

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE.

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : **Electrotechnique**  
Filière : **Génie Electrique**

*Présenté par*

**Yacine RAHAB**  
**Mouloud TEGGOUR**

Mémoire dirigé par **Salah HADDAD**

Thème

# Etude de l'association d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) et d'un convertisseur multiniveaux

*Mémoire soutenu publiquement le 28 septembre 2014 devant le jury composé de :*

**M<sup>r</sup> M'Hand MEKIOUS**  
MCB, UMMTO , Président

**M<sup>r</sup> Salah HADDAD**  
Professeur, UMMTO , Rapporteur

**M<sup>elle</sup> Rahma KACHENOURA**  
MAA, UMMTO , Examineur

**M<sup>elle</sup> Malika LOUNACHI**  
MAB, UMMTO, Examineur

---

# *Sommaire*

## *Symboles et abréviations*

<i>Introduction générale</i> .....	01
------------------------------------	----

## ***Chapitre I : Généralités sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne***

<b>I.1-Introduction</b> .....	03
<b>I.2-Définition de l'énergie éolienne</b> .....	03
<b>I.3-Constitution d'une éolienne</b> .....	03
<b><i>I.3.1-Le mât</i></b> .....	04
<b><i>I.3.2-Le rotor</i></b> .....	05
<b><i>I.3.3-La nacelle</i></b> .....	05
<b>I.4-Accouplement mécanique de l'éolienne</b> .....	06
<b><i>I.4.1-Eolienne à attaque directe</i></b> .....	06
<b><i>I.4.2-Eolienne à attaque indirecte</i></b> .....	06
<b>I.5-Principe de conversion de l'énergie éolienne</b> .....	06
<b>I.6-Différents types d'éoliennes</b> .....	07
<b><i>I.6.1-Eolienne à axe vertical</i></b> .....	07
<b><i>I.6.1.A-Avantages de la structure à axe vertical</i></b> .....	08
<b><i>I.6.1.B-Inconvénients de la structure à axe vertical</i></b> .....	08
<b><i>I.6.2-Eoliennes à axe horizontal</i></b> .....	08
<b><i>I.6.2.A-Amont</i></b> .....	08
<b><i>I.6.2.B-Aval</i></b> .....	08
<b>I.7-Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne</b> .....	09
<b><i>I.7.1-Avantages</i></b> .....	09
<b><i>I.7.2-Inconvénients</i></b> .....	09
<b>I.8-Chaine de conversion de l'énergie éolienne</b> .....	10
<b><i>I.8.1-Conversion de l'énergie cinétique</i></b> .....	10
<b><i>I.8.1.A-Loi de Betz</i></b> .....	10
<b><i>I.8.1.B-Production de l'énergie mécanique</i></b> .....	11
<b>I.9-Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne</b> .....	12
<b>I.10-Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique</b> .....	13
<b><i>I.10.1-Fonctionnement à vitesse fixe</i></b> .....	13
<b><i>I.10.2-Fonctionnement à vitesse variable</i></b> .....	14
<b><i>I.10.2.A-Intérêt de la vitesse variable</i></b> .....	15
<b>I.11 -Différentes Structures du Système de Conversion Electromécanique</b> .....	16
<b><i>I.11.1 -Eolienne à machine asynchrone à cage</i></b> .....	16
<b><i>I.11.2 Machine asynchrone à double stator</i></b> .....	16
<b><i>I.11.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance</i></b> .....	17
<b><i>I.11.4 Machine asynchrone à double alimentation avec un rotor bobiné</i></b> .....	17
<b><i>I.11.4.A- Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée</i></b> .....	17
<b><i>I.11.4.B- Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer</i></b> .....	18
<b><i>I.11.4.C-Machine asynchrone à double alimentation-structure de Scherbius avec convertisseurs MLI</i></b> .....	18
<b><i>I.11.5-Autres machines</i></b> .....	19

---

<b>I.12- Eolienne à Machine Asynchrone à Double Alimentation</b> .....	19
<b><i>I.12.1-Description de la MADA</i></b> .....	20
<b><i>I.12.2 -Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA</i></b> .....	21
<i>I.12.2.A -Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone</i> .....	21
<i>I.12.2.B -Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone</i> .....	21
<i>I.12.2.C -Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone</i> .....	22
<i>I.12.2.D -Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone</i> .....	22
<b><i>I.12.3- Bilan de Puissances dans une Génératrice Asynchrone à Rotor Bobiné</i></b> ... 23	
<i>I.12.3.A -En mode hypo-synchrone</i> .....	24
<i>I.12.3.B -En mode hyper-synchrone</i> .....	24
<b><i>I.12.4 -Avantages et inconvénients de la MADA</i></b> .....	25
<i>I.12.4.A- Avantages de la MADA</i> .....	25
<i>I.12.4.B -Inconvénients de la MADA</i> .....	25
<b>I.13 –Conclusion</b> .....	26

**Chapitre II : Commande en puissance de la MADA connectée au réseau**

<b>II.1-Introduction</b> .....	27
<b>II.2 -Référentiels de travail</b> .....	27
<b><i>II.2.1-référentiel lié au stator</i></b> .....	27
<b><i>II.2.2-référentiel lié au rotor</i></b> .....	28
<b><i>II.2.3-référentiel lié au champ tournant</i></b> .....	28
<b>II.3-Hypothèses de travail</b> .....	28
<b>II.4-Modélisation de la MADA</b> .....	28
<b><i>II.4.1-Modèle de la MADA dans le repère (a b c)</i></b> .....	29
<b><i>A. Equations électriques dans le repère (a b c)</i></b> .....	29
<b><i>B. Equations magnétiques dans le repère (a b c)</i></b> .....	30
<b><i>C. Equation mécanique de la MADA</i></b> .....	31
<b><i>II.4.2-Modèle de la MADA dans le plan (dq)</i></b> .....	31
<b><i>A. Application de la transformation de Park</i></b> .....	31
<b><i>B. Equations électromagnétiques dans le plan (dq)</i></b> .....	32
<b><i>C. Equation du couple électromagnétique dans le plan (dq)</i></b> .....	33
<b><i>II.4.3 -Commande vectorielle de la MADA</i></b> .....	33
• <i>Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques</i> .....	35
• <i>Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques</i> .....	36
<b><i>II.4.4 -Commande vectorielle directe et indirecte</i></b> .....	37
• <i>Commande vectorielle directe</i> .....	37
• <i>Commande vectorielle indirecte</i> .....	38
- <i>Commande en boucle ouverte</i> .....	38
- <i>Commande en boucle fermée</i> .....	39
<b>II.5 –Résultats de Simulation et discussions</b> .....	40
<b><i>II.5.1-Conditions de la simulation</i></b> .....	41
- <i>Suivi de consigne</i> .....	41
- <i>Sensibilité aux perturbations</i> .....	41
<b><i>II.5.2 - Interprétation des résultats</i></b> .....	41
<b>II.6 –Conclusion</b> .....	46

---

**Chapitre III : Commande de la MADA associée à un convertisseur simple niveau**

III.1- Introduction.....	48
III.2-Structure d'alimentation de la MADA par une cascade redresseur – onduleur...	48
III.3- Hypothèses simplificatrices.....	49
III.4- Modèle du convertisseur coté réseau (CCR) simple niveau.....	49
III.4.1- Calcul des courants d'entrée du CCR.....	50
III.4.2-Calcul des tensions d'entrée du CCR.....	50
III.4.3-Calcul du courant de sortie du CCR.....	52
III.4.4-Calcul de la tension de sortie du CCR.....	52
III.4.5- Elaboration des signaux de commande.....	52
-Principe de la MLI.....	53
III.5- Modèle du convertisseur coté Machine (CCM).....	54
III.5.1- Calcul des tensions de sortie du CCM.....	55
III.6-Résultats de simulation et discussions.....	56
III.7- Conclusion.....	62

**Chapitre IV : Commande de la MADA associée à un convertisseur multiniveaux**

IV.1 Introduction.....	63
IV-2 Principe de l'onduleur multiniveaux.....	64
IV-2-1 Généralité sur les convertisseurs multiniveaux.....	64
IV-2-2 Principe de fonctionnement d'un onduleur multiniveaux.....	64
IV.3-Les redresseurs multiniveaux.....	65
IV.3.1-Structure des redresseurs multiniveaux.....	65
IV.4- Résultats de simulation et discussions.....	65
IV.5-Conclusion.....	70

Conclusion générale.....	71
--------------------------	----

**Bibliographie**

**Annexe A**

**Annexe B**

---

## Symboles et abréviations

---

CCM	Convertisseur <b>C</b> ôté <b>M</b> achine
CCR	Convertisseur <b>C</b> ôté <b>R</b> éseau
GADA	<b>G</b> énératrice <b>A</b> synchrone à <b>D</b> ouble <b>A</b> limentation
MADA	<b>M</b> achine <b>A</b> synchrone à <b>D</b> ouble <b>A</b> limentation
IGBT	<b>I</b> nsulated <b>G</b> ate <b>B</b> ipolair <b>T</b> ransistor
MAS	<b>M</b> achine <b>A</b> synchrone triphasée
FMM	<b>F</b> orce <b>M</b> agnéto- <b>m</b> otrice
S	Surface balayée par l'éolienne
$\rho$	Densité de l'air
V	Vitesse du vent
$V_n$	Vitesse nominale du vent
$V_{max}$	Vitesse maximale du vent (pouvant endommager la turbine)
$C_p$	Coefficient de puissance
$P_{\text{éolienne}}$	Puissance de l'éolienne
$P_{\text{vent}}$	Puissance extraite du vent
$\beta_i$	Angle d'inclinaison des pales de l'éolienne
$\lambda$	Vitesse relative
R	Rayon de l'aérogénérateur
$\Omega$	Vitesse de rotation de l'aérogénérateur
$\Omega_2$	Vitesse de rotation de la génératrice après le multiplicateur
k	Rapport du multiplicateur de vitesse
$P_m$	Puissance mécanique fournie ou reçue par la MADA
$P_n$	Puissance nominale fournie par la turbine
f	Fréquence appliquée au stator
$f_2$	Fréquence appliquée au rotor
g	Glissement
$E_s$	Force électromotrice créée au stator
$E_r$	Force électromotrice créée au rotor
$N_s$	Nombre de spires statoriques
$N_r$	Nombre de spires au rotor
$\omega_s$	Vitesse de synchronisme
$\omega$	Vitesse mécanique de l'arbre
$i_s$	Courant circulant au bobinage statorique
$i_r$	Courant circulant au bobinage rotorique

## Symboles et abréviations

---

$P_s$	Puissance électrique fournie ou reçue par le stator de la MADA
$P_r$	Puissance électrique fournie ou reçue par le rotor de la MADA
$\theta_s$	angle relatif à la pulsation statorique
$\theta_r$	Angle relatif à la pulsation rotorique
$t$	Temps
$[V_s]$	vecteur des tensions statoriques
$[V_r]$	vecteur des tensions rotoriques
$[I_s]$	Vecteur des courants statoriques
$[I_r]$	vecteur des courants rotoriques
$[\varphi_s]$	Vecteur des flux statoriques
$[\varphi_r]$	Vecteur des flux rotoriques
$R_s, R_r$	Résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la machine
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$P_s, P_r$	Puissances actives statorique, rotoriques
$Q_s, Q_r$	Puissances réactives statoriques, rotoriques
$M$	Inductance mutuelle
$L_s, L_r$	Inductances cycliques statorique, rotorique
$\Phi_{dr}, \Phi_{qr}, \Phi_{ds}, \Phi_{qs}$	Flux rotoriques et statoriques diphasés dans un repère tournant
$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$	Courants statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant
$V_{dr}, V_{qr}, V_{ds}, V_{qs}$	Tensions statorique et rotorique déphasée
$C_i$	Variable d'état des intrépteur d'un convertisseur
$p$	Opérateur de Laplace
$K_i, K_p$	Constantes du régulateur PI (proportionnelle - intégrale)
$r$	coefficient de réglage de la MLI
$U_{dc}$	Tension dans le bus continu
$f_p$	Fréquence de la porteuse
$m$	indice de modulation
$V_p$	Tension de la porteuse

# *Introduction Générale*

# Introduction Générale

---

La Machine Asynchrone à rotor bobiné et Doublement Alimentée (MADA) a fait l'objet de nombreuses recherches principalement dans son fonctionnement en génératrice pour des applications d'énergie éolienne. Notre travail concerne le fonctionnement générateur à vitesse variable de la MADA, principalement au niveau de l'amélioration de la commande en puissance.

Avec la crise mondiale, nous constatons l'émergence des énergies renouvelables qui se caractérisent par leur stock inépuisable et durable. Elles sont propres et ont un faible impact sur l'environnement d'où leur succès grandissant dans l'opinion publique, chez les investisseurs et les pouvoirs publics.

La source principale de ce type d'énergie est le vent, elle procure l'avantage de ne pas être centralisé mais d'être disponible au lieu de la demande.

De nos jours, l'énergie éolienne est devenue une solution viable pour la production d'énergie, en complément des autres sources d'énergie renouvelables. Alors que la majorité des éoliennes installées sont à vitesse fixe, le nombre des éoliennes à vitesse variable ne cesse d'augmenter. La génératrice asynchrone à double alimentation avec une commande vectorielle est une machine qui présente d'excellentes performances et elle est couramment utilisée dans l'industrie des éoliennes. Il existe de nombreuses raisons pour l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour une éolienne à vitesse variable; comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances active et réactive.

Le présent travail concerne une étude de la commande en puissance d'une MADA à flux statorique orienté. Pour ce faire, on a adopté pour le plan de travail constitué de quatre chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre est consacré aux notions générales sur l'énergie éolienne. Les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées afin de montrer les avantages inégalés de la machine asynchrone à double alimentation surtout en grande puissance et en vitesse variable.

Dans le second chapitre, une modélisation de la MADA sera présentée. Celle-ci sera suivie de l'établissement de la stratégie de commande qui permettra à la machine d'avoir un fonctionnement à vitesse variable. Ceci est possible à travers la mise en place de la double

## Introduction Générale

---

alimentation. Une alimentation constante au niveau du stator, une autre de tension et fréquence variables au niveau du rotor. Cette stratégie consiste en la commande vectorielle en P et Q. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour ensuite valider son modèle par la simulation sous l'environnement Simulink du logiciel MATLAB.

Dans le troisième chapitre, qui représentera la partie principale de cette étude, on envisage de traiter (étude et simulation) toute la chaîne de conversion éolienne : turbine, la génératrice, et les convertisseurs qui leur sont associés. Les deux convertisseurs utilisés seront commandés en utilisant une MLI triangule sinusoïdale à une porteuse. Ainsi, les résultats de simulation seront présentés et interprétés.

Enfin, dans le dernier chapitre on va souligner l'importance de l'utilisation des convertisseurs multiniveaux où leurs avantages seront montrés en termes de réduction d'ondulations des courants et le contenu harmonique des tensions de sortie. Ainsi les résultats de simulation seront présentés et interprétés.

# CHAPITRE I :

## *Généralités sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne*

## **I.1-Introduction :**

L'échauffement différentiel de la surface terrestre par le soleil entraîne le déplacement d'importantes masses d'air sur la terre, c'est-à-dire le vent. Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en électricité ou en d'autres formes d'énergie. La production d'énergie éolienne a connu une croissance extraordinaire au cours de la dernière décennie, car cette énergie est reconnue comme étant un moyen économique de produire de l'électricité.

L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique, en tout lieu suffisamment venté. Les applications de l'énergie éolienne sont variées mais la plus importante consiste à fournir de l'électricité.

Pour cela, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart ils utilisent des machines asynchrones à double alimentation (MADA).

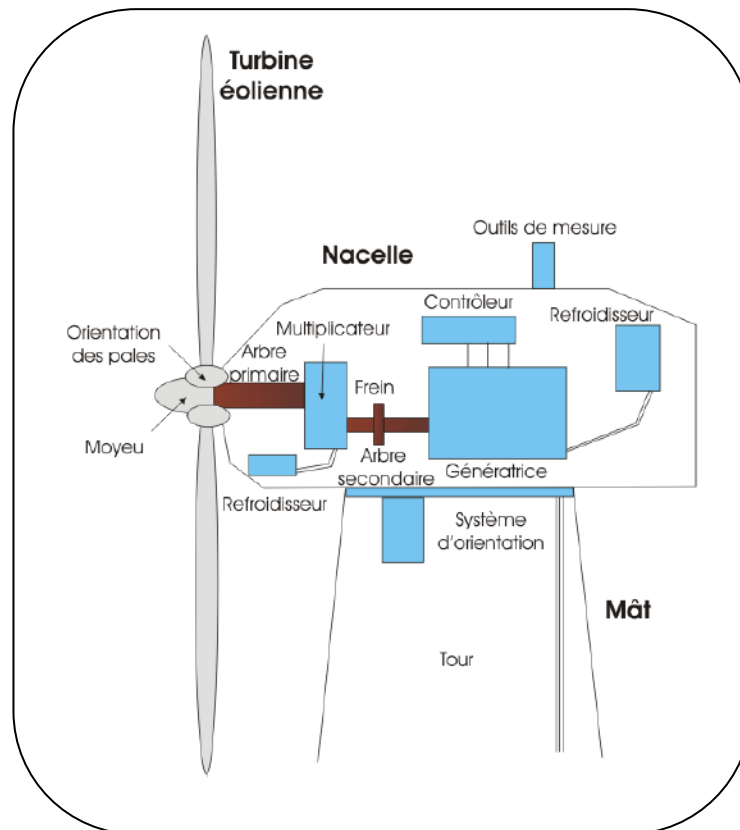
Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie et les différents types de génératrices. La dernière partie de ce chapitre illustrera les différentes structures des machines asynchrones à double alimentation, leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt.

## **I.2-Définition de l'énergie éolienne :**

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

## **I.3-Constitution d'une éolienne:**

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



**Fig.I.1- Constitution d'une éolienne à axe horizontal [4]**

### ***1.3.1-Le mât :***

Le mât est généralement un tube en acier, son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi il permet de placer le rotor à une hauteur élevée au-dessus du sol, où la vitesse du vent est supérieure et les effets des obstacles locaux sont moindres, améliorant ainsi la captation de l'énergie [2], de plus il permet d'accéder à la nacelle pour des opérations d'entretiens et d'inspections. Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât peut mesurer entre 10 et 80 m de haut et ceci dépend du type d'éolienne et de sites d'implantation. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres de haut, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages [3]. Trois grands types de tour peuvent se rencontrer, mât haubané, tour en treillis et tour tubulaire. La tour a une forme légèrement conique ou, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.

### ***1.3.2-Le rotor :***

Le rotor est un ensemble constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Son rôle est de capter l'énergie du vent et la transformer en énergie mécanique. Les pales doivent être légères, solides et durables, pour résister à l'action des éléments. On les construit habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, en plastique renforcé ou en bois [2]. Le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 et plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite [3]. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour, des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Par contre pour les rotors à vitesse variable le dispositif d'orientation des pales est simplifié et une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

### ***1.3.3-La nacelle :***

Elle 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). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [1].

### **I.4-Accouplement mécanique de l'éolienne :**

#### ***I.4.1-Eolienne à attaque directe :***

Le principe de l'attaque directe est d'avoir la génératrice directement sur l'hélice. Cette dernière fonctionne à la vitesse basse du rotor, ce qui permet de supprimer le multiplicateur, qui est le siège de perte de puissance et source de bruit. Ce type de génératrice doit tourner à des vitesses comprises entre 18 et 50 tr/min ; pour produire de l'électricité avec ce type de machine il faut que la génératrice possède un grand nombre de pôles permettant d'obtenir une fréquence de l'ordre de 50Hz [5].

#### ***I.4.2-Eolienne à attaque indirecte :***

Dans ce type d'éolienne, la vitesse de rotation de la turbine est relativement faible, et le couple mécanique est élevé en sortie d'arbre de la turbine. Les machines électriques sont dimensionnées en couple, et on cherche à les faire tourner rapidement pour atteindre des puissances massiques satisfaisantes.

C'est pourquoi on intercale un multiplicateur mécanique à engrenages entre la turbine et la génératrice ; cette dernière est souvent une machine asynchrone à cage ou alors la machine à double alimentation pour un fonctionnement à vitesse variable économique [6].

### **I.5-Principe de conversion de l'énergie éolienne :**

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 trs/mn, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par le générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public [28].

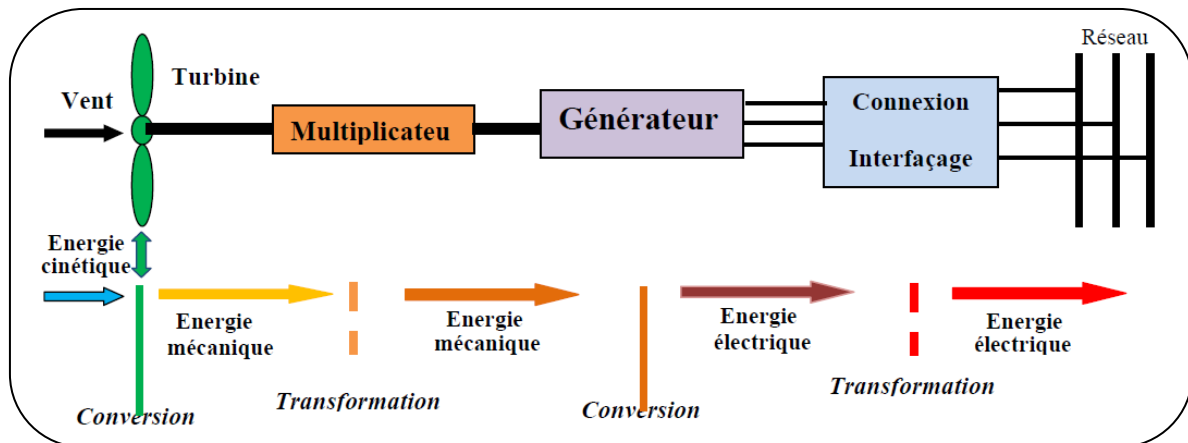


Fig.I.2- Principe de la conversion de l'énergie éolienne [7]

## I.6-Différents types d'éoliennes :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal.

### I.6.1-Eolienne à axe vertical :

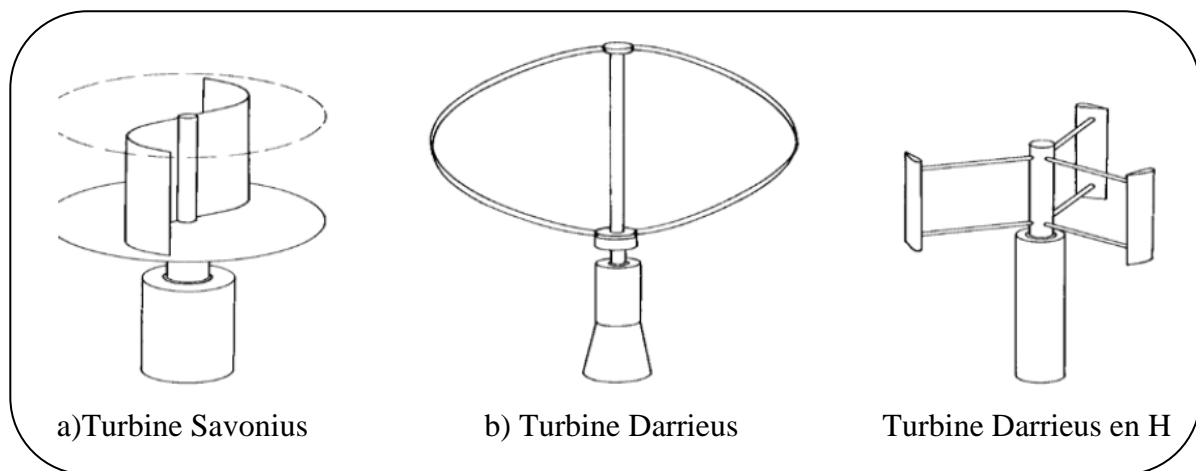


Fig.I.3- Différentes formes d'éoliennes à axe horizontal [8]

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. De nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue [9]. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit :

### *1.6.1.A-Avantages de la structure à axe vertical [5]:*

- ✓ La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- ✓ Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quelque soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- ✓ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

### *1.6.1.B-Inconvénients de la structure à axe vertical [5]:*

- ✓ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- ✓ La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- ✓ Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

### *1.6.2-Eoliennes à axe horizontal :*

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales [10].

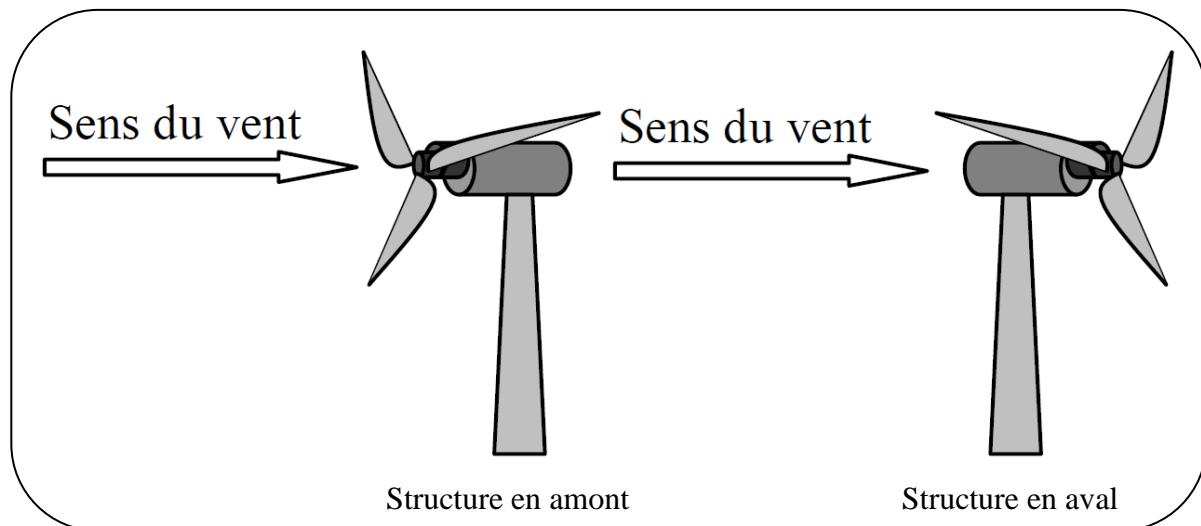
Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

#### *1.6.2.A-Amont :*

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

#### *1.6.2.B-Aval :*

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.



**Fig.I.4- Différentes structures d'éoliennes à axe horizontal**

## **I.7-Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :**

### **I.7.1-Avantages [11] [12]:**

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimales.

### **I.7.2-Inconvénients [12]:**

- ✓ La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- ✓ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

### I.8-Chaine de conversion de l'énergie éolienne :

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir :

- Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique
- Une transmission mécanique
- Une génératrice
- Un système de liaison électrique

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes :

- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes.

### I.8.1-Conversion de l'énergie cinétique :

#### I.8.1.A-Loi de Betz :

On peut schématiser une éolienne comme un dispositif de surface  $S$  perpendiculaire à la direction du vent comme dans la figure I.5, d'après la théorie de Betz, la puissance du vent est :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho * S * V^3 \quad (I.1)$$

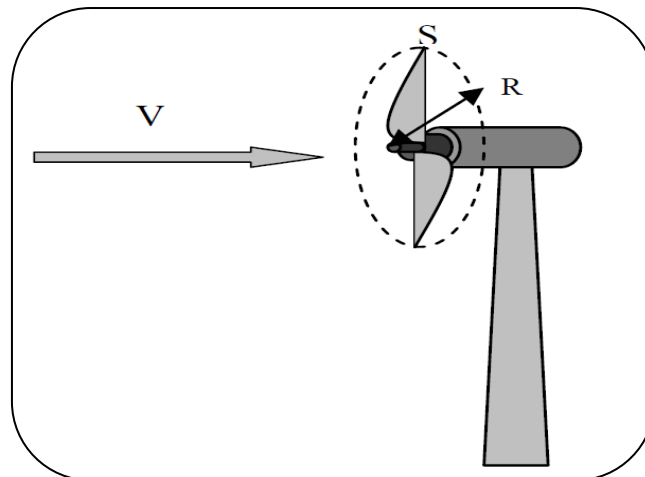


Fig.I.5- Schéma d'une éolienne simplifiée

Avec :

$S$  : est la surface balayée par l'éolienne [ $m^2$ ].

$\rho$  : est la densité de l'air qui est égale à  $1,22 \text{ Kg/m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ .

$V$  : est la vitesse du vent [ $m/s$ ].

## Chapitre I : Généralités sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de l'énergie cinétique du vent, le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale, théoriquement disponible, est appelé coefficient de puissance  $C_p$ .

$$P_{\text{éolienne}} = C_p * P_{\text{vent}} \quad (\text{I.2})$$

Cette relation a été démontrée par **Albert BETZ** dès 1919, d'où son nom. La valeur du coefficient de puissance  $C_p = 16/27$ , est une limite maximum du rendement des éoliennes qui est, en général, loin d'être atteinte et c'est cette limite théorique (appelée limite de Betz) qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Le coefficient de puissance  $C_p$  diffère pour chaque éolienne, il dépend de l'angle d'inclinaison des pales  $\beta_i$  et la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [29] :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (\text{I.3})$$

La Courbe qui illustre le coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $C_p = f(\lambda)$  est donnée à la figure I.6 :

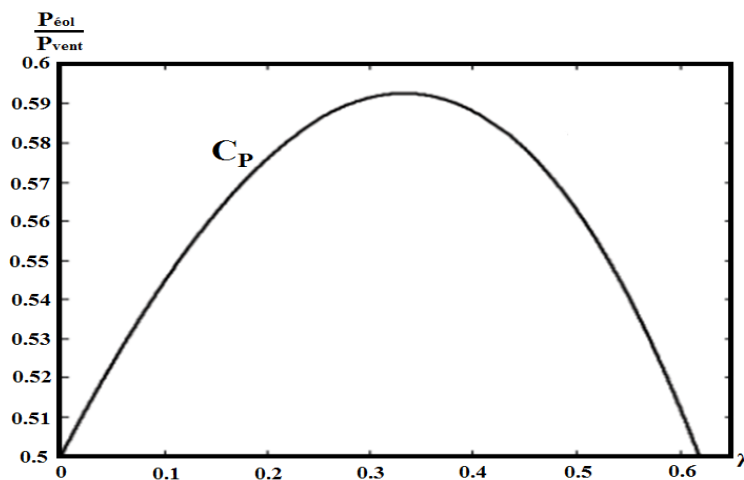


Fig.I.6- Courbe représentant le coefficient de puissance

### I.8.1.B-Production de l'énergie mécanique :

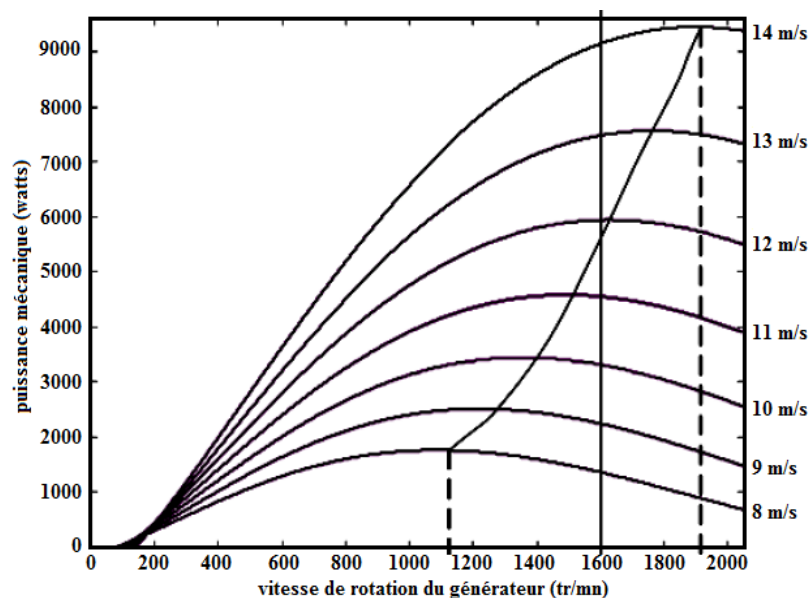
Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse  $k$ , la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{R \cdot \Omega_2}{kV} \right) \pi * \rho * R^2 * V^3 \quad (\text{I.4})$$

Avec  $\Omega_2$ , la vitesse de rotation (de la génératrice) après le multiplicateur.

La relation I.4 permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses du vent (figure I.7).

A la vue de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne, et par conséquent la génératrice, fonctionne à vitesse fixe par exemple (1600 tr/min) la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée ( $V=12m/s$ ), les maximums théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse du vent, la génératrice devra pouvoir fonctionner à vitesse variable (entre 1100tr/mn et 1900tr/mn pour cet exemple) [13].

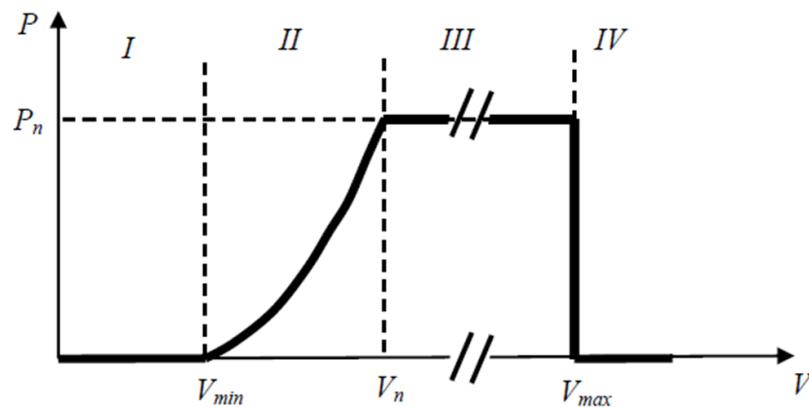


**Fig.I.7- Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée**

### **I.9-Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :**

L'objectif de cette régulation est double, d'une part protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale  $P_n$  à une vitesse de vent nominale  $V_n$ , au-delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale  $V_{max}$  qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement, (figure I.8) [16]:

- **La zone I:** le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.
- **La zone II:** la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent.
- **La zone III :** la vitesse de rotation est maintenue constante par un régulateur de vitesse et la puissance  $P$  fournie par l'arbre reste égale à  $P_n$ .
- **La zone IV:** la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeau ( $\beta = 90^\circ$ ).



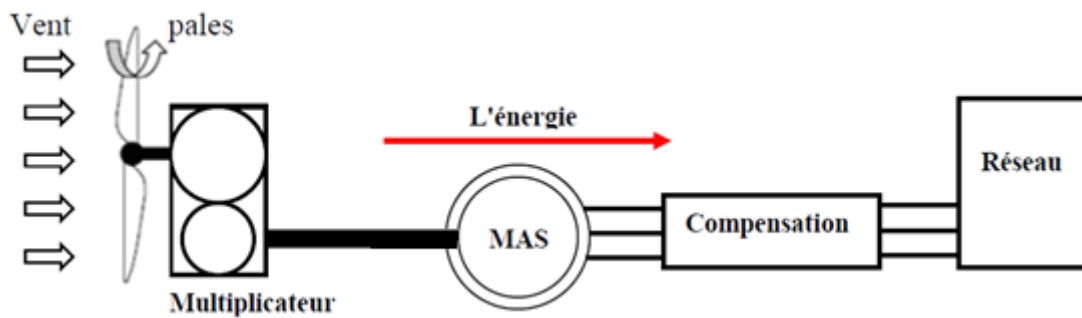
**Fig.I.8- Caractéristique puissance /vitesse du vent d'une éolienne classique**

### I.10-Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique :

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

#### I.10.1-Fonctionnement à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écurie directement couplée sur le réseau électrique (figure I.9). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales [17].



**Fig.I.9- Eolienne à base d'une MAS connectée au réseau**

Parmi ses avantages [12] [18]:

- Elles possèdent un système électrique plus simple, car elles n'ont pas besoin de système électronique de commande.
- Elles ont une très grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Moins cher

### ***1.10.2-Fonctionnement à vitesse variable***

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, un multiplicateur, un générateur, un convertisseur de puissance. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique synchrone ou asynchrone.

Les machines synchrones : elles sont utilisées 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 [12].

La deuxième catégorie d'éolienne repose sur des machines asynchrones. Elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Ces machines tournent à une vitesse beaucoup plus importante que celle de la turbine éolienne d'où la nécessité d'utiliser un multiplicateur de vitesse. Cette technologie est utilisée pour les fortes puissances. La machine asynchrone peut être alimentée par le stator (machine à cage) ou par le stator et le rotor à la fois (machine à rotor bobiné) [1] [19].

Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants [12] [17] [20] :

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent (augmentation du rendement énergétique).
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevés. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- Elles réduisent le bruit lors du fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente.
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien.

### *1.10.2.A-Intérêt de la vitesse variable :*

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustrée sur la figure I.7.

À partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent [14].

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent sous vitesse variable. Les avantages principaux des éoliennes à vitesse variable comparées à celles à vitesse fixe sont les suivants [15] :

- Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti.
- Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale  $P_n$ ,

- Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie.
- Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.

### I.11- Différentes Structures du Système de Conversion Electromécanique :

#### I.11.1 -Eolienne à machine asynchrone à cage :

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique, voir la figure (1.10).

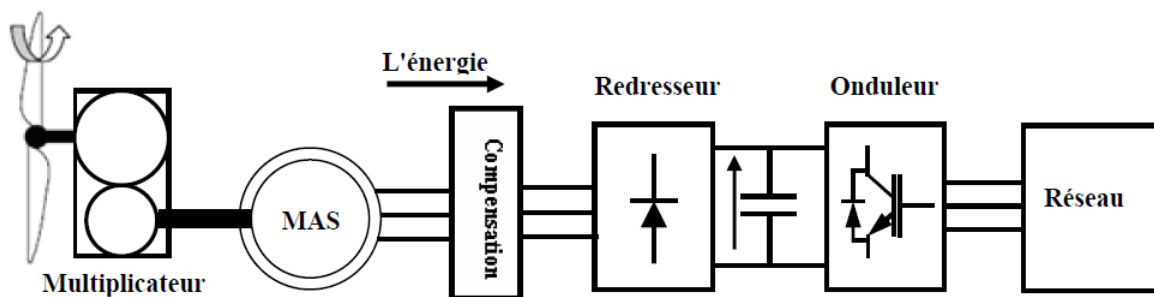


Fig.I.10- Eolienne à base d'une MAS à vitesse variable

#### I.11.2-Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif utilisant la machine asynchrone à cage, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure 1-11) :

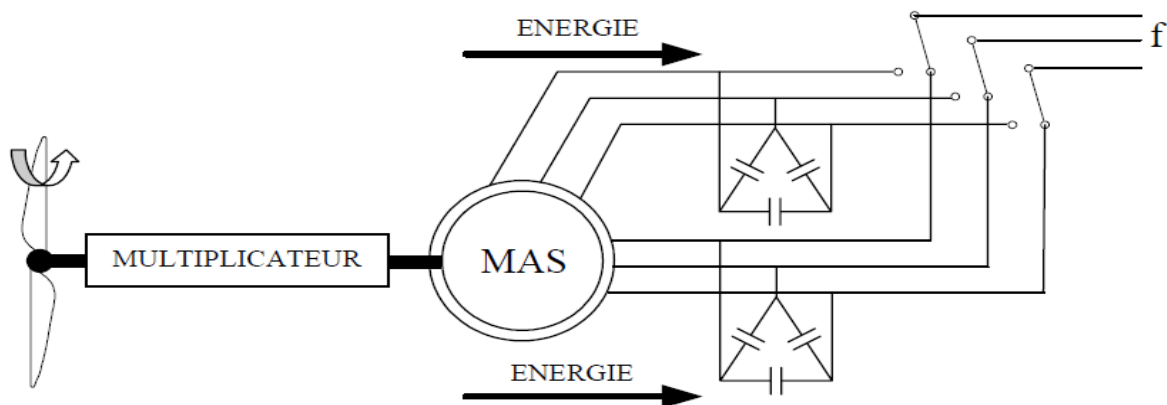
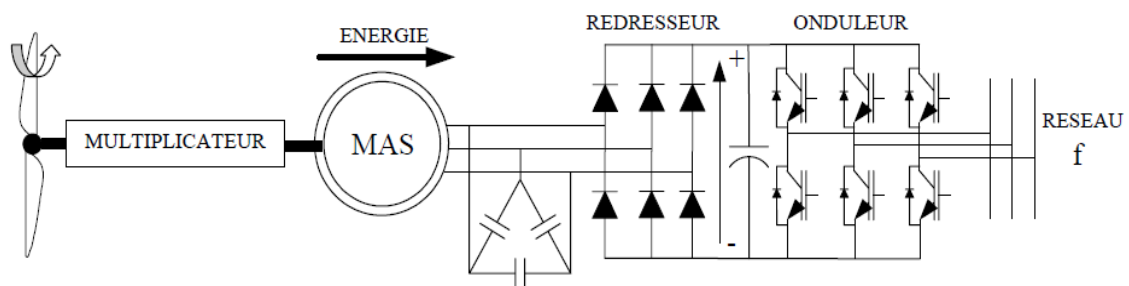


Fig.I.11- Machine asynchrone à double stator

### *I.11.3-Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance*

La structure représentée sur la figure I-12 autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée en tension continue. L'onduleur permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire.



**Fig.I.12- Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble Redresseur – Onduleur**

### *I.11.4 Machine asynchrone à double alimentation avec un rotor bobiné*

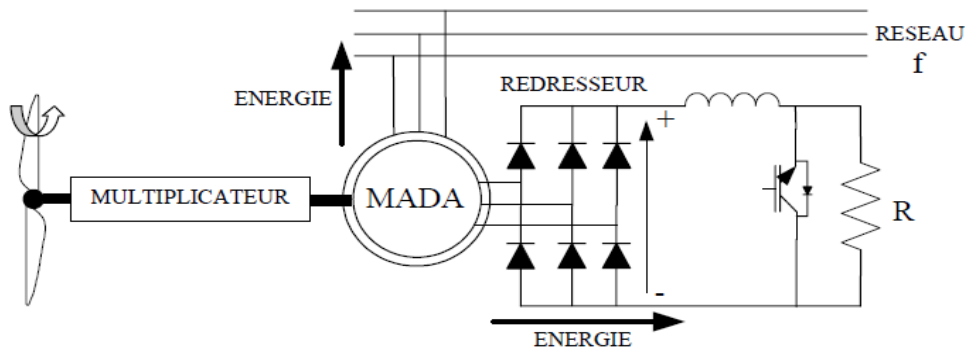
La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous.

Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée dans la seconde partie de ce mémoire.

#### *I.11.4.A- Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée*

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure I.13, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO.

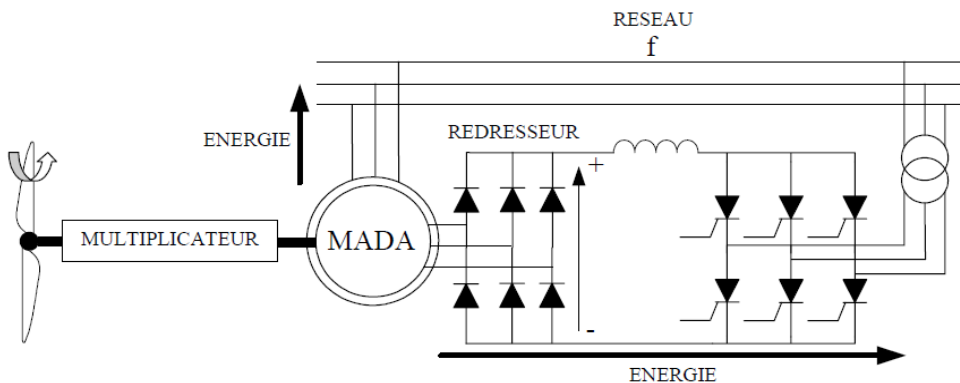
Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.



**Fig.I.13- MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée**

*I.11.4.B- Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer*

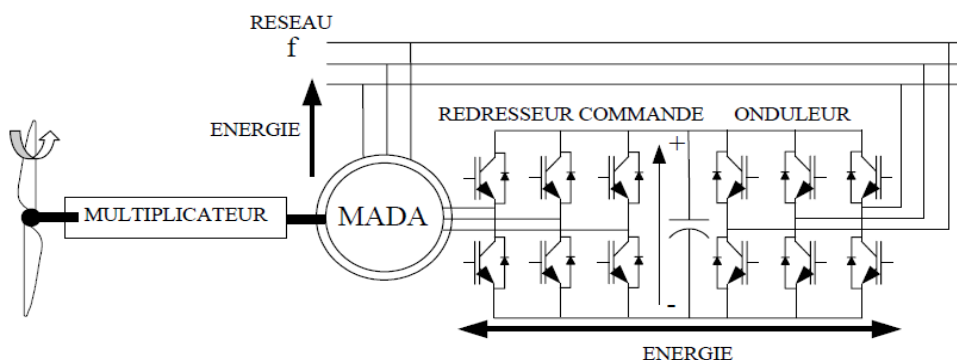
Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, figure I-14).



**Fig.I.14- MADA, structure de Kramer**

*I.11.4.C- Machine asynchrone à double alimentation-structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :*

Le schéma de la figure I.15 montre la structure de Scherbius avec convertisseurs MLI. Cette structure possède le net avantage de permettre un transfert bidirectionnel de puissance.



**Fig.I.15- structure de Scherbius avec convertisseurs MLI**

### I.11.5-Autres machines :

D'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées notamment dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids [1]. Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple mais la puissance produite par ces éoliennes est généralement faible. Ce type de machines pourrait être un candidat de futures éoliennes [1] [12] [19].

Afin de permettre une production optimale d'énergie électrique quelque soit la vitesse du vent et de commander indépendamment l'échange avec le réseau de puissance active et réactive, nous nous intéresserons particulièrement dans ce qui suit à la Machine Asynchrone à Double Alimentation.

### I.12- Eolienne à Machine Asynchrone à Double Alimentation :

Actuellement la majorité des progrès éoliens (supérieur à 1MW) reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). La MADA a la particularité de disposer de deux bobinages triphasés au stator et au rotor. Le bobinage statorique est lié directement au réseau et transfère la plus grande partie de la puissance, tandis que le bobinage rotorique, de moindre puissance, permet de faire varier les courants rotoriques d'excitation de la MADA en utilisant un convertisseur statique, commandé en MLI. Ce dispositif permet le fonctionnement à vitesse variable et a l'avantage d'utiliser un convertisseur de faible puissance (30% de la puissance nominale fournie au réseau).

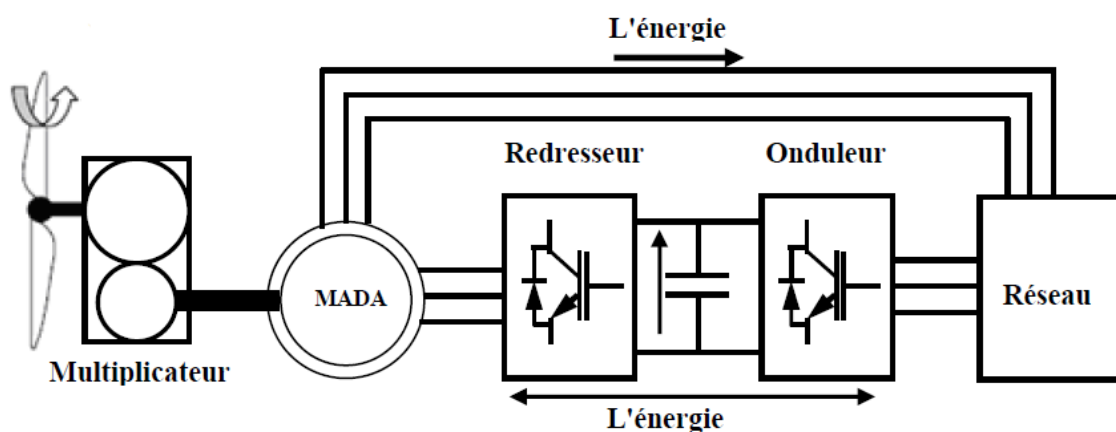


Fig.1.16- Eolienne à base d'une MADA à vitesse variable

### I.12.1-Description de la MADA :

La première apparition de la machine asynchrone à double alimentation "*doubly-fed induction machine* (DFIM) ", date de l'année 1899 [25]; il ne s'agissait pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [24].

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [1].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulement triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques (rotor bobiné) [23]. Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator raccordé en étoile et dont l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague et permet une connexion externe des bobinages au rotor. Cette connexion est une liaison d'alimentation externe qui permet de réaliser un contrôle des grandeurs rotoriques [22].

Pour être classée comme machine à double alimentation il faut qu'il y ait des sources actives sur le stator et le rotor à la fois. Dans les systèmes modernes, une de ces sources est dérivée électroniquement, et peut être commandée pour fournir l'opération à vitesse variable du système, soit comme un moteur ou un générateur. Le convertisseur de puissance est typiquement relié à l'enroulement du rotor. L'autre source (réseau) a typiquement une fréquence et une tension nominalement fixées, qui est habituellement un raccordement direct au stator [1].

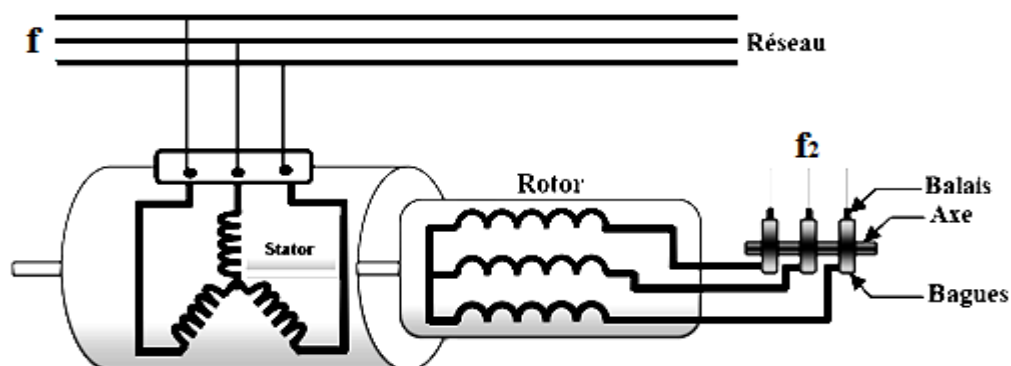


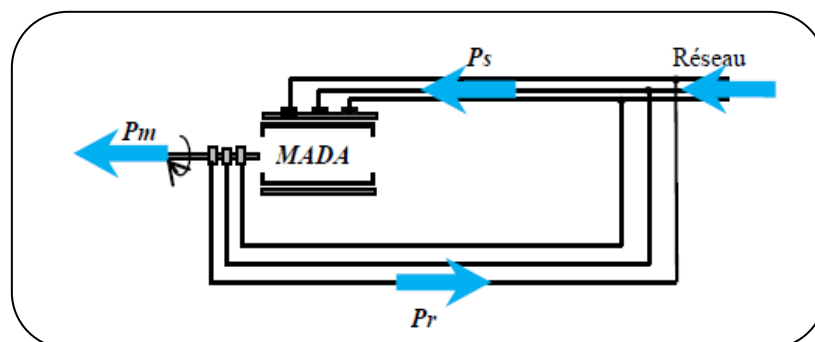
Fig.I.17- Schéma d'une MADA à rotor bobiné

### *I.12.2 -Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :*

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut être en générateur qu'au dessus de cette vitesse, dans la MADA 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 synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine [11].

#### *I.12.2.A -Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :*

Dans ce mode de fonctionnement le stator est alimenté par le réseau, et la puissance de glissement transite par le rotor pour la réinjecter au réseau, cette puissance est dissipée en pertes joule dans le cas des machines asynchrones à cage [5]. Ce type de fonctionnement est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse en dessous de vitesse de synchronisme.



**Fig.I.18- Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone**

#### *I.12.2.B -Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :*

Dans ce mode de fonctionnement le stator est alimenté par le réseau et la puissance de glissement est également fournie par le réseau, dans ce régime, la machine asynchrone à cage classique ne peut fonctionner. Ce type de fonctionnement est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse au dessus de vitesse de synchronisme [11].

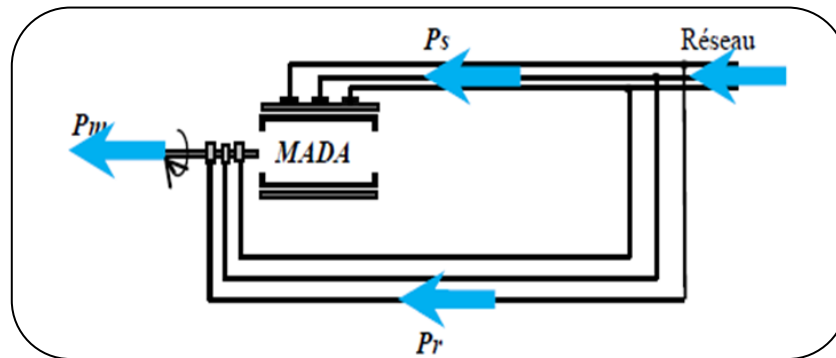


Fig.I.19- Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

I.12.2.C -Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone :

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator, et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [11].

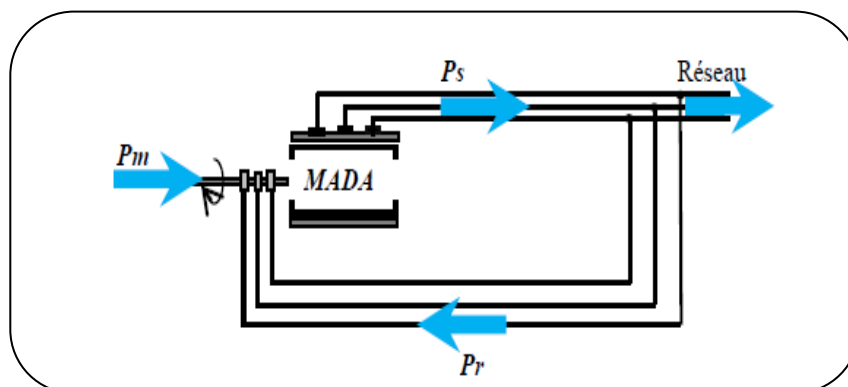


Fig.I.20- Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

I.12.2.D -Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone :

Dans ce mode de fonctionnement, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Dans ce régime, la machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement [11]. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme.

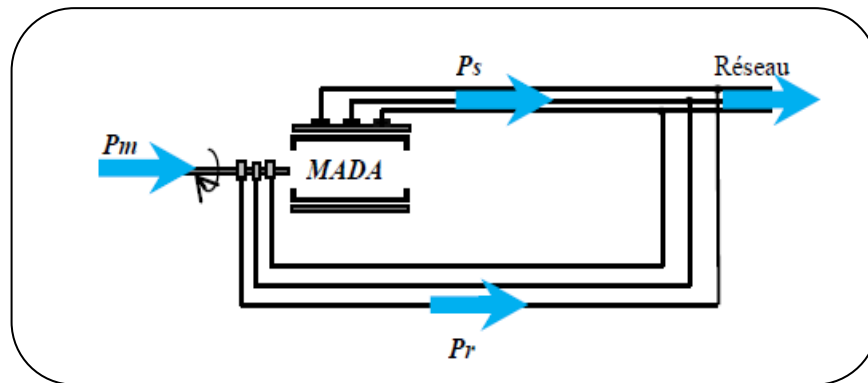


Fig.I.21- Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

### I.12.3- Bilan de Puissances dans une Génératrice Asynchrone à Rotor Bobiné :

Avant d'introduire le bilan des puissances d'une MADA, on commence d'abord par une machine asynchrone à rotor bobiné. En effet la MADA n'est qu'une machine asynchrone à rotor bobiné alimentée par le stator et par le rotor.

- Puissance absorbée au stator

$$P_e = -3 \cdot E_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi \quad (\text{I.10})$$

- Puissance transmise au rotor

$$P_r = P_e - P_{fs} - P_{js} \quad (\text{I.11})$$

- Pertes Joule rotoriques

$$P_{jr} = g \cdot P_r \quad (\text{I.12})$$

- Puissance mécanique développée

$$P_m = P_r \cdot (1 \mp g) \quad (\text{I.13})$$

- Puissance mécanique transmise à la charge

$$P_{mec} = P_m + P_v \quad (\text{I.14})$$

Avec :

$P_e$  : Puissance absorbée au stator

$P_{fr}$  : pertes fer rotoriques

$P_{js}$  : pertes Joule statoriques

$P_v$  : pertes par ventilation

$P_{fs}$  : pertes fer statoriques

$P_m$  : Puissance mécanique développée

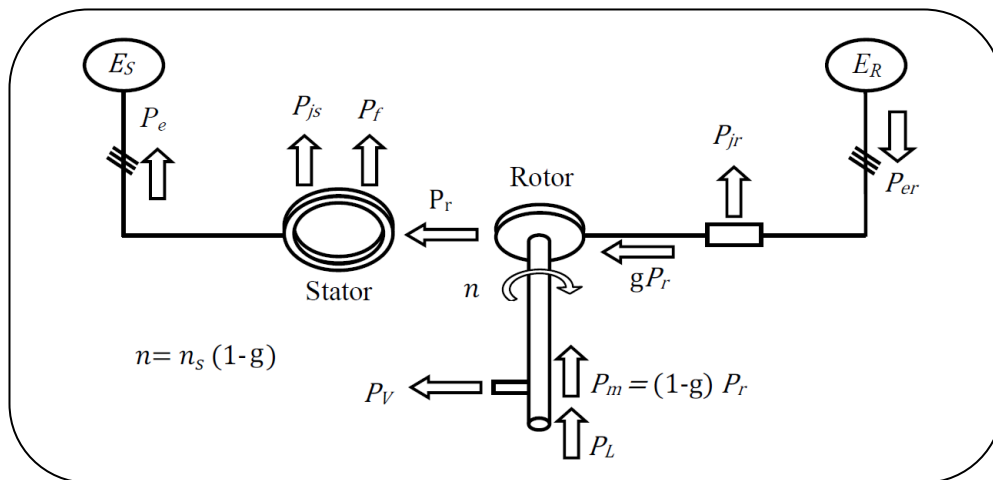
$P_r$  : Puissance transmise au rotor

$P_{mec}$  : Puissance mécanique transmise à la charge

$P_{jr}$  : pertes Joule rotoriques

#### I.12.3.A -En mode hypo-synchrone

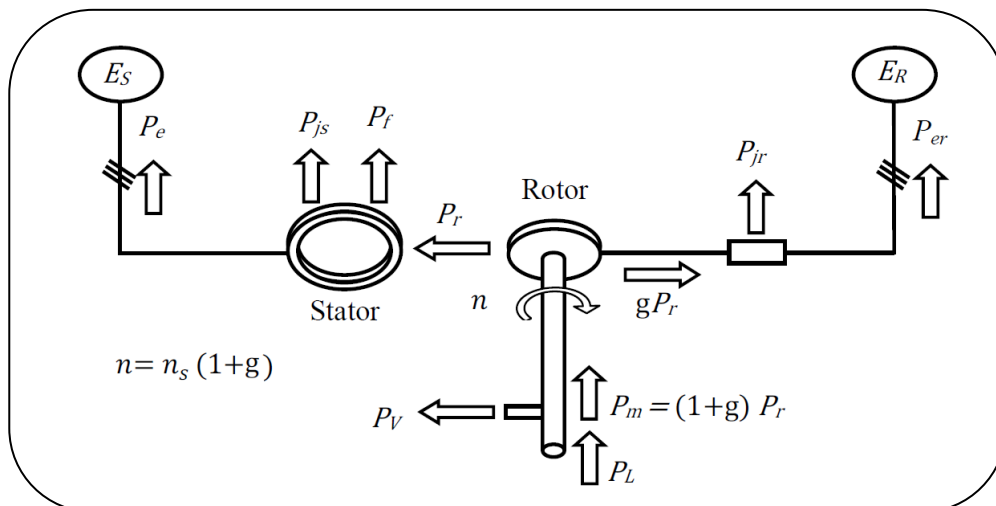
La figure I.22 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme :



**Fig.I.22- Bilan de puissances dans une GADA en mode hypo-synchrone**

### I.12.3.B -En mode hyper-synchrone :

La figure I.23 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et 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 :



**Fig.1.23- Bilan de puissances dans une GADA en mode hyper-synchrone**

### ***I.12.4 -Avantages et inconvénients de la MADA :***

#### ***I.12.4.A- Avantages de la MADA :***

L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (Courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [27] ;

- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse de synchronisme.
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
  - Fonctionnement à vitesse de rotation variable;
  - Régulation découplée des puissances active et réactive

#### ***I.12.4.B -Inconvénients de la MADA [27]:***

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus grand que celle de la machine classique.
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

### **I.13 -Conclusion :**

## Chapitre I : Généralités sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à une étude plutôt descriptive de l'ensemble des composants d'un système éolien. Cette étude nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale et nous a donné une idée sur ses différentes structures.

Parmi les différentes structures présentées, nous nous sommes particulièrement intéressés à la Machine Asynchrone à Double Alimentation vu les avantages et les performances qu'elle présente. Ces performances peuvent être améliorées d'avantage en lui associant un système d'électronique de puissance. Nous consacrons le reste de ce mémoire à l'étude de cette machine.

## CHAPITRE II :

*Commande en puissance de la  
MADA connectée au réseau*

### II.1-Introduction :

Les génératrices asynchrones sont largement répandues pour la production de l'énergie électrique d'origine éolienne, particulièrement dans des régions isolées. Afin de permettre une production d'électricité optimale pour différentes vitesses de vent et de vitesses de l'éolienne, nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui présente plusieurs avantages en comparaison avec la machine à cage

Ce chapitre présente la modélisation et la commande vectorielle d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) intégrée dans un système d'énergie éolienne. L'objectif est d'appliquer cette technique de commande pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la GADA, appliquée à un système éolien d'une puissance de 10 KW.

Enfin, les performances du système seront testées et comparées par simulation en termes de suivi de consignes, et de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques de la GADA.

### II.2 -Référentiels de travail :

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique :

#### II.2.1-référentiel lié au stator :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes  $(\alpha, \beta)$ . Ce référentiel est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [21] [30].

$$\theta = \theta_s - \theta_r ; \frac{d\theta_s}{dt} = 0 ; \omega_r = -\frac{d\theta_r}{dt} ;$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega_r$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r$$

### **II.2.2-référentiel lié au rotor :**

Dans ce cas, le système d'axes ( $dq$ ) est immobile par rapport au rotor et tourne avec lui  $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$  [30]. Ce système d'axes est utile pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \text{ donc } \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s$$

### **II.2.3-référentiel lié au champ tournant :**

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes ( $X,Y$ ), il tourne avec la vitesse du champ tournant [30].

$$\frac{d\theta_r}{dt} = g\omega_s, \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$$

### **II.3-Hypothèses de travail :**

Afin d'élaborer un modèle simple de la MADA .Il est nécessaire de tenir compte des hypothèses simplificatrices suivantes [21]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et il est parfaitement feuilleté.
- Les pertes fer et par hystérésis sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet, de plus, que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition spatiale sinusoïdale.

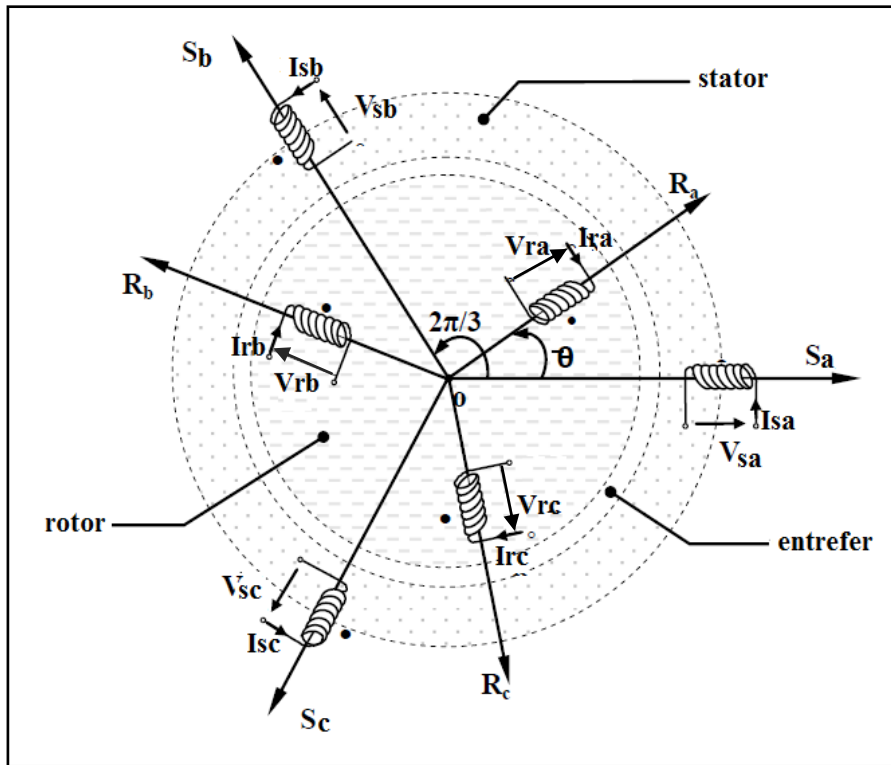
### **II.4-Modélisation de la MADA :**

Avant d'aborder la commande vectorielle de la MADA, il faut d'abord construire son référentiel. Ce dernier est celui de Park exprimé dans un référentiel permettant de réaliser une commande en puissance active et réactive simple et découplée.

**II.4.1. -Modèle de la MADA dans le repère (a b c) :**

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor.

Elle peut être électriquement schématisée par la figure suivante :



**Fig.II.1- Représentation de la MADA dans le repère (a b c)**

**A. Equations électriques dans le repère (a b c) :**

Les enroulements illustrés par la figure précédente obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases} \quad (II.1)$$

Avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

### **B. Equations magnétiques dans le repère (a b c) :**

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_s] [I_s] + [M_s][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_r] [I_r] + [M_s][I_s] \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

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

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

Avec :  $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$

### C. Equation mécanique de la MADA :

L'équation du mouvement peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \cdot \Omega = C_{em} - C_r \quad (II.3)$$

$J$  : moment d'inertie des masses tournantes ( $\text{Kg.m}^2$ ) ;

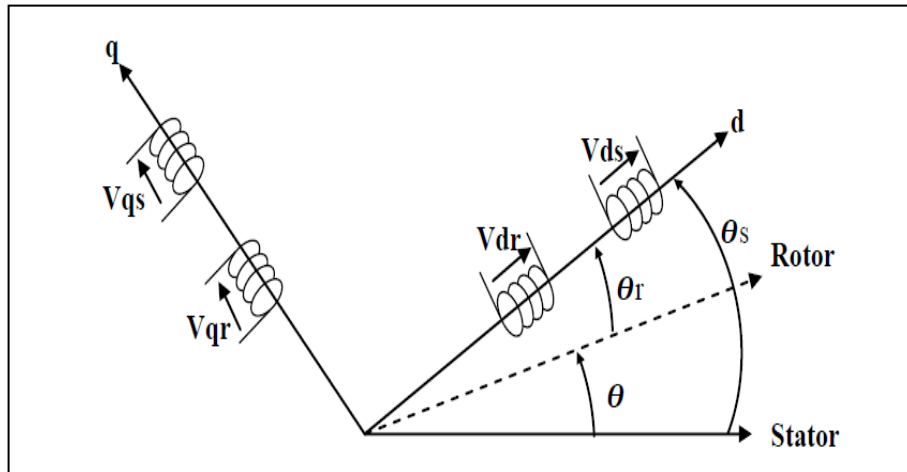
$K_f$  : Coefficient de frottement en ( $\text{Nm.s/rad}$ ) ;

$C_{em}$  : Couple électromagnétique en ( $\text{Nm}$ ) ;

$C_r$  : Couple résistant en ( $\text{Nm}$ ) ;

$\Omega$  : vitesse angulaire électrique de rotation du rotor.

### II.4.2-Modèle de la MADA dans le plan (dq) :



**Fig.II.2- Représentation de la MADA dans le repère (dq)**

#### A. Application de la transformation de Park :

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux courants, tensions et flux permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants.

La matrice de Park est donnée par [34] :

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

Son inverse est donnée par :

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

Cette transformation ne permet pas de conserver l'expression de la puissance en passant d'un système réel (a,b,c) à un système fictif (d,q,0). Pour avoir la conservation de l'expression de la puissance dans les deux systèmes, il faut que la matrice  $P(\theta)$  soit orthonormée. Pour cela ; il suffit de remplacer les coefficients  $\frac{2}{3}$  et  $\frac{1}{2}$  par respectivement par  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  et  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ .

Le changement de variables relatif aux (courants, tensions et flux) est défini par la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)^{-1}] \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix}$$

### **B. Equations électromagnétiques dans le plan (dq) :**

En appliquant la transformation de Park pour le système d'équations électriques du stator, on aura :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \Phi_{sq} \frac{d\theta_s}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \Phi_{sd} \frac{d\theta_s}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

En procédant d'une façon analogue à celle du stator, on trouve pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \Phi_{rq} \frac{d\theta_r}{dt} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + \Phi_{rd} \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Les relations entre les flux et les courants sont exprimées par les équations suivantes :

$$\text{Flux coté rotor : } \begin{cases} \Phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Flux coté stator} : \begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Après développement des calculs et en choisissant les courants statoriques et rotoriques comme variables d'état, nous obtenons :

$$\frac{d}{dt} I_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ V_{sd} - R_s I_{sd} + (L_s \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{M^2}{L_r} \frac{d\theta_r}{dt}) I_{sq} + (M \frac{d\theta_s}{dt} - M \frac{d\theta_r}{dt}) I_{rq} - \frac{M}{L_r} V_{rd} + \frac{M R_r}{L_r} I_{rd} \right] \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{d}{dt} I_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ V_{sq} - R_s I_{sq} + (L_s \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{M^2}{L_r} \frac{d\theta_r}{dt}) I_{sd} + (M \frac{d\theta_s}{dt} + M \frac{d\theta_r}{dt}) I_{rd} - \frac{M}{L_r} V_{rq} + \frac{M R_r}{L_r} I_{rq} \right] \quad (\text{II.9})$$

$$\frac{d}{dt} I_{rd} = \frac{1}{\sigma L_r} \left[ V_{rd} - R_r I_{rd} + (L_r \frac{d\theta_r}{dt} - \frac{M^2}{L_s} \frac{d\theta_s}{dt}) I_{rq} + (M \frac{d\theta_r}{dt} - M \frac{d\theta_s}{dt}) I_{sq} - \frac{M}{L_s} V_{sd} + \frac{M R_s}{L_s} I_{sd} \right] \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{d}{dt} I_{rq} = \frac{1}{\sigma L_r} \left[ V_{rq} - R_r I_{rq} + (\frac{M^2}{L_s} \frac{d\theta_s}{dt} - L_r \frac{d\theta_r}{dt}) I_{rd} + (M \frac{d\theta_r}{dt} + M \frac{d\theta_s}{dt}) I_{sd} - \frac{M}{L_s} V_{sq} + \frac{M R_s}{L_s} I_{sq} \right] \quad (\text{II.11})$$

### C. Equation du couple électromagnétique dans le plan (dq) :

On peut l'écrire comme suit :

$$C_{em} = -p(\Phi_{rd} I_{rq} - \Phi_{rq} I_{rd}) = p(\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II.12})$$

### II.4.3-Commande vectorielle de la MADA :

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par une orientation adéquate du repère (*dq*). Si cela est réalisé, nous obtiendrons un comportement proche de celui d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique [26].

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Dans cette optique, nous développerons des lois de commande en puissance exprimées dans un référentiel tournant à la vitesse du flux statorique donc du champ tournant et orienté suivant le flux statorique d'axe direct.

Cela implique les relations suivantes :

$$\text{Si le repère (d,q) tourne à } \omega_s ; \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega_r = g \cdot \omega_s$$

Si le repère (d,q) est orienté suivant le flux statorique d'axe d, nous obtiendrons :

$$\Phi_{sd} = \Phi_s \text{ et } \Phi_{sq} = 0$$

Dans ce qui suit et à partir des simplifications précédentes, nous exprimerons les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques en fonction des courants rotoriques.

Finalement, en exprimant les relations entre les tensions et les courants rotoriques nous montrerons que la MADA est commandable en puissance par ses tensions rotoriques. Nous établirons en conséquence les schémas bloc de commande en puissance de la MADA.

$$\text{Tensions statoriques} \begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \Phi_{sq} \frac{d\theta_s}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \Phi_{sd} \frac{d\theta_s}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Tensions rotoriques} \begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \Phi_{rq} \cdot g \cdot \omega_s \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + \Phi_{rd} \cdot g \cdot \omega_s \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec un flux statorique constant et orienté,  $\Phi_{sd} = \Phi_s$  et  $\Phi_{sq} = 0$  ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\text{Tensions statoriques} \begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \Phi_s \omega_s \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Tensions rotoriques} \begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - \Phi_{rq} g \cdot \omega_s \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + \Phi_{rd} g \omega_s \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Pour les machines de moyenne et forte puissances utilisées dans l'énergie éolienne, on néglige la résistance du bobinage statorique ( $R_s = 0$ ), les équations (II.16) deviennent :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = \Phi_s \omega_s = V_s \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

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

$$\text{flux coté rotor} \begin{cases} \Phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$\text{flux coté stator} \begin{cases} \Phi_s = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ 0 = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

A partir des équations des composantes directes et en quadrature du flux statoriques (équations (II.18), Nous pouvons écrire les relations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{1}{L_s} (\Phi_s - M \cdot I_{rd}) \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

- *Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :*

Les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

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

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

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

$$\begin{cases} P_s = -\frac{M V_s}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{\Phi_s V_s}{L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

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

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{rd} \quad (\text{II.24})$$

Les puissances active et réactive rotoriques peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} P_r = -g \cdot \frac{M V_s}{L_s} I_{rq} \\ Q_r = g \left( \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{M V_s}{L_s} \right) I_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

- *Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques :*

A partir du système d'équation (II.20), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\Phi_{rd} = \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \quad (\text{II.26})$$

$$\Phi_{rq} = \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] I_{rd} + \frac{M}{L_s} \Phi_{sq} \quad (\text{II.27})$$

Comme  $\Phi_{sq} = 0$ , on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = I_{rd} \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{rq} = \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] I_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

On obtient donc le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rd} - g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{rq} + g \omega_s \sigma L_r I_{rd} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

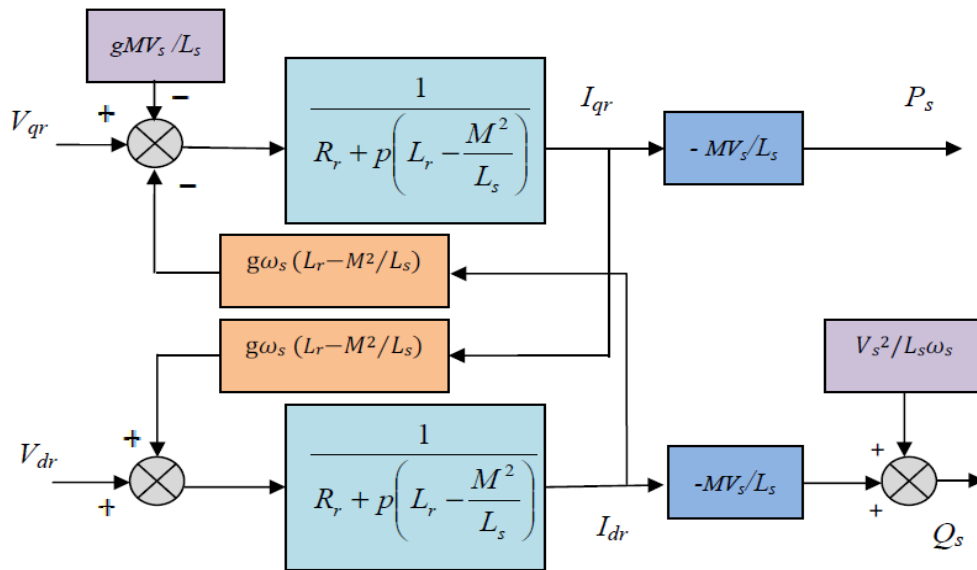
En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \sigma L_r I_{rd} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre  $\sigma L_r$  est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme  $g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s}$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Les équations (II.23), (II.24) et (II.30) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (**Fig.II.3**).



**Fig.II.3- Schéma bloc du système à réguler**

Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe  $q$  rotorique et la puissance réactive et la puissance active pour l'axe  $d$  rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire coté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

#### II.4.4 -Commande vectorielle directe et indirecte :

La commande vectorielle à flux rotorique orienté, est dite directe ou indirecte selon la méthode d'estimation du vecteur flux rotorique.

- *Commande vectorielle directe :*

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. L'appellation commande directe vient du fait que les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotorique de la machine. L'intérêt que présente cette méthode est que sa mise en œuvre est simple.

Pour réguler la GADA, nous avons mis en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur PI (Fig.II.4) :

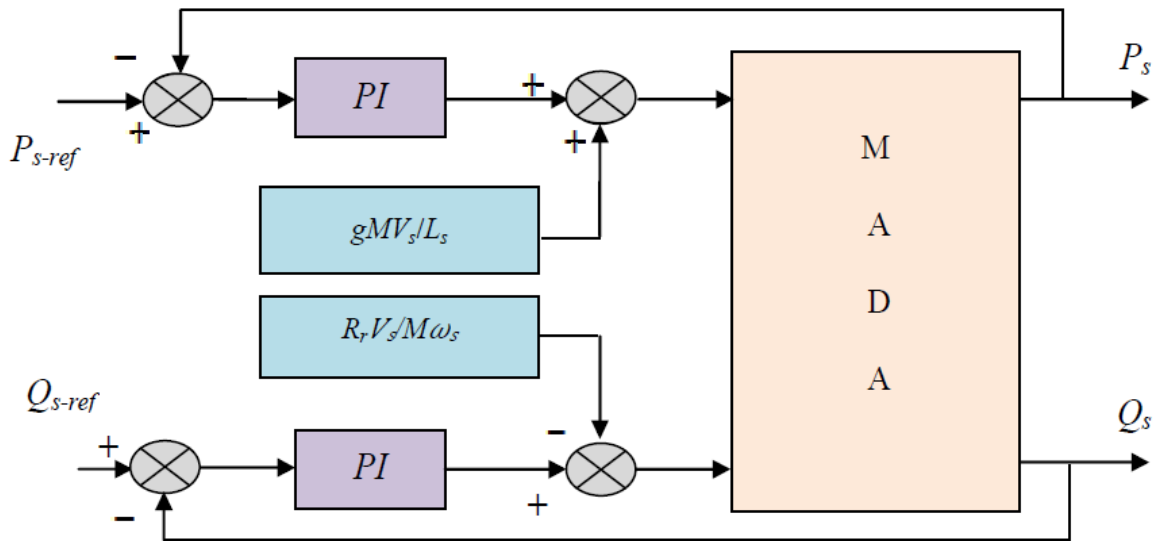


Fig.II.4- Schéma bloc de la commande directe

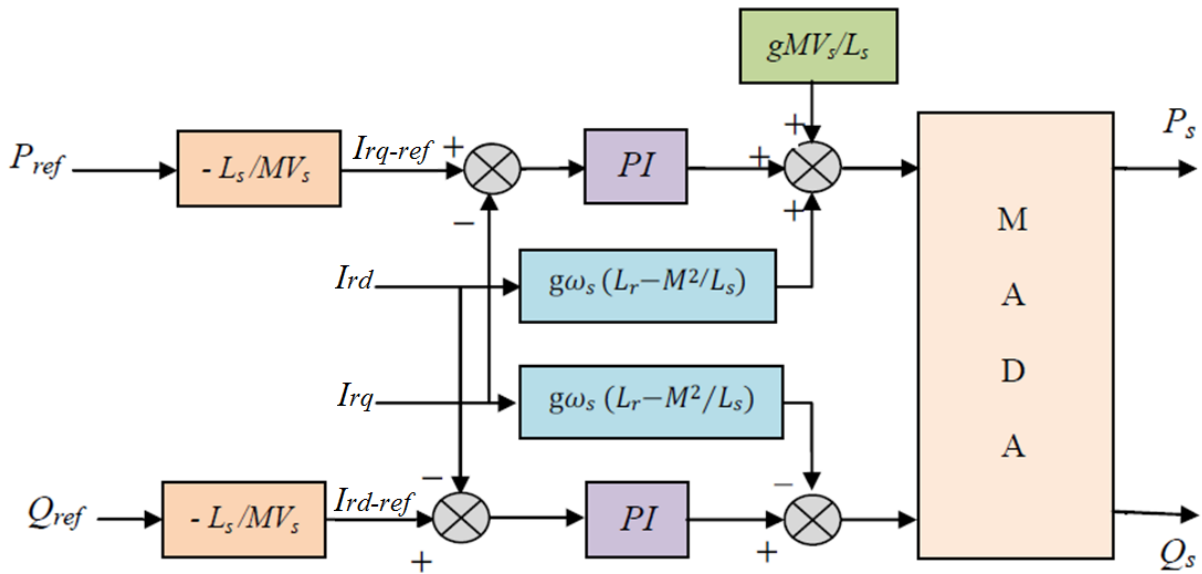
- *Commande vectorielle indirecte :*
  - *Commande en boucle ouverte :*

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence. Elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe *d* et *q*.

A partir des expressions des puissances active et réactive statoriques du système (II.23), on déduit les références des courants rotoriques direct et en quadrature suivant les relations :

$$\begin{cases} I_{rq\_ref} = -\frac{L_s}{M V_s} P_{s\_ref} \\ I_{rd\_ref} = -\frac{L_s}{M V_s} Q_{s\_ref} + \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad (II.31)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-après :

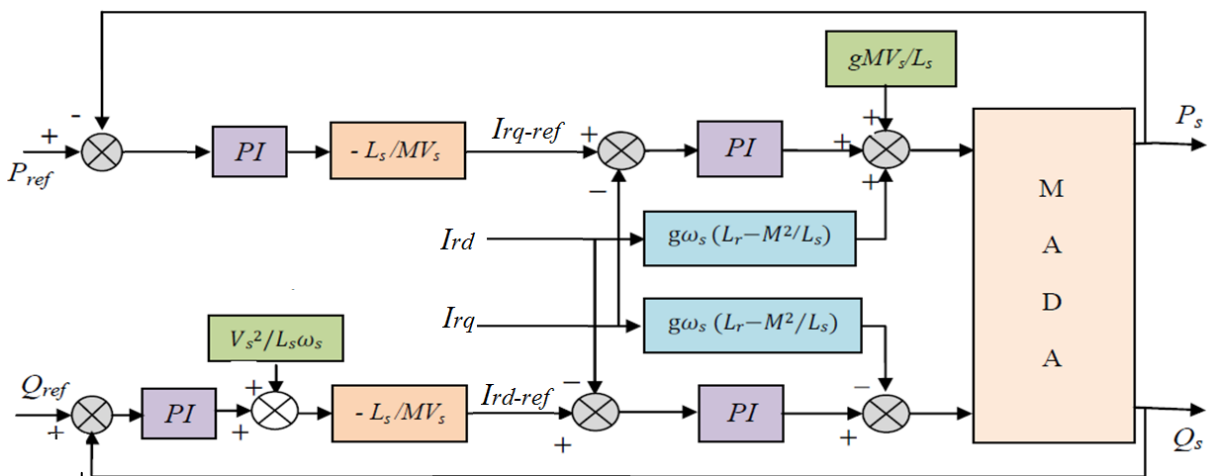


**Fig.II.5- Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte**

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

- *Commande en boucle fermée :*

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :



**Fig.II.6- schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée**

## Chapitre II : Commande en puissance de la MADA connectée au réseau

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Tout fois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers. C'est cette structure que nous allons traiter dans notre travail.

### II.5 –Résultats de Simulation et discussions :

Dans ce qui suit nous présentons les résultats de tests par simulation effectués sur une machine d'une puissance de 7,5 kw dont les paramètres sont donnés en annexe. Les tests effectués sont des tests de consigne de puissances active et réactive et des tests de perturbation de la vitesse de rotation.

Le schéma de la figure (II.7) est un schéma bloc simulink comprimé du système complet montrant les interactions entre les différents régulateurs et la MADA. Notons qu'ici la présence du convertisseur n'est pas prise en compte et que les résultats obtenus seront considérés comme idéaux. Nous montrerons l'influence des convertisseurs dans ces prochains chapitres.

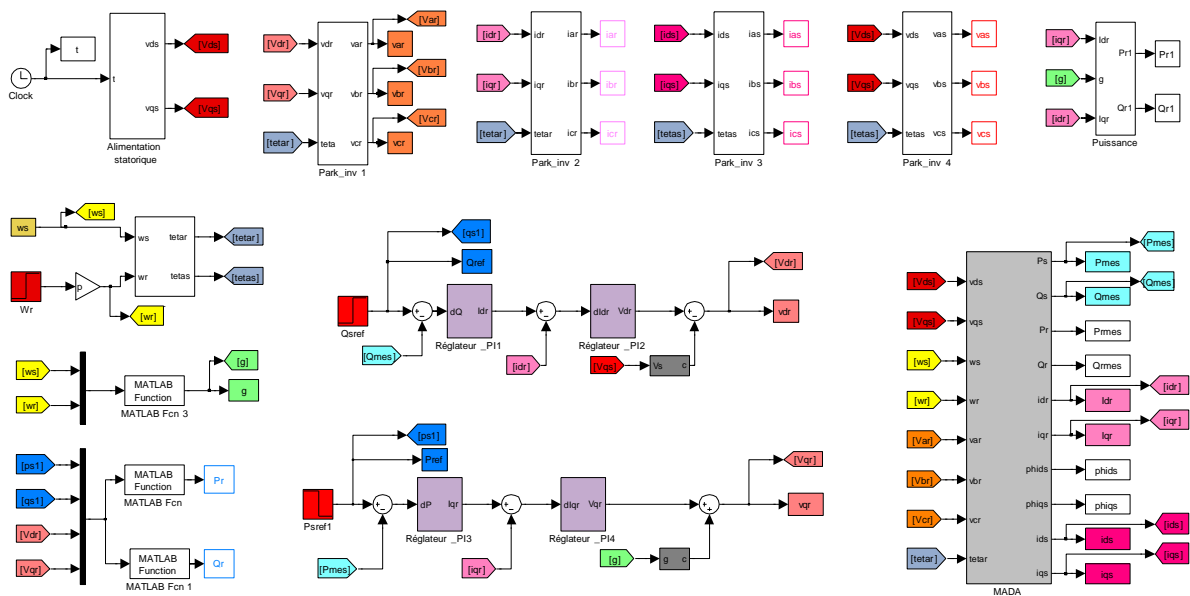


Fig.II.7- Schéma Simulink du système Alimentation + MADA

### ***II.5.1-Conditions de la simulation :***

- *Suivi de consigne :*

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

Conditions de l'essai :

- Machine entraînée à 1050 tr/min.
- à  $t=0.5$  s : échelon de puissance active ( $P_{s_{ref}}$  passe de -2000W à -7500W).
- à  $t=0.5$  s : échelon de puissance réactive ( $Q_{s_{ref}}$  passe de 0 à 2000 VAR).

- *Sensibilité aux perturbations :*

Cet essai nous permet de vérifier dans quelle mesure les puissances mesurées restent à leur valeur de consigne lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement.

Conditions de l'essai :

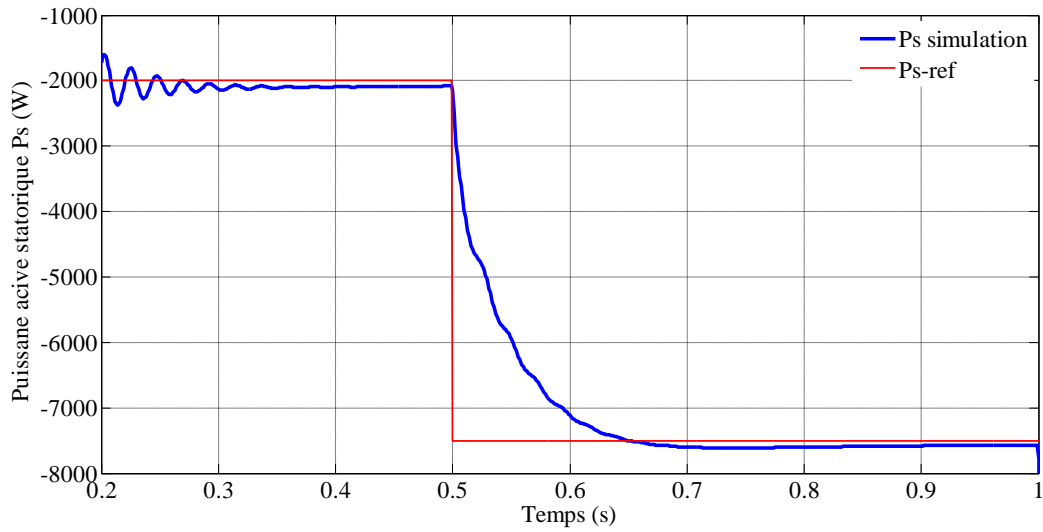
- Machine entraînée à 1050 tr/mn.
- à  $t=0.5$  s : échelon de puissance active ( $P_{s_{ref}}$  passe de -2000 à -7500W).
- Consigne de puissance réactive fixe de ( $Q_{s_{ref}} = 0$  VAR).
- à  $t=1$ s, la vitesse passe brusquement de 1050 à 1950 tr/min.

### ***II.5.2 - Interprétation des résultats :***

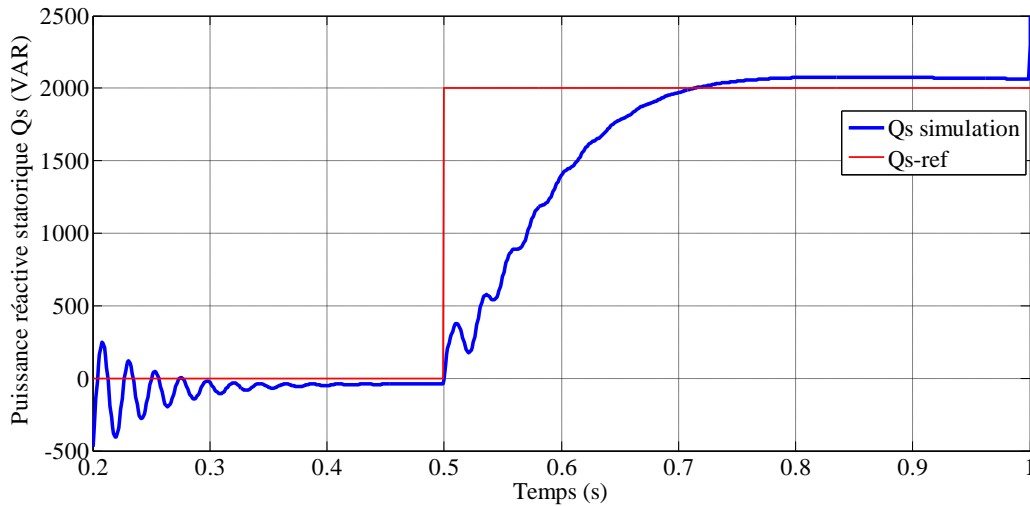
Pour analyser les performances de la stratégie de commande proposée, nous avons effectué deux tests : un test de suivi de consigne et un test de régulation en puissance de la GADA. Cet essai nous permet de vérifier dans quelle mesure les puissances mesurées restent à leur valeur de consigne lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement.

Dans le but de mieux apprécier les performances de ce régulateur, les simulations effectuées dans cette section ne tiennent pas compte des modèles des convertisseurs CCM et CCR.

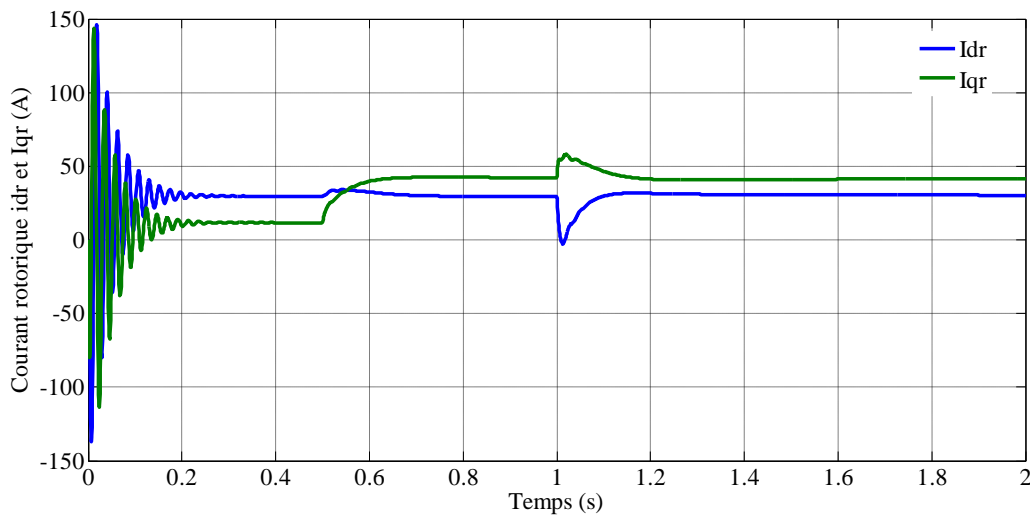
## A. Suivi de consigne :



**Fig.II.8- Suivi de consigne : puissance active**



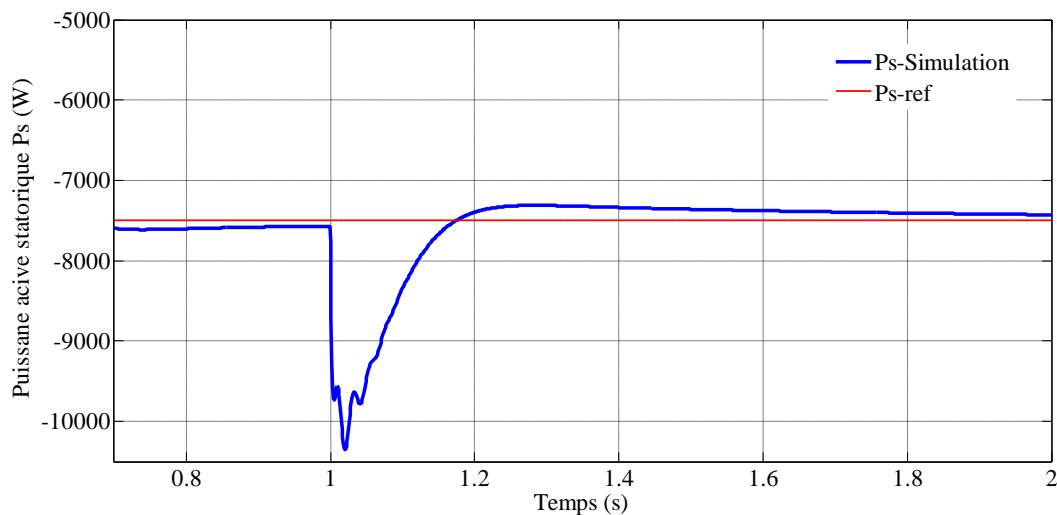
**Fig.II.9- Suivi de consigne : puissance réactive**



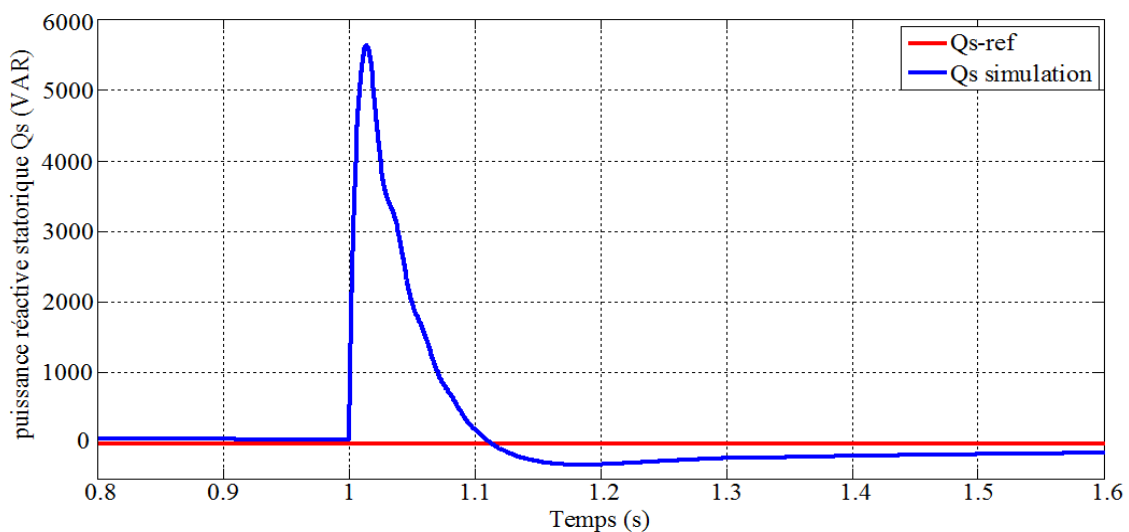
**Fig.II.10- Courants rotoriques directs et quadratiques de la GADA.**

Les figures (II.8) et (II.9) présentent les résultats obtenus pour le test de suivi de consigne dans le cas de stratégie de commande par régulateur PI. Pour cet essai, la vitesse est fixée à 1050tr/mn, nous appliquons des échelons de puissance active et réactive ( $P_{s-ref}=-7.5kW$  et  $Q_{s-ref}=2kVAR$ ) aux instants  $t=0.5s$  respectivement. A la figure (II.10) sont montrés les courants rotoriques  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  de la GADA. Les puissances  $Q_s$  et  $P_s$  suivent parfaitement l'évolution des courants  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  respectivement, car dans ce mode de contrôle (contrôle indirect), les puissances statoriques ne sont pas mesurées mais est plutôt reconstruites à partir des courants rotoriques.

### B. Sensibilité aux perturbations

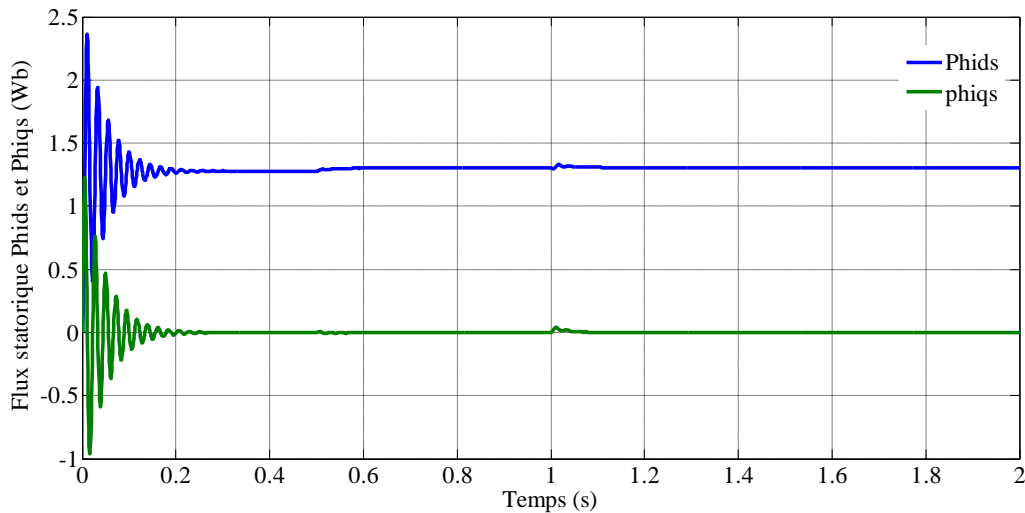


**Fig.II.11- Effet d'une variation de vitesse : puissance active**



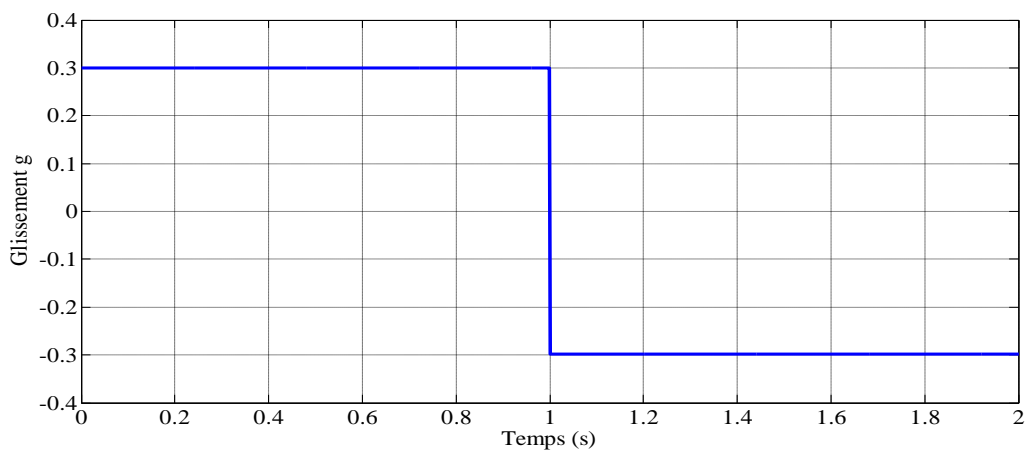
**Fig.II.12- Effet d'une variation de vitesse : puissance réactive**

Les figures (II.11) et (II.12) montrent les résultats obtenus pour le test de régulation en puissance de la GADA. Les puissances active et réactive statoriques étant fixées à  $-7.5\text{kW}$  et  $0\text{kVAR}$  respectivement, à l'instant  $t=1\text{s}$  la vitesse rotorique varie brusquement de  $1050\text{tr/mn}$  à  $1950\text{tr/mn}$  (qui correspond à une variation du glissement de  $-30\%$  jusqu'à  $+30\%$ ). A l'instant du changement de la vitesse, le régulateur PI se montre robuste et rejette la perturbation. En effet, les limites du régulateur PI apparaissent nettement en présence de la perturbation.



**Fig.II.13- Les flux statoriques sur l'axe d et q.**

Dans la figure (II.13) sont illustrés les flux statoriques dans la GADA. La totalité du flux est sur l'axe  $d$  comme imposé par la commande vectorielle mise en œuvre. Par conséquent, le découplage entre l'axe  $d$  et l'axe  $q$  est parfait. Ceci valide la commande vectorielle.



**Fig.II.14- Variation de glissement**

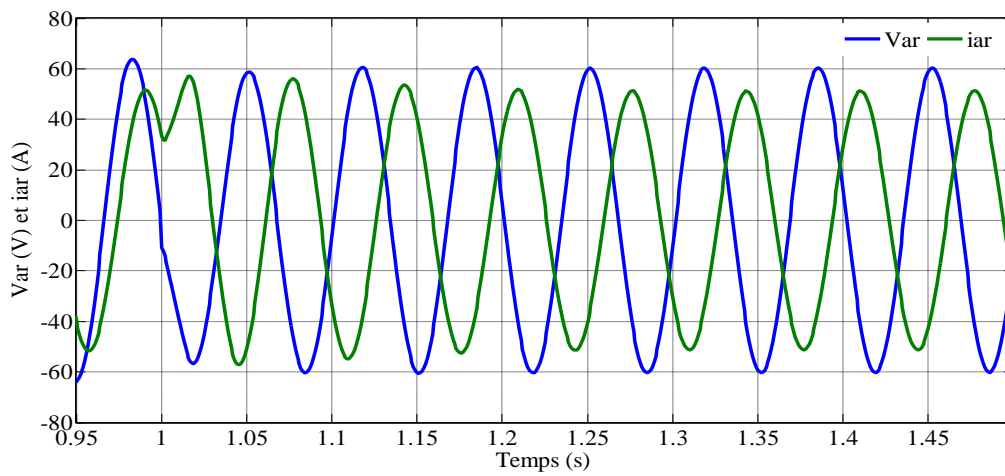
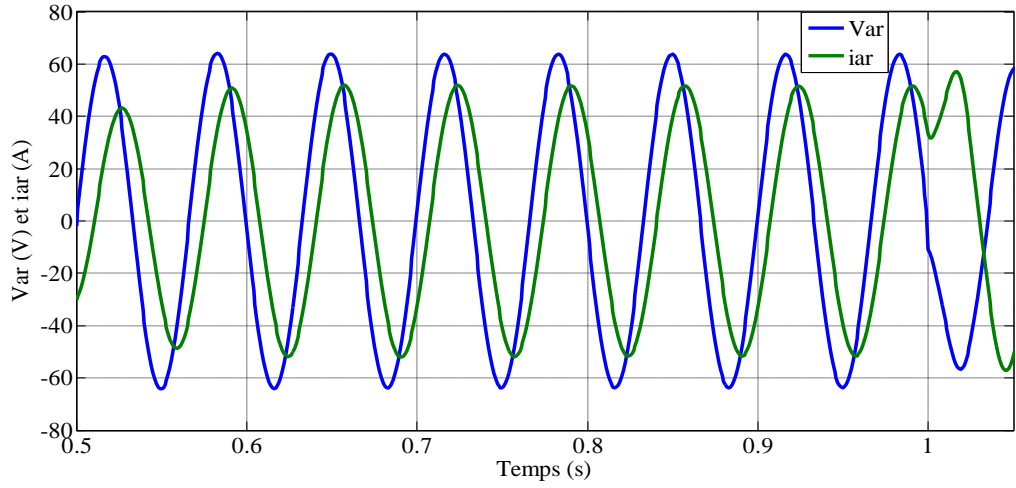


Fig.II.15- Zoom sur la tension et le courant rotoriques

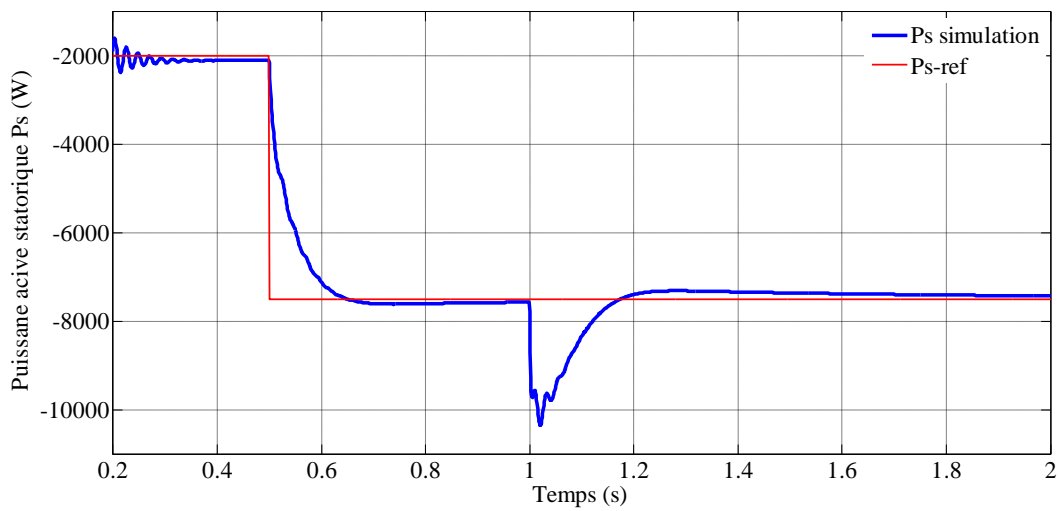
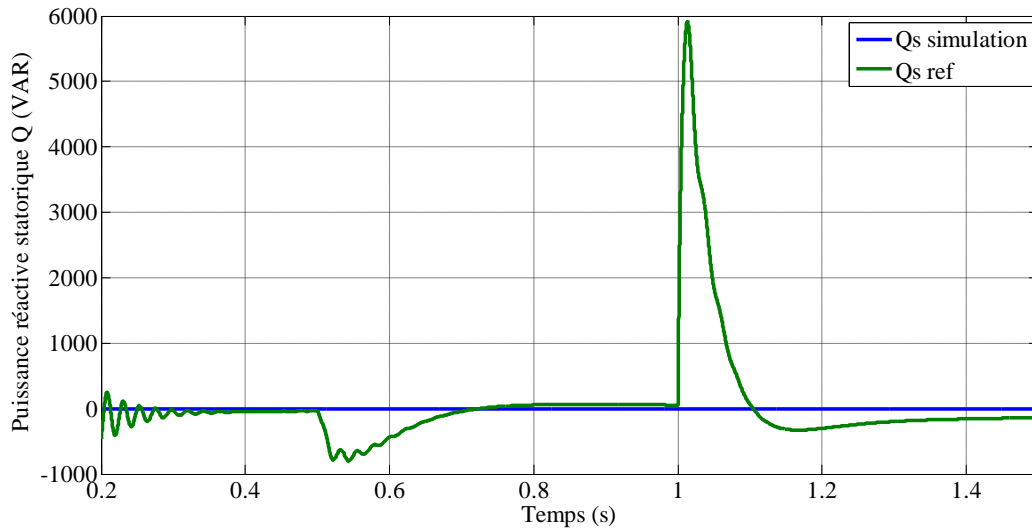


Fig.II.16.a- La puissance active statorique



**Fig.II.16.b- La puissance réactive statorique**

Le glissement de la GADA est donné à la figure II.14. Ainsi, le facteur de puissance unitaire au niveau du stator est garanti (figure II.16.b). La figure II.15 montre des zooms sur le courant et tension dans une phase rotorique. Au régime hyper-synchrone ( $g < 0$ ), le courant et la tension rotorique sont en opposition de phase, car dans ce mode de fonctionnement, le rotor fournit de la puissance active au réseau. Cependant nous remarquons un petit déphasage entre ces deux grandeurs qui est dû à la puissance réactive circulant entre le rotor et le réseau. Au régime hypo-synchrone ( $g > 0$ ), le courant et la tension sont en phase à un petit décalage près qui est dû à la puissance réactive transitée entre le rotor et le réseau (Fig.II.15). Dans ce mode de fonctionnement le rotor absorbe de la puissance active à partir du réseau. Ainsi, le modèle développé du système de conversion d'énergie éolienne basé sur la GADA est validé.

### II.6 -Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation et la commande vectorielle ont été exposées. La méthode du flux orienté appliquée depuis quelques années à la machine asynchrone à double alimentation reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux.

La commande vectorielle de la MADA que nous avons développé présente une poursuite satisfaisante de la référence. Il faut signaler que le régulateur PI a permis de maîtriser les régimes transitoires, et en général, les variations paramétriques de la machine.

A partir des résultats de simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active.

Comme indiqué précédemment, les résultats présentés dans ce chapitre ne tiennent pas compte de la présence du convertisseur du côté rotor.

Les puissances obtenues sont parfaitement constantes en régime permanent. Dans les prochains chapitres nous étudierons l'influence de la présence du convertisseur coté rotor sur la forme des puissances obtenues. Nous montrerons que celles-ci ne sont pas parfaitement constantes en régime permanent, mais elles fluctuent autour des références. Nous agirons sur la structure du convertisseur en introduisant le multiniveaux pour réduire l'amplitude de ces fluctuations.

## CHAPITRE III :

*Commande de la MADA  
associée à un convertisseur  
simple niveau*

### III.1- Introduction :

Ce chapitre est destiné à montrer l'influence de la présence du convertisseur dans la branche rotorique sur les performances de la commande en puissance de la MADA.

Ce convertisseur est un ensemble redresseur (CCR)-onduleur (CCM) séparé par un étage à courant continu comme montré sur la figure (III.1).

Le Convertisseur Coté Réseau (CCR) fonctionne en redresseur dans un régime hypo-synchrone, il est commandé en MLI de façon à assurer une tension du bus continue constante et un facteur de puissance désiré.

Le Convertisseur Coté Machine (CCM) fonctionne en onduleur dans un régime hypo-synchrone, il est commandé en MLI de façon à fournir une puissance active et réactive données au stator.

Cette cascade de convertisseurs permet un transfert bidirectionnel de la puissance rotorique ; c'est-à-dire qu'en régime hyper-synchrone le CCM fonctionnera en redresseur et le CCR en onduleur.

Les convertisseurs CCR et CCM sont à simple niveau ; c'est-à-dire que chacun est composé de six interrupteurs (IGBT+une diode en antiparallèle) commandés par une seule porteuse.

### III.2-Structure d'alimentation de la MADA par une cascade redresseur- onduleur :

Dans cette partie, nous présentons l'alimentation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation dont le stator est couplé directement au réseau et le rotor par une cascade redresseur-onduleur à MLI.

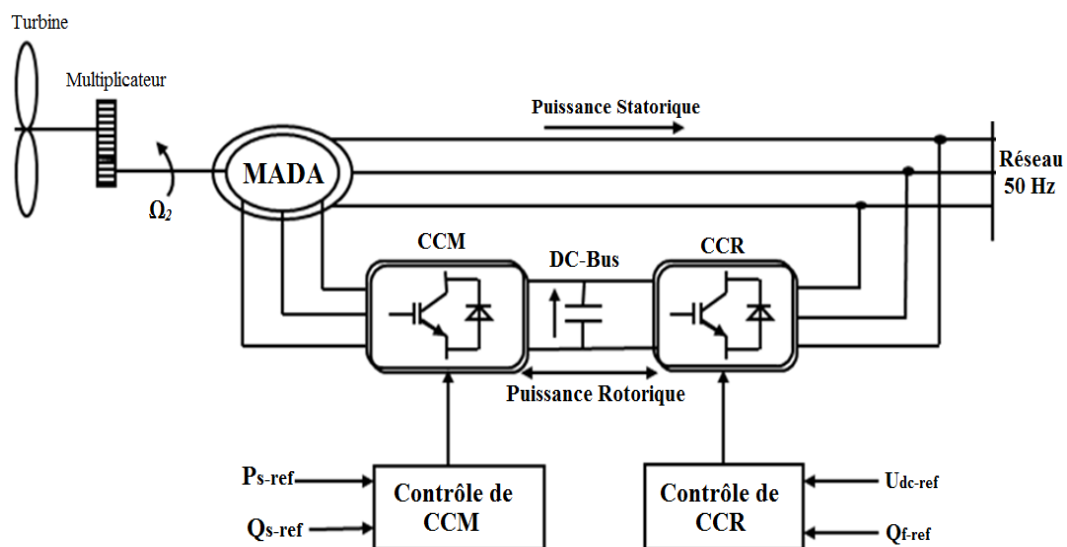


Fig.III.1- Architecture de commande du système éolien

### III.3- Hypothèses simplificatrices [31]:

Pour simplifier les modèles, certaines hypothèses simplificatrices ont émisées :

- Les interrupteurs sont considérés comme parfaits (résistance de valeur nulle à l'état passant, infinie à l'ouverture et les commutations sont instantanées).
- Les cellules d'interrupteurs placées en série ou en parallèles et commandées par les mêmes signaux sont considérées comme un seul interrupteur.
- La source est considérée comme parfaite et indépendante des autres contraintes électriques. Par exemple, une source de tension sera indépendante du courant et de la fréquence.
- Les éléments passifs sont considérés comme linéaires et invariants dans le temps, c'est-à-dire que les valeurs qui les caractérisent (résistance, inductance et capacité,...) ne change pas dans le temps, ne dépendent pas des autres contraintes électriques et ne peuvent pas se saturés.

### III.4- Modèle du convertisseur coté réseau (CCR) simple niveau :

Le redresseur simple niveau est constitué de six interrupteurs, chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en antiparallèle. Dans le cas des moyennes puissances les transistors sont des IGBT.

Les six interrupteurs forment ainsi trois bras et chaque bras commande une phase. La commande des interrupteurs de chaque bras est dite complémentaire. Nous nous déterminerons donc la commande des interrupteurs du haut de chaque bras.

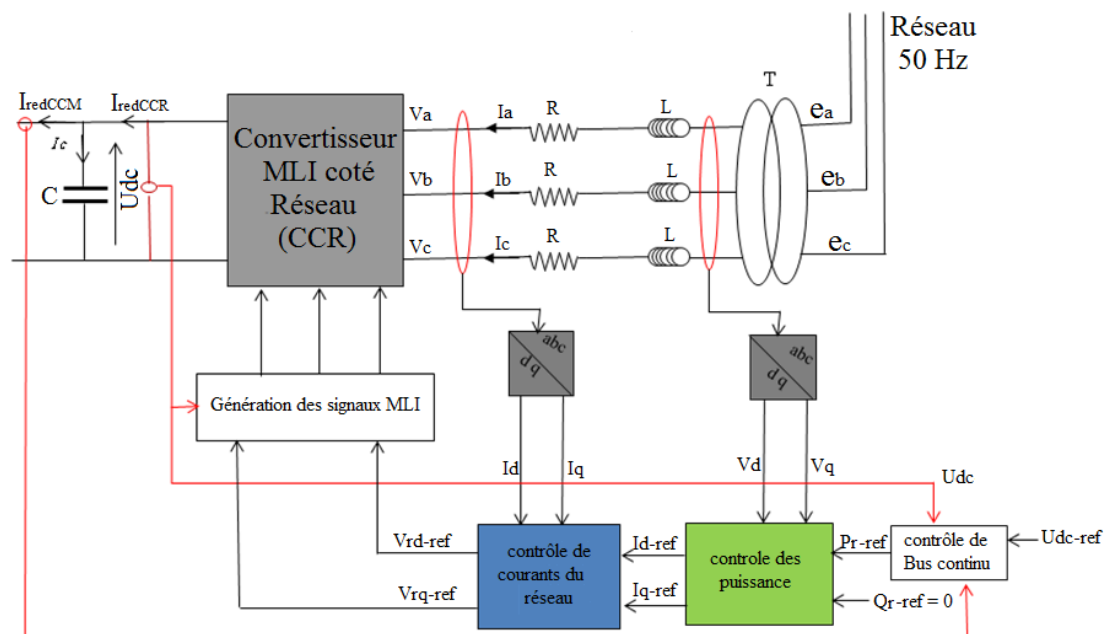


Fig .III.2- Schéma de principe de la régulation du CCR

### III.4.1- Calcul des courants d'entrée du CCR :

La source est composée d'une f.é.m. triphasée parfaitement sinusoïdale en série avec une résistance  $R$  et une inductance  $L$  sur chaque phase. Le réseau est supposé parfaitement équilibré, les impédances des trois phases sont identiques. Les trois tensions du réseau sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} e_a = e_{amax} \sin \theta \\ e_b = e_{bmax} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c = e_{cmax} \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.1)$$

Avec :

$e_{max}$  : L'amplitude maximale de la tension de source

En appliquant la loi du Kirchhoff côté alternatif, on obtient :

$$\begin{cases} -e_a + R I_a + L \frac{d}{dt} I_a + V_a = 0 \\ -e_b + R I_b + L \frac{d}{dt} I_b + V_b = 0 \\ -e_c + R I_c + L \frac{d}{dt} I_c + V_c = 0 \end{cases} \quad (III.2)$$

Où  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  sont les tensions simples à l'entrée du convertisseur (CCR).

Le système d'équations (III.2) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{R}{L} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a - V_a \\ e_b - V_b \\ e_c - V_c \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

### III.4.2-Calcul des tensions d'entrée du CCR :

Après avoir calculé les courants d'entrée au convertisseur (CCR) maintenant on cherche les tensions d'entrée :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (III.4)$$

Pour passer des tensions composées aux tensions simples, étant donné que la somme instantanée des courants ( $I_a + I_b + I_c$ ) est nulle (le point neutre  $n$  n'est pas relié), et que le réseau est équilibré et sinusoïdal impliquant la somme des forces électromotrices ( $e_a + e_b + e_c$ ) nulle.

Alors :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{III.5})$$

A partir des équations (III.4) et (III.5) on trouve :

$$\begin{cases} V_a = \frac{U_{ab} - U_{ca}}{3} \\ V_b = \frac{U_{bc} - U_{ab}}{3} \\ V_c = \frac{U_{ca} - U_{bc}}{3} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Dans notre application, Le redresseur est commandé par des fonctions de commutations ( $C_{R1}$ ,  $C_{R2}$  et  $C_{R3}$ ) prenant les valeurs de 0 ou +1. Chaque interrupteur peut être commandé en ouverture ou en fermeture, c'est-à-dire si un interrupteur du bras haut est bloqué  $C_{Ri} = 0$  et s'il est passant alors  $C_{Ri} = 1$  (avec  $i = 1, 2$  ou  $3$ ). De plus, lorsque  $C_{Ri} = 1$ , alors son complément, pour ne pas court-circuiter un bras du redresseur ou l'ouverture brusque,  $\overline{C_{Ri}} = 0$ . Les tensions d'entrée ( $V_a, V_b, V_c$ ) sont en fonction des états de ces interrupteurs. Le tableau suivant donne les huit états possibles de ces interrupteurs.

K	$C_{R1}$	$C_{R2}$	$C_{R3}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$
0	1	0	0	$U_{dc}$	0	$-U_{dc}$
1	1	1	0	0	$U_{dc}$	$-U_{dc}$
2	0	1	0	$-U_{dc}$	$U_{dc}$	0
3	0	1	1	$-U_{dc}$	0	$U_{dc}$
4	0	0	1	0	$-U_{dc}$	$U_{dc}$
5	1	0	1	$U_{dc}$	$-U_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

**Tableau illustrant les différents états des interrupteurs et les tensions correspondantes**

De cette table, On cherchera alors une expression reliant la tension  $U_{dc}$  aux tensions  $V_a, V_b, V_c$  qui soit une fonction de l'état des interrupteurs. On commencera d'abord par trouver l'expression des tensions composées en fonction de l'état des interrupteurs.

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{dc}(C_{R1} - C_{R2}) \\ U_{bc} = U_{dc}(C_{R2} - C_{R3}) \\ U_{ca} = U_{dc}(C_{R3} - C_{R1}) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

On remplace (III.8) dans (III.6) on trouve :

$$\begin{cases} V_a = U_{dc} \left[ \frac{2C_{R1} - (C_{R2} + C_{R3})}{3} \right] \\ V_b = U_{dc} \left[ \frac{(2C_{R2} - (C_{R3} + C_{R1}))}{3} \right] \\ V_c = U_{dc} \left[ \frac{(2C_{R3} - (C_{R1} + C_{R2}))}{3} \right] \end{cases} \quad (III.9)$$

Le système d'équations peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{R1} \\ C_{R2} \\ C_{R3} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

#### III.4.3-Calcul du courant de sortie du CCR:

L'état ouvert ou fermé des interrupteurs permet de passer directement des courants d'entrée  $I_a, I_b, I_c$ , en fonction des courants dans les interrupteurs  $I_{k11}, I_{k21}, I_{k31}$  au courant à la sortie du redresseur  $I_{dc}$ .

Avec :

$$\begin{cases} I_{k11} = I_a C_{R1} \\ I_{k21} = I_b C_{R2} \\ I_{k31} = I_c C_{R3} \end{cases} \quad (III.11)$$

On en déduit que le courant à la sortie du redresseur est donné par :

$$I_{redCCR} = I_{k11} + I_{k21} + I_{k31} \quad (III.12)$$

#### III.4.4-Calcul de la tension de sortie du CCR :

Pour compléter le modèle du redresseur dans le repère triphasé (a b c), on rajoute l'équation traduisant la charge de la capacité C qui est donnée par :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} I_c \quad ==> \quad \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (I_{redCCR} - I_{redCCM}) \quad (III.13)$$

#### III.4.5- Elaboration des signaux de commande :

Les signaux de commande  $C_{R1}, C_{R2}, C_{R3}$  sont déterminés par l'intersection des trois tensions de références qui sont les sorties du régulateur de tension du bus continu et la porteuse.

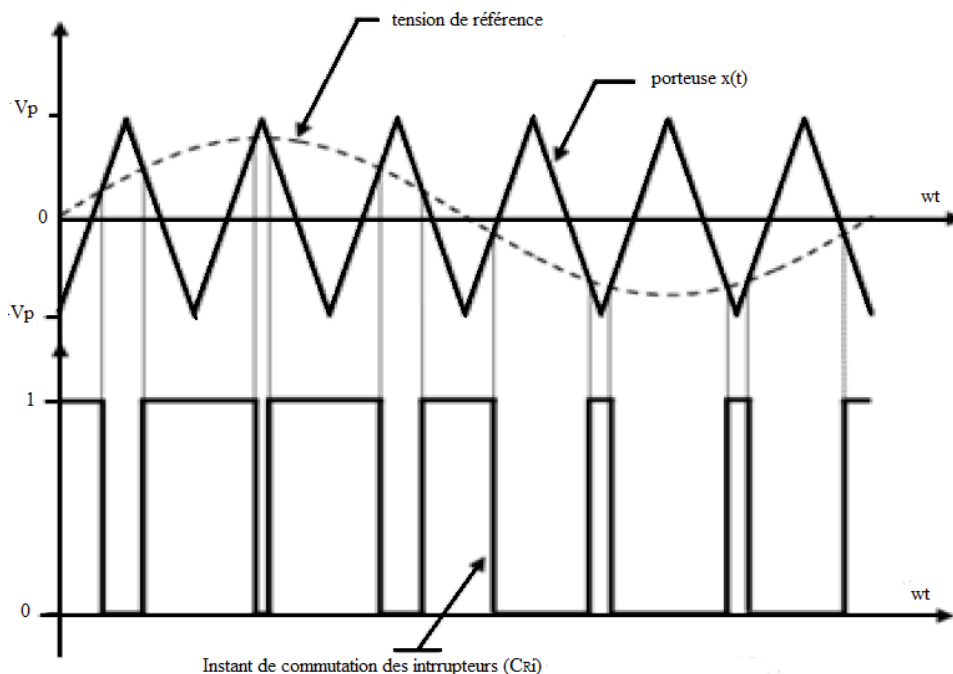
Cette porteuse est unique dans le cas d'un CCR simple niveau, mais dans le cas d'un convertisseur multiniveaux, il y aura autant de porteuses que de convertisseurs en parallèles.

### - *Principe de la MLI :*

La modulation triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersective puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale :

- L'indice de modulation  $m$  qui définit le rapport entre la fréquence  $f_p$  de la porteuse et la fréquence  $f$  de la référence :  $m = f_p / f$
- Le taux de modulation  $r$  (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante  $V_r$  à la valeur crête  $V_p$  de la porteuse:  $r = V_r / V_p$ .



**Fig III.3- Principe de la commande à MLI**

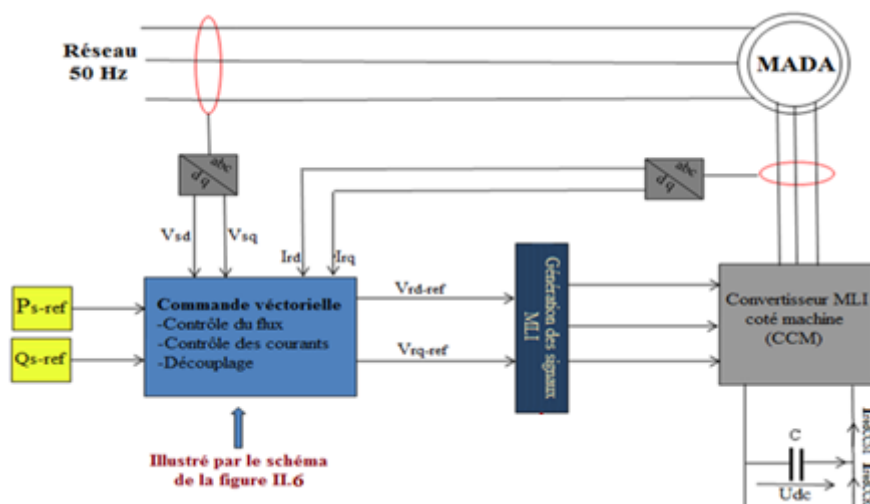
**III.5- Modèle du convertisseur coté Machine (CCM) :**

L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique aujourd'hui. L'onduleur peut être utilisé à fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse des machines électriques. L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir du réseau standard 230/400V, 50Hz [32].

Après redressement, la tension (étage continu) est filtrée par des composants passifs C, pour être finalement appliquée à l'onduleur. Ce dernier qui est constitué de trois bras formé d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement selon la puissance et la fréquence de travail, chaque bras compte deux composants de puissance complémentaires munis de diode montée en antiparallèle. Les diodes de roue libres assurent la continuité du courant une fois que les interrupteurs sont ouverts et aussi la protection des transistors.

À noter qu'un temps de retard doit exister pratiquement entre les interrupteurs haut et bas d'un même bras afin d'éviter le court-circuit de la source continu. L'onduleur est commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui est très sollicitée par les industriels et chercheurs en commande des machines électriques.

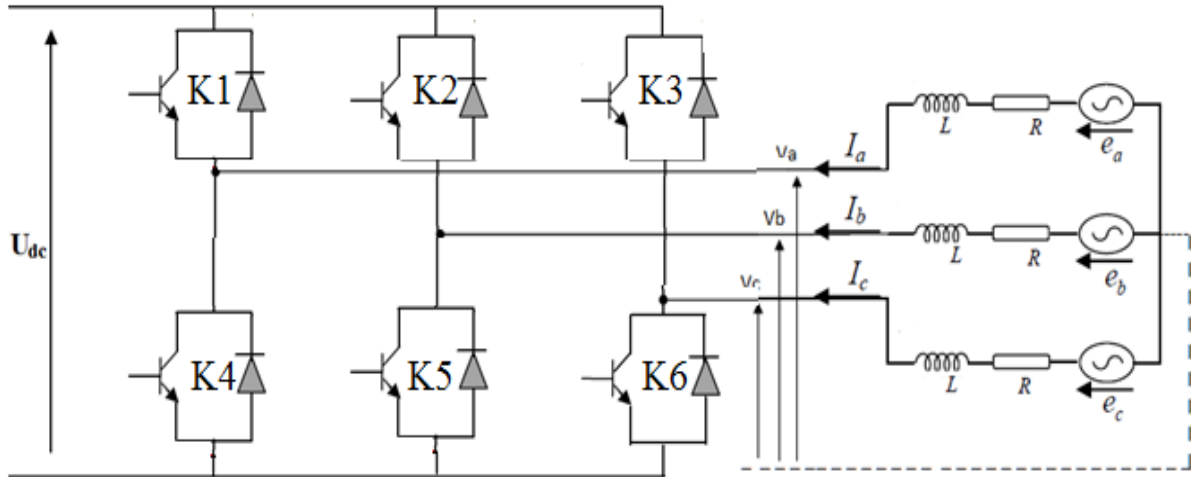
La figure (III.4) montre le schéma de principe de la commande CCM équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Les différents interrupteurs sont supposés parfaits, c'est-à-dire que les phénomènes dus à la commutation sont négligés.



**Fig.III.4- Schéma de principe de la commande CCM**

**III.5.1- Calcul des tensions de sortie du CCM :**

Nous pouvons remplacer les bras du CCM par des interrupteurs à deux positions modélisées par une fonction logique décrit l'état de chaque interrupteur, sa valeur vaut 1 si l'interrupteur est fermé, et 0 s'il est ouvert.



**Fig.III.5-Onduleur de tension triphasée**

Les interrupteurs (K1, K4), (K2, K5), (K3, K6) sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court-circuit.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur (CCM) s'expriment par :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_{dc}(C_{01} - C_{02}) \\ U_{bc} = U_{dc}(C_{02} - C_{03}) \\ U_{ca} = U_{dc}(C_{03} - C_{01}) \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$V_a + V_b + V_c = 0$$

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

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad \text{(III.15)}$$

On remplace (III.14) dans (III.15) on trouve :

$$\begin{cases} Va = \frac{U_{dc}}{3} (2C_{01} - C_{02} - C_{03}) \\ Vb = \frac{U_{dc}}{3} (2C_{02} - C_{03} - C_{01}) \\ Vc = \frac{U_{dc}}{3} (2C_{03} - C_{01} - C_{02}) \end{cases} \quad (III.16)$$

Le système d'équations (III.16) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{01} \\ C_{02} \\ C_{03} \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

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

### III.6-Résultats de simulation et discussions :

Le modèle global du système éolien fut simulé dans l'environnement Matlab/Simulink. Le modèle comprend : une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), convertisseurs CCR et CCM simple niveau qui permettent de relier le rotor au réseau.

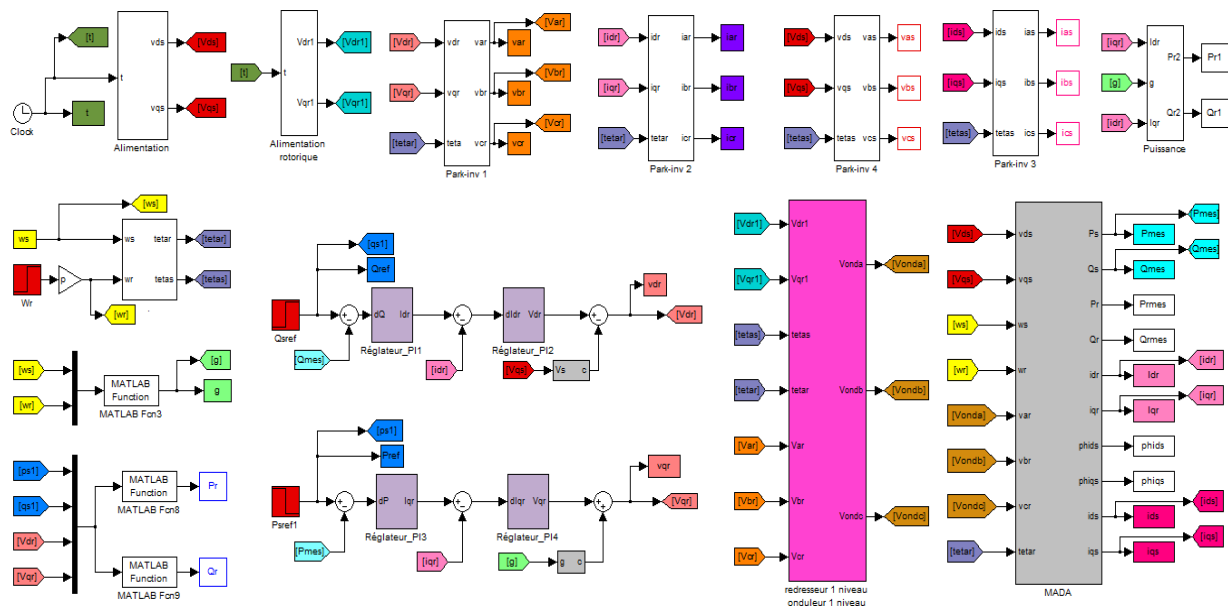
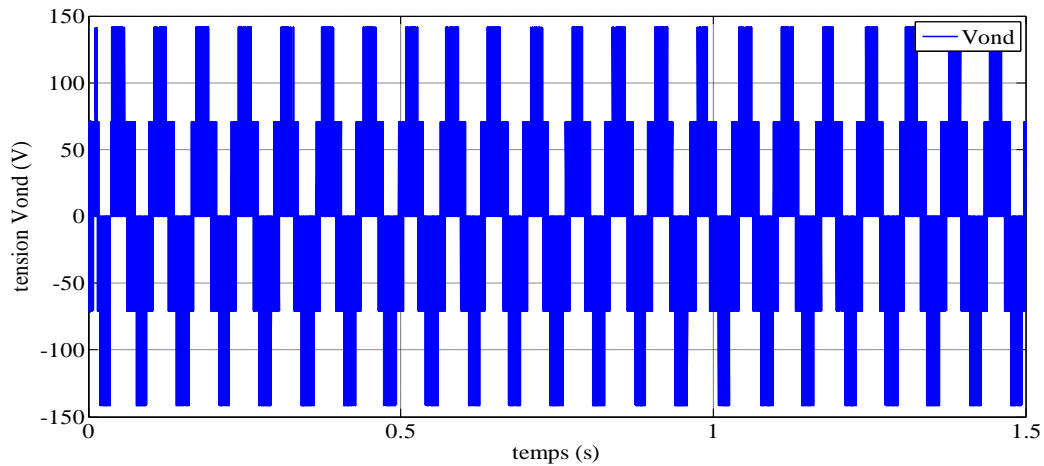
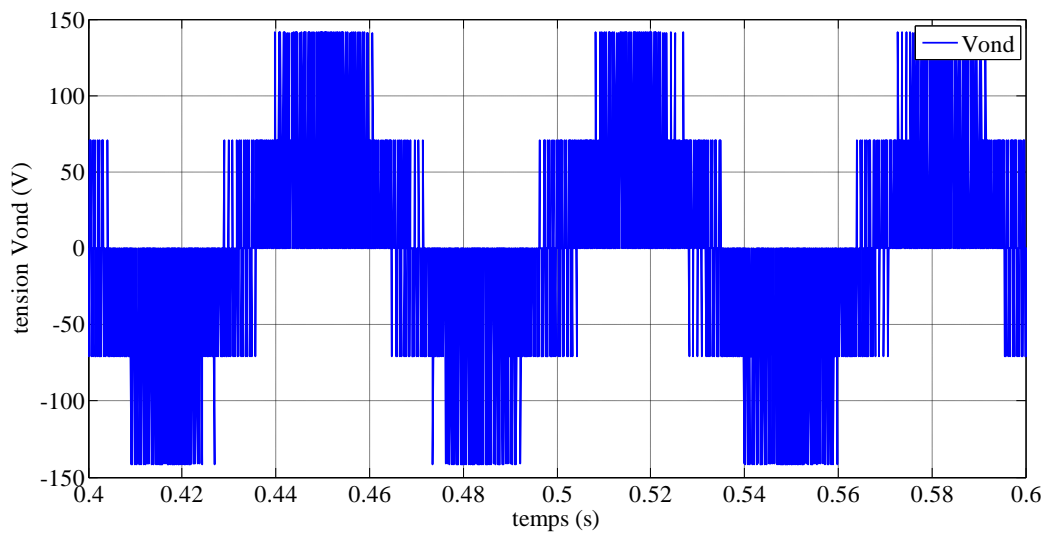


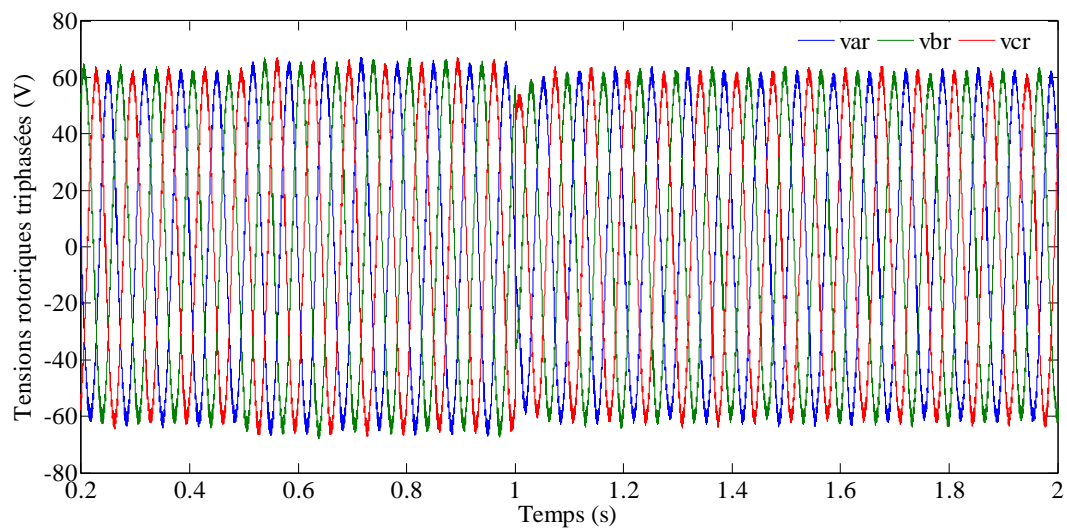
Fig.III.6- Schéma de simulation de l'ensemble redresseur-onduleur à MLI-MADA



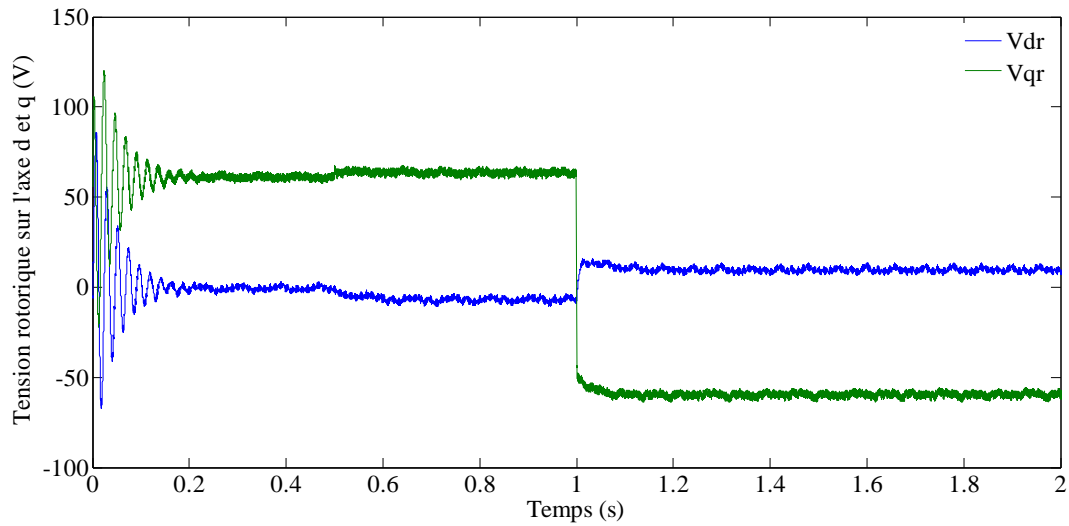
**Fig.III.7- Tension d'une phase à la sortie de l'onduleur à MLI**



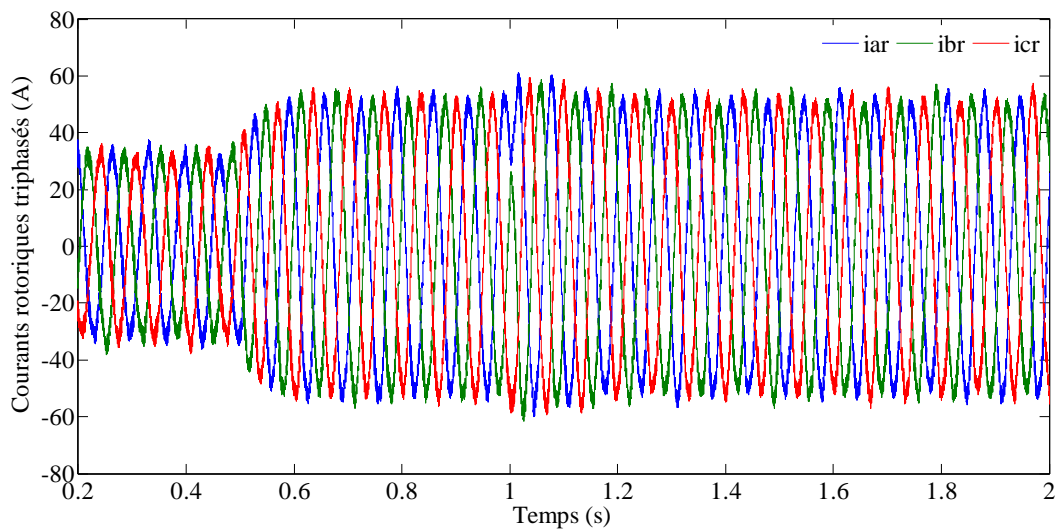
**Fig.III.8- Zoom sur la tension à la sortie d'e onduleur à MLI**



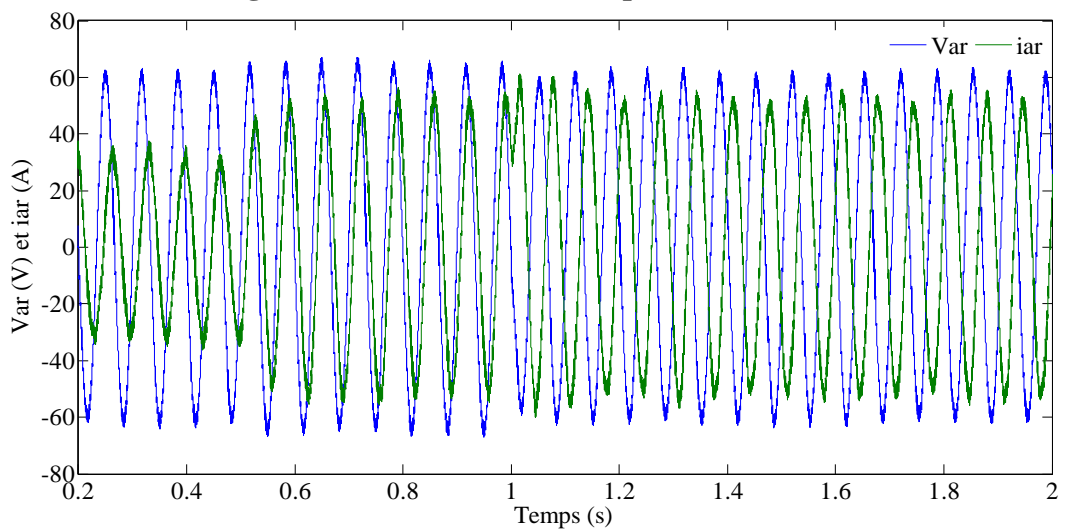
**Fig.III.9- Les tensions rotoriques de la MADA**



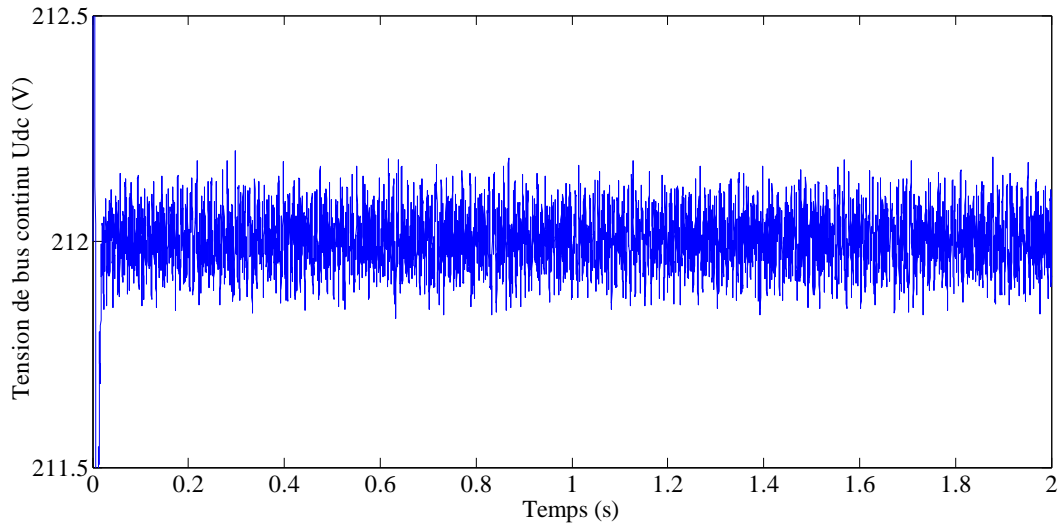
**Fig.III.10-** Les tensions rotoriques de la MADA sur les axes  $d$  et  $q$



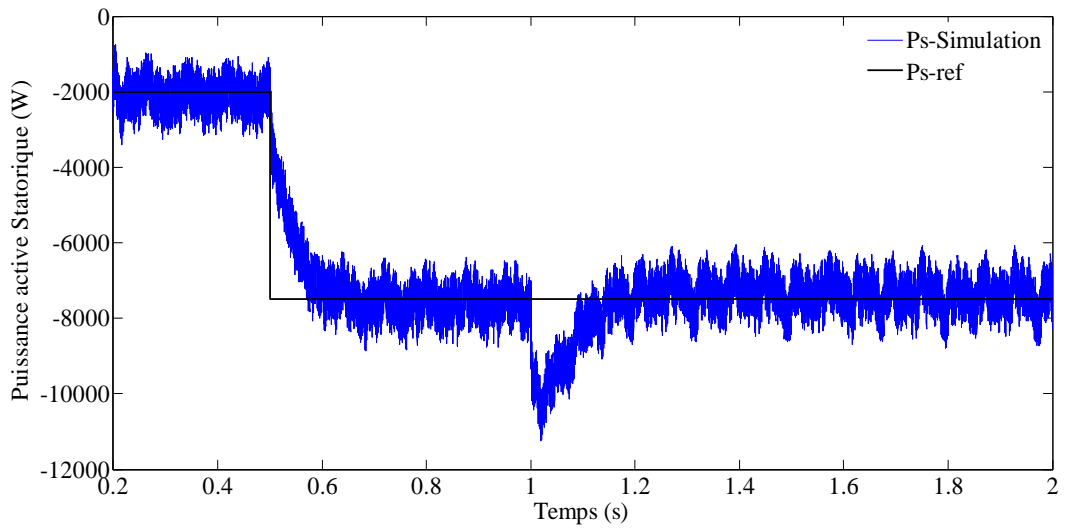
**Fig.III.11-** Les courants rotoriques de la MADA



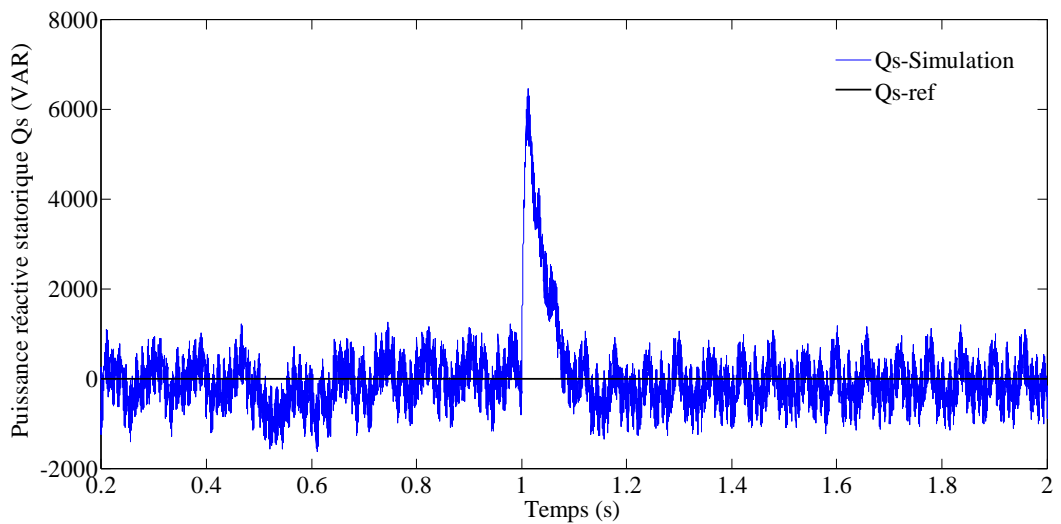
**Fig.III.12-** Tension et courant d'une phase rotorique



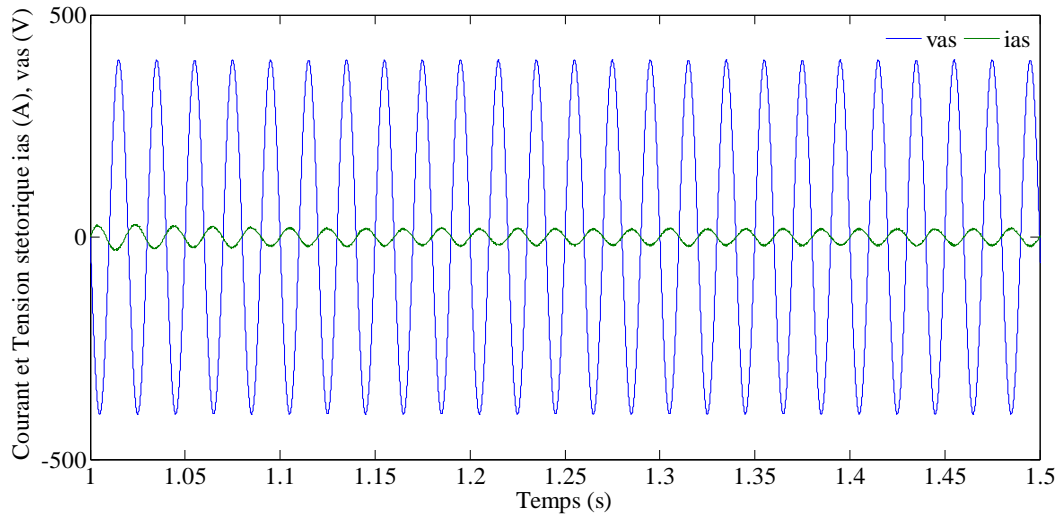
**Fig.III.13- La tension du bus continu**



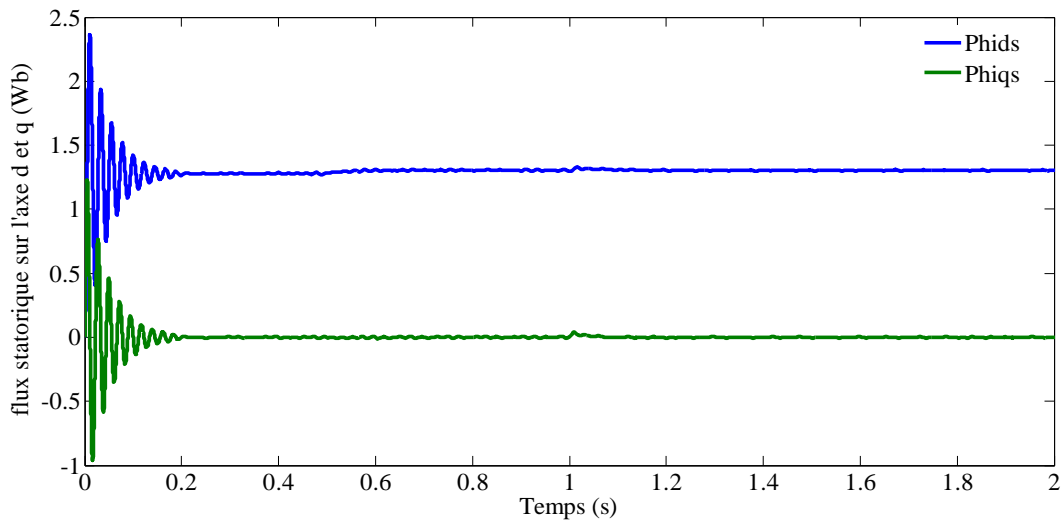
**Fig.III.14- La puissance active simulée**



**Fig.III.15- La puissance réactive simulée**



**Fig.III.16- Tension et courant d'une phase statorique**



**Fig.III.17- Allure des flux statoriques dans les axes d et q**

Les figures précédentes montrent les résultats de simulation du l'ensemble redresseur-onduleur à MLI-MADA.

Les Figures (III.7) et (III.8) représentent la tension d'une phase à la sortie de l'onduleur à MLI sans et avec zoom. Ces figures montrent bien les deux niveaux de tension à la sortie de l'onduleur simple niveau pour une phase, sachant que les deux autres sont déphasées l'une par rapport à l'autre de  $2\pi/3$ .

Les figures (III.9), (III.10), (III.11) et (III.12) montrent que les tensions et les courants rotoriques de la MADA ont une fréquence et une amplitude variable, en effet les pulsations rotoriques sont régies par l'équation  $\omega_s = \omega + \omega_r$ , donc si  $\omega$  change ce qui se traduit par un changement de la vitesse du rotor,  $\omega_r$  change aussi d'une façon à garder  $\omega_s$  constante car elle

est imposée par le réseau. On peut expliquer le changement d'amplitude des tensions et des courants rotoriques comme suit :

Lorsque la puissance statorique change, le régulateur doit agir sur les tensions de commande  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  afin de ramener la puissance active statorique  $P_s$  à sa valeur de référence et comme  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont liées aux courants rotoriques  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$ , donc ils changent d'amplitude aussi.

La figure (III.12) représente dans un même graphe la tension et courant d'une phase rotorique, elle montre que lors de variation de la vitesse de rotation à  $t=1s$ , le courant et la tension de la phase rotorique deviennent en opposition de phase, ce qui explique que la machine passe du fonctionnement hypo synchrone vers l'hyper synchrone.

La figure (III.13) présente la tension aux bornes du bus continu, il est à remarquer que cette tension est maintenue à sa valeur de référence.

Les figures (III.14) et (III.15) représentent les puissances fournies active et réactive et leurs valeurs de référence imposées à la MADA. La consigne de puissance réactive est maintenue à zéro afin d'assurer un facteur de puissance unitaire coté statorique.

On observe dans la figure (III.14) que la puissance active s'approche de la puissance de référence et la figure (III.15) montre que la puissance réactive reste nulle ; ce qui indique un bon contrôle de la machine. Mais ces deux figures nous montrent que les puissances fournies au niveau du stator sont fluctuantes.

Si maintenant, on analyse les signaux statoriques de la figure (III.16), on remarque que la tension et le courant sont en opposition de phase ; ce qui correspond bien à un facteur de puissance unitaire et à une puissance active négative c'est-à-dire produite par la MADA et envoyée sur le réseau. La forme du courant statorique est presque la même que celle dans le cas sans onduleur sauf qu'ici, le courant s'écarte très peu de sa forme sinusoïdale. Cette déformation s'explique par un contenu moins riche en harmonique du courant dans le cas d'un onduleur simple niveau.

Les valeurs maximales ont diminué avec une présence d'harmoniques. On note que la variation de la fréquence de commutation permet d'augmenter les pertes joules ce qui provoque l'échauffement des composants de puissance.

D'après la figure (III.17), le flux statorique d'axe q est nul ce qui vérifie l'hypothèse de l'orientation du flux statorique d'axe q ( $\varphi_{qs} = 0$ ), cependant le flux statorique d'axe d ( $\varphi_{ds}$ ) est constant car la MADA est connectée à un réseau stable.

### III.7- Conclusion

Après avoir construit le modèle du système complet Redresseur simple niveau- Onduleur simple niveau- MADA, nous l'avons testé par simulation dans les mêmes conditions que celles du chapitre précédent (sans convertisseur).

Les mêmes tendances ont été remarquées que dans le cas idéal (sans convertisseur). À la différence que les puissances en régime établi sont ici fluctuantes.

Les fluctuations sont dues à la présence des harmoniques induits par les deux convertisseurs CCR et CCM.

Dans le prochain chapitre nous chercherons à réduire l'amplitude des fluctuations de la puissance en remplaçant le CCR-CCM simple niveau par un autre multiniveaux.

## *CHAPITRE IV :*

*Commande de la MADA  
associée à un convertisseur  
multiniveaux*

#### IV.1- Introduction :

La technologie de conversion de l'énergie du continu vers l'alternatif en utilisant les convertisseurs statiques est une partie de l'électronique de puissance en pleine croissance. Cela tient essentiellement à deux raisons [33] :

- La première est l'étendue du domaine de leurs applications.
- La seconde vient de l'amélioration des performances des semi-conducteurs de puissance et de l'apparition de nouveaux composants permettant l'implantation de nouvelles stratégies de commande plus performantes.

La demande en puissance des applications industrielles a augmenté considérablement ces dernières années, jusqu'à atteindre l'ordre de quelque mégawatts (de l'ordre de 10MW) pour les basses et moyennes tensions. L'utilisation de convertisseurs conventionnels à deux niveaux, à grandes fréquences de commutation, est limitée à ce niveau de puissance à cause des pertes non négligeables engendrées par la commutation des interrupteurs. En plus on se trouve obligé d'associer plusieurs interrupteurs en série et en parallèle afin de respecter les limites physiques des interrupteurs utilisés. Donc l'utilisation des convertisseurs multi-niveaux dans les applications de moyenne et hautes puissances est proposée comme une solution à l'handicap technologique des semi-conducteurs.

Dans ce travail, nous nous pencherons surtout sur les applications basses et moyennes tension où la performance est privilégiée. Les performances qui nous intéressent plus particulièrement sont le rendement du convertisseur et la qualité de sa tension de sortie, celle-ci étant essentiellement exprimée en termes de résolution obtenue. Pour cela, nous nous intéresserons aux convertisseurs multiniveaux qui semblent adaptés à la commande d'une machine asynchrone à double alimentation.

Dans la première simulation, nous allons utiliser un système éolien qui comporte un convertisseur CCR simple niveau, un convertisseur CCM 5 niveaux et une GADA. Dans la seconde, nous allons utiliser un système éolien qui comporte un CCR 5 niveaux, un CCM 5 niveaux et une GADA et à la fin, nous comparons les résultats obtenus

## **IV-2 Principe de l'onduleur multiniveaux : [33]**

### ***IV-2-1 Généralité sur les convertisseurs multiniveaux :***

Le concept de convertisseurs multiniveaux a été mis en place depuis 1975. Le terme multiniveaux a commencé avec les convertisseurs à trois niveaux. Ultérieurement, plusieurs topologies de convertisseurs multiniveaux ont été développées.

L'onduleur multiniveaux présente plusieurs avantages, parmi lesquels on peut mentionner :

La qualité d'onde : les convertisseurs multiniveaux peuvent non seulement générer les tensions de sortie avec une distorsion très faible, mais peut aussi réduire le  $dV/dt$ , donc certains problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) peuvent être réduits.

La tension de mode commun : les convertisseurs multiniveaux produisent une tension de mode commun plus réduite, donc une durée de vie des moteurs plus importante quand ils sont utilisés pour les entraînements électriques. En outre, la tension de mode commun peut être éliminée en utilisant des stratégies de modulation avancées telles que celle proposée dans les chapitres précédents.

Courant d'entrée : les convertisseurs multiniveaux peuvent tirer un courant d'entrée avec une faible distorsion.

Fréquence de découpage : les convertisseurs multiniveaux peuvent fonctionner à la fois à la fréquence fondamentale et à une fréquence de découpage élevée (MLI). Il convient de noter qu'une faible fréquence de commutation signifie généralement des pertes réduites, donc un gain plus élevé dans le rendement du convertisseur.

### ***IV-2-2 Principe de fonctionnement d'un onduleur multiniveaux : [33]***

Les principes présentés précédemment sont également valables pour les modulateurs multiniveaux dont nous présenterons maintenant les spécificités. La plupart des modulateurs décrits dans la littérature sont basés sur la comparaison d'un ensemble de porteuses triangulaires avec le signal de référence. Ils peuvent également être basés sur le calcul des angles de commutation, en vue d'éliminer des harmoniques spécifiques. Les modulateurs multiniveaux sont généralement basés sur l'utilisation de porteuses triangulaires symétriques.

Ces porteuses sont au nombre d'une de moins que le nombre de niveaux, leur agencement caractérise la méthode de modulation. La combinaison des signaux de comparaison permet de déterminer le signal modulé et plus ou moins directement d'obtenir les signaux de commande. Le signal modulé est généré par le convertisseur par l'intermédiaire des signaux de commande, il n'a généralement pas d'utilité en tant que signal et souvent on passe directement des signaux de comparaison aux signaux de commande du convertisseur.

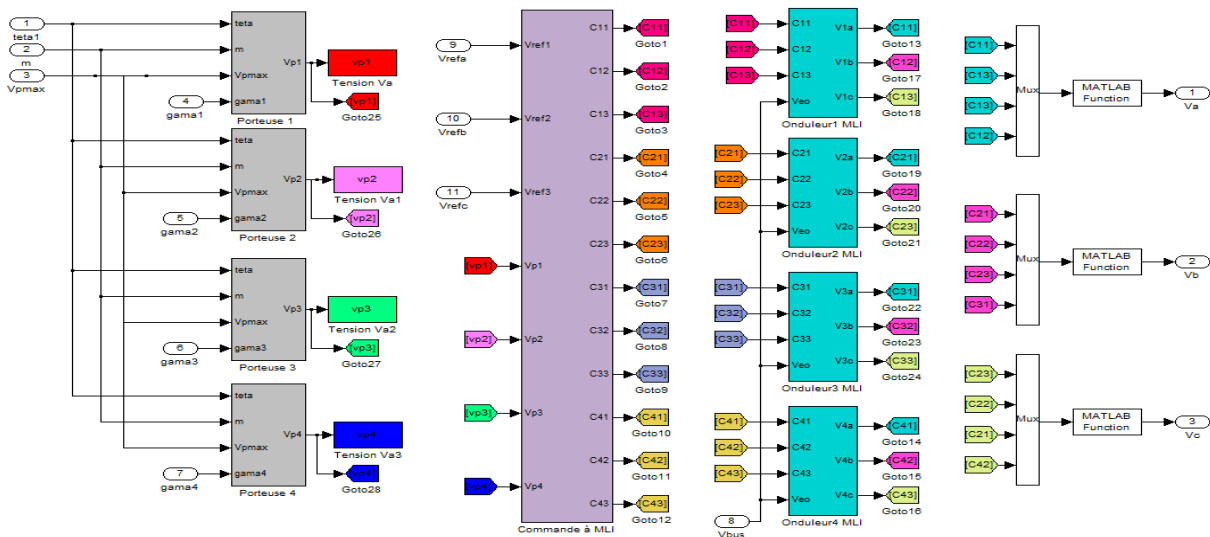


Fig.IV.1- Schéma global de l'onduleur à MLI multiniveaux sous Matlab.

### IV.3-Les redresseurs multiniveaux :

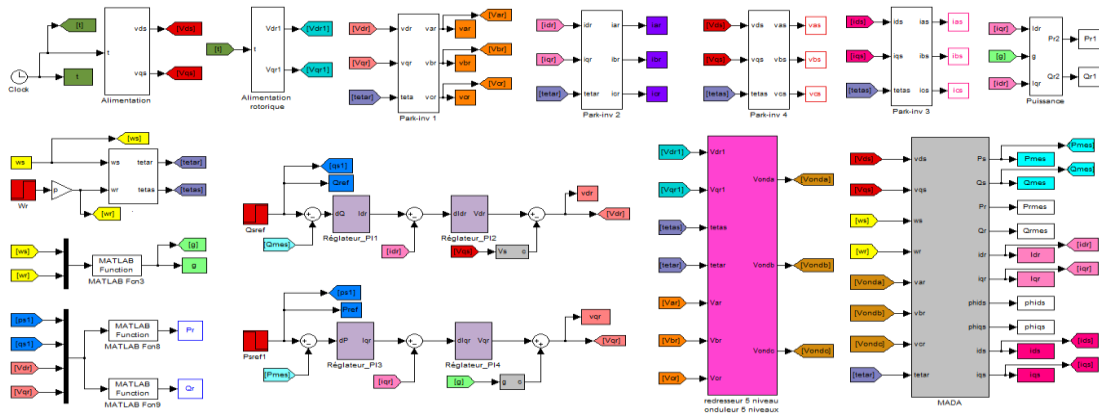
Les redresseurs multiniveaux ont la même structure que les onduleurs multiniveaux, ainsi que leur principe de fonctionnement.

#### IV.3.1-Structure des redresseurs multiniveaux :

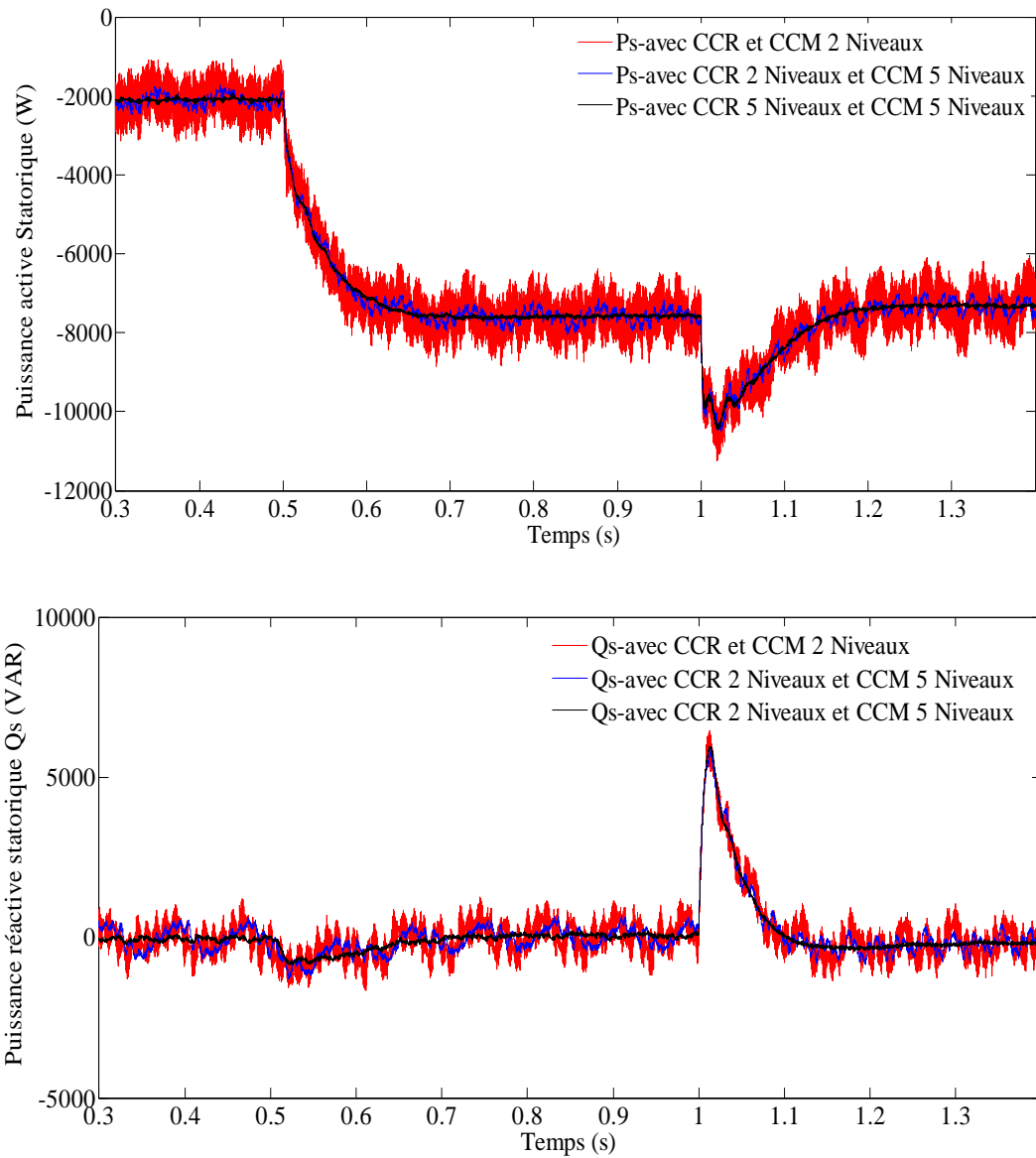
Par leur structure, Les convertisseurs à cinq niveaux sont réversibles. Ils peuvent fonctionner en onduleur pour transférer l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternatif ou bien fonctionner en redresseur et assurer alors le transfert énergétique dans le sens inverse.

### IV.4- Résultats de simulation et discussions :

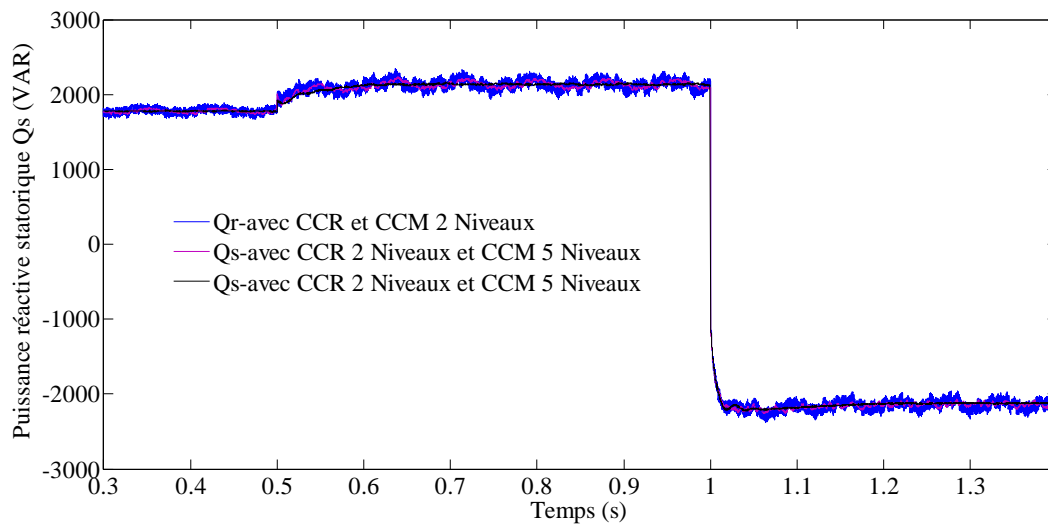
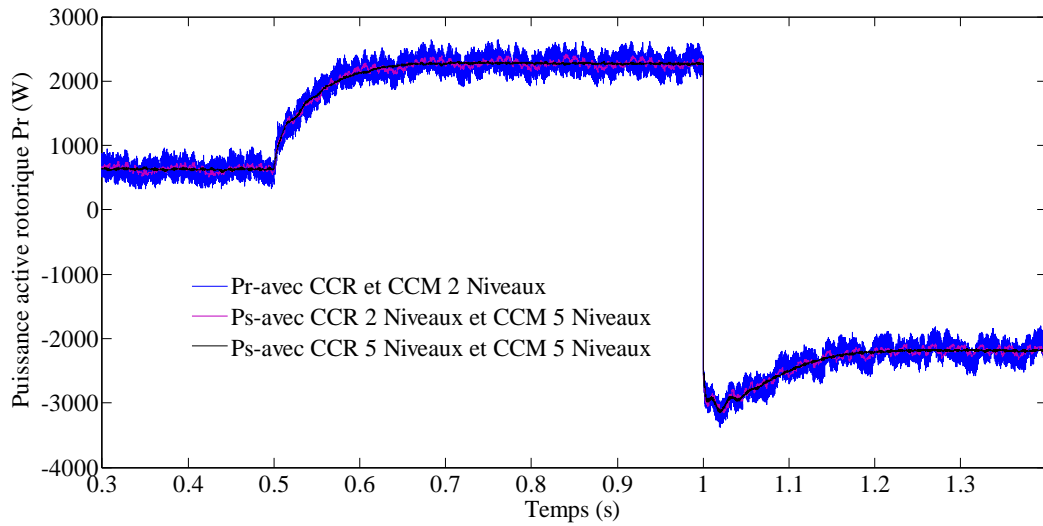
La figure suivante présente le schéma global de simulation numérique sous MATLAB-SIMULINK de l'ensemble {redresseur-onduleur multi-niveaux-MADA} :



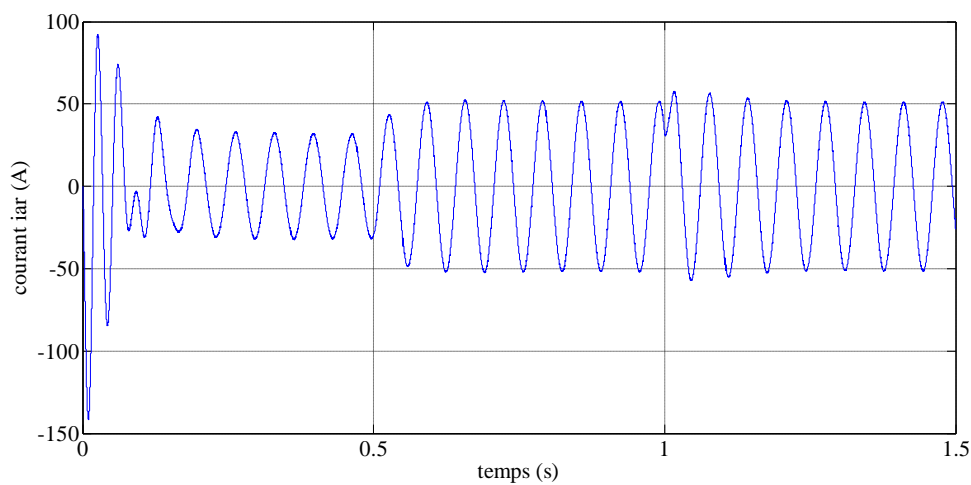
**Fig.IV.2- Bloc de simulation sous environnement Matlab-Simulink l'ensemble (redresseur-onduleur à MLI multi-niveaux-MADA)**



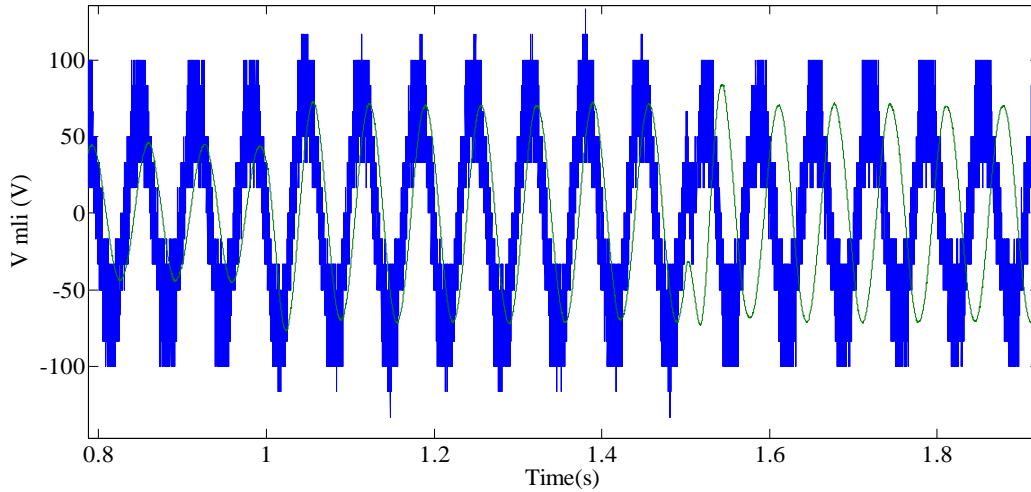
**Fig.IV.3- Les puissances active et réactive statoriques**



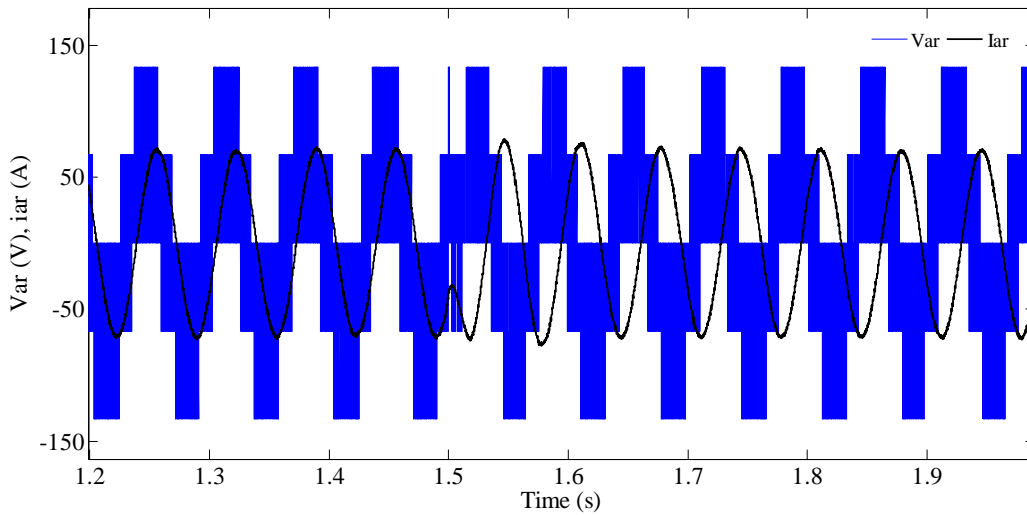
**Fig.IV.4-** Les puissances active et réactive rotoriques



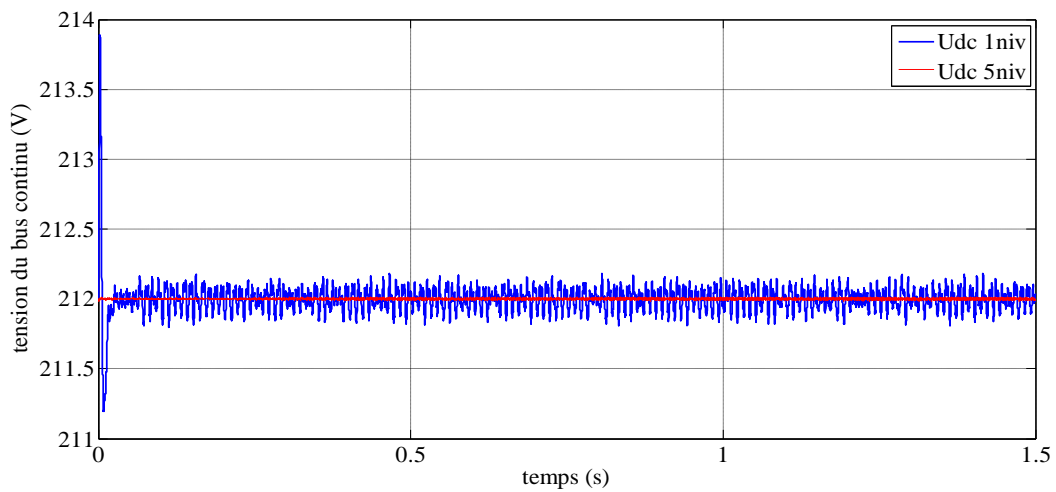
**Fig.IV.5-** Le courant d'une phase rotorique



**Fig.IV.6-** La tension de l'onduleur à 5 niveaux et le courant sur une phase rotorique



**Fig.IV.7-** La tension de l'onduleur à 2 niveaux et le courant sur une phase rotorique



**Fig.IV.8-** La tension du bus continu issue d'un redresseur à 2 niveaux et 5 niveaux

D'après les résultats illustrés dans la figure (IV.3), on remarque que les puissances active et réactive mesurées obtenues par l'utilisation d'un onduleur et redresseur multiniveaux ont la même forme que celle obtenus au premier chapitre (alimentation purement sinusoïdale), elles sont moins fluctuantes si on va les comparer à celles obtenues lors de l'utilisation d'un onduleur et redresseur simple niveau, aussi à celles obtenues avec un onduleur multiniveaux et un redresseur simple niveau. Dans le même temps, on remarque que le système gagne une plus grande dynamique et cela permet un réglage plus rapide de la commande et une très bonne précision.

La figure (IV.4), montre les puissances active et réactive rotoriques. On remarque que ces puissances sont moins fluctuantes lors d'utilisation d'un redresseur et onduleur multiniveaux.

Si maintenant on observe les figures (IV.6 et IV.7), on remarque que les convertisseurs multiniveaux permettent une meilleure qualité de tension que les convertisseurs conventionnels (simple niveau). On remarque aussi que la résolution obtenue est plus élevée, le convertisseur est capable de générer plus que deux ou trois niveaux et réglage de la tension est plus fin, ce qui permet de réduire les contraintes imposées à la charge qui subit sans cela une tension qui commute entre ses deux valeurs maximales.

La figure (IV-8) nous montre que la tension du bus continu est restée toujours à sa valeur de référence et grâce à l'ensemble (onduleur et redresseur multiniveaux), on remarque qu'elle est moins fluctuante par rapport à celle obtenue avec l'ensemble (redresseur simple niveau et onduleur multiniveaux), aussi à celle obtenu avec l'ensemble (redresseur et onduleur simple niveau).

A partir de la figure (IV-5), on remarque l'amélioration de l'onde du courant rotorique par la réduction des pics (dus à la modulation) au régime transitoire et au régime établi.

#### **IV.5-Conclusion :**

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés aux performances obtenues en utilisant un convertisseur multiniveaux au lieu d'un convertisseur simple niveau.

Les résultats obtenus par simulation montrent que l'alimentation par un ensemble redresseur-onduleur multi-niveau permet :

- De réduire la fluctuation des puissances en régime permanent.
- D'améliorer l'allure des tensions et des courants à la sortie des onduleurs ainsi que le taux d'harmoniques.
- D'augmenter la puissance grâce à l'accroissement échelonné du niveau de la tension commutée.
- Réduire la taille des filtres passifs parfois nécessaires pour limiter ces sollicitations.
- Réduire les fluctuations au niveau de la tension de bus continu.

# *Conclusion Générale*

## Conclusion Générale

---

L'objectif préalablement défini dans ce travail consistait à rechercher un moyen pour améliorer les performances de la commande en puissance de la GADA.

La solution proposée consistait à utiliser un système redresseur MLI - Onduleur MLI multiniveaux pour alimenter le circuit rotorique de la GADA. Le but du travail qui nous a été assigné était de modéliser ce système, de le tester par simulation et de comparer ses performances avec le même système mais qui utilise un convertisseur simple niveau.

Nous avons commencé par le premier chapitre qui définit l'énergie éolienne. Nous avons montré les différents éléments qui constituent une éolienne et ses différents types qui existent. Par des équations, nous avons montré le principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et donné quelques structures d'un système éolien. A la fin, nous avons choisi une structure de Scherbius à base d'une MADA, son principe de fonctionnement, le bilan et le transfert de puissance sont montrés.

Dans le second chapitre nous avons modélisé la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) dans un repère diphasé à l'aide de la transformation de Park et développé sa commande vectorielle afin de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la GADA et le réseau. Un régulateur de type proportionnel intégral (PI) est testé afin d'analyser ses performances vis à vis du suivi de consigne et du rejet des perturbations.

Dans le troisième chapitre, on a présenté la modélisation du CCR et du CCM simple niveau ainsi que la simulation de l'ensemble convertisseur à MLI simple niveau-MADA. Cette étude a montré que la forme de la puissance instantanée comporte des fluctuations dues aux harmoniques et notre but est de chercher à les réduire en utilisant des convertisseurs multiniveaux.

L'objectif du quatrième chapitre était de reprendre le même modèle que celui du troisième chapitre et de remplacer dans un premier temps l'onduleur à deux niveaux par un onduleur multiniveaux (nous nous sommes limités à cinq niveaux). Ensuite, nous remplaçons l'onduleur et le redresseur à deux niveaux par un onduleur et redresseur cinq niveaux. Nous avons comparé les performances de ces nouveaux systèmes de ce chapitre entre eux pour montrer l'influence de redresseur multiniveaux et aussi, avec celles du système du troisième chapitre (onduleur et redresseur à deux niveaux), en termes de fluctuations de la puissance générée par la MADA. Nous avons trouvé que le système proposé répondait bien aux objectifs assignés et permettait également de remplir certaines fonctions qui peuvent être

## Conclusion Générale

---

demandées par le réseau, tels que la compensation de la puissance réactive et le filtrage des courants harmoniques.

Faces à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives peuvent être proposées pour améliorer davantage les qualités de notre système, à savoir :

- Etablissement d'un modèle de commande en puissance de la MADA prenant notamment en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- Contrôle du système par des techniques d'intelligence artificielle.
- Intégration éventuelle d'un système de stockage.
- Intégration mixte de la MADA avec le photovoltaïque dans un parc éolien (système hybride).
- Interaction avec les autres génératrices du réseau ou supervision d'une ferme éolienne.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

---

[1] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.

[2] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.

[3] S. El Aimani, "Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension ", Thèse de doctorat, Université de Lille, Décembre 2004.

[4] K.Ferkous, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de magistère, Université de Constantine, Mai 2009.

[5] A.Boyette, "Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, France, décembre 2006.

[6] B.Multon, G.Robin, "Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne " ; .C.G.E'03, Saint-Nazaire, juin 2003.

[7] G. Aggoun, « Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'un système de génération éolienne », Mémoire de magistère, UMMTO, 2010.

[8] A.Bouhedda, « Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne », Mémoire de magistère, UMMTO, juillet 2011.

[9] S.Metatla, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », Mémoire de magistère, Ecole nationale supérieure polytechnique d'Alger, Juin 2009.

[10] M.S.Abdoulaziz, « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007.

[11] R.Rouabhi, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation / Application : Energie éolienne », Mémoire de magistère, Université Ferhat ABBAS – Sétif, 2012.

[12] H.Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'Arts et métiers centre de Bordeaux, décembre 2003.

---

## Bibliographie

---

[13] F.Ahmed Sid, « Modélisation et commande du générateur éolien à double alimentation avec filtrage actif du réseau », Mémoire de magistère, Ecole nationale supérieure polytechnique d'Alger, Juillet 2009.

[14] T.Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, EMP. Ecole centrale de Lille, Septembre 2011.

[15] B. Francois, B. Robyns, E. De Jaeger, F. Minne, « Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension », Revue REE, N° 5, pp 65-74, Mai 2005.

[16] V.Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et de métiers, Novembre 2008.

[17] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ». Thèse de doctorat, Université de Lille, 2007.

[18] B.Kelkoul, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire de magistère, Université de Tlemcen, Juin 2011.

[19] N. Abu Tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : Modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de doctorat, Ecole doctorale de Lyon, 2008.

[20] L. Khetache, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation » Mémoire de magistère, Université de Batna, 2007.

[21] T.Douadi, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone », Mémoire de Magistère, Université de Batna.

[22] B. Robyns, B. François, Ph. Degobert et J-P. Hautier, «Commande vectorielle de la Machine asynchrone», Edition TECHNIP, Paris, 2007.

[23] D. Forchetti, G. Garcia et M. I. Valla, «Vector control strategy for a doubly-fed standalone induction generator vector », IEEE Trans .Energy conversion, pp: 991-995, 2002.

[24] Y. Elbia, «Commande floue optimisée d'une machine asynchrone a double alimentation et a flux orienté», Mémoire de Magistère En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.

---

## Bibliographie

---

- [25] M. S. Vicatos et A. J. Tegopoulos, « A doubly-fed induction machine differential drive model for automobiles », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, No. 2, pp. 225-230, June 2003.
- [26] N.Akkari, « Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Université de Batna, Juin 2010.
- [27] N.Hamdi, « Amélioration des performances des aérogénérateurs », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Juillet 2013.
- [28] R.Redjem, « Modélisation et commande des machines électriques », Mémoire de magistère, Université de Constantine, juillet 2009.
- [29] M.Rapin, J.M.Noel, « Energie éolienne, principes et étude de cas », Edition Dunod, 2010.
- [30] R.Azaizia, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux », Mémoire de magistère, Université de Boumerdes, 2008.
- [31] C.Gombert, « Simulation temps-réel des dispositifs d'Électronique de puissance dédiés au Réseaux d'Énergie Electrique », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de GRONOBLE, 29 septembre 2005.
- [32] S.E.Rezgui, « Commande de machines électriques en environnement Matlab/Simulink et temps réel – Application à la machine asynchrone : commande vectorielle sans capteurs mécaniques SVWM, mode glissant, MRAS », Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2009.
- [33] E.F.Mogos, « Production décentralisée dans les réseaux de distribution ; Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour les contrôles des sources », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et de Métiers, centre de Lille, 2005.
- [34] P.Barret, « Régimes transitoires des machines tournantes électriques », Editions Eyrolles, 1987.
-

# *Annexes*

# ANNEXE A

## Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation :

Puissance nominale	$P_n = 7.5 \text{ KW}$
Tension nominale composée	$V_s = 230\sqrt{3} \text{ V}$
Resistance du stator	$R_s = 0.6 \Omega$
Resistance du rotor	$R_r = 0.164 \Omega$
Inductance propre du stator	$L_s = 0.097 \text{ H}$
Inductance propre du rotor	$L_r = 0.0218 \text{ H}$
Inductance mutuelle	$M_{sr} = 0.0436 \text{ H}$
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Fréquence statorique	$f = 50 \text{ Hz}$
Constante de temps statorique	$T_s = L_s / R_s$
Constante de temps rotorique	$T_r = L_r / R_r$
Coefficient de dispersion	$\sigma = 1 - (M^2 / L_r * L_s)$

## Paramètres des convertisseurs :

Indice de modulation	$m = 75$
Coefficient de réglage en tension	$r = 0.8$
Capacité du bus continu	$C = 3.3 \mu\text{F}$

## Paramètres des régulateurs :

Temps de réponse du régulateur de courant	$trq = 0.001 \text{ s}$
Temps de réponse du régulateur de puissance	$trc = 0.005 \text{ s}$

---

# ANNEXE B

## B.1 - Synthèse des régulateurs

Pour commander la MADA en puissance des régulateurs s'imposent, les plus répondus sont les régulateurs proportionnel-intégral (PI). Dans cette partie de ce chapitre on s'intéresse à la synthèse des régulateurs de puissance et de courant qui nous permettra d'atteindre à la fois une bonne dynamique et une bonne robustesse pour la commande en puissance la machine.

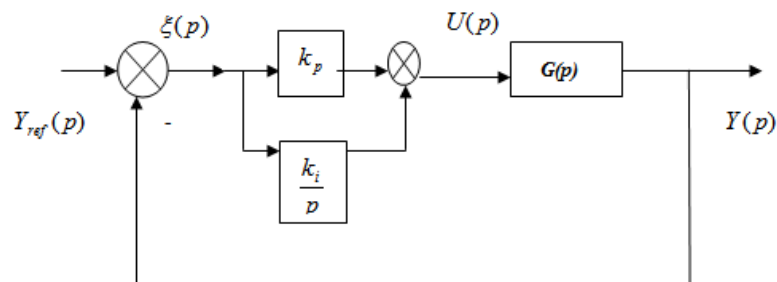
### - Le régulateur proportionnel intégral (PI)

La structure générale d'un régulateur proportionnel intégral, noté PI, est composée de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale mises en parallèle. Sa fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p}$$

Avec :  $K_p$ : le gain proportionnel du régulateur.

$K_i$ : gain intégrateur du régulateur.



**Fig.B.1- Structure de commande utilisant un régulateur PI**

L'avantage principal d'un régulateur PI est qu'il annule l'erreur statique grâce à la fonction intégrale et non pas en utilisant les coefficients  $K_p$  et  $K_i$ . En effet, il calcule la commande  $u(t)$  à injecter au système en intégrant la grandeur d'erreur  $\varepsilon(t)$ . Ainsi, le signal de commande augmente tant que le signal d'erreur est non nul, la commande  $u(t)$  ne cesse de croître que lorsque l'erreur entre  $y(t)$  et  $y_{ref}(t)$  est nulle. Pour calculer les gains du régulateur PI on utilise la méthode par compensation des pôles.

## Annexe

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$G_{bf}(p) = \frac{\frac{k_p}{p} \left( p + \frac{k_i}{p} \right) G(p)}{1 + \frac{k_p}{p} \left( p + \frac{k_i}{p} \right) G(p)}$$

Celle-ci montre que le régulateur PI ajoute un zéro à la fonction de transfert en boucle fermée. Celui-ci peut éventuellement être utilisé pour compenser un pôle de la fonction de transfert du système à commander, simplifiant ainsi l'ordre du transfert en boucle fermée. Il existe donc deux méthodes pour déterminer les coefficients  $K_p$  et  $K_i$  du régulateur.

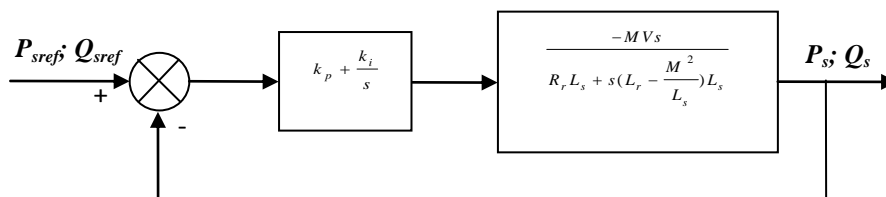
- *La méthode de la compensation de pôles :*

Cette méthode se déroule en deux étapes, elle consiste, dans une première étape, à utiliser le zéro de régulateur ( $K_i / K_p$ ) pour compenser un pôle du système à commander. Elle permet ainsi de simplifier l'ordre de la fonction de transfert en boucle ouverte. Cette compensation donne la première équation permettant de calculer les deux coefficients  $K_i$  et  $K_p$ . Dans une seconde étape, on calcule la fonction de transfert en boucle fermée, et on détermine une seconde équation permettant de calculer le deuxième coefficient de régulateur.

### **B.1.1-Synthèse du régulateur PI pour le contrôle des puissances :**

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale **PI** sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques, l'action du régulateur proportionnelle **P** assure la rapidité de la réponse dynamique, et l'action du régulateur intégral élimine l'erreur statique en régime permanent.

La figure suivante montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur **PI**. Dans notre cas, la fonction de transfert est sous la forme  $K_p + \frac{K_i}{p}$  :



**Fig.B.2- Stratégie de commande des puissances par un régulateur PI.**

## Annexe

---

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante. Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{M V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p}$$

En calculant la FTBF on obtient :

$$FTBF = \frac{\frac{K_p \frac{M V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p}}{\frac{K_p \frac{M V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{1 + \frac{M V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) p}} = \frac{K_p \frac{M V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + K_p \frac{M V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}$$

$$FTBF = \frac{1}{\frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{1 + \frac{M V_s}{K_p \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) p}} p} = \frac{1}{1 + \tau_r p}$$

Par identification:

$$\tau_r = \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{K_p M V_s}$$

Le terme  $\tau_r$  désigne ici le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci à 5 ms, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie sur le réseau avec la MADA de 7,5 kW de notre banc d'essais. Une valeur inférieure est susceptible d'engendrer des régimes transitoires avec des dépassements

---

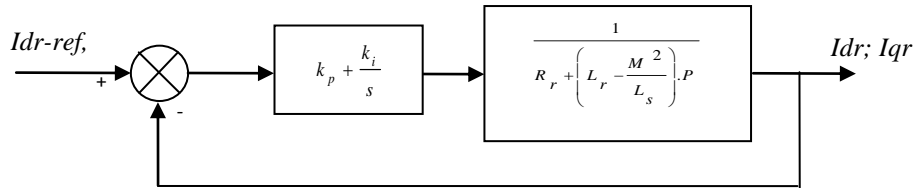
## Annexe

importants et ne présente pas d'intérêt particulier pour notre application. Les termes  $K_i$  et  $K_p$  sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s}$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s R_r}{M V_s}$$

*II.1.2 - Synthèse du régulateur PI pour le contrôle des courants rotorique :*



**Fig.B.3- Stratégie de commande des courants rotoriques par un régulateur PI.**

La fonction de transfert est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{I_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot P}$$

Pour les axes d et q, la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{1}{R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot P}$$

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{1}{\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{R_r}{\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} + P}$$

Avec la méthode de la compensation des pôles on obtient :

$$p + \frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} + P$$

Alors on a :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}$$

Dou :  $K_i = \frac{K_p}{T_r \cdot \sigma}$  Avec  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

## Annexe

---

Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{1}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p}$$

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

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{K_p} p}$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_{rp}} \quad \text{On déduit } \tau_r = \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{K_p}$$

$$K_p = \frac{\sigma L_r}{\tau_r} \quad \text{et} \quad K_i = \frac{R_r}{\tau_r} \quad \text{Avec } \sigma = (1 - \frac{M^2}{L_r L_s})$$

