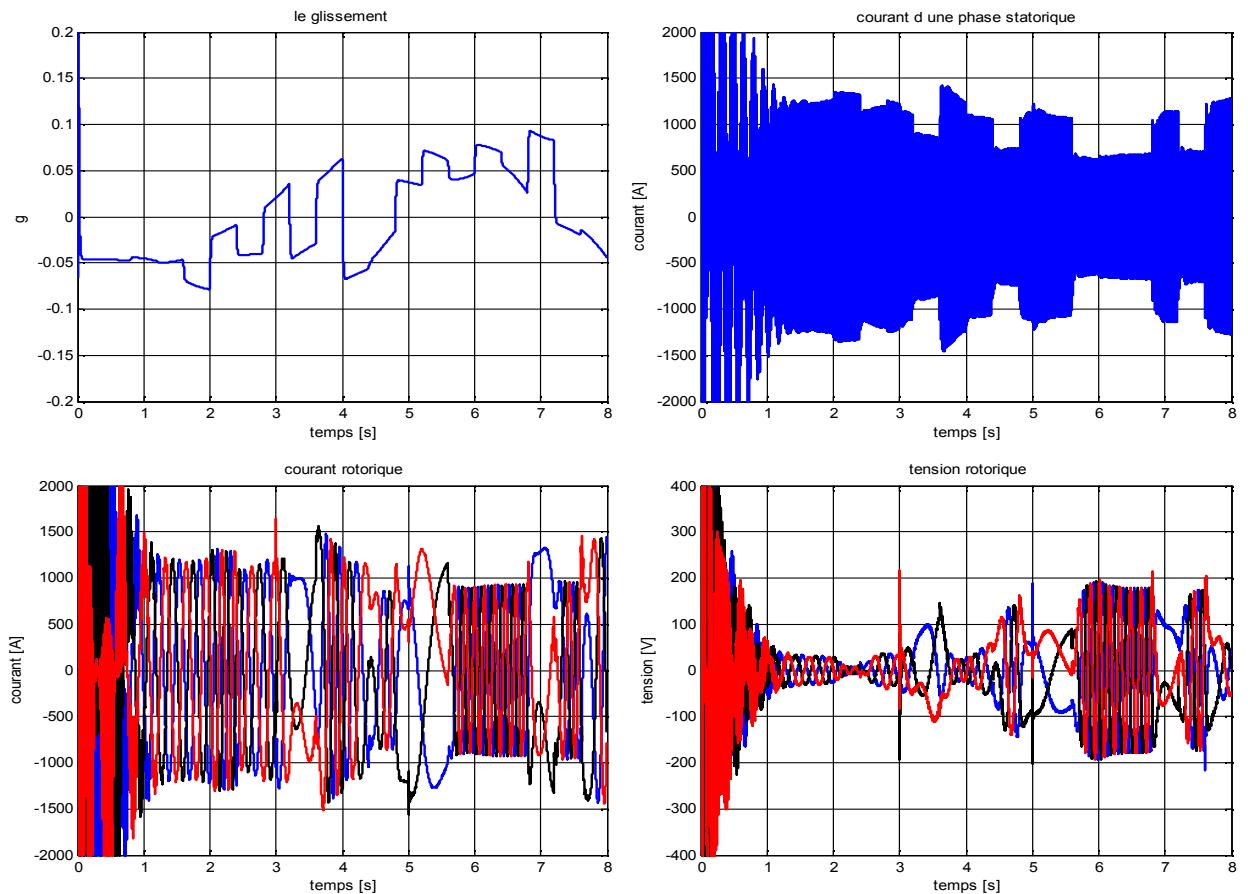


Figure III.20: Variation des grandeurs électriques pour le stator et le rotor de la machine suivant le glissement g .

La variation de l'inertie augmente un peu les écarts entre la vitesse de rotation et celle de référence, ce qui peut provoquer une dégradation du coefficient de puissance C_p . Cette dégradation n'influe, cependant, pas beaucoup sur le contrôle des puissances.

III.5.4 Quatrième essai (correction du facteur de puissance)

Il est important de pouvoir corriger le facteur de puissance en compensant l'énergie réactive consommée par une partie des récepteurs. Les éoliennes étant le plus souvent connectées sur les réseaux de distribution et non de transport, elles se trouvent au plus près des récepteurs qui consomment de l'énergie réactive. C'est un service système très apprécié par le gestionnaire des réseaux. Ceci va permettre de faire une correction locale du facteur de puissance et permettre aux lignes de transport de fonctionner avec un facteur de puissance élevé, proche de l'unité [Boy 2006]. (voir l'Annexe B).

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation sur laquelle nous agissons pour contrôler la puissance réactive pour le système éolien au niveau du réseau « stator – rotor », nous avons abouti au schéma bloc de la commande présenté à la figure III. 21.

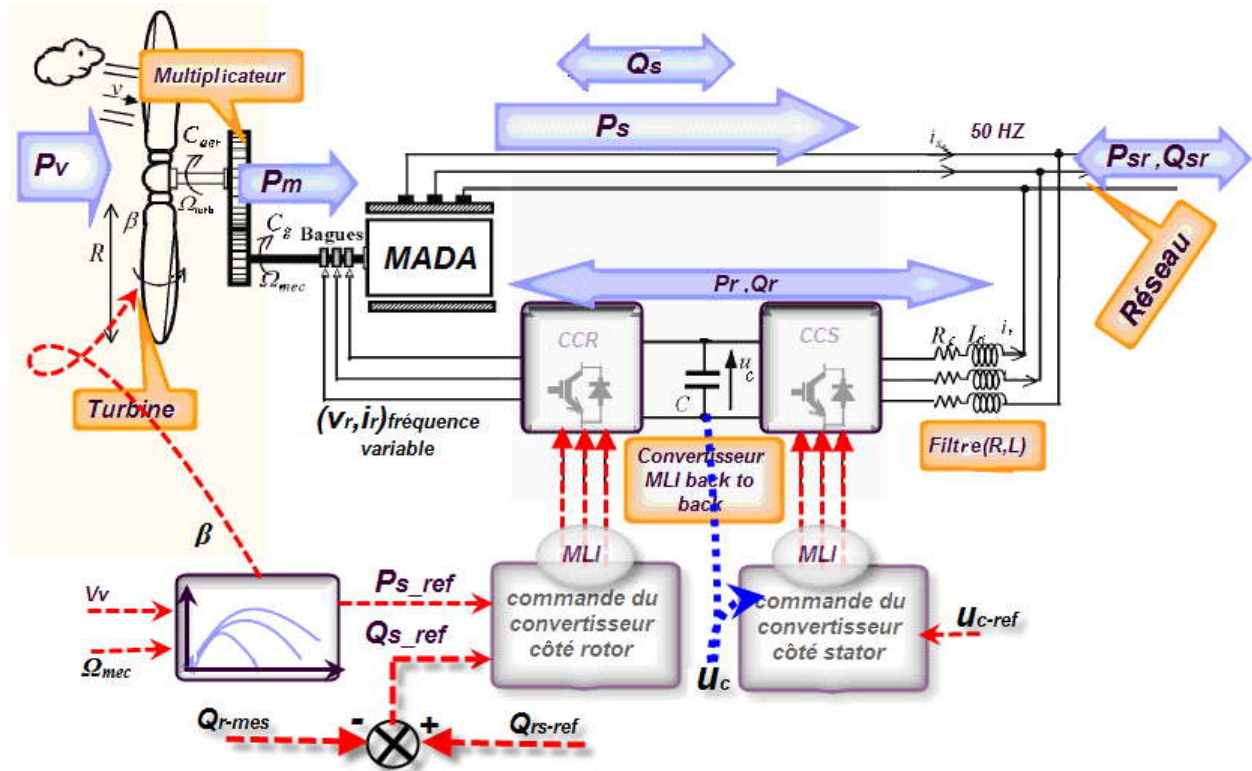


Figure III.21: Commande de la chaîne de conversion avec la commande de la puissance réactive sur le réseau

Cette structure simplifiée permet un réglage de la puissance réactive fournie ou absorbée entre le réseau et le système de conversion.

Les conditions de l'essai sont:

- vitesse mécanique variable suivant le profil du vent (même choix du profil que pour le deuxième essai).
- échelon de puissance active (selon les conditions MPPT).
- échelon de puissance réactive au niveau du stator:
 - à $t=3$ s, Q_{sr} passe de - 400 kVAR à 0 kVAR,
 - à $t= 5$ s, Q_{sr} passe de 0 kVAR à 200 kVAR.

Nous avons conservé la même dynamique que précédemment en ce qui concerne le modèle général et on fait une simple variation sur le mode de réglage de la puissance réactive. Les figures III.22, III.23, III.24 présentent les résultats de la simulation pour cet essai.

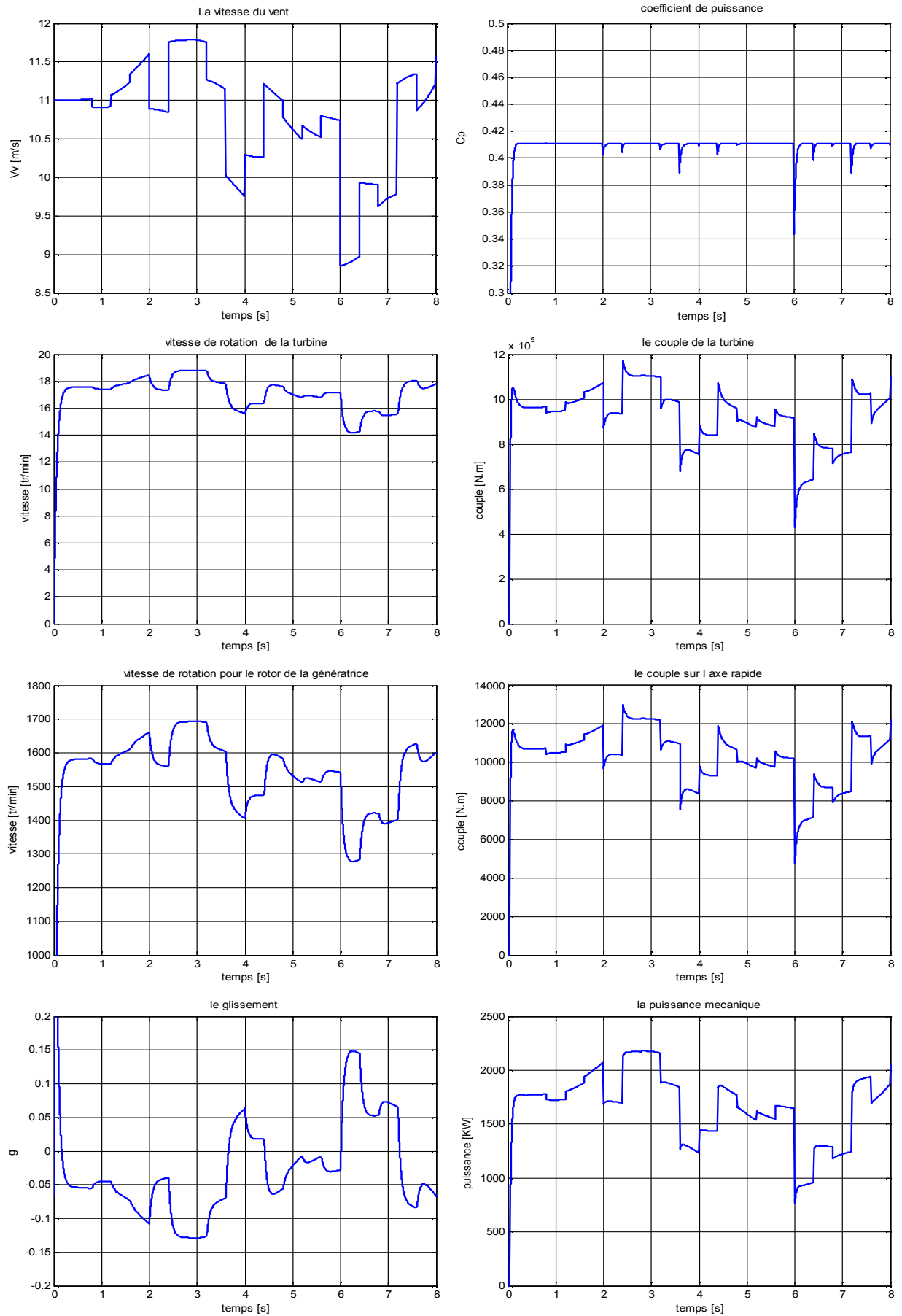


Figure III.22: Evolution des grandeurs mécaniques de la chaîne de conversion globale.

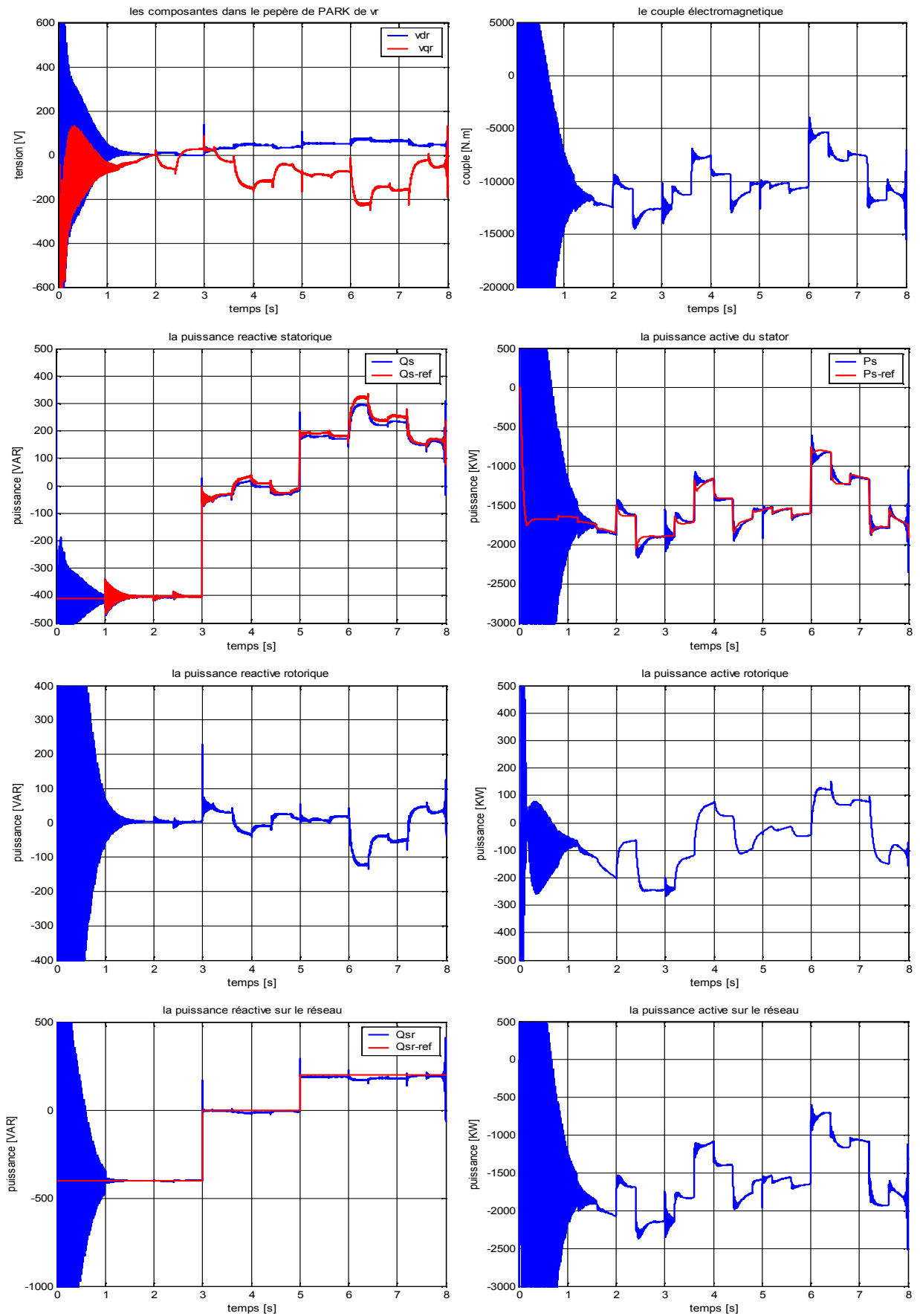


Figure III.23: Evolution suivant (v_d , v_q) des puissances active et réactive dans le système de conversion éolien

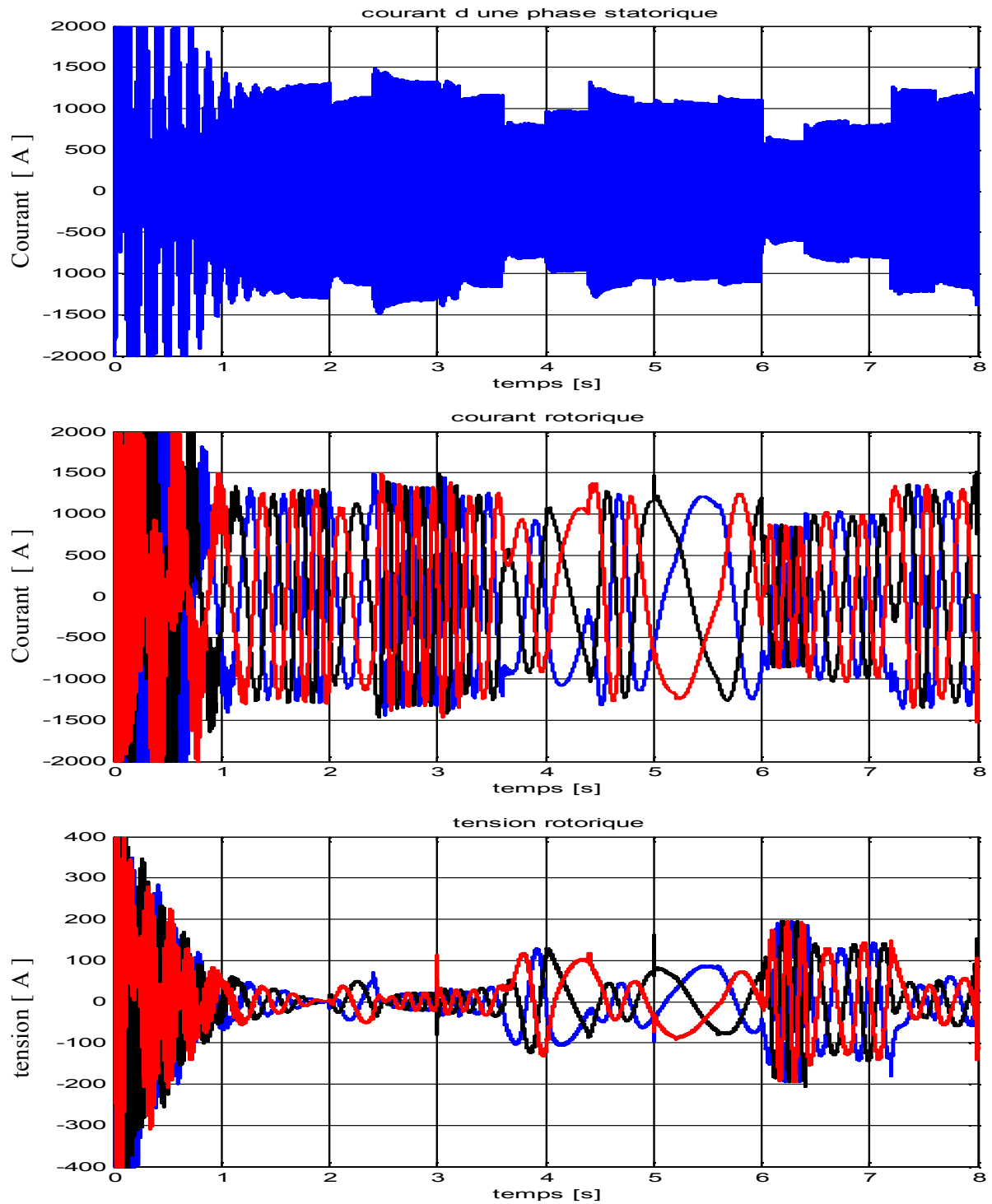


Figure III.24: Variation des grandeurs électriques pour le rotor et le stator de la machine suivant le changement de la vitesse du vent.

Comme illustré sur la figure III.23, les allures des courbes montrent poursuite acceptable de la puissance réactive entre la génératrice et le réseau et leur référence, surtout pour des vitesses du vent proches de la valeur moyenne. Même remarque pour la puissance active au niveau du stator ainsi que la puissance réactive totale fournie au réseau. Cette méthode de commande présente des performances remarquables au niveau du réglage de la puissance réactive dans le réseau à travers le système éolien de manière assez précise. Ce réglage nous permet donc d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif) et même nulle (facteur de puissance unitaire).

Il faut noter que la puissance réactive pouvant être générée ou absorbée est limitée par la valeur de la puissance active et le niveau de la tension du bus continu.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé tous les éléments qui interviennent dans le système de conversion. Ce système est soumis à un vent variable dans le temps comme un entrée perturbatrice (source de puissance mécanique) et soumis aussi à des lois de commande dans le but de contrôler les variables de sorties qui sont les puissances active et réactive de la MADA.

Des simulations sont donc réalisées pour tester les performances des algorithmes de cette commande (avec des régulateurs PI) en termes de poursuite des trajectoires ou robustesse vis à vis des variations de deux paramètres (le vent et l'inertie).

A partir des résultats que nous avons trouvés, on peut conclure que les réglages des puissances active et réactive sont découplés. Le régime transitoire apparaît clairement sur les allures des variables électriques et prend une longue durée au démarrage de l'éolienne, ce qui provoque des problèmes de connexion et de déconnexion de la MADA. Cet inconvénient présent sur la machine est également signalé dans certaines publications trouvées dans la littérature.

Afin d'obtenir de meilleures performances, on joue d'une part sur la qualité de la puissance réactive et d'autre part sur le rendement de la chaîne de conversion. Nous avons vu qu'il était possible de régler la puissance réactive au point de connexion de l'éolienne avec le réseau, ce qui donne un avantage par rapport au réglage de cette puissance à travers le stator de la machine toute seule. En plus, on a constaté que la vitesse de la génératrice est effectivement réglable dans le but d'extraire le maximum de puissance active.

Conclusion générale

Le but de ce travail est de faire une étude sur le système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette étude consiste en l'association de deux parties, l'une mécanique (l'hélice, le multiplicateur) et l'autre électrique (la MADA, les convertisseurs électroniques). Malgré les inconvénients présentés par la machine asynchrone à double alimentation (la MADA) avec la présence d'un système de bagues et balais, cette machine constitue actuellement la meilleure solution pour le choix du système de conversion électromécanique. Ceci revient à ses possibilités de fonctionnement à vitesse variable pour une large plage de la vitesse du vent. Ainsi, présente-t-elle un avantage très attractif pour les constructeurs. La possibilité de faire sa connexion électronique à travers le rotor présente un intérêt économique non négligeable car cela peut permettre la réduction des dimensions des convertisseurs et de la minimisation des pertes.

Nous avons établi un modèle de la chaîne de conversion de l'éolienne basée sur une machine à double alimentation. Dans ce modèle, le stator de la machine est directement connecté au réseau et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs électroniques bidirectionnels en courant (convertisseur côté rotor CCR et convertisseur côté stator CCS). Le convertisseur côté rotor délivre une tension rotorique de pulsation égale à la fréquence du réseau multipliée par la valeur absolue du glissement g , soit $\omega_r = |g| \cdot \omega_s$. Ce convertisseur permet de contrôler le couple électromagnétique de la génératrice (la puissance active) et donc la vitesse de rotation.

La puissance (active) traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le point de fonctionnement (hypo synchrone ou hyper synchrone):

Si $\Omega_m > \Omega_s$, $g < 0$, on est en mode hyper synchrone. La puissance rotorique est débitée. Elle est transmise au réseau à travers les deux convertisseurs et le bus continu.

Si $\Omega_m < \Omega_s$, $g > 0$, on est en fonctionnement hypo synchrone. La puissance rotorique est absorbée. Elle provient du réseau à travers le bus continu et les convertisseurs.

Avec l'utilisation de la machine asynchrone à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25 % de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour transiter cette puissance (rotorique). Ils sont donc en conséquence plus petits et moins coûteux. C'est le principal intérêt d'utiliser la MADA. Ces convertisseurs à base d'interrupteurs électroniques IGBT sont contrôlés par la technique MLI (sinusoïdal).

Le modèle de simulation est validé à l'aide des données trouvées dans les publications et des données techniques provenant des sites Internet d'un aérogénérateur à puissance nominale de 2MW. On note que la modélisation de ce système de conversion éolienne est réalisée pour la deuxième zone de fonctionnement (voir § I.3.4).

On agit sur le circuit du rotor à travers le CCR pour faire varier la puissance extraite. C'est pour cela qu'on utilise une commande vectorielle dans le but de contrôler les échanges des puissances active et réactive entre la machine et le réseau à travers les enroulements statoriques. Ce mode de contrôle est basé sur des régulateurs PI.

En ce qui concerne le test « suivi des consignes des puissances », les régulateurs PI donnent des résultats très acceptables surtout si la vitesse mécanique est proche de celle du synchronisme.

Pour les tests effectués par la suite, nous avons essayé de maximiser le rendement énergétique par l'introduction de l'algorithme de commande (MPPT). En pratique, l'efficacité de ce dernier dépend principalement de la précision des informations données sur la vitesse du vent. On montre [Cam 2003], [Ela 2004] qu'il est judicieux d'estimer cette vitesse au lieu de la mesurer, puisque cette mesure est généralement imprécise.

Les puissances active et réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce ce convertisseur de puissance. Avec ce mode de contrôle la MADA peut fonctionner comme un générateur de puissance active à l'instar d'un alternateur synchrone.

Afin d'étudier le système de conversion dans des conditions d'exploitation plus vastes et réelles, il serait souhaitable de poursuivre ce travail comme suit:

- * faire une étude sur les stratégies de commande de cette chaîne pour les zones de fonctionnement qui ne sont pas traitées dans ce mémoire,
- * chercher de nouvelles structures de commande pour synthétiser des lois de contrôle plus robustes,
- * essayer d'estimer la vitesse du vent au lieu de la mesurer avec un anémomètre,
- * étudier en détails l'interaction entre le vent et l'aéroturbine dans le but de bien comprendre et clarifier certains phénomènes qui ne sont pas pris en compte ici,
- * prendre en compte aussi le phénomène de saturation dans la modélisation de la machine,
- * étudier l'interaction de la MADA avec le réseau afin de maintenir la chaîne de conversion en service,

Conclusion générale

- * pour améliorer la qualité de l'énergie électrique du réseau, étendre l'étude en effectuant un filtrage actif,
- * en fin, il est important de réaliser un banc d'essais afin de valider expérimentalement les résultats de simulation.

Annexe A : Caractéristiques techniques

Données de dimensionnement

Vitesse nominale du vent : 11,5 m/s

Rotor

Diamètre : 82 m

Surface balayée : 5281 m²

Nombre de pales : 3

Matériau : composite résine, fibre de verre et fibre de Carbone

Vitesse de rotation nominale : env. 8.5 à 17.1 tr/min

Sens de rotation (vue face au rotor) : sens des aiguilles d'une montre

Position : face au vent

Calage des pales

Principe : moteur électrique, un par pale

Régulation de puissance : calage variable des pales

Angle maximale de calage des pales : 91 °

Mode d'entraînement du calage : moteurs à courant continu synchronisé avec batterie

Multiplicateur

Type : épicycloïdal

Puissance nominale : 2160 kW

Couple nominal : 1206 kNm

Gain : 90

Mât

Type : acier, conique

Hauteur : 59, 80 et 100 m

Diamètre de bride en tête de mât : env. 3.0 m

Diamètre de bride en pied de mât: env. 4.0 m

Système électrique

Filtere

Résistance d'un filtre (R_f) :	0,1 Ω
Inductance d'un filtre (L_f):	0,03 H

Les convertisseurs

Type de convertisseur :	IGBT à modulation de fréquence
Condensateur de bus continu (c) :	5000 μ F

Paramètres de la MADA

Type de génératrice :	génératrice asynchrone à double alimentation
Puissance nominale :	2000 kW
Vitesse de rotation :	900 à 1800 tr/min
Tension :	690 V
Fréquence :	50 Hz
Résistance statorique (R_s) :	0,03 Ω
Résistance rotorique (R_r) :	0,08 Ω
Inductance statorique (L_s):	7,468.10 ⁻³ H
Inductance rotorique (L_r):	0.007 H
Inductance Mutuelle (M):	7,37.10 ⁻³ H
Nombre de paires de pôles (p) :	2
Inertie de la machine (j_g):	65 kg.m ²
Inertie de la turbine (j_{turb}):	50.10 ⁵ kg.m ²
Inertie totale (j_t):	682.3 kg.m ²
Coefficient de frottement (f) :	3.10 ⁻³ Nm/rad/s

Annexe B : Qualité de l'électricité

Pour le cas très simple d'une charge alimentée à travers une ligne par une source de tension constante (figure B.2), on peut écrire de façon approchée que la chute de tension dans la ligne est [Rob 2006]: $\Delta v = v_1 - v_2$

Avec :

$$\Delta v = \frac{rP + xQ}{v_2} \quad (B.1)$$

r : résistance des conducteurs, x : réactance de la ligne, P et Q respectivement les puissances active et réactive transitant dans la ligne.

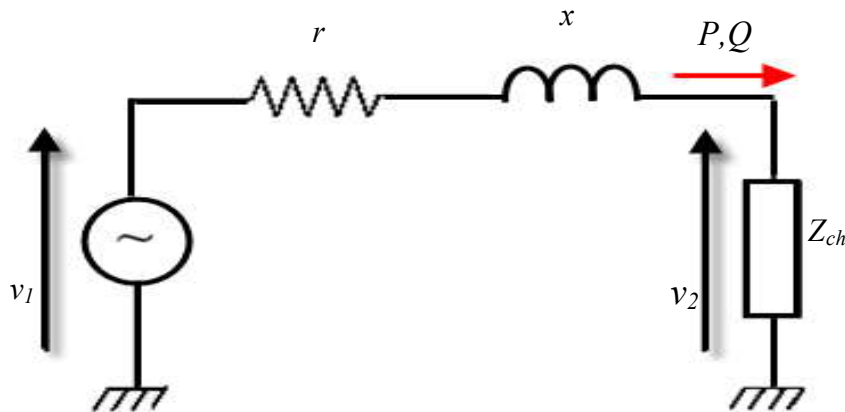


Figure B.1: Schéma équivalent simplifié d'une ligne

Pour les lignes de très haute tension (THT), $x \geq 10.r$. L'expression (B.1) peut donc se simplifier :

$$\Delta v = \frac{xQ}{v_2} \quad (B.2)$$

La puissance active générée par les éoliennes est par nature fluctuante, ce qui tend, d'après l'expression (B.1), à induire des fluctuations de tension dans la zone du réseau proche du point de connexion de ces éoliennes. Dans le réseau de transport constitué de ligne HT et THT, l'expression (B.2) montre que les variations de tension sont essentiellement induites par les transits de puissance réactive, contrairement aux réseaux de distribution. C'est pourquoi, il est demandé aux éoliennes actuellement connectées au réseau de transport de participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive. Ce réglage est possible avec les éoliennes connectées au réseau via l'électronique de puissance et non avec les éoliennes à vitesse fixe dont la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Cette dernière consommant une puissance réactive significative, nécessite l'ajout de condensateurs de compensation.

Résumé

L'évolution de la technologie éolienne s'est fortement accélérée ces dernières années et son développement va progresser grâce à l'amélioration obtenue sur les techniques et les moyens de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. L'objectif de ce mémoire est d'essayer d'ajouter un pas au développement de cette filière de production d'énergie qui présente un avantage environnemental considérable. Pour ce système, le modèle de la turbine est associé au modèle de la MADA qui est le type de machines choisi pour cette étude. Dernièrement, la plupart des éoliennes de forte puissance sont de ce type.

La puissance produite est transmise au réseau via les enroulements du stator et du rotor de cette machine. L'objectif de l'utilisation de la MADA est l'extraction du maximum de puissance à partir d'une vitesse de vent variable en optimisant la vitesse spécifique λ .

Dans ce travail, nous allons donc modéliser l'ensemble de cette chaîne par simulation numérique à l'aide du logiciel MATLAB – SIMULINK.

La technique d'extraction du maximum de puissance consiste à ajuster le couple (puissance active) de la génératrice pour fixer sa vitesse de rotation à une valeur optimale. Avec l'utilisation de la MADA, la majeure partie de la puissance produite est distribuée au réseau par le stator et moins de 25 % de la puissance nominale passe par les deux convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci constitue une autre raison qui justifie l'utilisation de la MADA. Le convertisseur côté rotor (CCR) est commandé par une MLI dont les consignes proviennent de la commande vectorielle de la MADA. Ce contrôle nous permet donc de contrôler indépendamment les puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques générées par le (CCR) aux puissances active et réactive statoriques.

Cette étude peut être étendue pour améliorer la qualité de l'énergie électrique du réseau en effectuant un filtrage actif.

Abstract

The development of wind turbine technology has greatly accelerated in recent years and its development will progress through the improvement achieved on techniques and means of converting wind energy into electrical energy. The purpose of this memorandum is to try to add a step in the development of this sector of energy production that presents a significant environmental benefit. For this system, the model of turbine is associated with the model of the DFIG which is the type of machines chosen for this study. Lately, most powerful wind turbines are of this type.

The power generated is transmitted to the network via the windings of the stator and rotor of the machine. The objective of using the DFIG is extracting the maximum of power from a wind speed variable speed optimizing the ratio λ .

In this work, we will model all parts of this chain simulation with MATLAB - SIMULINK.

The technique for extracting the maximum power is to adjust the torque (active power) of the generator to set its speed to optimum value.

With the use of DFIG, most of the power generated is distributed to the network by the stator, and less than 25% of the nominal power through the two power converters in the rotor. This is another reason that justifies the use of DFIG. The rotor side converter (RSC) is ordered by a PWM whose instructions come from the vectorial control of the DFIG. This control thus enables us to control the independently activate and reactive powers by establishing the equations which bind the values of the rotor voltage generated by (RSC) to the powers active one and reactivates stator.

This study can be extended to improve the quality of electric power network by to make an active filtering.

Bibliographie

- [Abd 2007] **Abdenour ABDELLI**,
«*Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive* » Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
Soutenue le 15 octobre 2007.
- [Abd 2003 a] **Abdelhakim DENDOUGA**,
«*Commande par mode de glissement de la machine à double alimentation alimentée par un onduleur de tension* » mémoire de Magister en Electrotechnique de l'Université de Batna, 2003.
- [Abd 2000 b] **E. S. Abdin, W. Xu**,
“*Control design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit*” IEEE Trans. on Energy conversion. Vol.15, No.1, March 2000.
- [Ack 1999] **Ackermann T, Garner K, Gardiner A**,
“*Embedded Wind Generation in Weak Grids – Economic Optimisation and Power Quality Simulation*” Renewable Energy, 1999, Vol. 18, pp. 205 - 221.
- [Ack 2002 a] **Ackermann T, Söder L**,
“*An Overview of Wind Energy-Status 2002.*” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, Vol. 6, pp. 67-128.
- [Ack 2003 b] **Vladislave Ackmatov**,
« *Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power* » Submitted to Electric Power Engineering, Ørsted-DTU, Technical University of Denmark in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy and the Danish Industrial Ph.D. degree.
April 2003.
- [Akt 2006] **Aktarujjaman, M. and Kashem, M.A. and Negnevitsky, M. and Ledwich, Gerard**,
“*Smoothing Output Power of a Doubly Fed Wind Turbine with an Energy Storage System*” In Proceedings Australian Universities Power Engineering. Conference 2006, Melbourne, Victoria, Australia.
- [Avi 1999] **Avia F, Cruz I**,
“*The Development of the Wind Energy market in Spain*”, European Wind Energy Conference Proceedings, Nice, 1999, pp. 477-480.
- [Bir 2003] **M'hamed BIRAME**,
«*Commande floue d'un convertisseur AC-DC à UPF en cascade avec un convertisseur DC-DC double étage alimentant un système de biberonnage par supercapacités d'un véhicule électrique* »
Mémoire de magister de l'Université de Batna.
Promotion2003.

- [Boy 2006] **Armand Boyette,**
«Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec le système de stockage pour la production éolienne » Thèse de Doctorat de l'Université de Hanri Poincaré, Nancy, I.
 Soutenue le 11 décembre 2006.
- [Car 1998] **Anders Carlsson,**
"The back to back converter -control and design"
 May 22, 1998. Published by: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund Institute of Technology Box 118 S-221 00 Lund. Sweden.
- [Car 2001 a] **P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi,**
"The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology"
 NREL/TP-500-28607.
 Février 2001.
- [Cam 2003] **Haritza CAMBLONG,**
«Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable_» Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers,
 Soutenue le 18 décembre 2003.
- [Chi 2008] **B.Chitti Babu, K.B.Mohanty, C.Poongothai,**
"Performance of Double-Output Induction Generator for Wind Energy Conversion Systems" National Institute of Technology Rourkela, India. October 2008 from. IEEE.
- [Cim 2003] **Gabriel – Octavian CIMUCA,**
« Système inertiel de stockage d'énergie associer à des centrteurs éoliens »
 Thèse de Doctorat de L'école Nationale Supérieure D'arts et Métiers.
 Soutenue le 18 décembre 2003.
- [Dri 2005] **SAID DRID,**
« Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Double Induction Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation : Théorie & Expérimentation » Thèse de Doctorat de l'Université de Batna.
 Soutenue le 9 Novembre 2005.
- [Ela 2004] **Salma EL AIMANI,**
« Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » Thèse de Doctorat de l' Ecole Centrale de Lille,
 Soutenue le 06 Décembre 2004.
- [Gag 2005] **Richard Gagnon, Gilbert Sybille, Serge Bernard, Daniel Paré, Silvano Casoria, Christian Larose,**
"Modeling and Real-Time Simulation of a Doubly-Fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine" Presented at the International Conference on Power Systems Transients (IPST'05) in Montreal, Canada on June 19-23, 2005.
 Paper No. IPST05-162.

- [Ger 2002] **Olivier GERGAUD,**
 « *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur* » Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.
 Soutenue le 9 décembre 2002
- [Han 2001] **L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen and B. Bak-Jensen,**
 “*Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*” Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
 December 2001.
- [Hok 2004] **Martti Hokkanen, Heikki J. Salminen, Timo Vekara,**
 “*A short review of models for grid-connected double-fed variable speed wind turbines*”, University of Vaasa, P.O. Box 700, FIN-65101. Vaasa, Finland.
 14 May, 2004.
- [Iva 0000] **Meny IVAN,**
 « *Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance* » Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier (LEM), article.
- [Iov 2003] **Florin IOV,**
 « *Contributions to Modelling, Analysis and Simulation of AC Drive Systems. Application to Large Wind Turbines*”, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Dunarea de Jos, University – Galati, 2003.
- [Khe 1997] **Abdelmalek KHEZZAR,**
 « *Filtrage actif du couple de machines électriques de forte puissance* » Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
 Soutenue publiquement le 14 Novembre 1997.
- [Lar 1997] **Ake Larsson,**
 “*power quality of wind turbine generating systems and their interaction with the grid*” Chalmers University of Technology S-4 12 96, Gotaborg, Sweden.
 10 March 1997.
- [Lec 2004] **Ludovic LECLERCQ,**
 « *Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes* » Thèse de Doctorat de Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille.
 Soutenue le 14 décembre 2004.
- [Mat 2004] **Julija MATEVOSYAN,**
 “*Wind power in areas with limited export capability*” Thesis Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering. Stockholm, 2004.
- [Mel 0000] **Rui Melício¹, V.M.F. Mendes²,**
 “*Doubly Fed Induction Generator Systems For Variable Speed Wind Turbine*” Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1950-062 Lisboa (Portugal).

- [Mir 2005] **Adam MIRECKI,**
« Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
 Soutenue le 5 avril 2005.
- [Mog 2004] **E. F. Mogos, X. Guillaud, V. Rogez,**
« A voltage regulation system for pitch-controlled variable-speed wind turbine »
 International Conference on Securing Critical Infrastructures, CRIS, 2004,
 Grenoble, 25- 27 octobre 2004.
- [Mul 2002] **Bernard MULTON,**
 conférence de rentrée de l'Ecole Doctorale STIM, Saint Nazaire, 24 octobre 2002.
- [Mul 2002 a] **Bernard MULTON¹, Olivier GERGAUD¹, Hamid BEN AHMED¹, Xavier ROBOAM², Stéphane ASTIER², Brayima DAKYO³, Cristian NICHITA³**
“État de l'art dans les aérogénérateurs électriques”, Extrait du rapport de synthèse ECRIN, bd de Vaugirard 75015 Paris, paru mai en 2002.
- [Mul 2003] **B.Multon, G.Robin, O.Gergaud, H.Ben Ahmed,**
“Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable” JCGE03, Saint Nazire, 2003.
- [Per 2004] **A. Perdana, O. Carlson, and J. Persson,**
“Dynamic Response of Grid-Connected Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator during Disturbances” Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics. Trondheim - 2004.
- [Pie 2004] **(c-br) J.T.G. Pierik (ECN) J. Morren (TUD) E.J. Wiggelinkhuizen (ECN) S.W.H. de Haan (TUD) T.G. van Engelen (ECN) J. Bozelie (Neg-Micon),**
“Electrical and Control Aspects of Offshore Wind Farms II (Erao II)”
 Volume 1: Dynamic models of wind farms. June 2004.
- [Poi 0000] **F. Poitiers, M. Machmoum, R. Le Doeuff and M.E. Zaim ,**
“Control of a doubly – fed induction generator wind energy conversion systems”
 GE44-LARGE, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Saint Nazaire, France.
- [Poi 2003 a] **Frédéric POITIERS,**
« Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes.
 Soutenue le 19 décembre 2003.
- [Reg 2005] **Rogério G. de Almeida, J. A. Peças Lopes,**
“Primary frequency control participation provided by doubly fed induction wind generators” Porto, Portugal. 22-26 August 2005.

- [Rob 2006] **B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont , A. Ansel, V. Courtecuisse B. François, S. Plumel, J. Deuse,**
“*Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie*” Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille.
J3ea – Vol. 5 – Hors série 1 (2006).
- [Rog 2004] **VINENT ROGEZ,**
« *Modélisation simplifiée de source de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire* » Thèse de Doctorat de Université d'Artois. Centre Nationale de Recherche Technologique de Lille.
Soutenue le 17 décembre 2004.
- [Sot 0000] **Stefan Soter**, Member, IEEE, **Ralf Wegener**, Student Member, IEEE,
“*Development of Induction Machines in Wind Power Technology*”
Institute of Electrical Drives and Mechatronics University of Dortmund, Germany.
- [Tap 2003] **Arantxa Tapia, Gerardo Tapia, J. Xabier Ostolaza, José Ramón Sáenz,**
“*Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator*”
IEEE Transaction on energy conversion, vol. 18, no. 2, June 2003
- [Vec 2005] **Ionel Vechiu,**
« *Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome* » Thèse de Doctorat de l'Université du Havre.
Soutenue le 15 Novembre 2005.
- [Vid 2004] **Paul-Etienne VIDAL,**
« *Commande non – linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation* »
Thèse de doctorat de l'Université Polytechnique de Toulouse.
Soutenue le 14 décembre 2004.
- [Vri 2003] **E. De Vries,**
“*Wind turbines technology trends*” Vol. 6, No. 4, James & James (Science Publishers), Renewable Energy World, July-August 2003.
- [Int 1] <http://www.sizilien-sicily-sicilia.de/Energie-uk.htm>
- [Int 2] <http://www.widpower.org>