

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En** : Génie électrique

**Spécialité** : Commande de machine électrique

**Par** : OSMANI Ilyes  
MALTI Omar

### **Sujet**

**Modélisation et commande indirect des puissances de la génératrice asynchrone à double alimentation dédié à un système éolien**

Soutenu publiquement, le 21 / 06 / 2017 , devant le jury composé de :

Mr M.A. BRIKCI NIGASSA	MAA	Univ. Tlemcen	Président
Mr M. LOUCIF	MAB	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr A. MECHERNENE	MCB	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mr A. GORINE	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur 1
Mr B. YACOUBI	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur 2

---

## Dedicaces

**J**E dédie ce travail :

- à mes parents : Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.
- à mes chers frères Reda, Abdelfattah et Ali : Mon affection pour vous est sans limite, votre soutien a sans doute été important pour le bon déroulement de mes études. Soyez en remerciés.
- à mon oncle Mohammed et oncles maternels et paternels.
- à tous les membres de ma grande famille Osmani et Abdallah.
- à tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en électrotechnique.
- à toutes mes amis, et à la promotion master 2 Electrotechnique, option Commande des machines : session 2017.
- Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et m'ont soutenu.

OSMANI Ilyes  
Tlemcen, le 15 juin 2017

---

## Dedicaces

**J**E dédie ce travail :

- à mes parents qui m'ont beaucoup aidé pour terminer mes études, et qui m'ont tellement encouragé moralement et psychiquement, et qui se sont sacrifiés pour moi.
- à mes très chers frères Mohammed, youcef, ma soeur, mes amis et toute la famille MALTI.
- à tous les enseignants du département de Génie Electrique et à tous mes amis de la promotion commandes des machines (2016-2017)
- aux martyrs de la lutte de libération nationale qui par leur sacrifice ont permis à nos générations d'accéder à la liberté et à la science.

MALTI Omar  
Tlemcen, le 15 juin 2017

---

## Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Electrique et Electronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Avant tout, nous remercions Dieu le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui que ce travail a pu être réalisée.

C'est un agréable plaisir pour nous d'exprimer nos remerciements à notre encadreur le Docteur LOUCIF Mourad, Maitre assistant à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, qui en acceptant de diriger ce travail de recherche nous a fait profiter de ses grandes compétences scientifiques et ses connaissances, ainsi pour ses précieux conseils. Nous le remercions également pour ses qualités humaines et de nous avoir supportée (dans tous les sens du terme) pendant la durée de ce travail.

Nos vifs remerciements vont également à notre co-encadreur, le Docteur MECHER-NENE Abdelkader, Maitre de conférences à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen pour sa disponibilité, son soutien et pour ses réponses à nos questions durant nos recherches.

Nous sommes honorés que Monsieur BRIKCI Nigassa Mohammed Amine, Maitre assistant à l'Université Abou Bekr Belkaïd, ait accepté de présider et d'honorer de sa présence le jury de soutenance du présent mémoire de Master. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre profond respect.

Nous sommes honorés que Monsieur Monsieur Ali GORINE, Maitre de conférences à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen et Monsieur Boumediene YACOUBI, Maitre assistant à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, accepté d'examiner ce travail, je les remercie pour leurs observations et leurs remarques pertinentes et constructives. Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

MALTI Omar, OSMANI Ilyes  
Tlemcen, le 15 juin 2017

# TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES	i
DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	xi
GLOSSAIRE	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
<b>I GÉNÉRALITÉ SUR LES SYSTÈMES ÉOLIENS</b>	<b>3</b>
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 HISTORIQUE DE L'ÉOLIENNE	4
I.3 DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES ÉOLIENNES DANS LE MONDE	5
I.4 DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES ÉOLIENNES EN AFRIQUE	7
I.5 DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES ÉOLIENNES EN ALGÉRIE	8
I.6 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	10
I.6.1 Avantages	10
I.6.2 Inconvénients	10
I.7 TYPES DES ÉOLIENNES	11
I.7.1 Eoliennes à axe vertical	11
I.7.2 Eoliennes à axe horizontal	12
I.8 CONSTITUTION D'UNE ÉOLIENNE	12
I.8.1 La Nacelle	12
I.8.2 La tour	13
I.8.3 Le rotor	13
I.9 TYPES DES GÉNÉRATEURS ÉLECTRIQUES	14
I.9.1 Générateurs asynchrone	14
I.9.1-a Générateurs asynchrone à cage d'écureuil	14
I.9.1-b Générateurs asynchrone à doubles stator	15
I.9.2 Générateurs synchrone	16
I.9.2-a Générateurs synchrone à rotor bobiné	16
I.9.2-b Générateurs synchrone à aiment permanant	17
I.9.3 Générateurs asynchrone à double alimentation	17

I.9.3-a	Générateurs asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipé . . . . .	18
I.9.3-b	Générateurs asynchrone à double alimentation à structure de Kramer . . . . .	18
I.9.3-c	Générateurs asynchrone à double alimentation avec cyclo-convertisseur . . . . .	19
I.9.3-d	Générateurs asynchrone à double alimentation à structure de scherbius . . . . .	20
I.10	CONCLUSION . . . . .	20
II	MODÉLISATION ET COMMANDE LA TURBINE ÉOLIENNE (PARTIE MÉCANIQUE)	<b>21</b>
II.1	INTRODUCTION . . . . .	22
II.2	LOI DE BETZ . . . . .	22
II.3	MODÉLISATION DE SYSTÈME DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE . . . . .	23
II.3.1	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine éolienne . . . . .	24
II.3.2	Modèle de la turbine . . . . .	24
II.3.2-a	Puissance aérodynamique . . . . .	24
II.3.2-b	Coefficient de puissance . . . . .	25
II.3.2-c	Vitesse relative . . . . .	25
II.3.3	Modèle de multiplicateur . . . . .	26
II.3.4	Modèle de l'arbre . . . . .	26
II.4	ZONES DE FONCTIONNEMENT D'UNE ÉOLIENNE . . . . .	27
II.5	RÉGULATION MÉCANIQUE DE LA PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE . . . . .	28
II.5.1	Système d'orientation des pales "Stall" . . . . .	28
II.5.2	Système d'orientation des pales "Pitch" . . . . .	29
II.6	TECHNIQUE D'EXTRACTION DE MAXIMUM DE PUISSANCE . . . . .	30
II.6.1	Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique . . . . .	30
II.6.2	Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique . . . . .	31
II.7	SYNTHÈSE DE RÉGULATEUR . . . . .	32
II.8	RÉSULTATS DE SIMULATIONS . . . . .	34
II.9	INTERPRÉTATIONS . . . . .	34
II.10	CONCLUSION . . . . .	37
III	MODÉLISATION ET COMMANDE INDIRECTE DES PUISSANCES DE LA GADA (PARTIE ÉLECTRIQUE)	<b>38</b>
III.1	INTRODUCTION . . . . .	39
III.2	DESCRIPTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION . . . . .	39
III.2.1	Structure de la machine . . . . .	39
III.2.2	Modes de fonctionnement de la machine à doubles alimentation . . . . .	40
III.2.2-a	Fonctionnement en mode moteur Hypo-Synchrone . . . . .	41
III.2.2-b	Fonctionnement en mode moteur Hyper-Synchrone . . . . .	41
III.2.2-c	Fonctionnement en mode génératrice Hypo-Synchrone . . . . .	42
III.2.2-d	Fonctionnement en mode génératrice Hyper-Synchrone . . . . .	42
III.3	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA MADA . . . . .	43

III.3.1	Avantages	43
III.3.2	Inconvénients	43
III.4	MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION	44
III.4.1	Hypothèses simplificatrices	44
III.4.2	Mise en équation dans le plan $(abc)$	45
III.4.2-a	Equations électriques dans repère $(abc)$	45
III.4.2-b	Equations magnétiques le repère $(abc)$	45
III.4.2-c	Couple électromagnétique	46
III.4.3	Transformation de Park	47
III.5	MISE EN ÉQUATION DANS LE PLAN $(d-q)$	48
III.5.1	Choix du référentiel	50
III.5.2	Représentation d'état dans le référentiel de Park	51
III.6	MODÉLISATION DE L'ALIMENTATION DE LA MADA	52
III.6.1	Modèle de l'onduleur de tension à deux niveaux	52
III.6.2	Commande par modulation de largeur d'impulsion	54
III.6.2-a	Principe de la MLI sinus - triangle	54
III.6.2-b	Caractéristiques de la MLI sinus-triangle	55
III.6.2-c	Modèle de la MLI sinus-triangle triphasé	55
III.7	CONTRÔLE INDÉPENDANT DES PUISSANCES ACTIVE ET RÉACTIVE	56
III.7.1	Technique d'orientation du flux statorique	56
III.8	COMMANDE DIRECTE	59
III.9	COMMANDE INDIRECTE EN BOUCLE OUVERT	60
III.10	RÉSULTATS DE SIMULATION EN BOUCLE OUVERT	61
III.10.1	Profils de poursuite, de régulation et robustesse	61
III.10.2	Résultats des simulations	61
III.10.3	Interprétation des résultats	63
III.11	COMMANDE INDIRECTE EN BOUCLE FERMÉ	64
III.12	RÉSULTATS DE SIMULATION EN BOUCLE FERMÉ	65
III.12.1	Profils de poursuite, de régulation et robustesse	65
III.12.2	Résultats des simulations	65
III.12.3	Interprétation	69
III.13	CONCLUSION	69
IV	ASSOCIATION DE LA PARTIE MÉCANIQUE AVEC LA PARTIE ÉLECTRIQUE ET INTÉGRATION AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE	70
IV.1	INTRODUCTION	71
IV.2	ASSOCIATION L'ENSEMBLE : PARTIE MÉCANIQUE-MADA ET CONVERTISSEUR CÔTÉ MACHINE :	71
IV.2.1	structures des commandes proposé en boucle ouvert	72
IV.2.2	Résultats des simulations en boucle ouvert	73
IV.2.3	structures des commandes proposé en boucle fermé	74
IV.2.4	Résultats des simulations en boucle fermé	75
IV.3	INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS :	76
IV.4	DESCRIPTION DE L'ÉOLIENNE À BASE DE LA MADA	77
IV.5	REDRESSEUR MLI	78

---

IV.6 STRUCTURE DU CONVERTISSEUR CÔTÉ RÉSEAU . . . . .	78
IV.7 MODÉLISATION DE FILTRE $R-L$ . . . . .	79
IV.8 MODÉLISATION DE BUS CONTINUS . . . . .	79
IV.9 COMMANDE DES PUISSANCES DE L'ONDULEUR CÔTÉ RÉSEAU . . . . .	80
IV.9.1 Orientation de tension statorique : . . . . .	80
IV.9.2 Stratégie de commande de tension de bus continue : . . . . .	81
IV.10 STRUCTURES GLOBALE DU SYSTÈME DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE	82
IV.11 CONCLUSION . . . . .	83
CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .	84
BIBLIOGRAPHIE . . . . .	88
ANNEXE A . . . . .	1
ANNEXE B . . . . .	3
ANNEXE C . . . . .	6

# TABLE DES FIGURES

I.1	Moulin à vent . . . . .	4
I.2	Modélisation du vent, carte globale de la vitesse moyenne du vent à 80m de hauteur publiée par World Wind Energy Association [3] . . . . .	5
I.3	Capacité d'énergie éolienne des 10 premiers pays, 2016 [4]. . . . .	6
I.4	Rang des puissances éoliennes installées dans l'Afrique fin 2016 [4]. . . . .	7
I.5	Première éolienne installée en Algérie. . . . .	8
I.6	Carte annuelle des vents (m/s) à 10 m du sol [18]. . . . .	9
I.7	Eolienne à axe vertical. . . . .	11
I.8	Eoliennes à axe Horizontale. . . . .	12
I.9	La nacelle d'un aérogénérateur à axe Horizontal . . . . .	12
I.10	La tour d'une éolienne. . . . .	13
I.11	Le rotor d'une aérogénérateur à axe Horizontal [5]. . . . .	13
I.12	Machine asynchrone dans la chaine de conversion éolienne. . . . .	14
I.13	Machine asynchrone double stator dans la chaine de conversion éolienne. . . . .	15
I.14	Alternateur dans la chaine de conversion éolienne. . . . .	16
I.15	GADA à énergie rotorique dissipé . . . . .	18
I.16	Générateurs asynchrone à double alimentation à structure Kramer . . . . .	19
I.17	Générateurs asynchrone à double alimentation à structure avec cyclo-convertisseur . . . . .	19
I.18	Générateurs asynchrone à double alimentation à structure de scherbius . . . . .	20
II.1	Tube de courant d'air autour d'une éolienne . . . . .	22
II.2	Schéma de la turbine éolienne. . . . .	24
II.3	Coefficient de la puissance en fonction de la vitesse relative de la turbine. . . . .	25
II.4	Schéma bloc de la turbine éolienne. . . . .	27
II.5	Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable. . . . .	27
II.6	Flux d'air sur un profil de pale " stall " [36]. . . . .	29
II.7	Variation de l'angle de calage des pales [41]. . . . .	29
II.8	Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique. . . . .	31
II.9	Commande MPPT avec asservissement de vitesse. . . . .	32
II.10	Boucle de régulation de la vitesse mécanique. . . . .	33
II.11	Vitesse du vent. . . . .	35
II.12	Puissance du vent. . . . .	35
II.13	Puissance de la turbine. . . . .	35
II.14	Couple de la turbine. . . . .	35
II.15	Vitesse relative. . . . .	36
II.16	Coefficient de puissance. . . . .	36
II.17	Vitesse mécanique. . . . .	36

II.18 Erreur de la vitesse mécanique. . . . .	36
III.1 Structure de la machine asynchrone à rotor bobiné. . . . .	40
III.2 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone. . . . .	41
III.3 Fonctionnement en mode hyper synchrone. . . . .	41
III.4 Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone. . . . .	42
III.5 Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone. . . . .	42
III.6 Représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentations	44
III.7 Principe de la transformation de Park[9]. . . . .	47
III.8 Schéma d'onduleur de tension à deux niveau . . . . .	52
III.9 Commande MLI par modulation « sinus-triangulaire ». . . . .	54
III.10Principe de l'orientation du flux statorique. . . . .	56
III.11Modèle avec commande vectorielle. . . . .	58
III.12Commande directe des puissances de la MADA . . . . .	59
III.13Commande indirecte des puissances de la MADA en boucle ouvert. . . . .	60
III.14Tests de poursuite et de régulation. . . . .	62
III.15Tests de robustesse pour les inductances statoriques et rotoriques. . . . .	62
III.16Tests de robustesse pour les résistances statoriques et rotoriques. . . . .	63
III.17Commande indirecte des puissances de la MADA en boucle fermé . . . . .	64
III.18Tests de poursuite et de régulation. . . . .	66
III.19Tests de robustesse pour les résistances statoriques et rotoriques. . . . .	67
III.20Tests de robustesse pour les inductances statoriques et rotoriques. . . . .	68
IV.1 Association de la partie mécanique avec la partie électrique et le conver-	
tisseur côté machine (CCM)en appliquant la commande indirecte des puis-	
sances en boucle ouvert . . . . .	72
IV.2 Profil du vent . . . . .	73
IV.3 Fonctionnement hypo synchrone par régulateur PI . . . . .	73
IV.4 Association de la partie mécanique avec la partie électrique et le conver-	
tisseur côté machine (CCM)en appliquant la commande indirecte des puis-	
sances en boucle fermer. . . . .	74
IV.5 Fonctionnement hypo synchrone par régulateur PI . . . . .	75
IV.6 Chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA . . . . .	77
IV.7 Convertisseur de tension fonctionnant en mode redresseur avec un filtre $R-L$ .	78
IV.8 Principe du bus continu . . . . .	79
IV.9 Schéma de principe d'orientation de tension statorique. [41] . . . . .	80
IV.10Principe de commande de convertisseur côté réseau. . . . .	81
IV.11Schéma global de la chaîne de conversion avec la commande indirecte des	
puissances de la MADA en boucle ouvert. . . . .	82
IV.12Schéma global de la chaîne de conversion avec la commande indirecte des	
puissances de la MADA en boucle fermé. . . . .	82
13 Boucle de régulation des courants . . . . .	3
14 Boucle de regulation des puissances . . . . .	4
15 Schéma bloc de la technique d'extraction de maximum de puissance . . . . .	6
16 Schéma bloc de la turbine éolienne . . . . .	6

---

17	Schéma bloc de la commande MPPT avec asservissement de la vitesse . . .	7
18	Modèle de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux avec commande MLI sinus-triangle . . . . .	7
19	Modèle de la machine asynchrone à double alimentation . . . . .	8
20	Modèle simulink de la commande indirect des puissances de la MADA . . .	8
21	Bloc de commande indirect des puissances de la MADA en boucle ouvert . .	9
22	Bloc de commande indirect des puissances de la MADA en boucle fermé . .	9
23	Modèle simulink de la commande indirect des puissance de la MADA avec la commande MPPT avec asservissement de la vitesse . . . . .	9

---

## Nomenclature

Les principales notations et abréviations utilisées dans ce mémoire sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

### Grandeurs électriques et mécaniques

Nom	Symbole	Unité
Couple résistant	$C_r$	$Nm$
Temps	$t$	$s$
Tension	$U$	$V$
Courant	$I$	$A$
Puissance	$P$	$W$
Flux magnétique	$\phi$	$Wb$
Induction magnétique	$B$	$T$
Facteur de puissance	$\cos \varphi$	–
Fréquence	$f$	$Hz$
Pulsation électrique	$\omega$	$rad/s$
Pulsation mécanique de rotation	$\Omega$	$rad/s$
Angle (position)	$\theta$	$^\circ, rad$

**Grandeurs électrique de la MADA**

Nom	Symbole	Unité
Coefficient de frottement visqueux	$f$	$N.s/rad$
Coefficient de dispersion de Blondel	$\sigma$	—
Constant de temps statorique	$T_s$	$s$
Constant de temps rotorique	$T_r$	$s$
Moment d'inertie	$J$	$kg.m^2$
Inductance cyclique statorique par phase	$L_s$	$H$
Inductance cyclique rotorique par phase	$L_r$	$H$
Inductance mutuelle cyclique	$M_{sr}$	$H$
Nombre de paire de pôle	$p$	—
Resistance de l'enroulement statorique par phase	$R_s$	$\Omega$
Resistance de l'enroulement rotorique par phase	$R_r$	$\Omega$

**Grandeurs mécanique de la turbine**

Nom	Symbole	Unité
Angle d'orientation des pales	$\beta$	$^\circ$
Vitesse de Vent	$V$	$m/s$
Vitesse de Vent estimer	$V_{est}$	$m/s$
Couple aérogénérateur	$C_{aero}$	$Nm$
Couple mécanique de la turbine	$C_{mec}$	$Nm$
Couple de la turbine	$C_t$	$Nm$
Couple de la turbine estimer	$C_{t-est}$	$Nm$
Couple électromagnétique de la turbine	$C_{em}$	$Nm$
Couple électromagnétique de référence	$C_{em-ref}$	$Nm$
Vitesse mécanique de la génératrice	$\omega_{mec}$	$rad/s$
Vitesse de la turbine	$\Omega_t$	$rad/s$
Vitesse de la turbine estimer	$\Omega_{t-est}$	$rad/s$
Vitesse de la turbine de référence	$\Omega_{t-ref}$	$rad/s$
Coefficient de puissance	$C_p$	—
Coefficient de puissance optimal	$C_{p-opt}$	—
Gain de multiplicateur	$G$	—
Masse volumique de l'air	$\rho$	—
Puissance aérogénérateur	$P_{aero}$	$W$
Rayon de pale	$R$	$m$
Nombre de pale	$p$	—
Vitesse relative	$\lambda$	—
Vitesse relative optimale	$\lambda_{opt}$	—
Moment d'inertie de la turbine	$J_t$	$kg.m^2$
Moment d'inertie de la génératrice	$j$	$kg.m^2$
Moment d'inertie totale	$J$	$kg.m^2$

---

## Glossaire

<b>Acronyme</b>	<b>Signification</b>
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MS	Machine Synchrone
MAS	Machine Asynchrone
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement économiques
MASD	Machine Asynchrone Double Stator
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Trackig
PMW	Pulse width Modulation
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
CCM	Convertisseur Côté Machine
CCR	Convertisseur Côté Réseau
FOC	Field Oriented Control
IRENA	International Renewable Energy Agency
INRA	Institut National de Recherche Agronomique

---

## Introduction générale

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est l'augmentation de la consommation de l'énergie électrique afin de répondre aux besoins et aux exigences industriels et quotidienne.

Cette augmentation est accompagnée par des dangers et des risques qui viennent de l'utilisation des matières fossiles (pétrole, charbon, gaz et nucléaire) qui vont polluer et détruire l'environnement et changer la climatique. Les matières fossiles sont facile à stockés et transportés, mais ils présentent deux très gros inconvénients : le premier, c'est qu'en brûlant, ils dégagent beaucoup de particule qui polluent l'atmosphère. Le second, c'est que leur quantité sur la terre est limitée. En effet, les hydrocarbures ont mis plusieurs centaines de millions d'années pour se former, ce qui signifie que leur stock n'est pas prêt de se renouveler dénotent de l'importance des énergies renouvelables qui représente une solution importante qui peut remplacer les matières fossiles sans punir l'environnement et sans pensé à sa quantité.

Le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelable (solaire, hydraulique, géothermique et éolienne) a connu une augmentation sans cesse ces derniers années surtout dans les pays développés comme la Chine qui est le leader de monde suivi par l'Allemagne et les Etats-Unis. Cette production par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

Parmi les nouvelles sources d'énergie, on trouve l'énergie éolienne qui fait l'objet de notre étude. L'énergie éolienne est une source d'énergie qui récupère l'énergie du vent. Grâce à celui-ci il permet de produire de l'électricité dans des éoliennes. Avec une puissance installée mondiale de 466GW à la fin 2016 [4], l'énergie éolienne est devenue un producteur majeur parmi des énergies renouvelables.

L'éolienne est composée par des aérogénérateurs qui captent à travers leurs pâles l'énergie cinétique de vent et entraine elle-même un générateur pour produire de l'électricité d'origine renouvelable qui est la génératrice asynchrone à doubles alimentation dans notre études.

L'objectif de ce travail est de tirer le maximum de puissance d'une éolienne à vitesse variable par la stratégie de commande MPPT, pour ce type d'application on utilise une machine asynchrone à double alimentation associée à des convertisseurs de l'électronique de puissance piloté à travers les grandeurs rotorique en appliquant une commande indirecte des puissances statorique et on l'intègre au réseau électrique.

Ce mémoire est organisée en quatre chapitres, comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à des notions théoriques sur l'énergie éolienne, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, les différents types d'aérogénérateur, les différents composants d'une éolienne et un rappel sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées.
- Le deuxième chapitre, nous allons présenter la partie mécanique de l'éolienne avec ces différents éléments constituant d'une turbine, un multiplicateur de vitesse et un arbre de transmission. Ainsi, introduit les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable. Puis, une modélisation de chacun de ces éléments présentés et nous allons proposer les stratégies de commande MPPT avec asservissement et sans asservissement de la vitesse mécanique pour extraire le maximum de puissance produit par l'éolienne.
- Dans le troisième chapitre, nous allons présenter la partie électrique à base d'une machine asynchrone à double alimentation, sa description, sa structure et ses modes de fonctionnement en tant que moteur ou générateur, ainsi les avantages et les inconvénients de cette machine. Nous allons par la suite développer la modélisation de la MADA faisant appel à la transformation de Park afin d'obtenir un modèle d'état et de mettre en évidence la structure multivariable et la nature non linéaire de ce type de générateur. Une modélisation de l'onduleur de tension, chargé de la conversation continu-alternatif et de sa commande MLI est également effectuée. Nous allons présenter le principe de l'orientation du flux statorique et les stratégies de commande des puissances active et réactive statorique (commande directe, commande indirecte en boucle ouvert et en boucle fermé) appliquer au convertisseur côté machine CCM. une étude de la technique de contrôle indirecte des puissances statorique à base de régulateur PI pour évaluer les performances de la commande proposée en poursuite, en régulation et en robustesse face à des variations paramétriques.
- Le quatrième chapitre est consacré pour faire l'association de la partie mécanique (éolien) avec la partie électrique (MADA et convertisseur côté machine) liés au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur côté réseau CCR pour avoir les deux modes de fonctionnement en hypo synchrone et hyper synchrone afin d'évaluer le fonctionnement de l'éolienne à vitesse du vent variable.

Ce mémoire sera achevé par une conclusion générale résume l'ensemble des travaux proposés et quelques perspectives pour de futurs travaux sont suggérées.

## Chapitre I

---

# Généralité sur les systèmes éoliens

### SOMMAIRE

---

I.1	INTRODUCTION . . . . .	4
I.2	HISTORIQUE DE L'ÉOLIENNE . . . . .	4
I.3	DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES ÉOLIENNES DANS LE MONDE . . . . .	5
I.4	DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES ÉOLIENNES EN AFRIQUE . . . . .	7
I.5	DÉVELOPPEMENT DES ÉNERGIES ÉOLIENNES EN ALGÉRIE . . . . .	8
I.6	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE . . . . .	10
I.6.1	Avantages . . . . .	10
I.6.2	Inconvénients . . . . .	10
I.7	TYPES DES ÉOLIENNES . . . . .	11
I.7.1	Eoliennes à axe vertical . . . . .	11
I.7.2	Eoliennes à axe horizontal . . . . .	12
I.8	CONSTITUTION D'UNE ÉOLIENNE . . . . .	12
I.8.1	La Nacelle . . . . .	12
I.8.2	La tour . . . . .	13
I.8.3	Le rotor . . . . .	13
I.9	TYPES DES GÉNÉRATEURS ÉLECTRIQUES . . . . .	14
I.9.1	Générateurs asynchrone . . . . .	14
I.9.2	Générateurs synchrone . . . . .	16
I.9.3	Générateurs asynchrone à double alimentation . . . . .	17
I.10	CONCLUSION . . . . .	20

---

## I.1 Introduction

L'utilisation de vent pour produire de l'énergie électrique est une technologie qui existe depuis longtemps. Cette procédure se fait par l'utilisation des éoliennes qui vont convertir l'énergie cinétique de vent en énergie électrique en utilisant des générateurs.

Dans ce chapitre nous allons présenter l'histoire de l'énergie éolienne avec des statistiques sur le gisement éolien dans le Monde, l'Afrique et l'Algérie. Puis, nous aborderons également les éléments utilisés pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie du vent ainsi les types des aérogénérateurs qui existe dans le marché éolienne et les types des générateurs électriques utiliser dans la production d'électricité à base d'éolienne en citons les avantages et les inconvénients de chaque génératrice.

## I.2 Historique de l'éolienne

Depuis longtemps l'homme utilise l'énergie du vent, la première utilisation de cette énergie était sur les marines à voiles pour faire déplacer les bateaux [31].

L'histoire de l'homme avec le vent a été commencer environs 3000 ans avec les perses et les égyptiens qui ont utilisé cette énergie pour pomper de l'eau et transformer les céréales en farine ou pour écraser les olives afin d'extraire l'huile avec des roues hydraulique d'eau et des moulins à vent. [29]



FIGURE I.1 – Moulin à vent

En 1841 l'énergie éolienne a connu une grande révolution, l'utilisation de cette énergie a été augmenter surtout au niveau de la production de l'énergie électrique grâce au belge Nollet qui a tenter la première essais et en 1887 le professeur britannique James Blyth a construit la première éolienne et puis en 1888 un grand industriel en électricité Charles Brush a fabriqué la première éolienne opérationnelle constituer d'un moulins en bois avec un diamètre de 17 m et 144 pales, et un dynamo brush de 12 kw, qui sert à alimenter quelques lampes et moteur et charger des batterie [31].

En 1920 les nombre des éoliennes commence à augmenter en réponse aux besoins de l'énergie électrique surtout dans les zones rurales et des fermes dans les Etats-Unis qui ont

atteint environ 600,000 unités en 1930 en utilisant le type des éoliennes a axe horizontale a faible puissance (1 kw) [29].

En 1950 l'apparition des énergies faucilles (machine à vapeur et les moteurs diesel) on entraînait le déclin de l'énergie éolienne et ralentira le développement des éoliennes. En 1990, les éoliennes subit des améliorations technologique important en construisant des aérogénérateurs a grand puissance plus de 5 MW et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours [31].

Les subventions accordées par des gouvernements ont permis leur développement dans un grand nombre de pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances produites, les coûts de production et les impacts sur l'environnement sont très différents [31].

### I.3 Développement des énergies éoliennes dans le monde

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Le gisement éolien ce caractérise par des informations au cours d'une période (la vitesse du vent, sa direction, ses fluctuation, son aléatoire, etc...)

Des laboratoires internationaux s'attachent à modéliser le vent à faible altitude (80 m, par exemple) au-dessus de grande régions(voir la figure I.2 ).

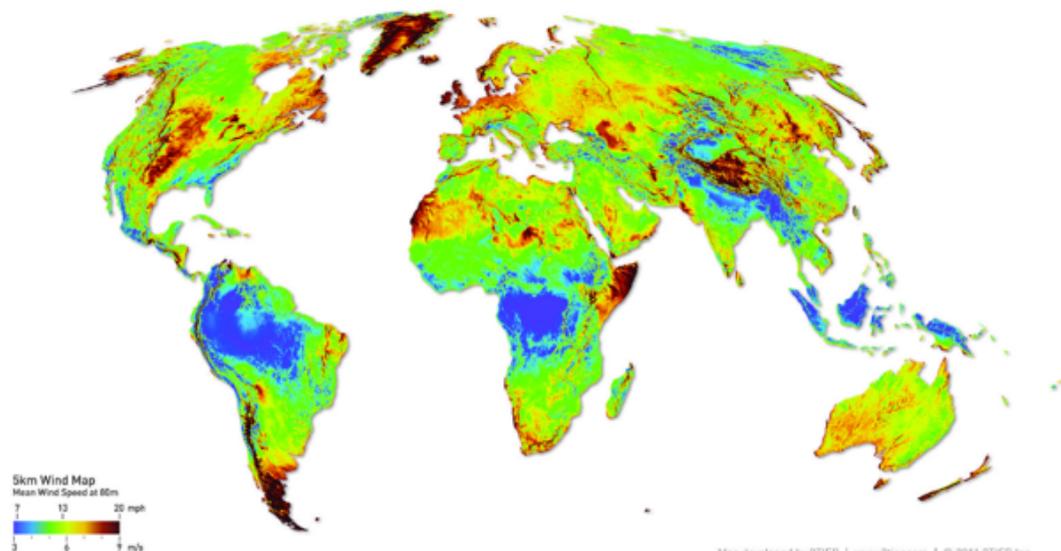


FIGURE I.2 – Modélisation du vent, carte globale de la vitesse moyenne du vent à 80m de hauteur publiée par World Wind Energy Association [3]

Il apparaît que le vent est, en moyenne sur l'année, modéré dans la région du pôle Nord et dans les régions intertropicales. Il est plus fort autour des régions comprises entre 50° et 60° de latitude. En mer le vent est plus fort (par exemple : atlantique Nord, zone des 40<sup>me</sup> qui dépend fortement des caractéristiques des éoliennes, comme nous le verrons plus loin. Par exemple, le potentiel éolien terrestre de l'Allemagne a été récemment réévalué de façon réaliste à hauteur de 2900 TWh en exploitant des aérogénérateurs de nouvelle technologie à haut facteur de charge au lieu de quelques centaines de TWh dans les années 1990 [17].

L'énergie éolienne a été la première source de nouvelle capacité de production électrique en Europe et aux États-Unis en 2016, et la deuxième en Chine. L'augmentation mondiale de la capacité éolienne constitue d'un record de 466 GW à la fin 2016. Les pays non-OCDE ont fourni la majorité des installations, la Chine occupant la première place [14], [35].

De nouveaux marchés ont émergé en Afrique, en Asie et en Amérique latine. Les entreprises et les acteurs privés ont continué d'opter pour l'énergie éolienne lorsqu'ils souhaitent assurer une électricité fiable et économique, et plusieurs grands investisseurs ont été exceptionnels pour le secteur en mer (Energie éolienne maritime), avec une capacité de 12 GW en Europe, et un montant total mondial de 14 GW [16].

Selon le site international des énergies renouvelables IRENA [4], la Chine occupe la première place mondiale parmi les pays qui profitent de l'énergie de vent pour produire de l'énergie électrique avec une capacité de 148.64 GW suivie du États-Unis avec une capacité de 81.28 GW et l'Allemagne la troisième mondialement avec une capacité de 49.75 GW.

La Figure I.3 montre les capacités d'énergie éolienne des dix premiers pays à la fin de l'année 2016.

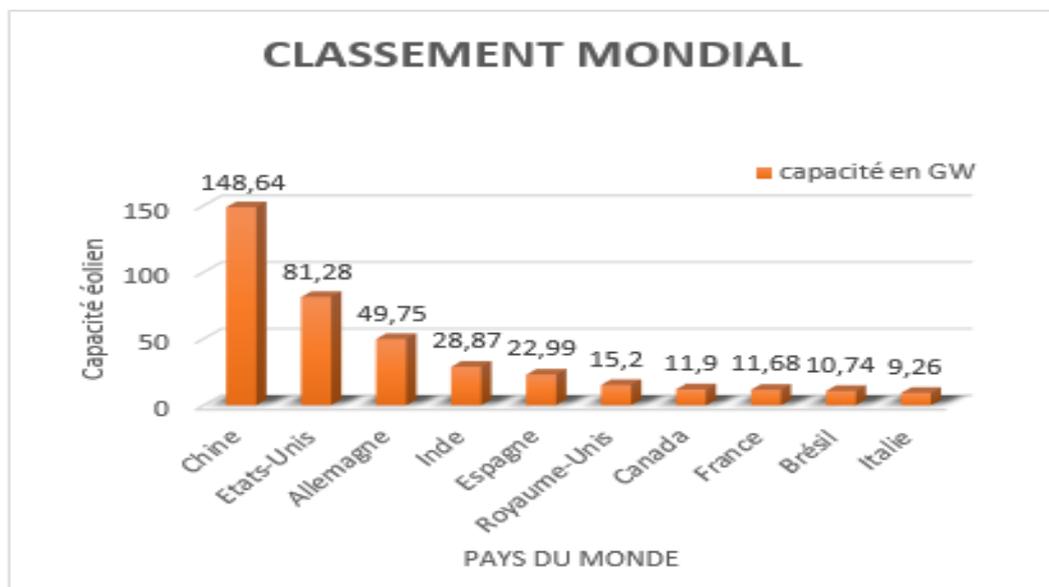


FIGURE I.3 – Capacité d'énergie éolienne des 10 premiers pays, 2016 [4].

## I.4 Développement des énergies éoliennes en Afrique

Une grande partie de l'Afrique est à cheval sur les zones équatoriales et tropicales du globe, et seules les régions du nord et du sud bénéficient du régime des vents d'ouest des latitudes tempérées. Aussi, les vitesses de vent sont généralement faibles dans beaucoup de pays de l'Afrique subsaharienne, particulièrement dans les pays enclavés. L'Afrique du Sud, l'Afrique du Nord et le littoral de la mer rouge (et de façon inattendue, une partie du Tchad et du Nord du Kenya) disposent de certains des meilleurs potentiels éoliens de la région. Des projets de production éolienne à grande échelle destinés à exploiter cette ressource énergétique abondante sont en cours de développement au Maroc, en Egypte et en Afrique du Sud. Cependant, la capacité éolienne en exploitation reste très faible comparée à la puissance installée au niveau mondial. L'éolienne se heurte également au faible niveau des compétences techniques et a un manque de prise de conscience du potentiel qu'il représente. De ce fait, à l'exception de l'Afrique du Nord, peu de projets ont été entrepris en Afrique, et l'expérience de l'éolien pour une production électrique raccordée au réseau ou l'alimentation d'un mini-réseau reste limitée [1].

La figure I.4 montre que la puissance éolienne installée en Afrique a atteint 3.7 GW à la fin 2016, plus d'un tiers est produit en Afrique du Sud suivie du Maroc avec une capacité de 795 MW, le parc éolien de Tarfaya avec 301 MW, marque un tournant décisif dans la stratégie énergétique du Maroc. L'Egypte se place au troisième rang en Afrique avec 750 MW fin 2016 suivie de Kenya et de l'Ethiopie [4].

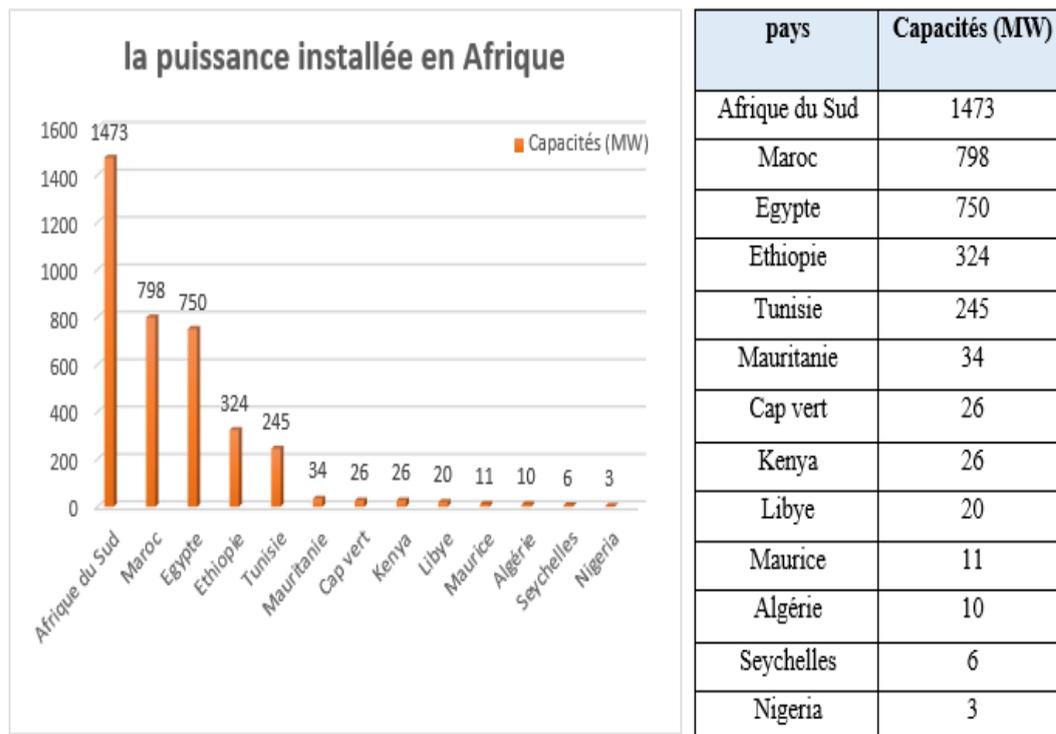


FIGURE I.4 – Rang des puissances éoliennes installées dans l'Afrique fin 2016 [4].

## I.5 Développement des énergies éoliennes en Algérie

Selon le site international des énergies renouvelables [4], l'Algérie occupe la 11<sup>ème</sup> place parmi les pays africains qui utilise l'énergie éolienne avec une installation qui produit une puissance de 10.20 MW à la fin de l'année 2016.

La première éolienne qui a été installée en Algérie revient à la période de la colonisation française, en 1953 par « le Service de la colonisation et de l'Hydraulique relevant des militaires, qui contrôlaient les territoires du sud algérien. Actuellement, elle existe à l'intérieur de la station de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Adrar. Constitué d'un mat de 24 m surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 m (figure I.5) [42], [19].



FIGURE I.5 – Première éolienne installée en Algérie.

En 1957 un autre aérogénérateur de 100 KW a été installé sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30m de haut avec un diamètre de 25m fut rachetée par Electricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie [19].

La troisième tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique fut en 2014 à Kaberten situé à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar à capacité de 10.2 MW, ce parc éolien a été mis en service début juin 2014. Il est composé de 12 éoliennes, la puissance de chaque éolienne est de 850 kW et leur diamètre est de 52 m avec une hauteur du mât de 55 m. Les éoliennes sont implantées sur un site d'une superficie globale de 33 hectares. L'énergie électrique fournie par ce parc éolien est injectée dans le réseau MT local. Le taux de pénétration de l'énergie est de 5% par rapport au réseau local. L'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelable, et bien que le choix de l'énergie soit prédominant, l'énergie éolienne présente le deuxième axe de production de ce programme, Selon les prévisions du groupe Sonelgaz, la capacité totale installer à l'horizon 2030, fixé 5010 MW pour l'éolien pour la période 2015-2020, il est programmé de réaliser 1 GW en éolien parmi ces projets on trouve la réalisation de deux ferme éolien de l'ONM a mis en évidence l'existence d'autre sites ventés dans d'autre régions du Sud. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et Ain Salah disposeraient d'un important potentiel. Cette étude a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia qui a réactualisé la carte des vents à 10 m (figure I.6) [18], [2].

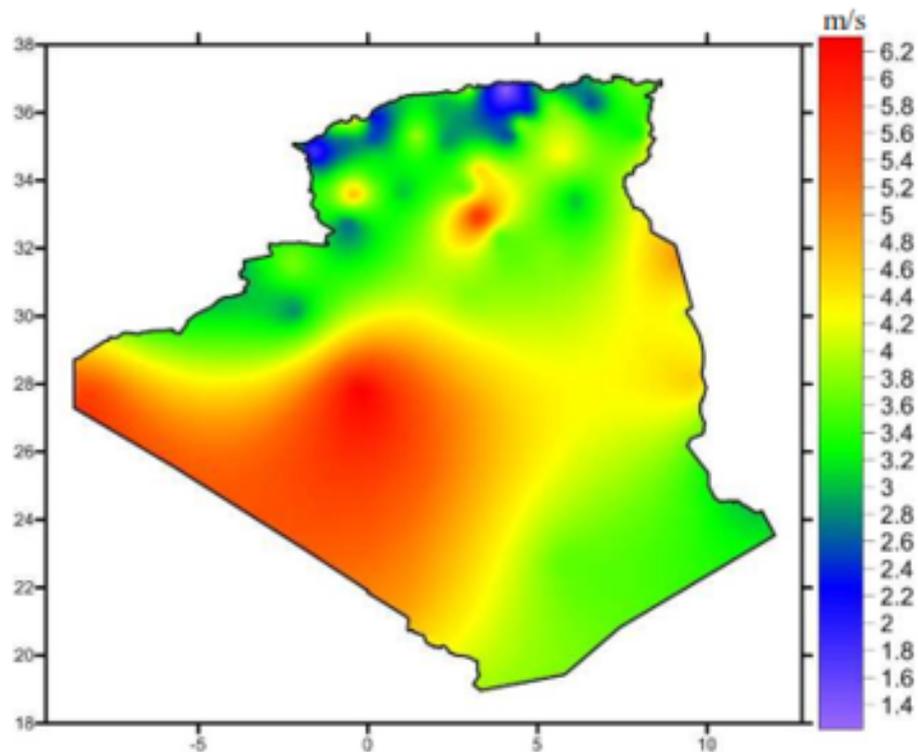


FIGURE I.6 – Carte annuelle des vents (m/s) à 10 m du sol [18].

## I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Comme tous les stations et la source de production d'électricité l'énergie éolienne elle a des avantages et des inconvénients.

### I.6.1 Avantages

Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables d'énergie, l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres :

- Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre et elle ne nécessite aucun carburant.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne d'émissions de  $C_{O_2}$  rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [42].
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires [29].

### I.6.2 Inconvénients

Malgré les avantages de l'énergie éolienne qui sont nombreux comme on vu précédemment l'énergie éolienne elle ainsi des inconvénients qui sont :

- La non régularité des ressources de vent (à l'exception de l'énergie géothermique). De même, la source d'énergie éolienne (vent) étant stochastique, donc la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- L'impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue [44].
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro-turbines [27].
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qua-

lité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes [27].

## I.7 Types des éoliennes

Il existe deux types des éoliennes lesquels sont utilisé dans le domaine des énergies renouvelables :

- Eoliennes à axe vertical.
- Eoliennes à axe horizontale.

### I.7.1 Eoliennes à axe vertical

Le mot vertical vient de la structure physique de ce type d'éolienne, le faite que son arbre est vertical par rapport au sol la donne plusieurs avantages surtout au niveau de maintenance et d'entretien puisque sa partie mécanique (multiplicateur et génératrice) se situe au niveau de sol. Ainsi grâce à sa turbine qui est perpendiculaire au vent quel que soit le sens de ce dernier conduit a une technologie plus simple à réaliser qui ne nécessite pas un mécanisme d'orientation des pales [38], [8].

En revanche ce type d'éoliennes présentent des inconvénients qui sont fortement remarquable surtout au niveau de sol puisque il occupe une grande surface de terrain, donc plus la puissance désiré est élevé plus la surface de terrain s'augmente [27]. Ainsi, le faible rendement de ce type est d'éolienne qui a poussé les constructeurs a pensé à réaliser d'autre système qui donne un rendement élevé et qui n'occupe pas une grande surface de terrain c'est au de la vient l'idée des éoliennes à axe horizontale [29] .

Il existe trois structures des éoliennes à axe vertical lesquels sont : Savonius, Darrius et rotor de Musgrove qui prend la forme de «H» (voir la figure I.7).

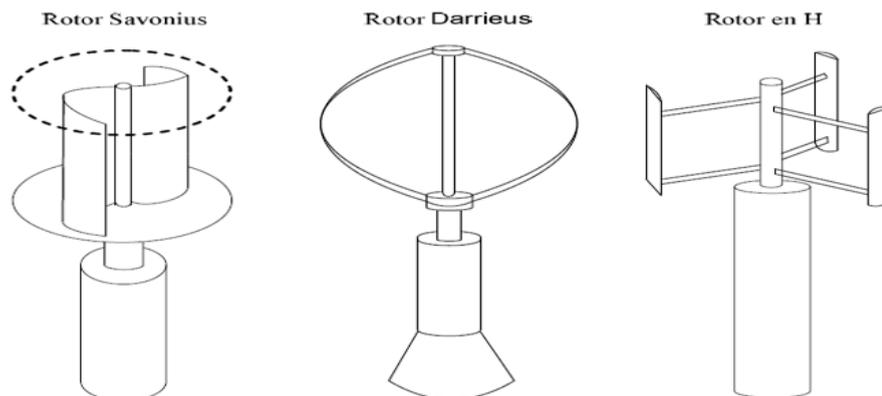


FIGURE I.7 – Eolienne à axe vertical.

### I.7.2 Eoliennes à axe horizontal

Ce type est actuellement le plus utilisé dans le monde avec sa structure qui se rappelle à celui du moulin à vent. A la base, on a un mât sur lequel est placée la nacelle, cette nacelle contient la génératrice ainsi que le système de transmission c'est-à-dire les éléments d'accouplement mécanique entre le rotor et la génératrice celle-ci convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La turbine de ce type d'éolienne qui se constitue d'un nombre de pales qui se varie entre un et trois pales avec un mécanisme d'orientation des pales peuvent être placés en amont ou en aval de la nacelle. (voir la figure I.8) [29], [21].

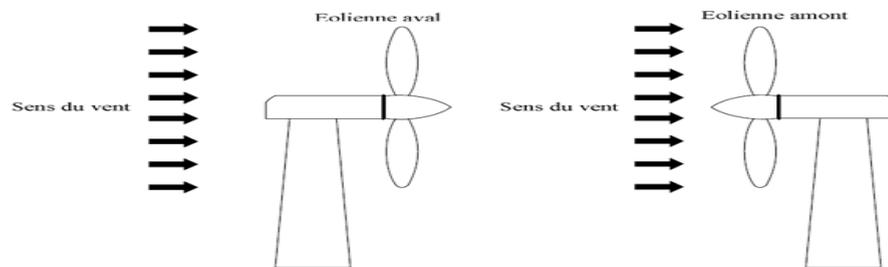


FIGURE I.8 – Eoliennes à axe Horizontale.

Malgré la nécessité d'un mécanisme d'orientation des pales pour cette structure et le coût le plus élevé par rapport à celle de l'autre type (éolienne à axe vertical), les éoliennes à axe Horizontale sont les plus utilisées actuellement dans le monde grâce à son rendement élevé et le faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical et ainsi la capture du vent en hauteur qui est plus forte et plus régulière qu'au voisinage du sol [27], [7].

## I.8 Constitution d'une éolienne

Un aérogénérateur est constitué de trois principaux éléments lesquels sont : la Nacelle, la tour et le rotor.

### I.8.1 La Nacelle

Elle est située au sommet du mât, elle est comme une salle qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique comme la montre la figure I.9) [40].

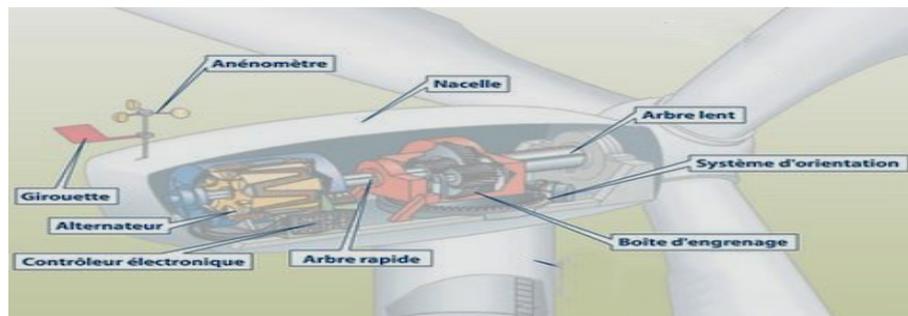


FIGURE I.9 – La nacelle d'un aérogénérateur à axe Horizontal

### I.8.2 La tour

La tour ou le mat, c'est un pylône qui supporte la nacelle et le rotor de l'éolienne. Généralement un tube en acier ou un treillis métallique, sa hauteur et son diamètre sont en fonction de la puissance nominale d'éolienne pour éviter les perturbations près du sol mais surtout pour permettre l'utilisation de pales plus longues. A l'intérieur on trouve les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle [38].



FIGURE I.10 – La tour d'une éolienne.

### I.8.3 Le rotor

Le rotor est la partie tournant de l'éolienne il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, généralement le nombre de ces pales ce varie de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre l'effort mécanique, le bruit, la pollution visuelle, le comportement vibratoire et le coût [20], [40]. Son rôle est de capter la puissance du vent par ces pales et la transférer à l'arbre lent de l'éolienne. Le diamètre de rotor se change et dépend de la puissance qu'on vent récupérée du vent.

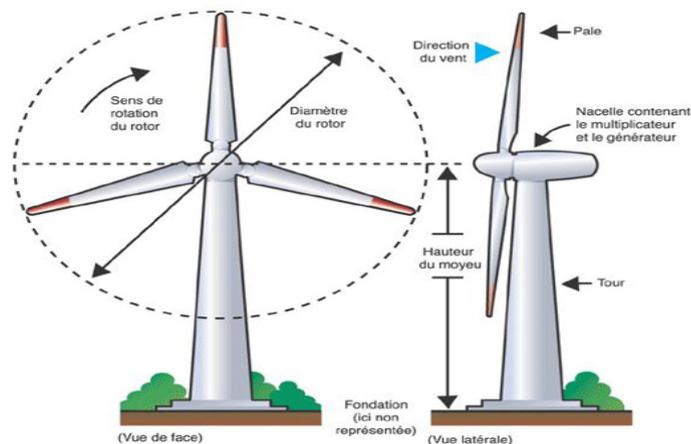


FIGURE I.11 – Le rotor d'une aérogénérateur à axe Horizontal [5].

## I.9 Types des générateurs électriques

Il existe plusieurs types des générateurs qui se diffère selon la structure et la nature de couplage de chaque un et les propriétés de ses bobines statorique et rotorique ainsi le mode de fonctionnement soit à vitesse fixe ou à vitesse variable. Nous évoquerons ici les technologies les plus répandues dans l'industrie éoliennes.

### I.9.1 Générateurs asynchrone

Il existe plusieurs types de cette générateurs :

#### I.9.1-a Générateurs asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage d'écureuil est une machine électrique à courant alternatif son liaison entre le stator est le rotor avec un glissement entre le champs tournant statorique et le rotor, cette machine est un convertisseur électromécanique qui peut fonctionner on mode moteur ou en mode générateur, cela est déterminer selon la vitesse de la machine par rapport à la vitesse de synchronisme, donc si la vitesse est inférieur a la vitesse de synchronisme la machine est en mode moteur est si la vitesse est supérieur à la vitesse de synchronise la machine est en mode génératrice [29], [20]. Parmi les avantages de cette machine elle est simple à fabrique, moins couteux par rapport aux autres machines et moins exigent en termes d'entretien.

Mais malgré ses avantages ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance globale du réseau. Celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure I.12 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne. Le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques due à l'orientation des pales et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevée. La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite.[36]

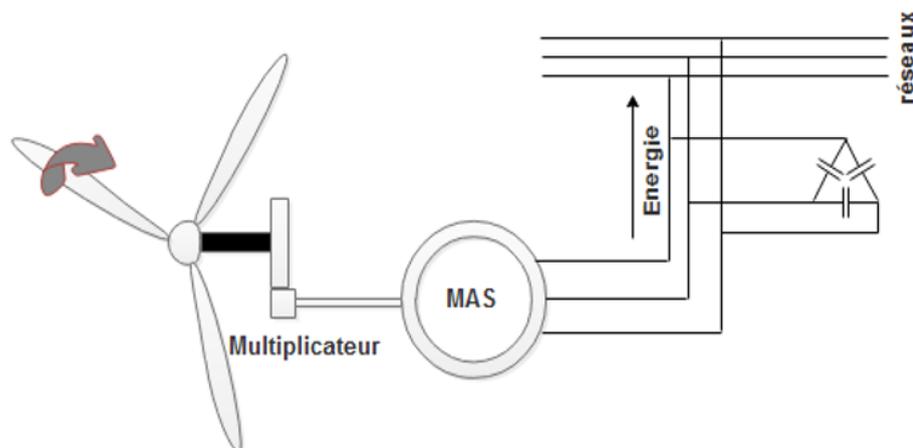


FIGURE I.12 – Machine asynchrone dans la chaîne de conversion éolienne.

### I.9.1-b Générateurs asynchrone à doubles stator

Pour améliorer le rendement du système précédent, certains constructeurs utilisent un autre système à base de machine asynchrone à double stator (figure I.13).

Ce type de génératrice est constitué d'un double bobinage dans le stator qui induit un nombre de paires de pôles variable qui permet un point de fonctionnement à deux vitesses avec deux plages de variation différentes. Alors sa production va s'augmenter [27], [37]. D'une part, on a un stator de faible puissance avec un nombre de paires de pôles élevé pour le fonctionnement à faibles vitesses de vent [9]. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée à faible nombre de paires de pôles pour les grandes vitesses du vent pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs [36].

Malgré la simplicité de cette machine et ses qualités importantes de robustesse, la machine asynchrone à double alimentation reste plus importante pour l'utilisation dans la conversion d'énergie dans les systèmes éoliens pour certaines raisons :

- Le deuxième stator rend la conception de la machine plus difficile et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, qui rend le système plus lourd et plus compliqué [36].
- La puissance échangée entre la machine et le réseau est très élevée qui implique l'utilisation de convertisseurs plus grands [27].
- Les pertes restent non négligeables qui atteignent jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine qui produit des perturbations nuisibles à la qualité de l'énergie délivrées et au rendement de la machine [9].
- Les batteries de condensateurs sont indispensables pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Car le redresseur est unidirectionnel et pour ça cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau [43].

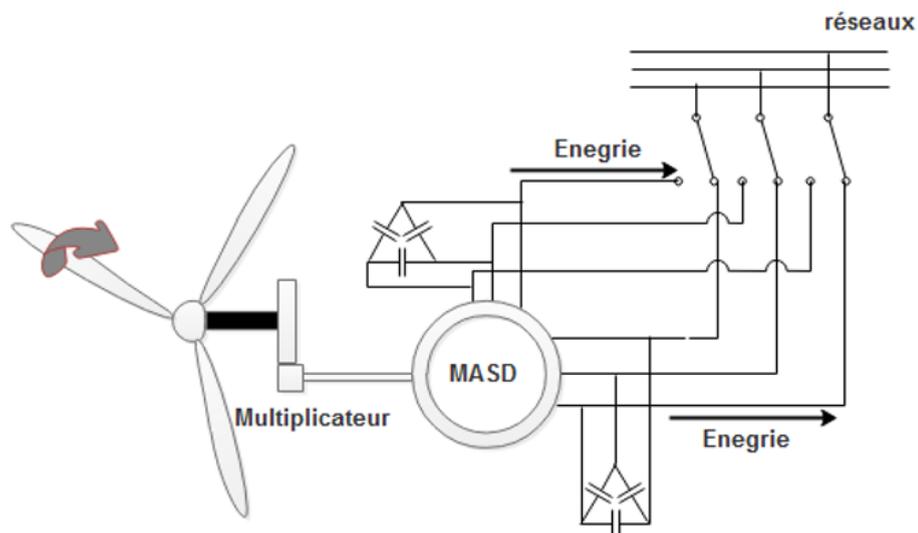


FIGURE I.13 – Machine asynchrone double stator dans la chaîne de conversion éolienne.

### I.9.2 Générateurs synchrones

Les constructeurs choisissent ces machines pour avoir l'avantage de l'absence de multiplicateur de vitesse ainsi que l'absence de courant réactif pour la magnétisation. Le champ magnétique peut s'obtenir par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour l'application d'entraînement direct qui ne nécessite pas de boîte de vitesses. Mais l'adaptation de cette machine à la connexion avec le réseau est indirecte et elle nécessite l'utilisation d'un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable ce qui augmente le coût de l'utilisation de cette machine pour les systèmes éoliens ainsi que sa complexité pour l'adaptation quel que soit le type de cette machine soit à rotor bobiné ou à aimant permanent [13], [41].

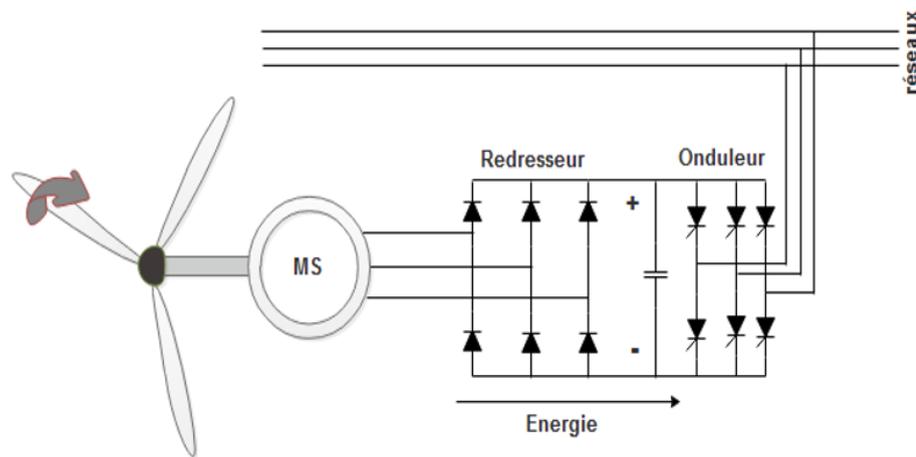


FIGURE I.14 – Alternateur dans la chaîne de conversion éolienne.

#### I.9.2-a Générateurs synchrones à rotor bobiné

C'est ce type de générateurs qui est utilisé dans la plus part des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [20].

L'utilisation des machines synchrones pour les éoliennes ne nécessite pas la présence d'un multiplicateur de vitesse, elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes de plus elles offrent des couples très importants, ainsi l'absence de courant réactif de magnétisation est un autre avantage pour ces machines.

Mais malgré tous ses avantages, l'adaptation de ces machines pour les systèmes éoliens pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (figure I.14) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [27].

### I.9.2-b Générateurs synchrone à aimant permanent

La machine synchrone à aimant permanent constitue d'un stator semblable à la MAS et d'un rotor exciter avec une source indépendante du réseau [15].

Parmi les avantages de cette machine elle fournit un couple important à dimension géométrique convenable qui ne nécessite pas de multiplicateur, en plus cette génératrice peut fonctionner en mode autonome [15], [21].

Mais malgré ses avantages, cette machine elle a plusieurs inconvénients pour l'utiliser sur les éoliennes tout d'abord il faut synchroniser le champ tournant rotorique avec le champ tournant statorique et pour ça on a le problème de maintenir la vitesse de l'éolienne constant et de synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion.

La marge de variation de la vitesse est strictement limitée c'est pour ça on a besoin d'une interface d'électronique de puissance intermédiaire entre le stator et le réseau. De plus, le convertisseur statique doit supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau alors il nous faut des composants plus performants donc plus coûteux [43].

Cette génératrice contient soit un système bagues/balais ou des aimants permanents qui sont souvent fabrique de terres rares qui sont très coûteux et moins durable à cause de risque de perd de ces caractéristique magnétique sous l'influence des variations fortes de Couple.

Malgré le bon rendement de ce système de conversion mais il est très compliqué et très coûteux, c'est la raison qui poussé les constructeurs a pensée aux machines asynchrones à double alimentation [43], [36].

### I.9.3 Générateurs asynchrone à double alimentation

Elle s'appelle la machine ou la génératrice asynchrone double alimentation selon la comparaison entre sa vitesse de rotation et sa vitesse de synchronisme.

Cette machine est l'un des machines les plus utilisé actuellement dans le domaine des éoliennes à cause de son rendement et son efficacité pour la production d'énergie électrique ainsi le coût qui est plus moins par rapport ou autre génératrices, pourtant elle nécessite un nombre de convertisseur plus que celle des autres.

Dans le domaine des énergies éoliennes, la génératrice asynchrone à double alimentations prend plusieurs structures selon l'utilisation et le besoin.

### I.9.3-a Générateurs asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipé

La structure de cette génératrice se basé sur un principe de connecté le stator directement au réseau et le rotor avec un redresseur à diode qui est par la suite connecté à un hacheur à base d'IGBT afin d'alimenté une charge résistive (figure I.15) [43].

L'utilisation de l'IGBT joue un rôle très important c'est par cette hacheur qu'on varie l'énergie dissipé par le bobinage rotorique et permet à la machine de fonctionné a vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [18], [9].

Le glissement de cette machine ce change en fonction de sa vitesse de rotation ce qui va nous conduit à un rapport très important entre le glissement et la puissance extraite de rotor donc si le glissement devient important la puissance extraite de rotor est élevé donc elle va entièrement dissiper dans la résistance  $R$  ce qui va nuit le rendement du système [29].

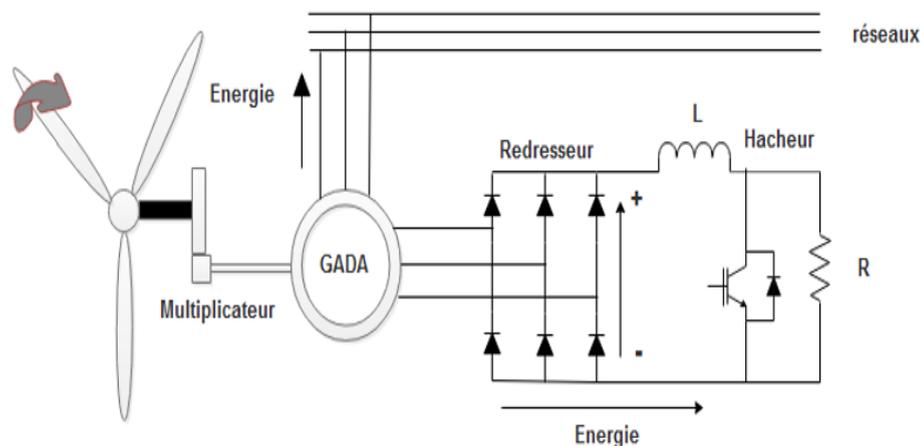


FIGURE I.15 – GADA à énergie rotorique dissipé

### I.9.3-b Générateurs asynchrone à double alimentation à structure de Kramer

Due à la complexité de la structure précédente et la perte de l'énergie au niveau de rotor qui influe sur le système et sur son fonctionnement, Kramer vient de proposer une autre structure qui fonctionne avec le même principe mais avec un changement au niveau de l'hacheur et de la résistance qui vont se remplacé par un onduleur et un redresseur pour faire profiter de l'énergie de glissement et de la envoyé vers le réseau (figure I.16) [27], [9].

Le dimensionnement de cet ensemble redresseur-onduleur se choisit selon la puissance nominale de la machine. Donc on peut dire que le système est avantageux si la taille de convertisseur est réduite par rapport à la puissance nominale de la machine [23]. Afin de respecté cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30% [18].

L'utilisation d'un onduleur à base de thyristor nuit au facteur de puissance, et le redresseur est unidirectionnel donc le système va produire l'énergie que pour la vitesse de rotation qui son supérieur au celle de synchronisme (fonctionnement hyper synchrone) [29].

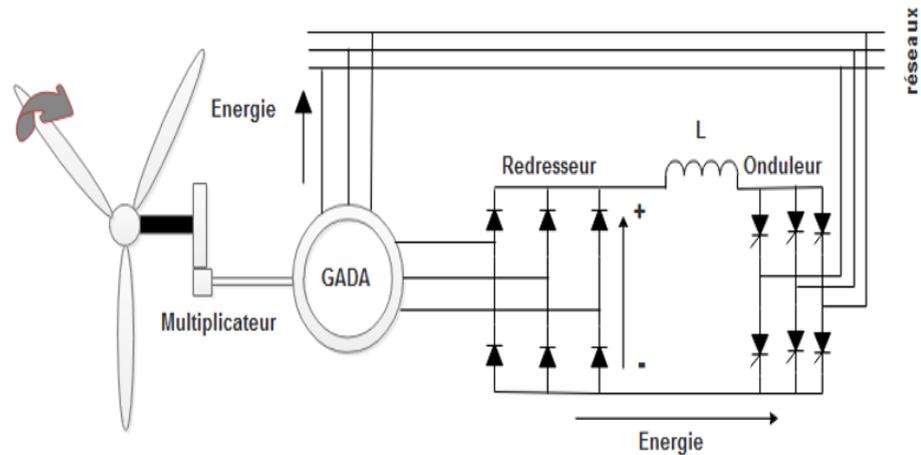


FIGURE I.16 – Générateurs asynchrone à double alimentation à structure Kramer

### I.9.3-c Générateurs asynchrone à double alimentation avec cyclo-convertisseur

Afin d'avoir une énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, on remplace l'ensemble redresseur-onduleur par un cyclo-convertisseur (figure I.17).

L'utilisation de cette cyclo-convertisseur permet d'avoir une vitesse de rotation qui se varie avec un pourcentage de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme ce qui va permet au système de fonctionné pour les deux modes hyper-synchronisme et hypo-synchronisme [43], [9].

Malgré les avantages de cette structure il y'a des harmoniques important qui perturbe le système et qui vont par la suite diminuer la puissance du dispositif.

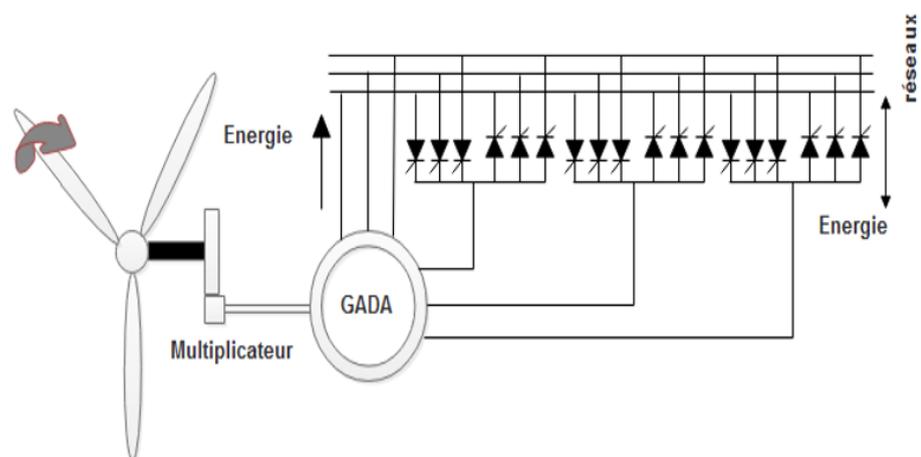


FIGURE I.17 – Générateurs asynchrone à double alimentation à structure avec cyclo-convertisseur

### I.9.3-d Générateurs asynchrone à double alimentation à structure de scherbius

C'est une structure qui utilise deux onduleurs de tension en cascade qui ont équipée d'IGBT et connecté au travers d'un bus continue. Toutefois les transistors IGBT peuvent être commandé à l'ouverture et à la fermeture et les onduleurs sont commandés en MLI, ce type de convertisseur a été choisi pour limité les perturbations en modifiant le spectre fréquentielle du signal (rejet les fréquences harmonique non nul vers les fréquences élevées), de contrôler le flux, la vitesse de la GADA du côté de la machine et de contrôlé les puissances active et réactive du côté réseau [43], [23].

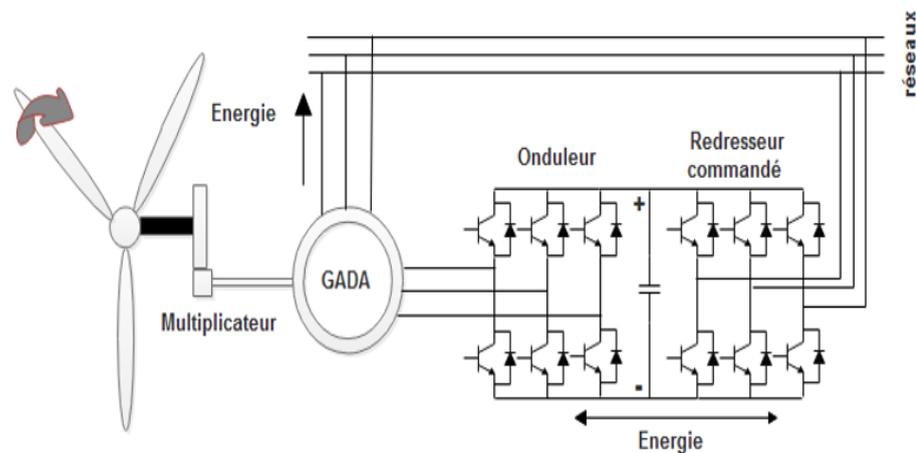


FIGURE I.18 – Générateurs asynchrone à double alimentation à structure de scherbius

Parmi les avantages de cette structure de conversion de ce système elle offre un contrôle de quatre grandeurs, à savoir le flux, la vitesse de la génératrice, les puissances transitées au réseau et la bidirectionnalité du convertisseur d'électronique de puissance permet les fonctionnements en hyper-synchrone et en hypo-synchrone.

Cette configuration permet une variation de 100% de la vitesse en utilisant des pales orientables. Les convertisseurs ne sont dimensionnés que pour seulement 25% de la puissance nominale de la génératrice donc les pertes dans le convertisseur sont peu importantes [22].

Par conséquent cette structure est la plus intéressante en termes de coût et de performances. Elle a donc été choisie comme structure de base pour la suite de notre travail.

## I.10 Conclusion

D'après les études théoriques qu'on a fait dans ce chapitre et la comparaison entre les différents aérogénérateurs qu'on peut utiliser on conclut que l'éolienne à axe horizontal est le meilleur pour la production de l'énergie électrique, ainsi d'après la comparaison entre les différents générateurs électriques on constat que la génératrice asynchrone à double alimentation avec la structure de scheirbus est la meilleur pour les éoliennes et la moins couteux.

## Chapitre II

---

# Modélisation et commande la turbine éolienne (partie mécanique)

---

### SOMMAIRE

---

II.1	INTRODUCTION . . . . .	22
II.2	LOI DE BETZ . . . . .	22
II.3	MODÉLISATION DE SYSTÈME DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE . . . . .	23
II.3.1	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine éolienne . . . . .	24
II.3.2	Modèle de la turbine . . . . .	24
II.3.3	Modèle de multiplicateur . . . . .	26
II.3.4	Modèle de l'arbre . . . . .	26
II.4	ZONES DE FONCTIONNEMENT D'UNE ÉOLIENNE . . . . .	27
II.5	RÉGULATION MÉCANIQUE DE LA PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE . . . . .	28
II.5.1	Système d'orientation des pales "Stall" . . . . .	28
II.5.2	Système d'orientation des pales "Pitch" . . . . .	29
II.6	TECHNIQUE D'EXTRACTION DE MAXIMUM DE PUISSANCE . . . . .	30
II.6.1	Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique . . . . .	30
II.6.2	Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique . . . . .	31
II.7	SYNTHÈSE DE RÉGULATEUR . . . . .	32
II.8	RÉSULTATS DE SIMULATIONS . . . . .	34
II.9	INTERPRÉTATIONS . . . . .	34
II.10	CONCLUSION . . . . .	37

---

## II.1 Introduction

L'énergie éolienne sert à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. L'énergie mécanique est produite par l'énergie cinétique de vent qui traverse les pales de la turbine de l'éolienne pour faire tourner le rotor de cette dernière. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent.

Dans ce chapitre, on va présenter la modélisation des différents composants constituant d'une turbine éolienne, un multiplicateur de vitesse et un arbre de transmission lié avec une machine asynchrone à double alimentation dans un premier temps. Puis, on va présenter les deux techniques de commande de la turbine éolienne dans la zone de fonctionnement 2 (MPPT) où la maximisation de puissance produite est maximale. La première méthode est appelée commande MPPT sans asservissement de vitesse et la deuxième méthode est la commande MPPT avec asservissement de vitesse mécanique à base d'un régulateur PI que l'on va suivre pendant la suite de ce travail.

## II.2 Loi de Betz

La loi de Betz définit le rapport entre l'énergie de vent et l'énergie récupérée par la turbine, donc l'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique de l'air situé en amont de l'éolienne, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. Albert Betz a démontré que la puissance maximale récupérable est égale aux  $16/27$  de la puissance incidente.

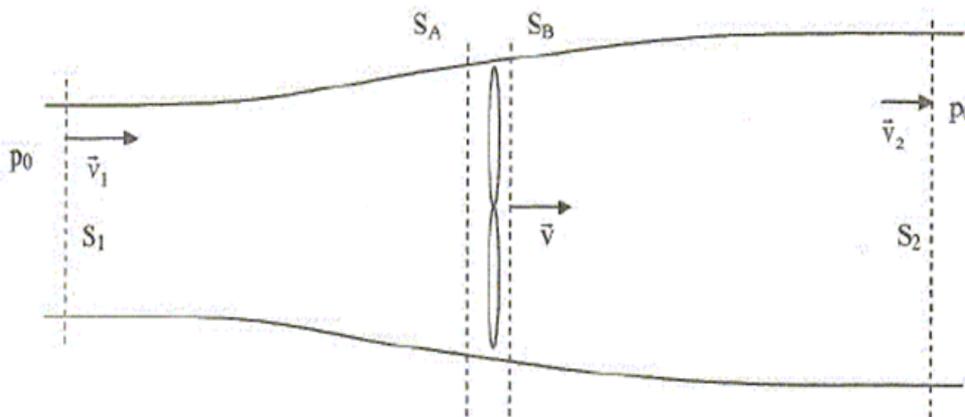


FIGURE II.1 – Tube de courant d'air autour d'une éolienne

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure II.1 sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit [32] :

$$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II.1})$$

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface et la vitesse moyenne.

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

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

$$P_m = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.3})$$

En remplaçant  $m$  par son expression dans l'expression précédant :

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.4})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse du vent  $V$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors [25] :

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$P$  : Puissance exprimé (W).

$S$  : Surface balayée par les pales ( $m^2$ ).

$V$  : Vitesse du vent (m/s).

$\rho$  : Densité de l'air ( $kg/m^3$ ).

## II.3 Modélisation de système de conversion d'énergie éolienne

La turbine est la première capteur de vent, elle convertit l'énergie cinétique de vent qui est capté par ses pâles en énergie mécanique afin de tourner la génératrice électrique pour produire de l'énergie électrique. trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupéré par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent.

La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent de site.

### II.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine éolienne

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [28], [6] :

- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air ( $db$ ) est très faible et peut être ignoré.
- Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice.

Le dispositif qui est étudié ici est constitué d'une turbine éolienne comprenant de trois pales orientable et de longueur  $R$ , fixé sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_t$  qui est reliée à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure II.2).

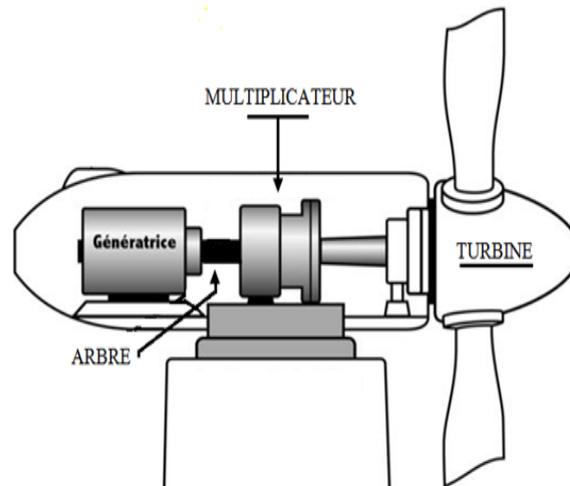


FIGURE II.2 – Schéma de la turbine éolienne.

### II.3.2 Modèle de la turbine

#### II.3.2-a Puissance aérodynamique

La puissance aérodynamique extraite à partir du vent peut être exprimé comme suit :

$$P_{aero} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{II.6})$$

Avec le couple aérogénérateur :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} \quad (\text{II.7})$$

$P_{aero}$  : Puissance aérodynamique (W).  
 $C_{aero}$  : Couple aérodynamique (Nm).  
 $C_p(\lambda, \beta)$  : Coefficient de puissance  
 $\Omega_t$  : Vitesse de la turbine (rad/s).

### II.3.2-b Coefficient de puissance

Le coefficient de puissance représente la puissance capturée du vent en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  et l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ . Et elle est écrite comme suit [6] :

$$\begin{cases} C_p = (C_1 - C_2) (\beta - 2) \cdot \sin(A) - C_4 (\lambda - C_5) \cdot (\beta - C_3) \\ A = \frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Où les valeurs des coefficient sont choisies comme suit :

TABLE II.1 – Les valeurs des coefficients

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
0,5	0,0167	2	0,00184	3

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne, il dépend de la variation des caractéristiques de la turbine.

### II.3.2-c Vitesse relative

La vitesse relative est défini par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V} \quad (\text{II.9})$$

La figure II.3 représente la variation de ce coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  et l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ .

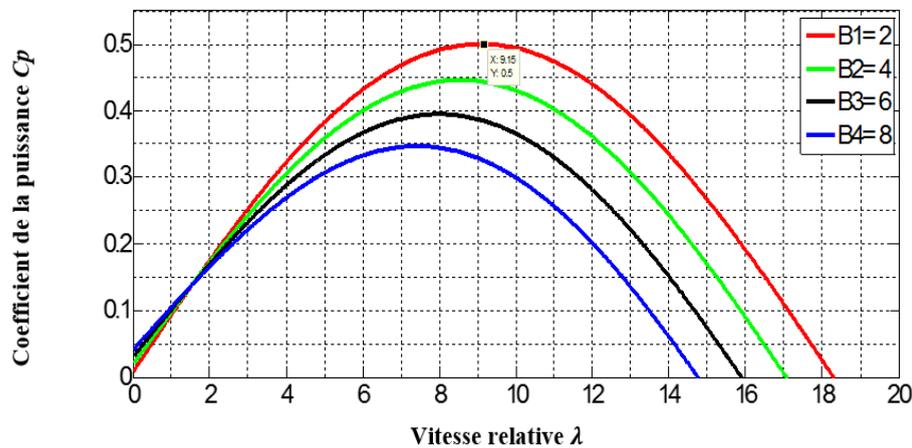


FIGURE II.3 – Coefficient de la puissance en fonction de la vitesse relative de la turbine.

### II.3.3 Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur est une boîte de transmission qui relie la turbine avec l'arbre de la génératrice avec un rapport de transmission  $G$  qui est choisit afin de mettre l'arbre de la génératrice dans la marge de vitesse désirée. Les pertes de transmission sont négligeable donc les fonction de la vitesse et le couple de la turbine à côté de la génératrice sont représenté par :

$$C_{mec} = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.10})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$C_{mec}$  : Couple mécanique de la génératrice (Nm).

$C_t$  : Couple de la turbine (Nm).

$\Omega_{mec}$  : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

$\Omega_t$  : Vitesse de la turbine (rad/s).

### II.3.4 Modèle de l'arbre

L'arbre est composé d'une masse correspondant à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu et une petite inertie représentant le rotor du générateur. Le moment d'énergie totale est modélisé comme suit :

$$J = j + J_t.G^2 \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$J_t$  : Inertie de la turbine.

$j$  : Inertie de génératrice.

$G$  : Gain de multiplicateur.

L'évolution de la vitesse mécanique  $\Omega$  dépend d'une relation entre le couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice  $C_{mec}$ , le couple électromagnétique produit par la génératrice  $C_{em}$ , et le couple de frottement visqueux  $C_{vis}$ .

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.13})$$

Le couple  $C_{vis}$  est représenté par le coefficient de frottement visqueux :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.14})$$

En remplaçant l'équation II.14 dans l'équation II.13 on obtient :

$$C_{mec} - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.15})$$

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{J \cdot s + f} (C_{mec} - C_{em}) \quad (\text{II.16})$$

Le schéma bloc de la turbine éolienne est donné par :

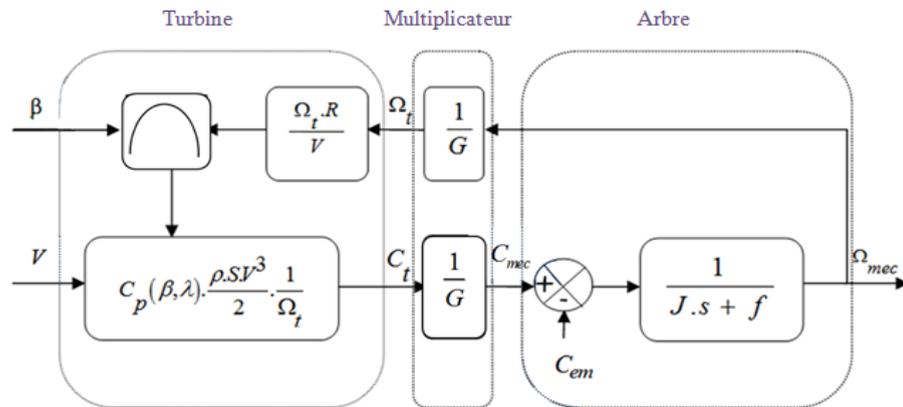


FIGURE II.4 – Schéma bloc de la turbine éolienne.

## II.4 Zones de fonctionnement d'une éolienne

Les phases de fonctionnement d'une éolienne varient selon la vitesse variable du vent et l'angle d'orientation des pales. Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir les quatre zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable :

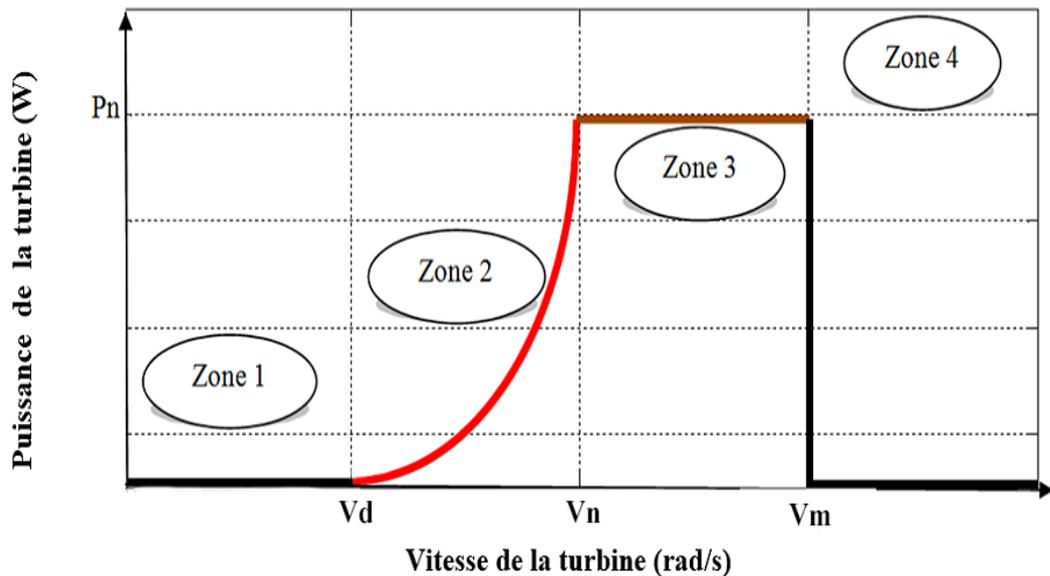


FIGURE II.5 – Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Les quatre zones de fonctionnement sont définies comme suit [10], [11] :

- Zone 1 : C'est une zone à vitesse du vent inférieure à la vitesse démarrage  $V_d$ , dans laquelle la vitesse du vent ne permet pas encore la rotation de l'éolienne et la puissance qui résultera de sa rotation est inférieure à la consommation et pertes électriques du système éolien en totalité.
- Zone 2 : Une zone où la vitesse de vent est supérieure à la vitesse démarrage et inférieure à la vitesse nominale  $V_n$  de l'éolienne. Cette partie de la courbe est caractérisée par une puissance proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Le système doit être arrangé de manière à tirer le maximum de profit de cette vitesse du vent et générer le maximum d'énergie électrique possible. Ceci se fait en gardant le coefficient de puissance  $C_p = C_{pmax}$  pour un angle calage bien défini  $\beta$ . C'est dans cette zone de la courbe que l'on parle des stratégies MPPT (Maximum Power Point Tracking).
- Zones 3 : Une zone de vitesse de vent supérieure à la vitesse nominale et inférieure à la vitesse de maximale  $V_m$  ou de déclenchement ; durant laquelle le coefficient  $C_p$  doit être contrôlé de manière à limiter la puissance électrique à la puissance nominale du générateur électrique utilisé. C'est donc une zone de fonctionnement de l'éolienne avec un rendement réduit.
- Zones 4 : Une zone où la vitesse de vent est supérieure à la vitesse de déclenchement, durant laquelle l'éolienne doit être arrêtée afin éviter des dommages du système électrique et celui mécanique.

Dans ce qui suit, nous nous sommes intéressés à la zone 2, où la maximisation de l'énergie électrique extraite est appliquée.

## II.5 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

### II.5.1 Système d'orientation des pales "Stall"

Le système délimitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle de calage devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

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

importante [41], [29].

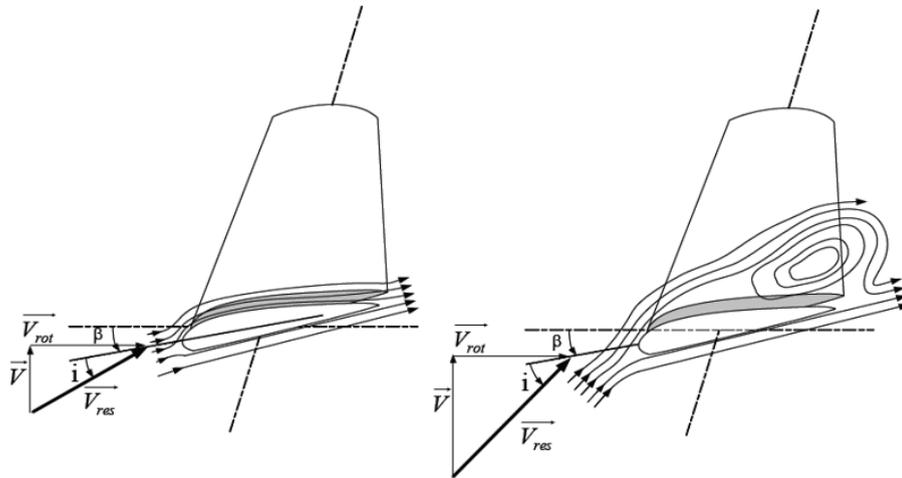


FIGURE II.6 – Flux d'air sur un profil de pale " stall " [36].

### II.5.2 Système d'orientation des pales "Pitch"

Ce système de régulation utilise la variation de l'angle des pales en variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de traînage. face au vent pour maintenir une vitesse de rotation constante. Il dévie la pale jusqu'à ce qu'elle prenne une position angulaire opportune à chaque variation de vent spécialement pour profiter au maximum du vent instantané, ainsi mettre en contrôle la puissance en cas des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale pour la protection de l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en « drapeau » des pales de l'hélice [41].

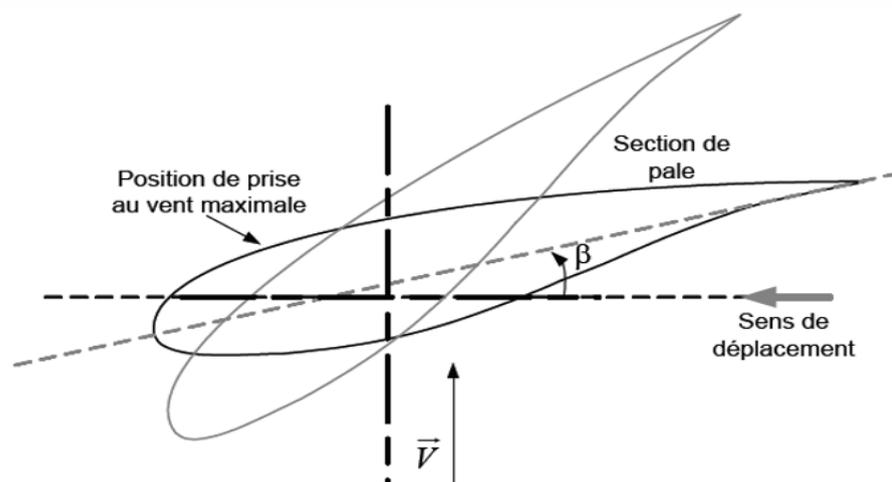


FIGURE II.7 – Variation de l'angle de calage des pales [41].

## II.6 Technique d'extraction de maximum de puissance

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait des sommets de ces caractéristiques c'est-à-dire pour chaque vitesse du vent le système doit trouver la puissance maximale de ce qui équivaut à la recherche de la vitesse mécanique optimale. Pour réaliser ce fonctionnement en va utiliser la terminologie Maximum Power Point Tracking (MPPT) de la turbine éolienne. Pour cela, nous avons besoin d'un algorithme agissant sur les variables de consigne afin d'avoir le meilleur rendement possible du dispositif.

Alors nous avons distingué deux méthodes de la commande MPPT avec asservissement et sans asservissement de la vitesse mécanique :

1. Commande MPPT sans asservissement de la vitesse
2. Commande MPPT avec asservissement de la vitesse

### II.6.1 Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique

Cette méthode de commande efficace et bien connue dans le domaine des éoliennes est basée sur la variation faible de la vitesse du vent en régime permanent [6]. Sous cette hypothèse, l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine est obtenue à partir de l'équation dynamique de cette dernière. Dans le régime permanent la vitesse est considérer constante et si en négligeant l'effet du frottement visqueux ( $C_{vis}=0$ ) on obtient les équations suivantes :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - C_{vis} \quad (II.17)$$

$$C_{em} = C_{mec} \quad (II.18)$$

L'estimation du couple aérodynamique  $C_t$  est permet de définir le couple électromagnétique de référence  $C_{em\_ref}$  :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_{t\_est}}{G} \quad (II.19)$$

Si on connaît une estimation de vitesse du vent et de la turbine, le couple estimé décrit comme suit :

$$C_{t\_est} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot S}{2} \cdot \frac{V_{est}^3}{\Omega_{t\_est}} \quad (II.20)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine  $\Omega_{t\_est}$  est obtenue à travers la vitesse mécanique et celle de la vitesse de vent estimé  $V_{est}$  est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse de la turbine. Les équations ci-dessous définissent ces deux estimations :

$$\begin{cases} \Omega_{t\_est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \\ V_{est} = \frac{\Omega_{t\_est} \cdot R}{\lambda} \end{cases} \quad (II.21)$$

À partir des équations II.21, le couple électromagnétique de référence peut s'écrire :

$$C_{em\_ref} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^5}{2(\lambda_{opt} \cdot G)^3} \Omega_{mec}^2 \quad (II.22)$$

Pour maximiser la puissance extraite, la vitesse relative est fixé à sa valeur optimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{p\max}$  donc le couple électromagnétique dans ce cas est réglé de la manière suivante :

$$C_{em\_ref} = \frac{\rho \cdot C_{p\max} \cdot \pi \cdot R^5}{2(\lambda_{opt} \cdot G)^3} \Omega_{mec}^2 = K \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II.23)$$

avec :

$$K = \frac{\rho \cdot C_{p\max} \cdot \pi \cdot R^5}{2(\lambda_{opt} \cdot G)^3} \quad (II.24)$$

La figure II.8 représente le schéma de principe de la commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique :

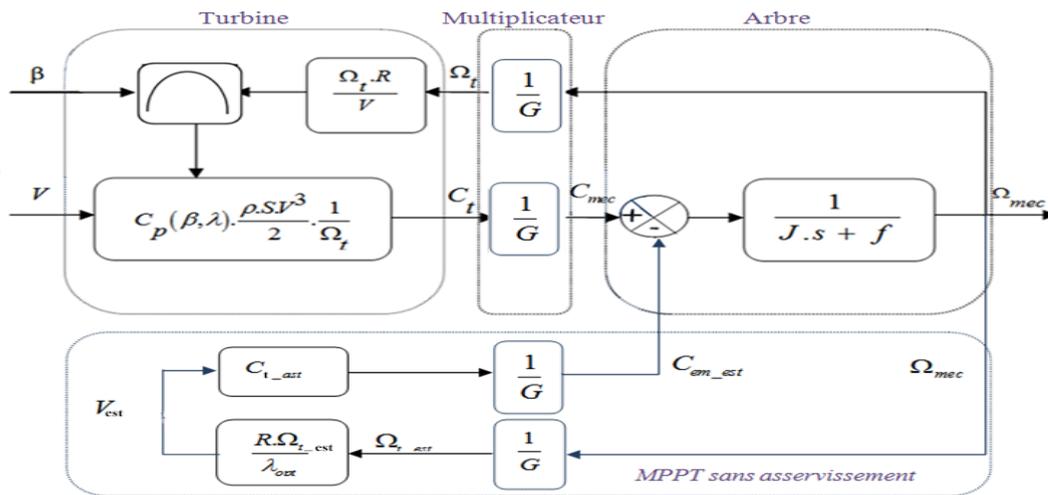


FIGURE II.8 – Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

### II.6.2 Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique

Cette stratégie de commande consiste à contrôler le couple électromagnétique de la machine afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Pour effectuer ce contrôle, un asservissement du vitesse mécanique de générateur doit être réaliser.

La figure II.9 représente le schéma de principe de la commande MPPT avec asservissement du vitesse mécanique.

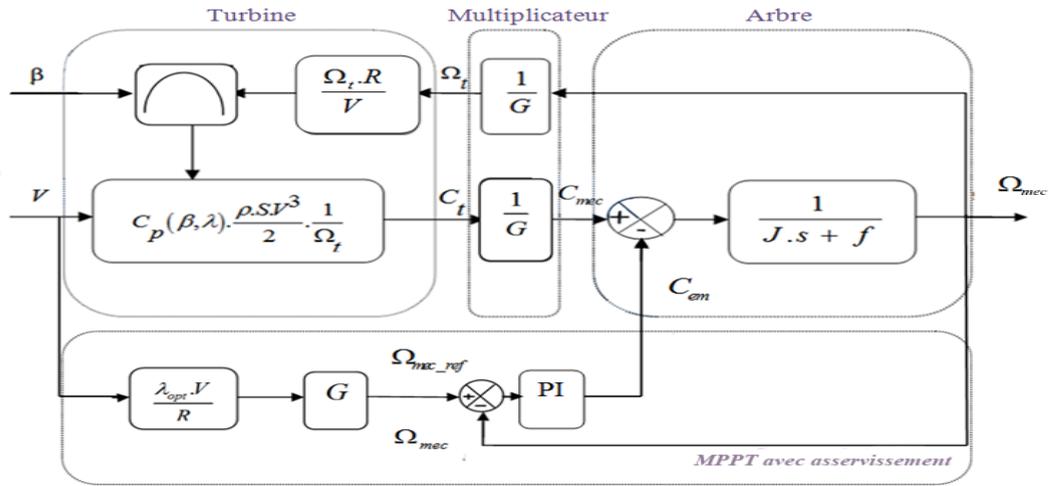


FIGURE II.9 – Commande MPPT avec asservissement de vitesse.

La figure II.9 montre que le couple électromagnétique de référence est obtenu en sortie d'un régulateur de type Proportionnel Intégral PI de vitesse (la vitesse mécanique comparer avec une vitesse de référence)

Pour un point de fonctionnement donné, on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ . Celui-ci est obtenu si la vitesse relative  $\lambda$  est égale à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  et l'angle de calage  $\beta$  est constant  $\beta=2$ .

Selon l'équation de rapport de vitesse  $\lambda$ , la vitesse mécanique de la turbine est égale à :

$$\Omega_t = \frac{\lambda \cdot V}{R} \quad (II.25)$$

À partir de l'expression précédente, la vitesse de la turbine de référence est définie par :

$$\Omega_{t\_ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (II.26)$$

$\lambda_{opt}$  : la vitesse relative optimal.

La vitesse mécanique de référence du générateur est obtenue à partir de l'équation de multiplicateur comme suit :

$$\Omega_{mec\_ref} = \Omega_{t\_ref} \cdot G \quad (II.27)$$

## II.7 Synthèse de régulateur

Le régulateur choisit doit accomplir l'asservissement de la vitesse mécanique à sa valeur de référence et diminuer l'erreur statique.

Donc on a choisi un correcteur proportionnel et intégrale PI qui peut accomplir notre cahier

de charge, car ce type de régulateur est simple à synthétiser et plus utilisé dans l'industrie en plus il est moins chère [?], [34].

La figure II.10 représente le schéma fonctionnel de la régulation de la vitesse mécanique :

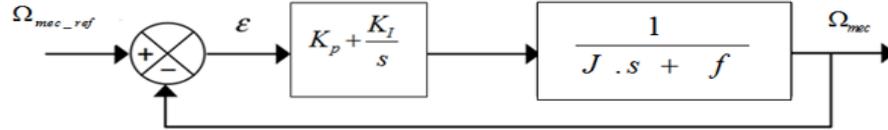


FIGURE II.10 – Boucle de régulation de la vitesse mécanique.

La fonction de transfert de régulateur est donnée par :

$$FT_{reg} = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P \cdot s + K_I}{s} \quad (\text{II.28})$$

La fonction de transfert du système à réguler :

$$FT_{sys} = \frac{1}{J \cdot s + f} \quad (\text{II.29})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$\begin{cases} FTBO_{\Omega} = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{m\_ref}} = \frac{K_P \cdot s + K_I}{s} \cdot \frac{1}{J \cdot s + f} \\ FTBO_{\Omega} = \frac{K_P \cdot s + K_I}{J \cdot s^2 + f \cdot s} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

En boucle fermée, la fonction de transfert donnée comme suit :

$$\begin{cases} FTBF_{\Omega} = \frac{FTBO_{\Omega}}{1 + FTBO_{\Omega}} \\ FTBF_{\Omega} = \frac{\frac{K_P \cdot s + K_I}{J}}{s^2 + \frac{(f + K_P)}{J} \cdot s + \frac{K_I}{J}} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

On a la fonction de transfert générale en BF d'un système est de l'ordre :

$$G(s) = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II.32})$$

où  $\xi$  représente le coefficient d'amortissement et  $\omega_n$  la pulsation propre.

On utilise la méthode par identification on obtient :

$$\begin{cases} 2 \cdot \xi \cdot \omega_n = \frac{(f + K_P)}{J} \\ \omega_n^2 = \frac{K_I}{J} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

D'où on tire les paramètres de régulateur :

$$\begin{cases} K_I = \omega_n^2 \cdot J \\ K_P = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot J - f \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Pour optimiser les performances dynamiques et la stabilité du système, on opte pour un coefficient d'amortissement en boucle fermée  $\xi$  de valeur égale à 0,7 [33], [30].

## II.8 Résultats de simulations

On a effectué des simulations de la partie mécanique après avoir modéliser l'ensemble des modèles de la turbine, le multiplicateur de vitesse, l'arbre mécanique et la stratégie de commandé MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique a été simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink relatif à ce chapitre sont illustrés dans l'annexe C.

Le profile de vent utiliser dans cette simulation et représenter par l'équation suivent [29] :

$$V = 6 + 0,2 \cdot \sin(0,1047 \cdot t) + 2 \cdot \sin(0,2665 \cdot t) + \sin(1,2930 \cdot t) + 0,2 \cdot \sin(3,6645 \cdot t) \quad (\text{II.35})$$

Les conditions de simulations et les paramètres de la turbine éolienne sont citées dans l'annexe A.

## II.9 Interprétations

On remarque que la turbine génère une puissance jusqu'à 7 KW pour une vitesse du vent maximale égale 9 m/s.

La puissance de vent, la puissance aérodynamique et le couple aérodynamique débitée par la turbine possède les mêmes allures que le profil de la vitesse du vent.

Le couple électromagnétique varie selon la vitesse mécanique de la turbine qui varie suivant la variation du vitesse de vent grâce de commande MPPT pour permettre à l'éolienne de fonctionner dans les conditions optimales.

La vitesse relative atteint sa valeur optimale avec un dépassement acceptable en régime transitoire, un bon suivi de consigne de la valeur de référence avec un faible erreur statique en régime permanent.

Le coefficient de puissance atteint sa valeur maximale sans dépassement en régime transitoire, un bon suivi de consigne de la valeur de référence avec erreur statique en régime permanent négligeable.

La turbine montre une bonne adaptation lors de la variation de la vitesse du vent en utilisons l'asservissement de vitesse en régulateur PI.

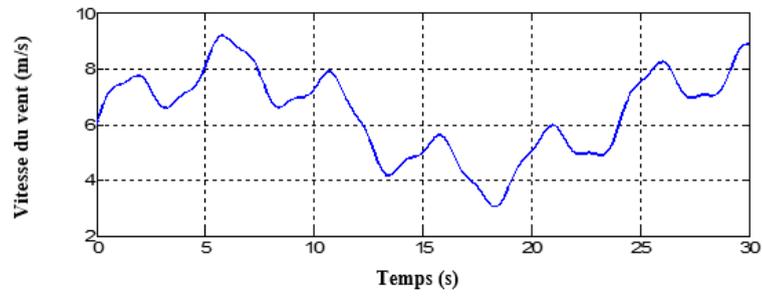


FIGURE II.11 – Vitesse du vent.

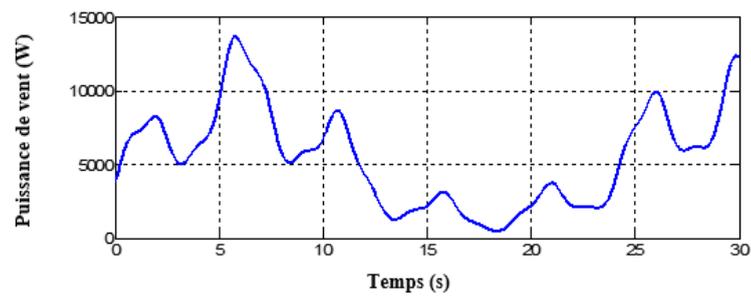


FIGURE II.12 – Puissance du vent.

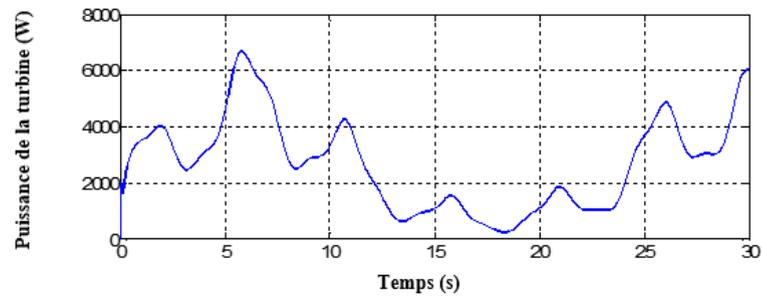


FIGURE II.13 – Puissance de la turbine.

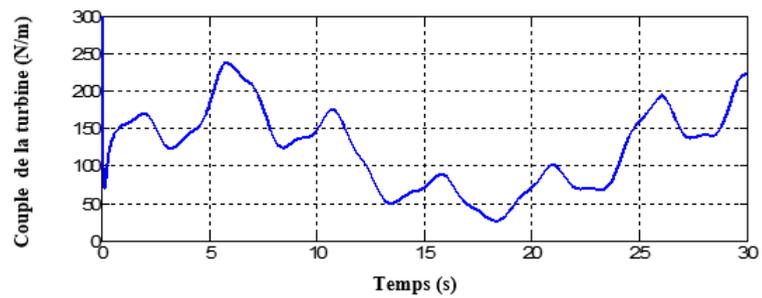


FIGURE II.14 – Couple de la turbine.

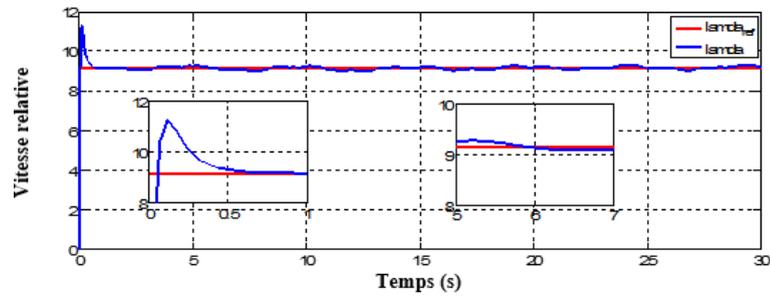


FIGURE II.15 – Vitesse relative.

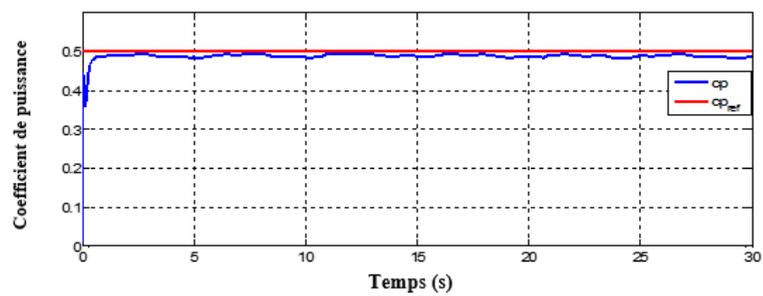


FIGURE II.16 – Coefficient de puissance.

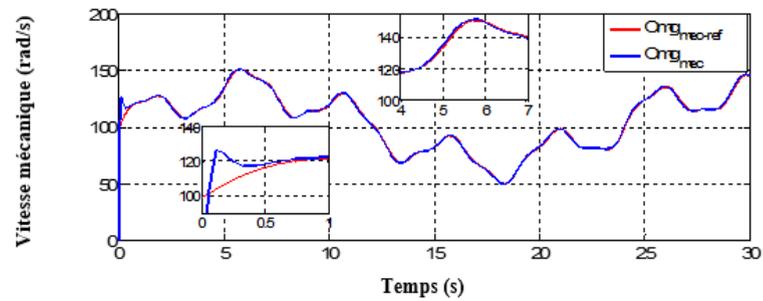


FIGURE II.17 – Vitesse mécanique.

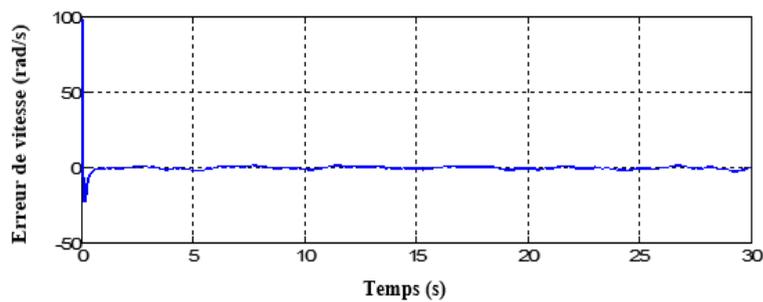


FIGURE II.18 – Erreur de la vitesse mécanique.

## II.10 Conclusion

Ce chapitre a traité la modélisation et la simulation d'un système éolien à vitesse variable munit de la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse, l'arbre de la génératrice et la commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents éléments du système éolien. En effet, les modèles analytiques des différents constituants ont été établis à savoir le profil du vent appliqué, le coefficient de puissance, ainsi que les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés.

Ensuite, nous sommes expliqués les différents zones de fonctionnements d'une éolienne. Dans la fin de ce chapitre, nous avons donc centré notre étude sur la commande de la turbine éolienne dans la zone de fonctionnement optimale, permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent. une méthodes de contrôle MPPT été examinée et détaillée (avec asservissement de la vitesse de rotation).

Dans le chapitre suivant nous allons développer et modéliser la partie électrique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne associée avec un convertisseur statique de côté machine (CCM).

## Chapitre III

# Modélisation et commande indirecte des puissances de la GADA (partie électrique)

### SOMMAIRE

III.1 INTRODUCTION . . . . .	39
III.2 DESCRIPTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION . . . . .	39
III.2.1 Structure de la machine . . . . .	39
III.2.2 Modes de fonctionnement de la machine à doubles alimentation . . . . .	40
III.3 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA MADA . . . . .	43
III.3.1 Avantages . . . . .	43
III.3.2 Inconvénients . . . . .	43
III.4 MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION . . . . .	44
III.4.1 Hypothèses simplificatrices . . . . .	44
III.4.2 Mise en équation dans le plan ( $abc$ ) . . . . .	45
III.4.3 Transformation de Park . . . . .	47
III.5 MISE EN ÉQUATION DANS LE PLAN ( $d-q$ ) . . . . .	48
III.5.1 Choix du référentiel . . . . .	50
III.5.2 Représentation d'état dans le référentiel de Park . . . . .	51
III.6 MODÉLISATION DE L'ALIMENTATION DE LA MADA . . . . .	52
III.6.1 Modèle de l'onduleur de tension à deux niveaux . . . . .	52
III.6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion . . . . .	54
III.7 CONTRÔLE INDÉPENDANT DES PUISSANCES ACTIVE ET RÉACTIVE . . . . .	56
III.7.1 Technique d'orientation du flux statorique . . . . .	56
III.8 COMMANDE DIRECTE . . . . .	59
III.9 COMMANDE INDIRECTE EN BOUCLE OUVERT . . . . .	60
III.10 RÉSULTATS DE SIMULATION EN BOUCLE OUVERT . . . . .	61
III.10.1 Profils de poursuite, de régulation et robustesse . . . . .	61
III.10.2 Résultats des simulations . . . . .	61
III.10.3 Interprétation des résultats . . . . .	63
III.11 COMMANDE INDIRECTE EN BOUCLE FERMÉ . . . . .	64
III.12 RÉSULTATS DE SIMULATION EN BOUCLE FERMÉ . . . . .	65
III.12.1 Profils de poursuite, de régulation et robustesse . . . . .	65
III.12.2 Résultats des simulations . . . . .	65
III.12.3 Interprétation . . . . .	69
III.13 CONCLUSION . . . . .	69

## III.1 Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (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.

Ce chapitre consiste à étudier notre commande proposer qui est la commande indirecte de puissance d'une machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement générateur. Pour cela, notre chapitre est organisé comme suit :

- La première partie, nous allons présenter le modèle mathématique de la MADA dans le repère de Park liés au champ tournant pour étudier la commande.
- La deuxième partie, consiste à présenter le modèle de convertisseur d'électronique de puissance continu-alternative en utilisant un onduleur de tension à deux niveaux avec la technique de modulation large d'impulsion MLI.
- La troisième, consacré à faire l'orientation du flux statorique pour le contrôle indirecte des puissances de la MADA à base de régulateur PI afin d'évaluer ces performances en poursuite, en réglation et en robustesse.

## III.2 Description de la machine asynchrone à double alimentation

Elle a une dynamique très complexe à cause des interactions stator-rotor, ce qui rend la modélisation basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant insuffisante pour décrire son comportement dynamique.

### III.2.1 Structure de la machine

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoques dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais (figure III.1).

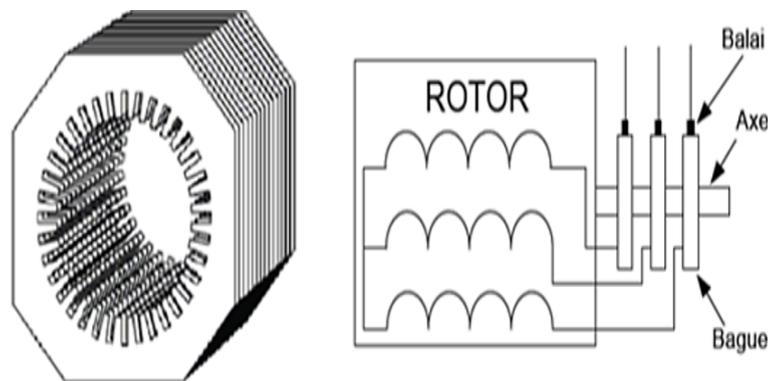


FIGURE III.1 – Structure de la machine asynchrone à rotor bobiné.

En fonction de moteur le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par l'effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hyposynchrone.

### III.2.2 Modes de fonctionnement de la machine à doubles alimentation

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On va présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [12].

Les différents modes de fonctionnement de la MADA dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié à ce dernier par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique (alternatif/alternatif) sont :

- Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone (figure III.2)
- Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone (figure III.3)
- Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone (figure III.4)
- Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone (figure III.5)

Seuls les deux derniers quadrants sont exploitables pour la production de l'énergie électrique, donc nous nous intéressons dans notre étude à ces deux quadrants générateur pour la production d'énergie électrique.

## III.2.2-a Fonctionnement en mode moteur Hypo-Synchrone

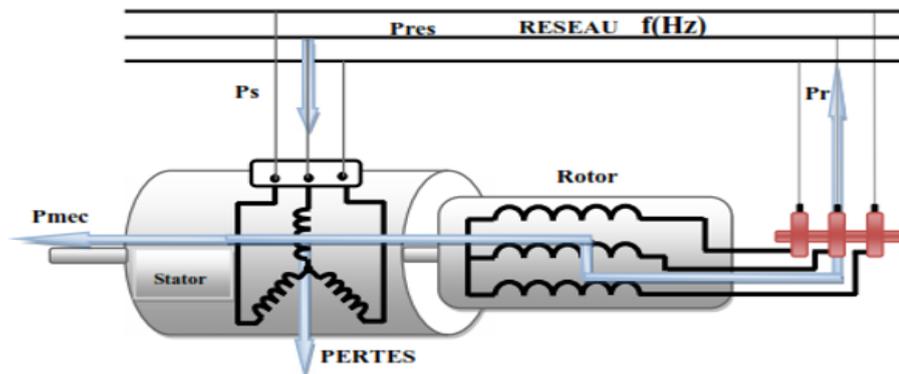


FIGURE III.2 – Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.

Le mode de fonctionnement comme apparaît dans la figure III.2 la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

## III.2.2-b Fonctionnement en mode moteur Hyper-Synchrone

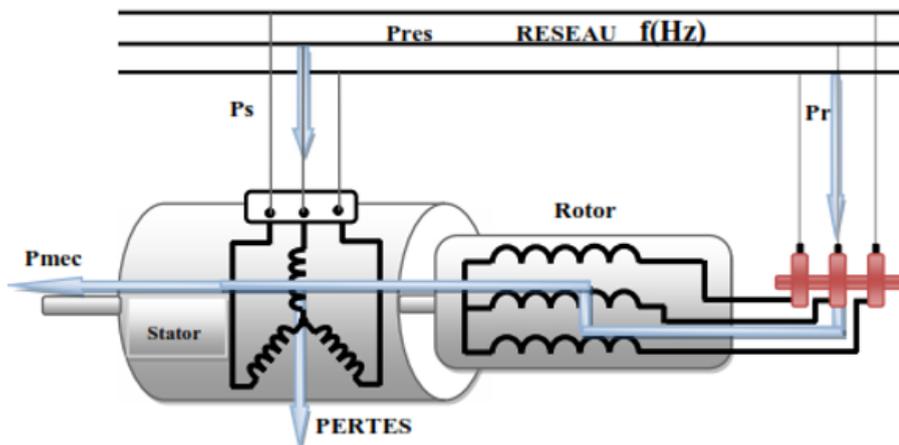


FIGURE III.3 – Fonctionnement en mode hyper synchrone.

La figure III.3 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a alors un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme.

## III.2.2-c Fonctionnement en mode génératrice Hypo-Synchrone

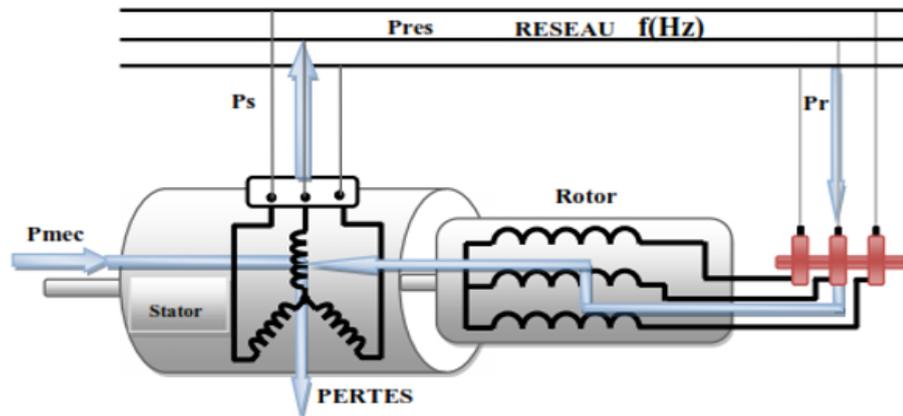


FIGURE III.4 – Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone.

la figure III.4 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. On a dans ce cas un fonctionnement en mode génératrice en dessous de la vitesse de synchronisme, fonctionnement en mode génératrice Hypo-Synchrone.

## III.2.2-d Fonctionnement en mode génératrice Hyper-Synchrone

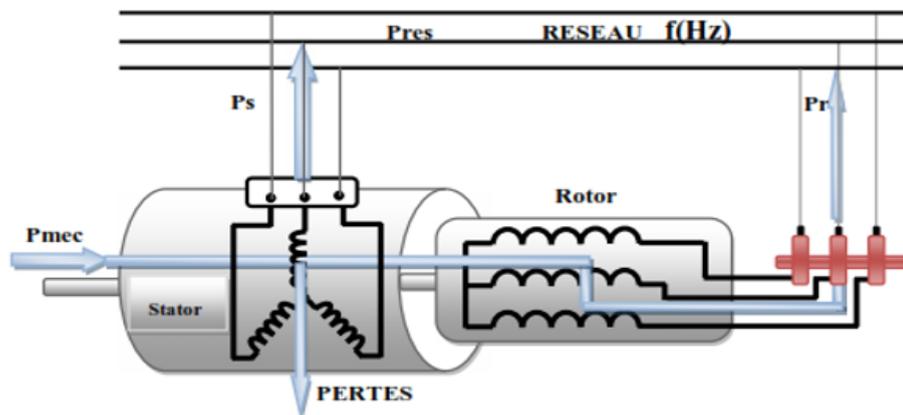


FIGURE III.5 – Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone.

Le dernier mode de fonctionnement figure III.5 la puissance est fournie par le stator au réseau et la puissance de glissement transmise par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a alors un fonctionnement en mode génératrice en dessus de la vitesse de synchronisme.

Avec :

$P_s$  : Puissance statorique

$P_r$  : Puissance rotorique

$P_m$  : Puissance mécanique

## III.3 Avantages et inconvénients de la MADA

### III.3.1 Avantages

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs avantages dont on peut citer :

- 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.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme.
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- 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 :
  1. Fonctionnement à vitesse variable.
  2. Régulation découplée des puissances active et réactive.
- Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper) et la récupération de la puissance de glissement, la puissance produite peut atteindre 1,3 de la puissance nominale sans être surchauffée [9].
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement [9].

### III.3.2 Inconvénients

Malgré tous ses avantages la MADA elle a plusieurs inconvénients :

- A cause de ses balais, la machine asynchrone à double alimentation elle est plus volumineuse et plus longue que celle de la machine asynchrone classique.
- Elle nécessite l'utilisation d'un nombre important de convertisseurs qui est plus que celle de la machine classique.
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.

## III.4 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

De façon à représenter au mieux le comportement d'une MADA en simulation, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis mais suffisamment simple pour que les temps de calcul du simulateur ne soient pas prohibitifs.

### III.4.1 Hypothèses simplificatrices

Alors avant établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [24] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La saturation de circuit magnétique, hystérésis et les courants de Foucault sont négligeable.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet de plus que la f.m.m créée par chacune des armatures est à répartition sinusoïdale.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux.
- La constance d'inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

La figure III.6 représente la structure de principe de la machine asynchrone triphasée.

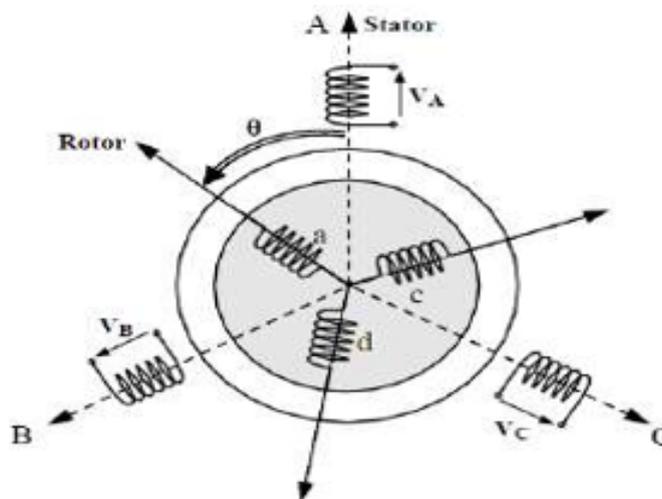


FIGURE III.6 – Représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentations

### III.4.2 Mise en équation dans le plan (*abc*)

La machine asynchrone triphasée est formée d'un stator fixe et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator contient trois enroulements couplés en étoile ou en triangle et sont alimentés par une tension triphasée de tensions. Il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine (Théorème de FERRARIS). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est :

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

#### III.4.2-a Equations électriques dans repère (*abc*)

Nous pouvons écrire, en respectant les conventions relatives aux récepteurs, les équations des tensions aux bornes des enroulements sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

$i_{s,r(a,b,c)}$  : Courants au stator et au rotor de la machine.

$\phi_{s,r(a,b,c)}$  : Flux propres circulant au stator et au rotor de la machine.

$V_{s,r(a,b,c)}$  : Tensions simples triphasées au stator et au rotor de la machine.

$R_s$  : Résistance de l'enroulement statorique.

$R_r$  : Résistance de l'enroulement rotorique.

#### III.4.2-b Equations magnétiques le repère (*abc*)

Le flux total embrassé par une phase résulte de l'action de son propre courant et des interactions avec les courants des autres phases. Nous pouvons exprimer les équations matricielles des flux recensés au stator et rotor sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

avec les quatre matrices d'inductance :

$[L_s]$  : matrice des coefficients d'inductance statorique,

$[L_r]$  : matrice des coefficients d'inductance rotorique.

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

$L_s$  : coefficient d'inductance propre d'une phase statorique,

$M_s$  : coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statoriques,

$L_r$  : coefficient d'inductance propre d'une phase rotorique,

$M_r$  : coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques,

$[M_{sr}]$  : matrice des coefficients d'inductance mutuelle du rotor sur le stator,

$[M_{rs}]$  : matrice des coefficients d'inductance mutuelle du stator sur le rotor,

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\Pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Le coefficient  $M_{sr}$  représente la valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre phase rotorique et statorique. Les matrices  $[M_{sr}]$  et  $[M_{rs}]$  sont dites circulantes, en effet chaque ligne se déduit de la précédente par permutation circulaire.

En remplaçant les relations (III.4) et (III.5) dans (III.2) et (III.3) on obtient les expressions matricielles suivantes :

$$\begin{cases} [V_s] = [r_s] \cdot [i_s] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_s]) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

### III.4.2-c Couple électromagnétique

L'expression générale du couple électromagnétique est donné par :

$$[C_{em}] = \frac{1}{2} [i]^t \left[ \frac{\delta}{\delta\theta} [L] \right] [i] \quad (\text{III.7})$$

Avec :  $[i] = \begin{bmatrix} i_{sa} & i_{sb} & i_{sc} & i_{ra} & i_{rb} & i_{rc} \end{bmatrix}^T$  \$

Et :

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

L'équation mécanique découlée :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (\text{III.8})$$

où :

$\Omega$  : Vitesse mécanique de la machine.

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

$C_r$  : Couple résistant.

$J$  : Moment d'inertie.

Nous constatons la complexité des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

### III.4.3 Transformation de Park

L'application de la transformation de Park est obtenue en substituant, les enroulements réels par des enroulements actifs d'axes orthogonaux  $d$  et  $q$ . Par conséquent, deux repères tournant ( $d$ - $q$ ) sont définis respectivement, l'un statorique et l'autre rotorique, pour lesquels l'angle de Park  $\theta$  est remplacé par  $\theta_s$  pour le stator et par  $\theta_r$  pour le rotor [29]

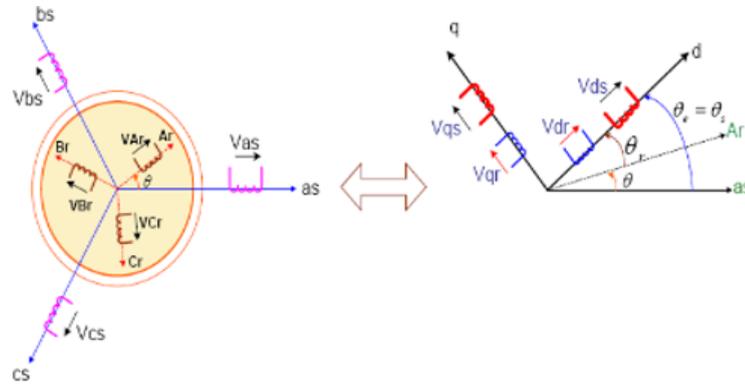


FIGURE III.7 – Principe de la transformation de Park[9].

Les angles  $\theta_r$  et  $\theta_s$  sont liés par la relation suivante :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \quad (\text{III.9})$$

Ce qui donne après dérivation par rapport au temps :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{III.10})$$

On utilise la transformation de Park qui conserve la puissance instantanée.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos(\psi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\psi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\psi) & -\sin(\psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\psi + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

La transformation inverse est définie par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\psi - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\psi + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix}$$

### III.5 Mise en équation dans le plan ( $d-q$ )

Les équations des tensions statoriques dans le référentiel ( $d-q$ ) :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d(\phi_{ds})}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d(\phi_{qs})}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Les équations des tensions rotoriques dans le référentiel ( $d-q$ ) :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d(\phi_{dr})}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d(\phi_{qr})}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Les équations des flux statorique dans le référentiel ( $d-q$ ) :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M_{sr} i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M_{sr} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Les équations des flux rotorique dans le référentiel ( $d-q$ ) :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_s \cdot i_{dr} + M_{sr} i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_s \cdot i_{qr} + M_{sr} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Les équations du couple électromagnétique

La transformation de Park modifié conservant la puissance instantanée invariante, son expression dans le référentiel ( $d-q$ ) peut être mise sous la forme suivante :

$$P_e m = [V_{s(a,b,c)}]^T \cdot [i_{s(a,b,c)}] + [V_{r(a,b,c)}]^T \cdot [i_{r(a,b,c)}] = [V_{s(d,q)}]^T \cdot [i_{s(d,q)}] + [V_{r(d,q)}]^T \cdot [i_{r(d,q)}] \quad (\text{III.17})$$

En développant le second membre, en remplaçant les composantes directes et en quadrature des tensions, on obtient l'expression suivante :

$$\begin{aligned} P_e m = R_s \cdot [i_{ds}^2 + i_{qs}^2] + R_r \cdot [i_{dr}^2 + i_{qr}^2] + \left[ \frac{d\phi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} i_{qs} \right] + \left[ \frac{d\phi_{dr}}{dt} i_{dr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} i_{qr} \right] \\ + \left[ (\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \right] + \left[ (\phi_{dr} \cdot i_{qr} - \phi_{qr} \cdot i_{dr}) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \right] \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

Cette expression comporte trois termes représentant respectivement :

La puissance dissipée en perte joule :

$$R_s \cdot [i_{ds}^2 + i_{qs}^2] + R_r \cdot [i_{dr}^2 + i_{qr}^2]$$

La puissance électromagnétique stockée dans le champ magnétique, c'est donc une puissance réactive :

$$\left[ \frac{d\varphi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} i_{qs} \right] + \left[ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} i_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} i_{qr} \right]$$

La puissance électrique transformée en puissance mécanique, couramment appelée puissance électromagnétique  $P_{em}$  :

$$\left[ (\varphi_{ds} \cdot \dot{i}_{qs} - \varphi_{qs} \dot{i}_{ds}) \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \right] + \left[ (\varphi_{dr} \cdot \dot{i}_{qr} - \varphi_{qr} \dot{i}_{dr}) \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \right]$$

On détermine le couple électromagnétique à partir de l'équation suivante :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} \quad (\text{III.23})$$

À partir de la relation III.19 on déduit l'expression de couple électromagnétique par :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{ds} \cdot \dot{i}_{qs} - \varphi_{qs} \cdot \dot{i}_{ds}) \quad (\text{III.24})$$

On peut établir d'autre expression selon les variables choisies :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{dr} \cdot \dot{i}_{qr} - \varphi_{qr} \cdot \dot{i}_{dr}) \quad (\text{III.25})$$

$$C_{em} = p \cdot M_{sr} \cdot (\dot{i}_{qs} \cdot \dot{i}_{dr} - \dot{i}_{ds} \cdot \dot{i}_{qr}) \quad (\text{III.26})$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot (\varphi_{qs} \cdot \dot{i}_{dr} - \varphi_{ds} \cdot \dot{i}_{qr}) \quad (\text{III.27})$$

$$C_{em} = p \cdot \frac{M_{sr}}{L_r} \cdot (\varphi_{dr} \cdot \dot{i}_{qs} - \varphi_{qr} \cdot \dot{i}_{ds}) \quad (\text{III.28})$$

D'où l'équation mécanique complète est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega$$

d'où :

$J$  : représente le moment d'inertie ;

$f$  : représente le coefficient de frottement visqueux ;

$C_r$  : est le couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine.

Les équations des puissances active et réactive dans un repère diphasé

Les puissances active et réactive de stator :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Les puissances active et réactive du rotor :

$$\begin{cases} P_r = V_{dr} \cdot i_{dr} + V_{qr} \cdot i_{qr} \\ Q_r = V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

### III.5.1 Choix du référentiel

On peut distinguer trois choix de référentiel possible :

– Référentiel lié au stator :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (\text{III.32})$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées  $\omega_s = 0$

– Référentiel lié au rotor :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (\text{III.33})$$

Ce référentiel est caractérisé par  $\omega_r = 0$

Ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

– Référentiel lié au champ tournant :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{III.34})$$

Ce référentiel est caractérisée par :  $\omega_r = \omega_s - \omega$

Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines.

Dans ce qui suit, nous nous sommes intéressés dans notre étude à choisir le référentiel lié au champ tournant.

### III.5.2 Représentation d'état dans le référentiel de Park

La représentation dans l'espace d'état est un système de la forme :

$$\begin{cases} \dot{[X]} = \frac{d[X]}{dt} = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \\ [Y] = [C] \cdot [X] \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

Où  $[X]$  est le vecteur d'état,  $[U]$  le vecteur de commande,  $[A]$  la matrice de transition ou d'état qui caractérise la dynamique du moteur,  $[B]$  la matrice d'application des commandes,  $[Y]$  le vecteur de sortie et  $[C]$  la matrice d'observation [34].

Le modèle d'état de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

– Pour les variables de commandes :  $V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$ , d'où :

$$\mathbf{u} = [V_{ds} \quad V_{qs} \quad V_{dr} \quad V_{qr}]^T$$

– Pour les variables d'état :  $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega$  soit :

$$\mathbf{\hat{x}} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr} \quad \omega]^T$$

Les variables de sortie pouvant être la vitesse, la position, le couple, les flux, les courants ou une combinaison de celles-ci.

On obtient après simplifications les équations d'état suivantes [36],[39], [?], [29] :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -a_1 \cdot i_{ds} + (a \cdot \omega + \omega_s) \cdot i_{qs} + a_3 \cdot i_{dr} + a_5 \cdot \omega \cdot i_{qr} + b_1 \cdot V_{ds} - b_3 \cdot V_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -(a \cdot \omega + \omega_s) \cdot i_{ds} - a_1 \cdot i_{qs} - a_5 \cdot \omega \cdot i_{dr} + a_3 \cdot i_{qr} + b_1 \cdot V_{qs} - b_3 \cdot V_{qr} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = a_4 \cdot i_{ds} - a_6 \cdot i_{qs} - a_2 \cdot i_{dr} + (\omega_s - \frac{\omega}{\sigma}) \cdot i_{qr} - b_3 \cdot V_{ds} + b_2 \cdot V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = a_6 \cdot \omega \cdot i_{ds} + a_4 \cdot i_{qs} - (\omega_s - \frac{\omega}{\sigma}) \cdot i_{dr} - a_2 \cdot i_{qr} - b_3 \cdot V_{qs} + b_2 \cdot V_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (C_r - p \cdot M_{sr} (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr})) - \frac{f}{J} \cdot \omega \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

en définissant les coefficients suivant :

$$\begin{aligned} a &= \frac{1 - \sigma}{\sigma} & a_1 &= \frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} & a_2 &= \frac{R_r}{\sigma \cdot L_r} & a_3 &= \frac{R_r \cdot M_{sr}}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} & a_4 &= \frac{R_s \cdot M_{sr}}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \\ a_5 &= \frac{M_{sr}}{\sigma \cdot L_s} & a_6 &= \frac{M_{sr}}{\sigma \cdot L_r} & b_1 &= \frac{1}{\sigma \cdot L_s} & b_2 &= \frac{1}{\sigma \cdot L_r} & b_3 &= \frac{M_{sr}}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \end{aligned}$$

$\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s \cdot L_r}$  : Coefficient de dispersion de Blondel.

Cette représentation d'état n'étant pas unique pour un système donné, on dispose donc de plusieurs choix pour le vecteur d'état qui dépendent de l'objectif tracé. Dans le cadre de ce travail, une commande en tension de la MADA est envisagée avec un contrôle vectoriel par orientation du flux statorique, dans cette optique les choix suivants ont été privilégiés.

## III.6 Modélisation de l'alimentation de la MADA

### III.6.1 Modèle de l'onduleur de tension à deux niveaux

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui transforment une puissance électrique d'une forme continue en une puissance en forme alternative. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoidale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée avec une fréquence désirée. Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture.

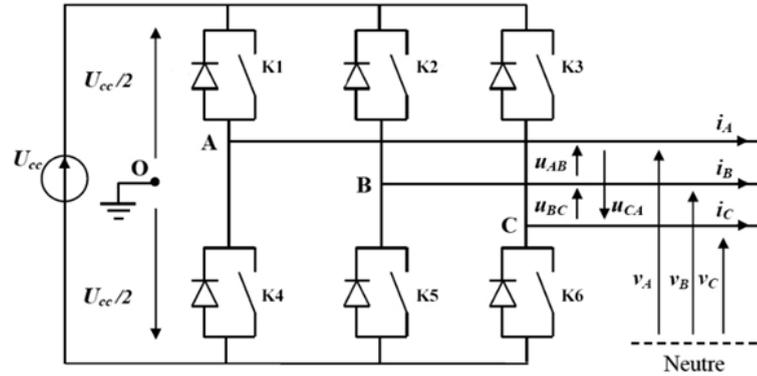


FIGURE III.8 – Schéma d'onduleur de tension à deux niveau

Afin d'éviter le court-circuit de la source de tension continue, les commandes des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

On considère un convertisseur idéal, d'où les hypothèses suivants [29] :

- la commutation des composants est instantanée,
- les chutes de tension à leurs bornes sont négligeables,
- les temps morts négligés,
- la charge est triphasée équilibrée et couplée en étoile avec point neutre isolé.

Les tensions composées sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} \\ u_{BC} = u_{BO} - u_{CO} \\ u_{CA} = u_{CO} - u_{AO} \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

Au niveau de la charge, les relations donnant les tensions simples sont :

$$\begin{cases} u_{AB} = v_A - v_B \\ u_{BC} = v_B - v_C \\ u_{CA} = v_C - v_A \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

Et en effectuant les différences membre à membre, on obtient :

$$\begin{cases} u_{AB} - u_{CA} = 2.v_A - (v_B + v_C) \\ u_{BC} - u_{AB} = 2.v_B - (v_A + v_C) \\ u_{CA} - u_{BC} = 2.v_C - (v_A + v_B) \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

Sachant que les tensions  $v_A, v_B, v_C$  forment un système triphasé équilibré, on peut écrire :

$$\begin{cases} u_{AB} - u_{CA} = 3.v_A \\ u_{BC} - u_{AB} = 3.v_B \\ u_{CA} - u_{BC} = 3.v_C \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

D'où les nouvelles expressions des tensions simples :

$$\begin{cases} v_A = \frac{1}{3} \cdot (u_{AB} - u_{CA}) \\ v_B = \frac{1}{3} \cdot (u_{BC} - u_{AB}) \\ v_C = \frac{1}{3} \cdot (u_{CA} - u_{BC}) \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

Les tensions simples en fonction des tensions mesurées entre les points  $A, B, C$  et le point milieu fictif  $O$  sont alors donnée par :

$$\begin{cases} v_A = \frac{1}{3} \cdot (2.v_{AO} - v_{BO} - v_{CO}) \\ v_B = \frac{1}{3} \cdot (-v_{AO} + 2.v_{BO} - v_{CO}) \\ v_C = \frac{1}{3} \cdot (-v_{AO} - v_{BO} + 2.v_{CO}) \end{cases} \quad (\text{III.42})$$

On obtient enfin la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{AO} \\ v_{BO} \\ v_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{III.43})$$

Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux interrupteurs supposés parfaits et fonctionnant de façon complémentaire, on peut par conséquent associer à chacun d'eux une valeur binaire de commande  $S_i$ , avec ( $i = A; B; C$ ) et telle que :

- $S_i = +1$  , si l'interrupteur du haut est fermé et l'interrupteur du bas ouvert ;
- $S_i = -1$  , si l'interrupteur du haut est ouvert et l'interrupteur du bas fermé.

Ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} v_{AO} \\ v_{BO} \\ v_{CO} \end{bmatrix} = \frac{U_{cc}}{2} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{III.44})$$

Enfin le convertisseur est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \frac{U_{cc}}{2} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{III.45})$$

Les tensions simples délivrées par l'onduleur seront obtenues directement à partir des états des grandeurs de commande  $S_A, S_B$  et  $S_C$  qui représentent les signaux de commande des interrupteurs. Les états de ces grandeurs seront aussi déterminés par la stratégie de commande envisagée.

La configuration de puissance restant identique pour les fonctionnements en onduleur et en redresseur, le modèle mathématique obtenu reste valide pour les deux modes de fonctionnement.

### III.6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion

#### III.6.2-a Principe de la MLI sinus - triangle

Nous nous sommes intéressés à la technique d'origine analogique dite sinus triangle. Elle consiste à comparer entre elles :

- une onde de référence, la modulatrice, de forme sinusoïdale et de fréquence  $f$ ,
- une onde de modulation, la porteuse, en général triangulaire, de haute fréquence  $f_p$ , tout en respectant l'inégalité sur les fréquences :  $f_p \gg f$

Les instants de fermeture des interrupteurs sont définis par les intersections entre les deux ondes, quant à la fréquence de commutation, elle est déterminée par celle de la porteuse.

La figure III.9 donne un exemple de chronogramme pour une commande MLI sinus-triangle monophasée sur une période de l'onde de modulation.

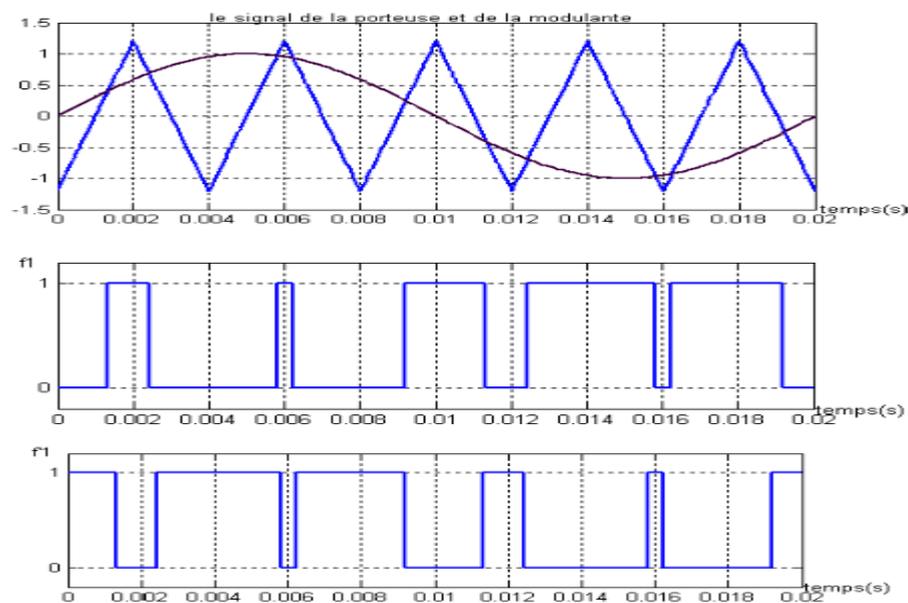


FIGURE III.9 – Commande MLI par modulation « sinus-triangulaire ».

Cette technique consiste à comparer entre elles :

- Trois ondes de référence, les modulatrices, de forme sinusoïdale, de basse fréquence  $f$  et déphasées de  $120^\circ$ .
- Et une onde, en général triangulaire, la porteuse de haute fréquence  $f_p$ . La valeur du rapport des fréquences entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

### III.6.2-b Caractéristiques de la MLI sinus-triangle

La tension de référence étant sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande :

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

$$m = \frac{f_P}{f} \quad (\text{III.46})$$

- Le coefficient de réglage «  $r$  » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence de référence ( $V_m$ ) et celle de la porteuse ( $U_p$ ) :

$$r = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{III.47})$$

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

### III.6.2-c Modèle de la MLI sinus-triangle triphasé

Le modèle de cette commande nécessite la production de trois signaux  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$  de type MLI sinus-triangle décalés de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre.

Equations des modulatrices :

$$\begin{aligned} v_{mA} &= \hat{V}_m \cdot \sin(2 \cdot \Pi \cdot f \cdot t) \\ v_{mB} &= \hat{V}_m \cdot \sin(2 \cdot \Pi \cdot f \cdot t - \frac{2 \cdot \Pi}{3}) \\ v_{mC} &= \hat{V}_m \cdot \sin(2 \cdot \Pi \cdot f \cdot t - \frac{4 \cdot \Pi}{3}) \end{aligned} \quad (\text{III.48})$$

Equation de la porteuse :

$$v_P = \begin{cases} \hat{V}_P \cdot (-1 + 4 \cdot \frac{t}{T_P}) \text{sit} \in [0, \frac{T_P}{2}] \\ \hat{V}_P \cdot (3 - 4 \cdot \frac{t}{T_P}) \text{sit} \in [\frac{T_P}{2}, T_P] \end{cases} \quad (\text{III.49})$$

Etats des interrupteurs :

$$S_i = \begin{cases} +1 \text{si}(v_{mi} - v_P) \geq 0 \\ -1 \text{si}(v_{mi} - v_P) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.50})$$

Les paramètres de l'onduleur sont citées dans l'annexe A. On trouvera dans l'annexe C un modèle de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux équipé d'une commande MLI sinus-triangle, définit à partir des équations précédentes et à implanté dans l'environnement MATLAB/Simulink.

### III.7 Contrôle indépendant des puissances active et réactive

La commande vectorielle permet un contrôle indépendant des puissances actives et réactives délivrée par la MADA, en commandant séparément le couple électromagnétique et le flux de la machine asynchrone. Son principe est basé sur le choix d'un repère de référence lié aux flux que l'on désire orienter.

#### III.7.1 Technique d'orientation du flux statorique

Dans le cadre de ce travail, nous avons envisagé d'établir une commande vectorielle par orientation du flux statorique sur l'axe  $d$ .

Nous avons vu que le couple en régime transitoire s'exprime dans le repère  $d$ - $q$  comme un produit croisé de courants ou de flux. Si nous reprenons l'écriture :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \cdot (\varphi_{qs} \cdot i_{dr} - \varphi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{III.51})$$

On s'aperçoit que si l'on élimine le deuxième produit ( $\varphi_{qs} \cdot i_{dr}$ ), alors le couple ressemblerait fort à celui d'une MCC.

Il suffit, pour ce faire, d'orienter le repère  $d$ - $q$  de manière à annuler la composante de flux en quadrature. C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct ( $d$ ) et donc d'avoir :

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = 0 \\ \varphi_{ds} = \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.52})$$

La figure III.10 illustre le principe de l'orientation du flux statorique.

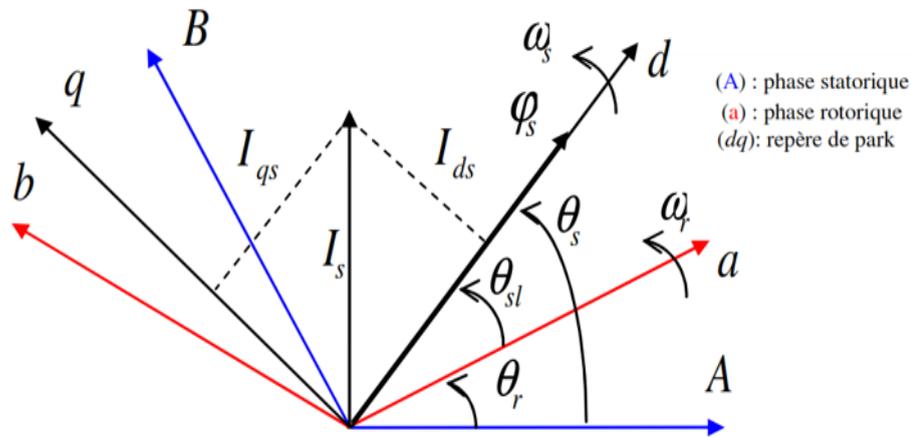


FIGURE III.10 – Principe de l'orientation du flux statorique.

Le couple électromagnétique s'écrit alors :

$$C_{em} = p \frac{M_{sr}}{L_s} i_{dr} \varphi_{ds} \quad (\text{III.53})$$

L'équation (III.15) des flux statoriques devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M_{sr} i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M_{sr} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.54})$$

Si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne [36], [12], les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.55})$$

En tenant compte l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (\text{III.56})$$

A partir de l'équation III.54, on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M_{sr}}{L_s} i_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{M_{sr}}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.57})$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.58})$$

Ou bien encore, d'après l'équation III.56 par :

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{qs} \\ Q_s = V_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.59})$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation III.57 :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.60})$$

A partir de l'équations III.55, nous obtenons l'expression du flux statorique suivante :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III.61})$$

Après simplification l'expression des puissances statoriques deviendra :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{III.62})$$

En remplaçant dans l'équation III.16 des flux rotoriques, les courants statoriques par l'expression III.62 on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.63})$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui lui seront appliquées :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.64})$$

Les équations précédentes permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par la figure III.11 :

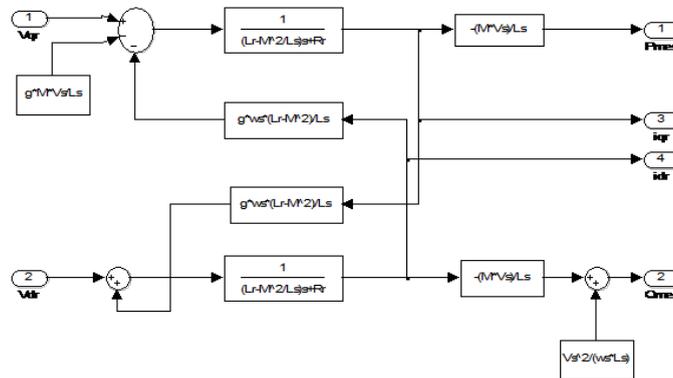


FIGURE III.11 – Modèle avec commande vectorielle.

A partir du modèle avec commande vectorielle on peut dimensionner les régulateurs PI dont il ya deux méthodes pour effectuer la commande en puissance de cette machine, la première approche s'appelle méthode directe des puissances et la deuxième méthode indirecte des puissances (en boucle ouverte ou en boucle fermée).

### III.8 Commande directe

La méthode direct consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives statoriques. Cette approche est appelée méthode directe car les régulateurs de puissance commandent directement les tensions rotoriques de la machine. Ainsi, on obtient un modèle plus simple à mettre en oeuvre permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe.

Le principe de la commande directe des puissances repose sur la mesure des tensions et courants du réseau mesurées au stator de la machine afin d'avoir une action directe sur les puissances actives et réactive.

La figure III.12 montre le schéma bloc de la commande directe des puissances de la MADA.

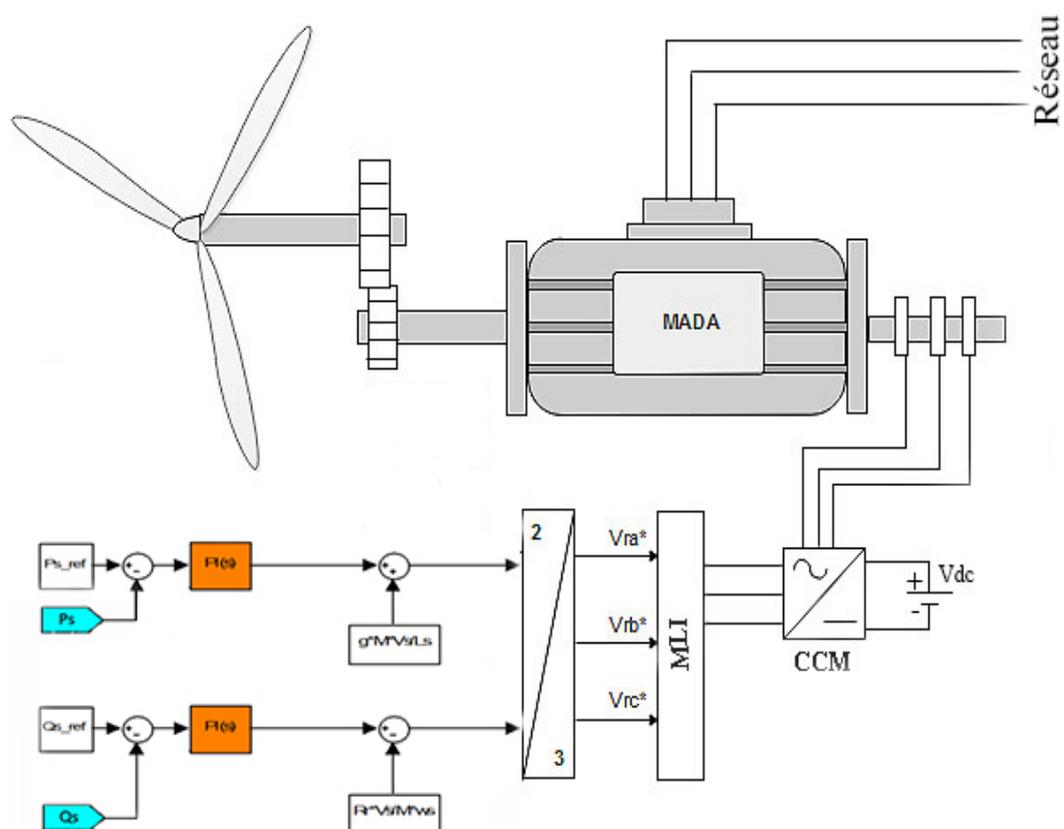


FIGURE III.12 – Commande directe des puissances de la MADA

### III.9 Commande indirecte en boucle ouvert

La commande indirecte en boucle ouvert est essentiellement basée sur l'hypothèse de compenser les termes de couplages, elle consiste à asservir non plus les puissances statoriques mais plutôt indirectement les courants rotoriques comme retour sur le comparateur d'axe  $d$  et  $q$ .

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} i_{qr\_ref} = -\frac{L_s}{M_{sr}V_s}P_{s\_ref} \\ i_{dr\_ref} = -\frac{L_s}{M_{sr}V_s}Q_{s\_ref} + \frac{V_s}{M_{sr}\omega_s} \end{cases} \quad (III.65)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive statoriques, on aboutit alors au figure III.13 qui présente la structure de commande indirecte en boucle ouvert.

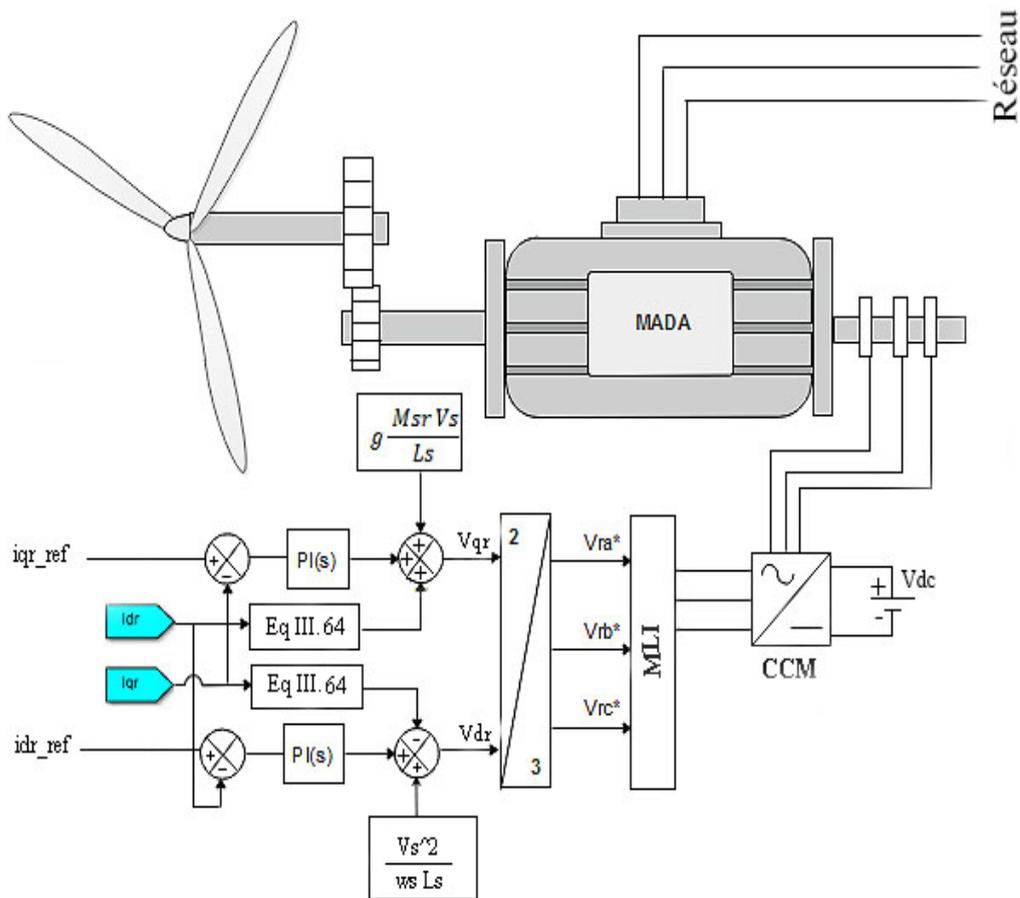


FIGURE III.13 – Commande indirecte des puissances de la MADA en boucle ouvert.

## III.10 Résultats de simulation en boucle ouvert

### III.10.1 Profils de poursuite, de régulation et robustesse

Nous avons réalisé plusieurs séries de simulations afin d'évaluer les performances de la commande indirecte des puissances de la machine asynchrone à double alimentation en boucle ouvert à base de régulateur PI.

Dans le présent chapitre, ces simulations ont trois motivations principales :

- l'examen des performances de la génératrice asynchrone à double alimentation, son association avec le convertisseur d'électronique de puissance (onduleur) et la commande indirecte des puissances en boucle ouvert reposant sur la stratégie de commande à base de réguler PI par l'orientation du flux statorique, sur des consignes des courants rotoriques prédéfinies ;
- l'analyse du comportement du processus à commander face aux variations des conditions de fonctionnement pour la consigne de vitesse passant de 144 rad/s à 155 rad/s à l'instant  $t = 4$  s ;
- la vérification de la robustesse vis à vis des variations paramétriques de la génératrice et plus particulièrement celles des résistances statorique et rotorique, les inductances statorique et rotorique sont montrées pour des variations de 100%, 120% et 140% de sa valeur nominale respectivement.

Aussi nous proposons deux benchmarks pour évaluer les performances :

- Le premier benchmark a pour objectif d'analyser des performances en régulation pour une vitesse d'entraînement variable passe de 144 rad/s à 155 rad/s à l'instant  $t = 4$  s, le courant rotorique d'axe  $d$  de référence imposée passant de 0 A à 10 A à l'instant  $t = 2$  s ;
- Le deuxième benchmark pour le courant rotorique d'axe  $q$  de référence imposée passant de 5 A à 15 A à l'instant  $t = 1$  s et de 15 A à 25 A à l'instant  $t = 3$  s.

### III.10.2 Résultats des simulations

Les résultats obtenus pour les différents tests de simulation réalisés, pour la génératrice asynchrone à double alimentation et l'onduleur équipé de la commande indirecte des puissances en boucle ouvert à base de régulateur PI développée dans le présent chapitre sont exposés respectivement sur :

- la figure III.14 pour les essais de poursuite et de régulation ;
- la figure III.16 pour les essais de robustesse vis à vis des variations des résistances ;
- la figure III.15 pour les essais de robustesse vis à vis des variations des inductances.

Les conditions de simulations, les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation et les paramètres de l'onduleur sont citées dans l'annexe A. L'ensemble des modèles de simulation a été simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink relatif à ce chapitre sont illustrés dans l'annexe C.

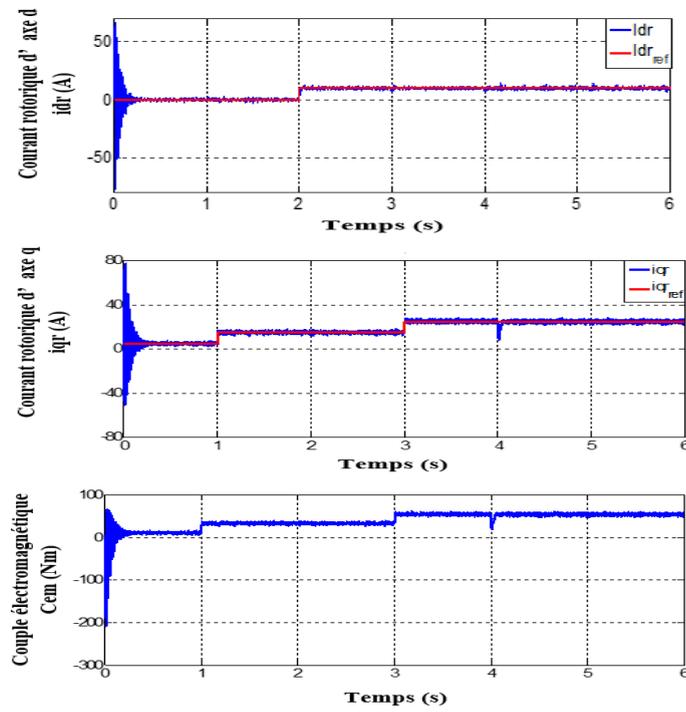


FIGURE III.14 – Tests de poursuite et de régulation.

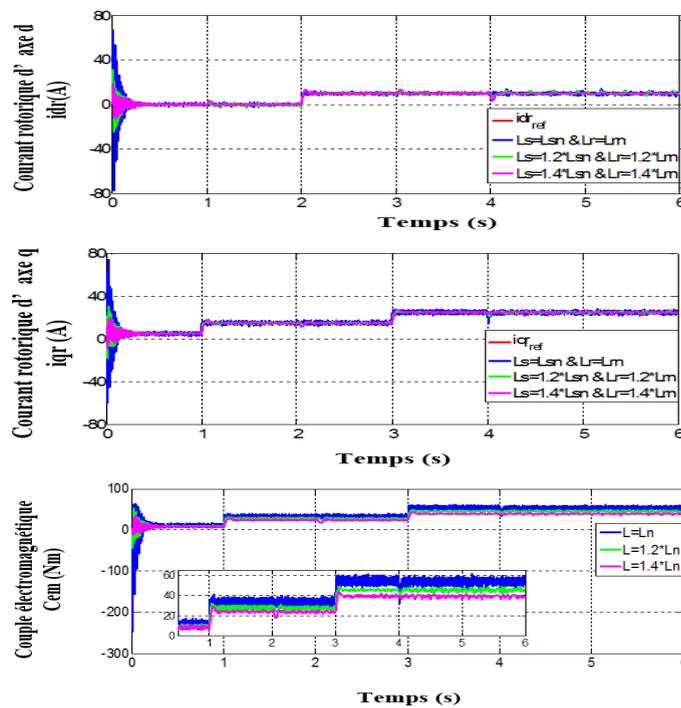


FIGURE III.15 – Tests de robustesse pour les inductances statoriques et rotoriques.

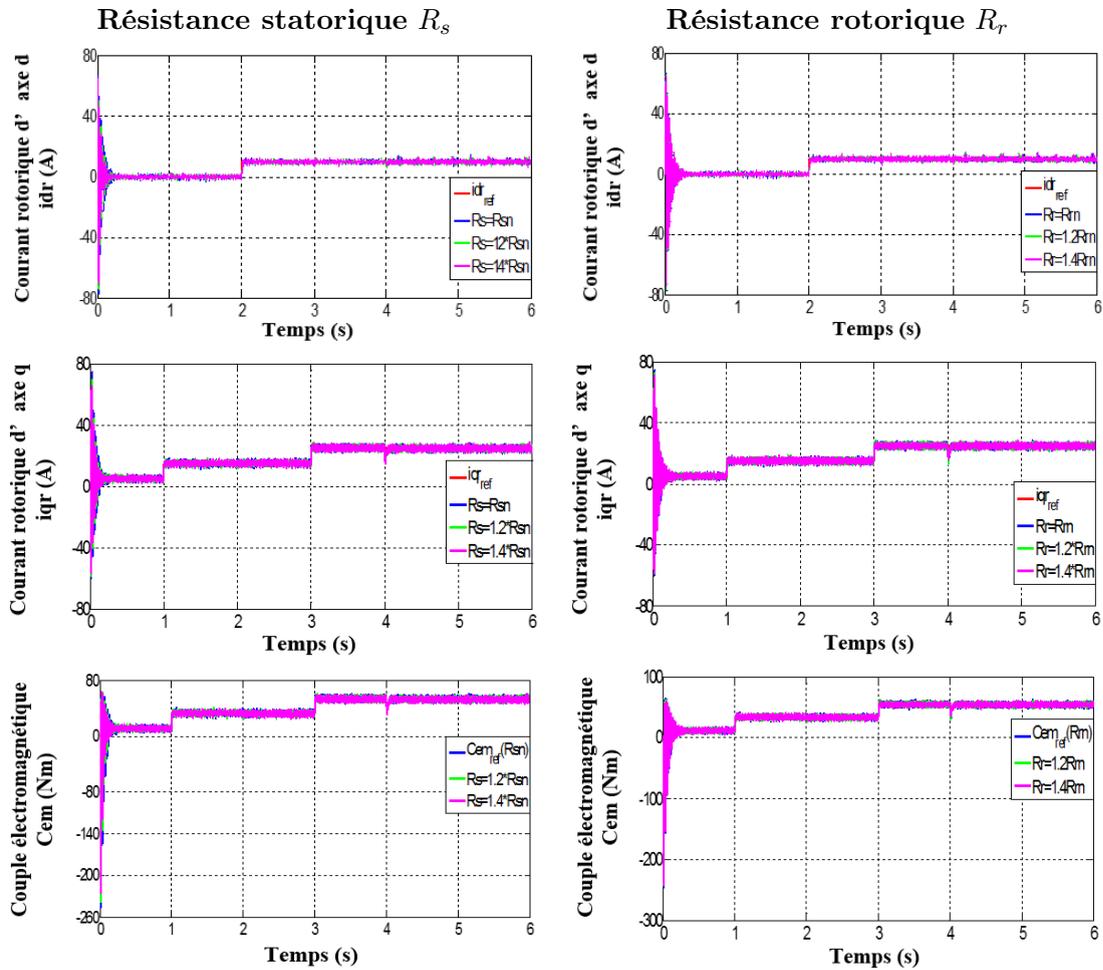


FIGURE III.16 – Tests de robustesse pour les résistances statoriques et rotoriques.

### III.10.3 Interprétation des résultats

Pour analyser et évaluer les performances de la stratégie de commande indirecte des puissances de la MADA en boucle ouvert à base de régulateur PI pour le contrôle des courants rotoriques, nous avons effectué des tests en poursuite et en régulation et un test de robustesse face aux variations paramétriques de la machine.

Pour les tests de poursuite et de régulation, nous constatons que les grandeurs des courants mesurées suivent bien leur trajectoire de référence sans dépassement et sans erreur statique en régime permanent. Puis, Lors de la variation du courant rotorique quadratique  $q$  à l'instant  $t=1s$  et  $t=3s$  et du courant rotorique direct  $d$  à l'instant  $t=2s$ . Ensuite, l'application d'une perturbation externe due au variation brusque de vitesse à l'instant  $t=4s$ , en remarque que les courants rotoriques et le couple électromagnétique sont affectées avec un temps de rejet de perturbation relativement faible.

Pour les tests de robustesse face aux variations paramétriques internes, la variation des résistances statorique et rtorique n'ont que très peu d'influence sur les courants rotorique et

le couple électromagnétique, par contre la variation des inductances statorique et rotorique influent non seulement les courants rotorique, mais également sur le couple électromagnétique est affectée, aussi bien lors de la poursuite que lors de l'application des perturbations.

### III.11 Commande indirecte en boucle fermé

La commande indirecte en boucle fermé est essentiellement basée sur l'hypothèse de compenser les termes de couplages, elle consiste à mettre deux boucles de régulation sur chaque axe  $d$  et  $q$ , une boucle interne correspondant aux courants rotoriques et l'autre boucle externe correspondant aux puissances statoriques à base de régulateur PI.

La figure III.17 présente la structure de commande indirecte en boucle fermé.

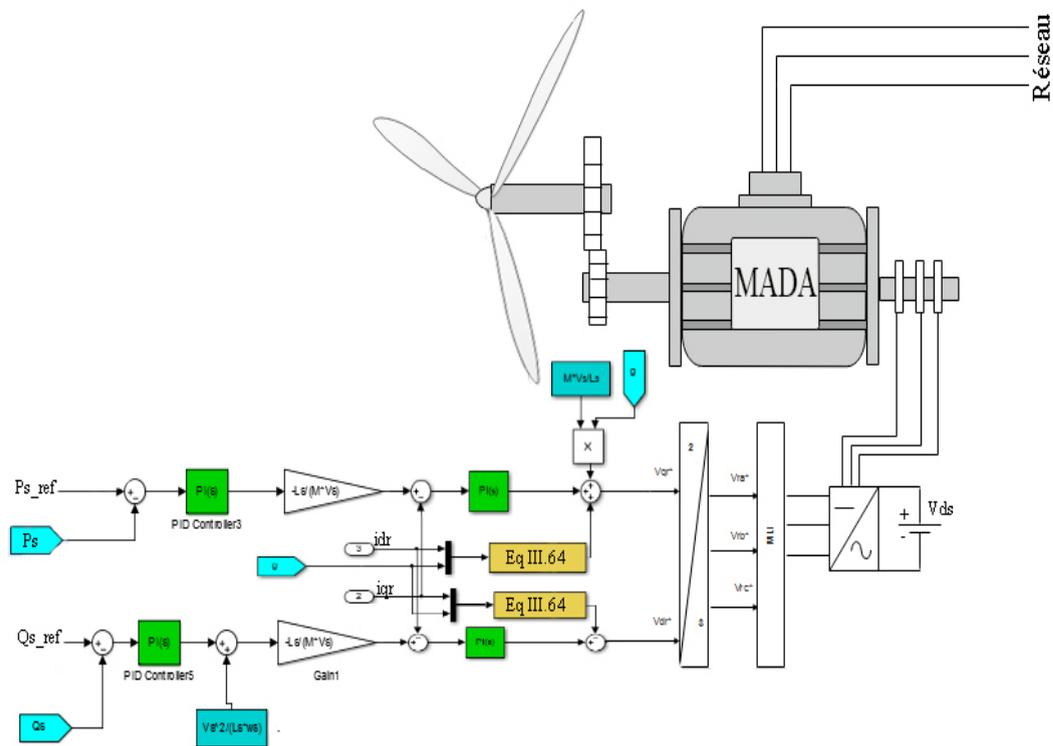


FIGURE III.17 – Commande indirecte des puissances de la MADA en boucle fermé

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toutefois, 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. La synthèse de ces régulateurs est détaillée dans l'annexe.

## III.12 Résultats de simulation en boucle fermé

### III.12.1 Profils de poursuite, de régulation et robustesse

Nous avons réalisé plusieurs séries de simulations afin d'évaluer les performances de la commande indirecte des puissances de la machine asynchrone à double alimentation en boucle fermé.

Dans le présent chapitre, ces simulations ont trois motivations principales :

- l'examen des performances de la génératrice asynchrone à double alimentation, son association avec le convertisseur d'électronique de puissance (onduleur) et la commande indirecte des puissances en boucle fermé reposant sur la stratégie de commande à base de réguler PI par l'orientation du flux statorique, sur des consignes des puissances statoriques prédéfinies ;
- l'analyse du comportement du processus à commander face aux variations des conditions de fonctionnement pour la consigne de vitesse passant de 144 rad/s à 155 rad/s à l'instant  $t = 4$  s ;
- la vérification de la robustesse vis à vis des variations paramétriques de la génératrice et plus particulièrement celles des résistances statorique et rotorique, les inductances statorique et rotorique sont montrées pour des variations de 100%, 120% et 140% de sa valeur nominale respectivement.

Aussi nous proposons deux benchmarks pour évaluer les performances :

- Le premier benchmark a pour objectif d'analyse des performances en régulation pour une vitesse d'entraînement variable passe de 144 rad/s à 155 rad/s à l'instant  $t = 4$  s, la puissance active statorique de référence imposée passant de 0 W à -2000 W à l'instant  $t = 1$  s et de -2000 W à -7000 W à l'instant  $t = 3$  s. La puissance active est imposée négative ce qui signifie que la MADA produit de l'énergie et la fournit au réseau ;
- Le deuxième benchmark pour la consigne de puissance réactive est quant à elle maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à améliorer la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau.

### III.12.2 Résultats des simulations

Les résultats obtenus pour les différents tests de simulation réalisés, pour la génératrice asynchrone à double alimentation et l'onduleur équipé de la commande indirecte des puissances en boucle fermé développée dans le présent chapitre sont exposés respectivement sur :

- la figure III.18 pour les essais de poursuite et de régulation ;
- la figure III.19 pour les essais de robustesse vis à vis des variations des résistances ;
- la figure III.20 pour les essais de robustesse vis à vis des variations des inductances.

L'ensemble des modèles de simulation a été simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink relatif à ce chapitre sont illustrés dans l'annexe C.

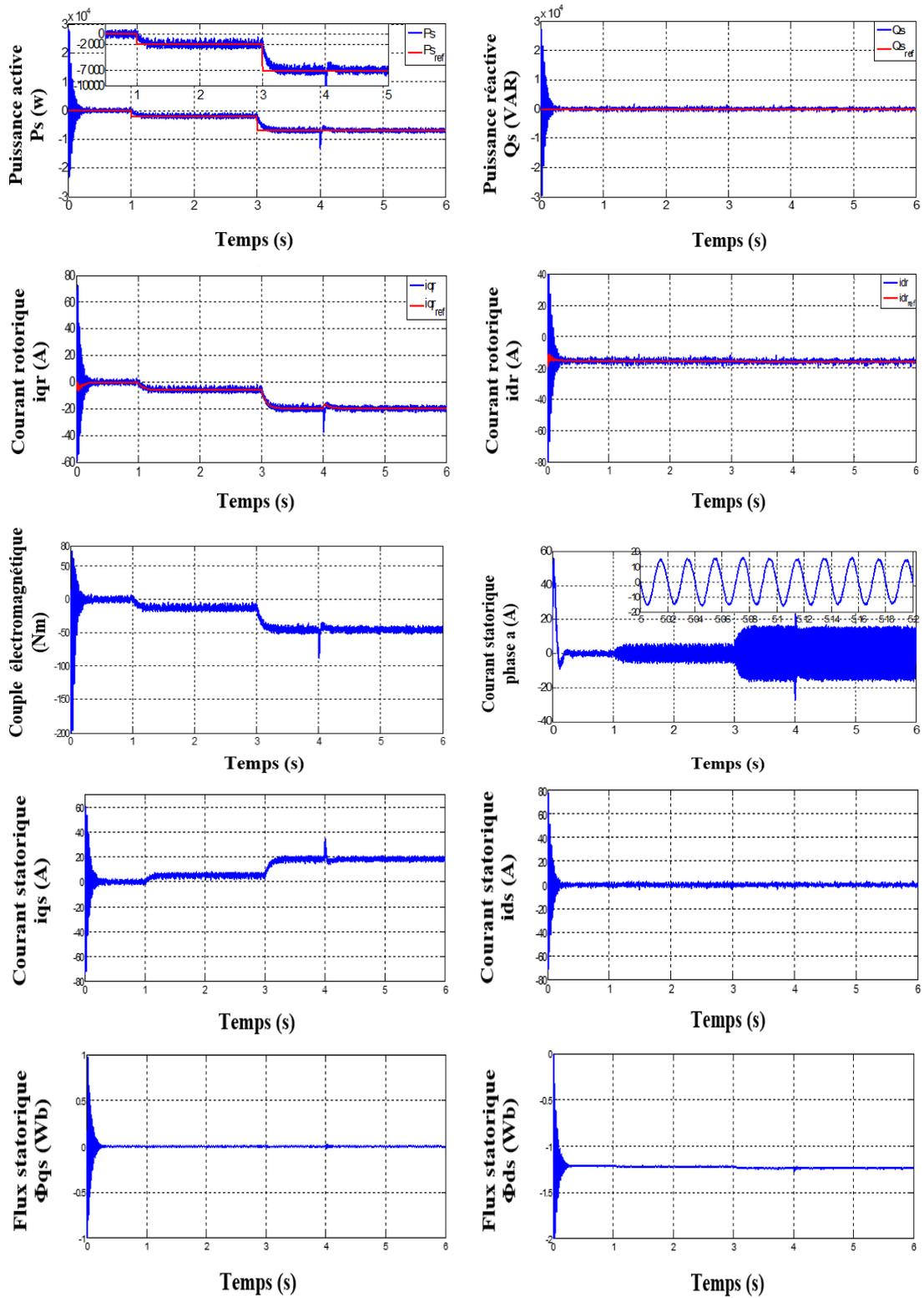


FIGURE III.18 – Tests de poursuite et de régulation.

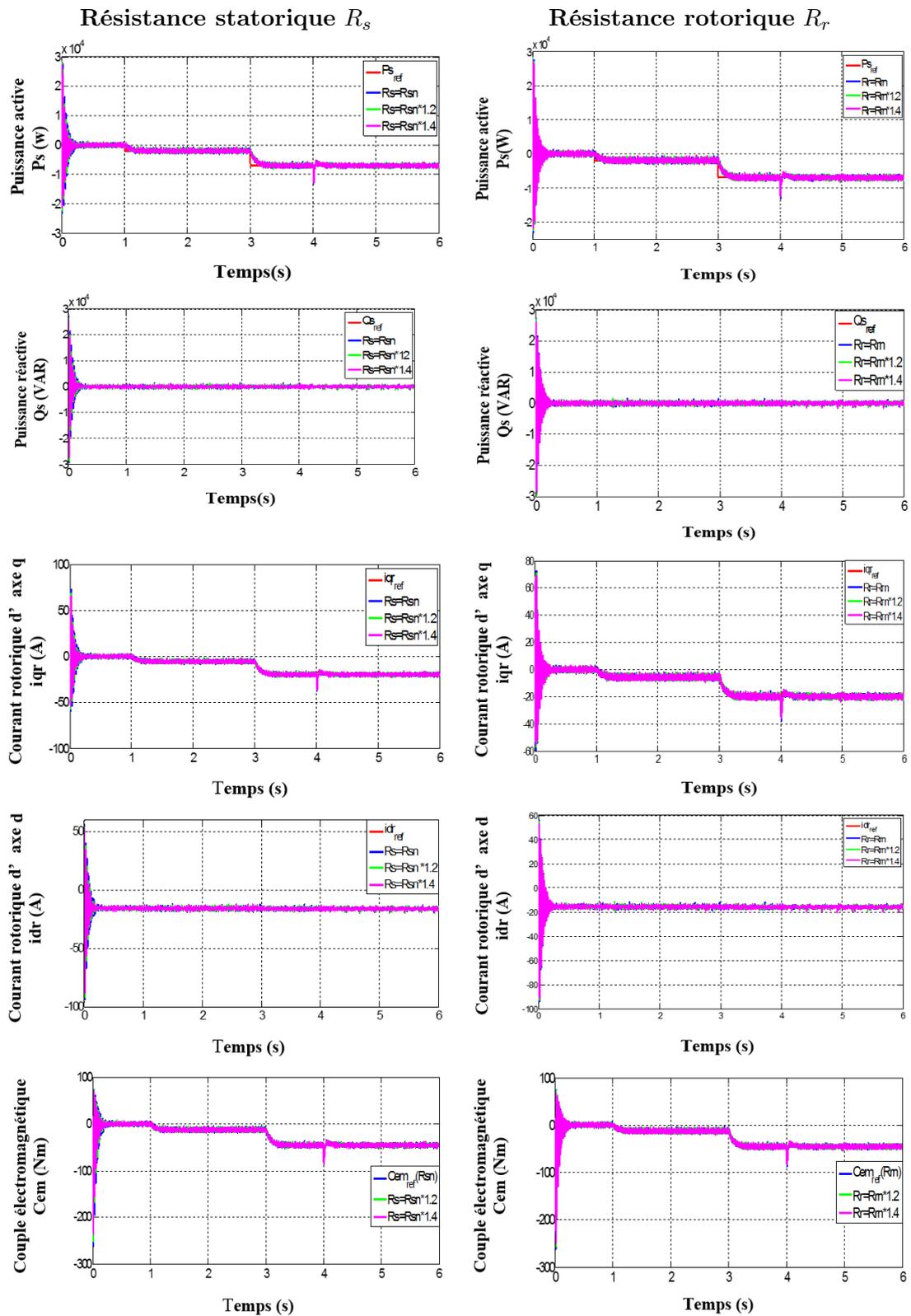


FIGURE III.19 – Tests de robustesse pour les résistances statoriques et rotoriques.

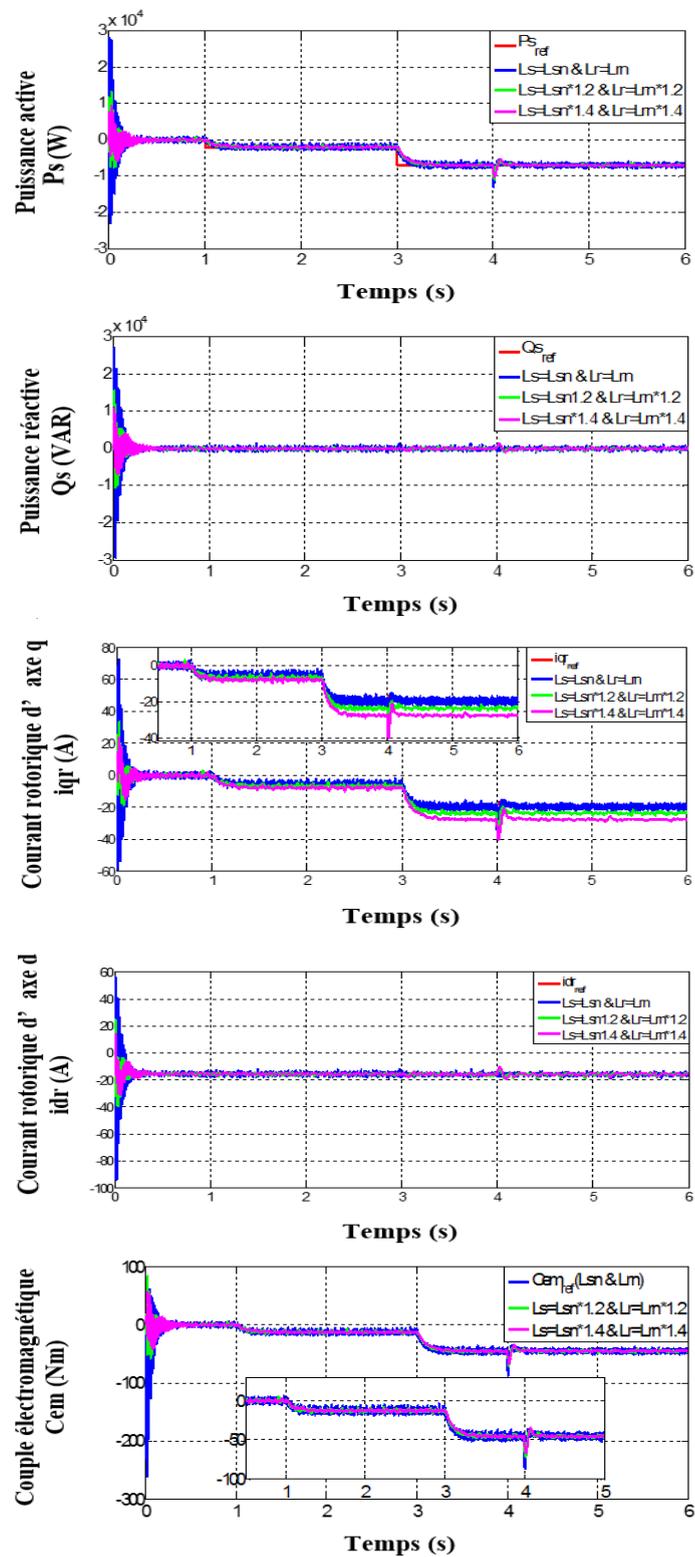


FIGURE III.20 – Tests de robustesse pour les inductances statoriques et rotoriques.

### III.12.3 Interprétation

Pour analyser et évaluer les performances de la stratégie de commande indirecte des puissances de la MADA en boucle fermée à base de régulateur PI pour le contrôle des puissances statorique en cascade avec le contrôle des courants rotoriques, nous avons effectués des tests en poursuite et en régulation et un test de robustesse face aux variations paramétriques de la machine.

Pour les tests de poursuite et de régulation, nous constatons que les grandeurs des puissances statoriques mesurées suivent bien leur trajectoire de référence sans dépassement et sans erreur statique en régime permanent. Puis, Lors de la variation de la puissance active à l'instant  $t=1s$  et  $t=3s$  et maintien de la puissance réactive pour avoir un facteur de puissance unitaire côté stator. Ensuite, l'application d'une perturbation externe due au variation brusque de vitesse à l'instant  $t=4s$ , en remarque que les puissances active et réactive suivent bien leur référence imposées avec une image sur les courants rotoriques quadratique et directe respectivement et le couple électromagnétique sont affectées avec un temps de rejet de perturbation relativement faible. Les courants statoriques sont sinusoïdaux avec une fréquence de 50 Hz, elles ont très claire dans le zoom des courants statoriques.

Pour les tests de robustesse face aux variations paramétriques internes, la variation des résistances statorique et rotorique n'ont que très peu d'influence sur les courants rotorique et le couple électromagnétique, par contre la variation des inductances statorique et rotorique influent non seulement les courants rotorique, mais également sur le couple électromagnétique est affectée, aussi bien lors de la poursuite que lors de l'application des perturbations.

## III.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dans les quatre quadrants en fonctionnement moteur et générateur, les avantages et les inconvénients de la MADA et les différents domaines d'application. Puis, on a présenté son modèle mathématique, basée sur la transformation de Park en s'appuyant sur une série d'hypothèses simplificatrices ce qui abouti aux modèles qui est non linéaire, multivariable et fortement couplé. La modélisation du convertisseur continu-alternatif et de la commande MLI de type sinus-triangle ont été présenté. Enfin, la technique de commande indirecte des puissances en boucle ouvert et en boucle fermé par orientation du flux statorique est décrite ainsi que la synthèse de différents régulateurs linéaire de type PI appliqué au convertisseur côté machine, dans le but d'évaluer les performances de ces stratégies de commande envisagées en poursuite, en régulation et en robustesse face à des variations paramétriques des résistances statorique et rotorique ainsi les inductances statorique et rotorique.

Les résultats obtenus avec ces techniques proposées en boucle ouvert et en boucle fermé, dont le contrôle des courants rotoriques et les puissances statoriques sont mise en œuvre, montrent des performances satisfaisantes en poursuite et en régulation. Cependant, un faible robustesse face aux variation des inductances statoriques et rotoriques.

## Chapitre IV

---

# Association de la partie mécanique avec la partie électrique et intégration au réseau électrique

### SOMMAIRE

---

IV.1 INTRODUCTION . . . . .	71
IV.2 ASSOCIATION L'ENSEMBLE : PARTIE MÉCANIQUE-MADA ET CONVERTISSEUR CÔTÉ MACHINE : . . . . .	71
IV.2.1 structures des commandes proposé en boucle ouvert . . . . .	72
IV.2.2 Résultats des simulations en boucle ouvert . . . . .	73
IV.2.3 structures des commandes proposé en boucle fermé . . . . .	74
IV.2.4 Résultats des simulations en boucle fermé . . . . .	75
IV.3 INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS : . . . . .	76
IV.4 DESCRIPTION DE L'ÉOLIENNE À BASE DE LA MADA . . . . .	77
IV.5 REDRESSEUR MLI . . . . .	78
IV.6 STRUCTURE DU CONVERTISSEUR CÔTÉ RÉSEAU . . . . .	78
IV.7 MODÉLISATION DE FILTRE $R-L$ . . . . .	79
IV.8 MODÉLISATION DE BUS CONTINUS . . . . .	79
IV.9 COMMANDE DES PUISSANCES DE L'ONDULEUR CÔTÉ RÉSEAU . . . . .	80
IV.9.1 Orientation de tension statorique : . . . . .	80
IV.9.2 Stratégie de commande de tension de bus continue : . . . . .	81
IV.10 STRUCTURES GLOBALE DU SYSTÈME DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE . . . . .	82
IV.11 CONCLUSION . . . . .	83

---

## IV.1 Introduction

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre la caractéristique couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

Dans ce chapitre, nous allons associer les deux parties mécanique et électrique réalisées précédemment dans les deux derniers chapitres II et III ainsi que la modélisation et la simulation des différentes structures de la commande indirecte des puissances en boucle ouverte et en boucle fermée.

Après nous allons proposer une stratégie de commande de tension de bus continue qui est supposée constante dans le chapitre précédent, ceci comprendra son maintien à la valeur désirée et limitation des harmoniques injectées dans le réseau par l'utilisation d'un redresseur commandé par la technique MLI.

L'ensemble composé du redresseur, du bus continu et de l'onduleur formera la cascade qui sera la liaison entre le rotor et le réseau, après avoir modélisé la turbine et son contrôle on va modéliser l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

## IV.2 Association l'ensemble : partie mécanique-MADA et convertisseur côté machine :

Pour illustrer les performances de la commande indirecte des puissances appliquée à la MADA. Nous avons réalisé plusieurs séries de simulations numériques avec la technique MPPT pour exploiter le maximum de puissance aérodynamique capté par la turbine, et avec un profil de vent aléatoire qui permet un fonctionnement de génératrice Hypo-Synchrone avec une valeur moyenne de 6(m/s).

Le modèle du vent utilisé dans notre étude est donné par l'équation :

$$V_{vent} = 6 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (IV.1)$$

Les résultats de notre simulation pour les différentes commandes proposées, avec l'association des parties mécaniques et électriques et le convertisseur côté machine muni d'un bus continu sont comme suite :

- Figure IV.1 : Commande indirecte des puissances en boucle ouverte de la GADA qui est en fonctionnement hypo synchrone.
- Figure IV.4 : Commande indirecte des puissances en boucle fermée de la GADA qui est en fonctionnement hypo synchrone.

### IV.2.1 structures des commandes proposé en boucle ouvert

Afin de réaliser un modèle d'un système éolien qui approche a la réalité et en utilisant les modèles établis dans les chapitres précédents (chapitre II et chapitre III). Nous allons faire une association entre la partie mécanique avec la commande MPPT avec asservissement de la vitesse et la partie électrique avec la commande indirecte des puissances en boucle fermé et en boucle ouvert.

Les figures IV.1 et IV.4 représentent les schémas synoptiques de l'association des deux parties (mécanique et électrique) avec les commandes proposées.

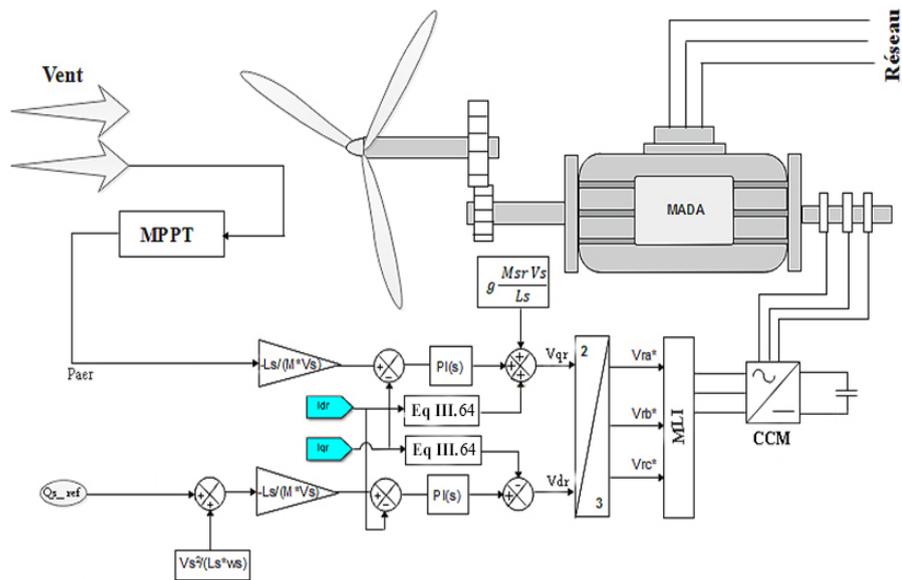


FIGURE IV.1 – Association de la partie mécanique avec la partie électrique et le convertisseur côté machine (CCM) en appliquant la commande indirecte des puissances en boucle ouvert

### IV.2.2 Résultats des simulations en boucle ouvert

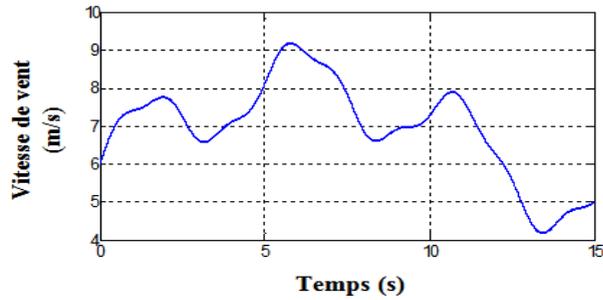


FIGURE IV.2 – Profil du vent

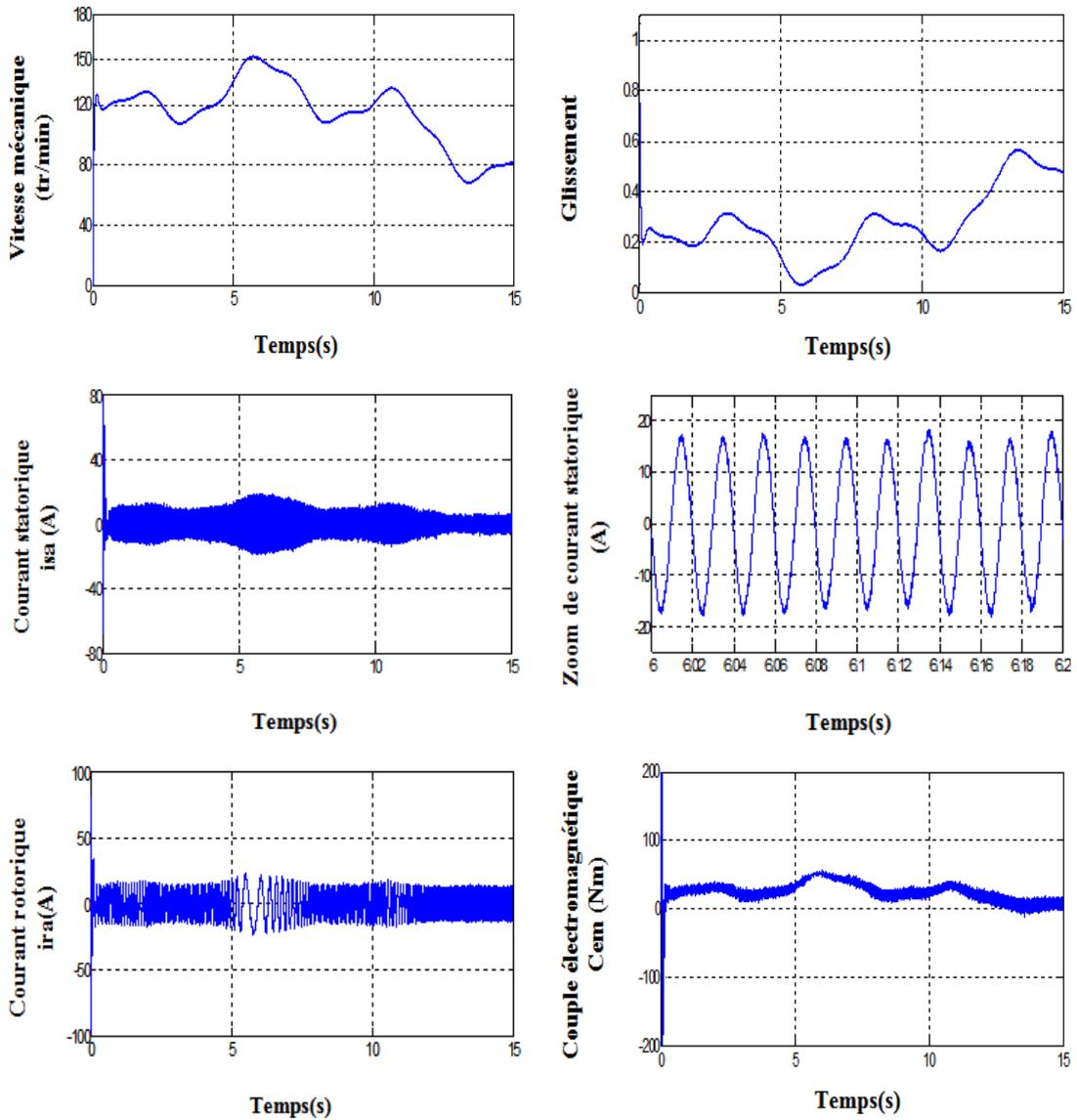


FIGURE IV.3 – Fonctionnement hypo synchrone par régulateur PI



IV.2.4 Résultats des simulations en boucle fermé

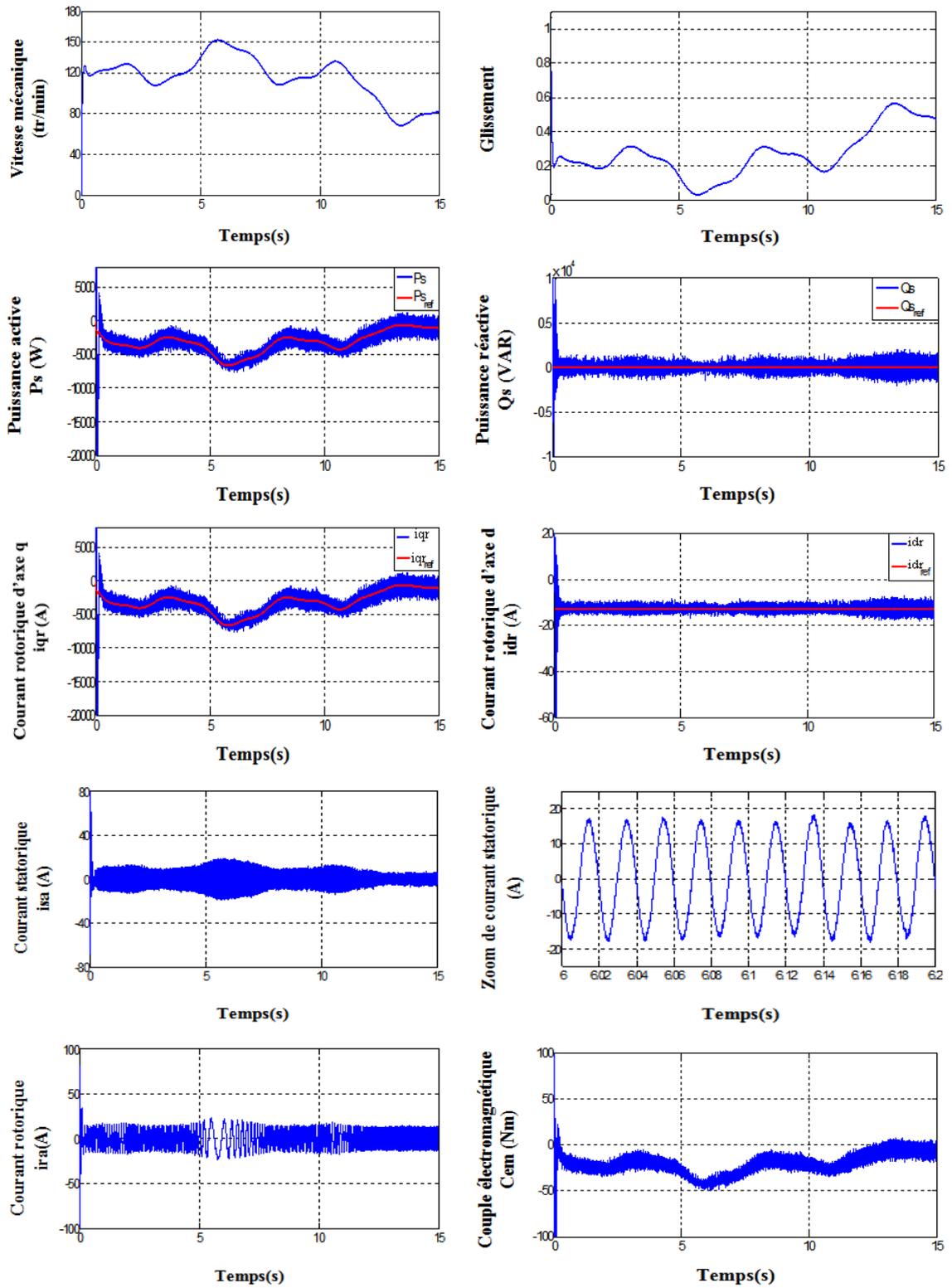


FIGURE IV.5 – Fonctionnement hypo synchrone par régulateur PI

### IV.3 Interprétations des résultats :

Les séries de simulations qu'on a réalisées dans l'environnement MATLAB/Simulink nous permettent d'évaluer les performances de la chaîne de conversion éolienne munie de la technique de commande MPPT et le convertisseur côté machine avec le profil du vent choisi pour une vitesse moyenne de 6 m/s.

Pour les deux stratégies de commande proposées, les résultats obtenus sont presque identiques. Toutefois, les approches de commande indirecte en boucle ouverte et en boucle fermée présentent des temps de réponse plus courts.

La vitesse mécanique suit bien le profil du vent, ainsi que sa référence aussi bien en régime transitoire, qu'en régime permanent avec un léger dépassement à l'aide de la stratégie de commande avec asservissement de la vitesse mécanique.

Le glissement est positif donc il est très clair quand on est dans un fonctionnement hypo synchrone.

La puissance active statorique suit correctement sa référence générée par la turbine. Le facteur de puissance unitaire est mis en évidence pour une puissance réactive nulle obtenue après la fin de son régime transitoire.

Les courants statoriques sont sinusoïdaux, malgré les variations du profil de vent avec une fréquence 50 Hz, elle est très claire dans le zoom des courants statoriques. Les courants rotoriques sont également sinusoïdaux, leur fréquence varie avec le glissement.

On note, au démarrage, de légères oscillations de haute fréquence sur les puissances active, réactive, courant rotorique direct, quadratique et sur le couple électromagnétique. Leurs amplitudes diminuent, une fois que la puissance réactive s'annule. Les oscillations liées aux puissances sont moindres et sont plus importantes pour le couple électromagnétique dans la commande indirecte en boucle fermée et moindre dans la commande indirecte en boucle ouverte, à cause de flux de la machine qui n'est pas encore stabilisé au démarrage.

## IV.4 Description de l'éolienne à Base de la MADA

Notre système étudié est une chaîne de conversion éolienne qui produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique qui vient de vent. Grâce à la turbine et la génératrice asynchrone double alimentation associé d'un convertisseur côté machine alimenté par un bus continu et un autre convertisseur côté réseau pour faire la liaison entre le rotor et le réseau électrique à travers un filtre passif  $R-L$ . Grâce à la bidirectionnelle de ces deux convertisseurs la génératrice peut fonctionné en deux modes de fonctionnement( fonctionnement Hypo-synchrone ou hyper-synchrone).

La figure IV.6 représente le schéma complet de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA qui se devisé en deux parties principale [29].

**La partie mécanique :** Cette partie qu'on a déjà étudiée dans le chapitre deux est composée en trois éléments importants lesquels sont : la turbine, le multiplicateur de vitesse et l'arbre de transmission. À travers ces éléments l'énergie cinétique de vent ce convertit en énergie mécanique afin d'entraîné la génératrice pour produit de l'énergie électrique.

**La partie électrique :** Cette partie qu'on présenté dans le chapitre précédent est composée de la MADA qui fait l'objet de notre étude dont le stator est connecté directement au réseau électrique et sont rotor est reliée au réseau à travers un convertisseur sous le nom de convertisseur Back to Back qui est constitué de deux convertisseurs statique bidirectionnels.

- **Un convertisseur côté machine (CCM) :** ce convertisseur est connecté au rotor de la machine, pour permet une commande qui contrôle les puissances active et réactive échangé entre le stator et le réseau.
- **Un convertisseur côté réseau (CCR) :** qui est connecté entre le bus continu et le réseau électrique à travers un filtre  $R-L$ . Le rôle de ce convertisseurs est de maintenir la tension du bus continu constante, quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance rotorique de la MADA et maintenir un facteur de puissance unitaire au point de connexion avec le réseau électrique.

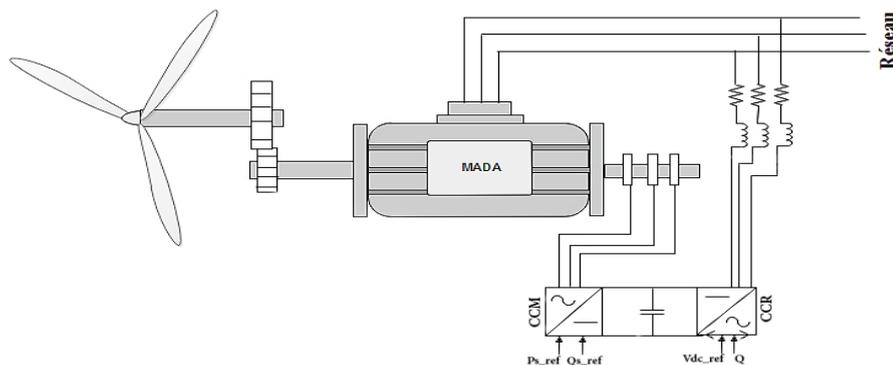


FIGURE IV.6 – Chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA

## IV.5 Redresseur MLI

Afin de pouvoir disposer d'une tension continue pour alimenter l'onduleur qui pilote la machine asynchrone à double alimentation, nous avons choisi d'utiliser un redresseur à modulation de largeur d'impulsion pour deux raisons principales :

- Utiliser un redresseur réversible en courant afin de permettre le transfert de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet les fonctionnements en hyper ou Hypo synchronisme.
- Mettre en oeuvre un redresseur qui génère peu ou pas de perturbation sur le réseau électrique par propagation de courant harmoniques.

On s'attache ici à réaliser la commande des six interrupteur afin de maintenir la tension de bus continu est constant tout en absorbant un courant qui soit le plus proche d'une forme sinusoïdale, donc nous allons piloter les six interrupteurs par une commande MLI synchronisée sur les tensions réseau. Pour ce faire il nous faut tout d'abord disposer des tensions du réseau. Du fait des perturbations présentes, ces tensions ne sont pas parfaitement sinusoïdales. Alors on utilise un filtre  $R-L$  pour éliminer les harmoniques [10], [11].

## IV.6 Structure du convertisseur côté réseau

la figure IV.7 représente le convertisseur côté réseau (CCR) connecté au réseau électrique avec avec un filtre  $R-L$  et un condensateur de bus continu qui alimente le deuxième convertisseur (CCM).

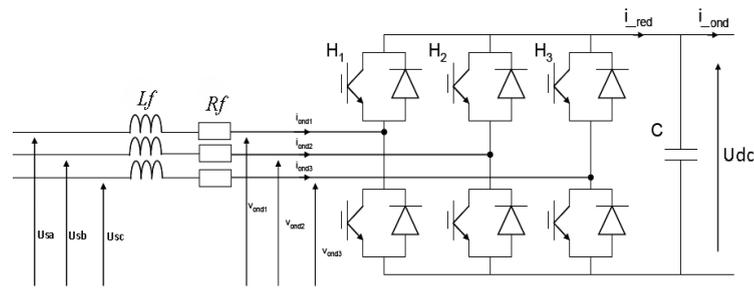


FIGURE IV.7 – Convertisseur de tension fonctionnant en mode redresseur avec un filtre  $R-L$ .

$Rf$  : Résistance de filtre de réseau.

$Lf$  : Inductance de filtre de réseau.

$i_{red}$  : Courant de redresseur.

$i_{ond}$  : Courant de l'onduleur.

$C$  : Capacité.

$Vdc$  : Tension du bus continu.

## IV.7 Modélisation de filtre R-L

Afin d'extraire les ondes principales des tensions, nous allons utiliser un filtre RL, l'inductance sera celle du filtre de réseau  $L_f$  et la résistance est celle de la ligne notée  $R_f$ . Le courant en sortie de réseau n'est pas sinusoïdal mais il sera filtré [?], [12].

la tension aux bornes du filtre est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.2})$$

En introduisant la transformée de Park vers le référentielle synchrone, les équations des tensions devient :

$$\begin{bmatrix} V_{md} \\ V_{mq} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

$V_{md,q}, i_{d,q}$  : Courant et tension de filtre dans le référentiel  $(d, q)$   
 $V_{ma,b,c}, i_{a,b,c}$  : Courant et tension modules par le convertisseur dans le référentiel  $(a, b, c)$   
 $V_{sd,q}, V_{sa,b,c}$  : Tensions de réseau dans le référentiel  $(d, q)$  et  $(a, b, c)$

## IV.8 Modélisation de bus continu

Le passage par le bus continu est indispensable pour permettre à l'onduleur de réguler l'amplitude et la fréquence. Le réseau est considéré comme une source de courant, car on prend en compte les inductances du réseau. De même les enroulements au rotor sont vus comme une source de courant puisque ce sont des bobinages. En utilisant un bus continu avec un condensateur, on respecte l'alternance source de tension et source de courant. En plus le condensateur joue le rôle de réservoir lors de l'échange de l'énergie et limite l'ondulation de tension continue [21].

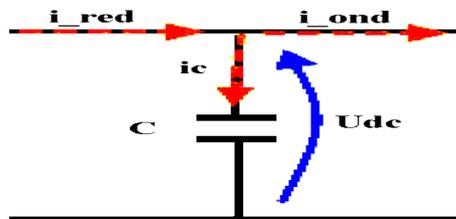


FIGURE IV.8 – Principe du bus continu

tension du bus continu en fonction de temps est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_c \quad (\text{IV.4})$$

Donc la tension de bus continu est exprimé par :

$$U_{dc} = \int \frac{1}{C} \cdot i_c \cdot dt \quad (\text{IV.5})$$

D'après la loi des noeuds le courant de bus continu est exprimé comme suit :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{IV.6})$$

## IV.9 Commande des puissances de l'onduleur côté réseau

Afin de simplifier les équations de tension de système et réduire les calculs des puissances active et réactive nous avons réalisé un commande des puissances de l'onduleur qui de côté réseau.

Après avoir faire des calculs pour les puissances active et réactives avec le réseau, nous obtenons les résultats suivants : [29]

$$\begin{cases} P_g = v_{dg} \cdot i_{dg} + v_{qg} \cdot i_{qg} \\ Q_g = v_{qg} \cdot i_{dg} - v_{dg} \cdot i_{qg} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

### IV.9.1 Orientation de tension statorique :

Pour faire orienter la tension statorique il suffit d'orienté le repère dq de façon à annuler la composante de tension statorique en quadrature en choisissant un angle de rotation de Park pour que la tension statorique soit porté sur l'axe direct (d) comme apparait sur la figure IV.9 pour avoir une équation :

$$\begin{cases} v_{dq} = v_d \\ v_{qg} = 0 \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

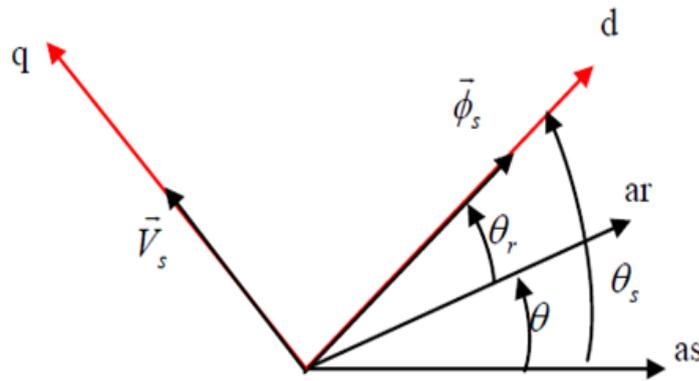


FIGURE IV.9 – Schéma de principe d'orientation de tension statorique. [41]

Alors d'après l'équation IV.7 du modèle des puissances du générateur et la relation IV.8, nous obtenons :

$$\begin{cases} P_g = v_{dg} \cdot i_{qg} \\ Q_g = -v_{dg} \cdot i_{dg} \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

Si on néglige les pertes dans l'onduleur alors on obtient la relation suivante :

$$\begin{cases} v_{dc} \cdot i_{dc} = v_d \cdot i_{dg} \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_m \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

### IV.9.2 Stratégie de commande de tension de bus continue :

Le rôle de la commande de tension de bus continue est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur. Les causes de sa variation sont essentiellement les pertes dans les interrupteurs du convertisseur (en conduction et en commutation) et dans l'inductance de couplage et la variation de la charge connectée au bus continu. La régulation de cette tension s'effectue par une boucle externe dont cette boucle de régulation génère la référence et l'injecte dans le condensateur [42], [26].

A partir de l'intégration de l'équation IV.10 nous obtenons la tension de bus continu  $V_{dc}$ .

Cette boucle a comme entrée la tension de référence  $V^*_{dc}$  et la tension mesurée  $V_{dc}$  comme présenté sur la figure IV.10 dont on a la valeur de courant référence dans l'axe q est fixé à zéro pour obtenir un facteur de puissance unitaire, et le courant de référence de l'axe d est obtenu à partir de la boucle externe de régulation de tension de bus continu [29]

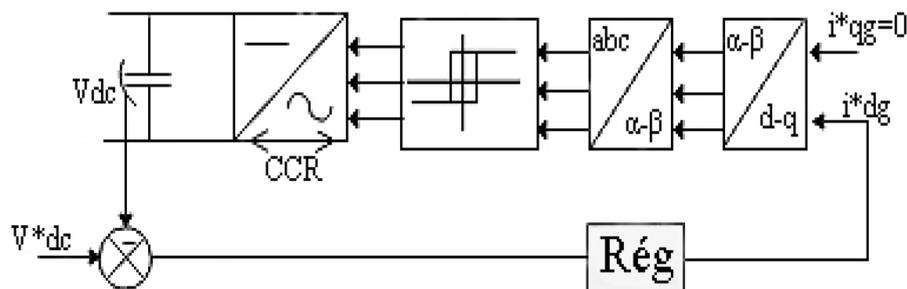


FIGURE IV.10 – Principe de commande de convertisseur côté réseau.

## IV.10 Structures globale du système de conversion d'énergie éolienne

Les figures IV.11 et IV.12 présentent les schémas synoptiques globales du système de conversion de l'énergie éolienne avec la commandes indirecte des puissances de la MADA en boucle ouvert et en boucle fermé et avec les éléments qu'on a présentés précédemment.

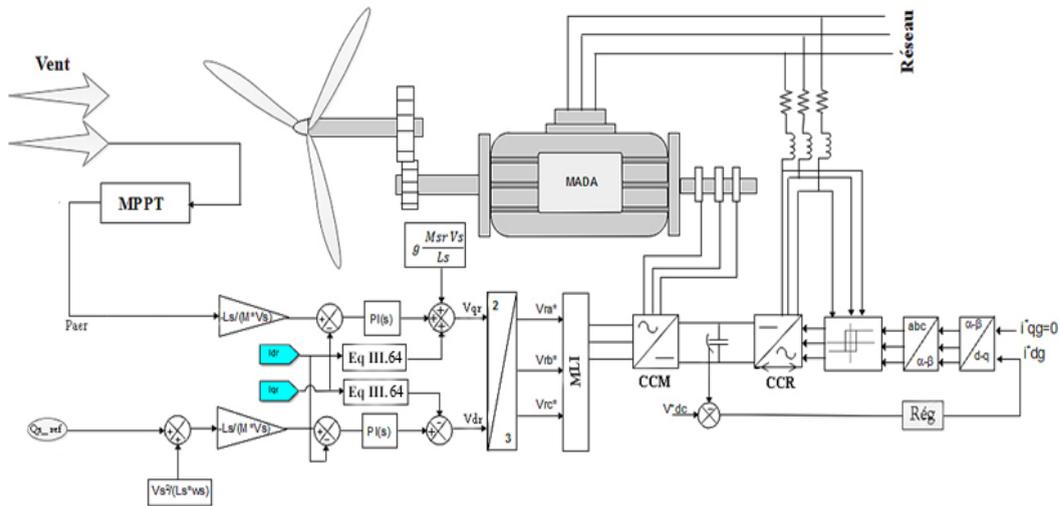


FIGURE IV.11 – Schéma global de la chaîne de conversion avec la commande indirecte des puissances de la MADA en boucle ouvert.

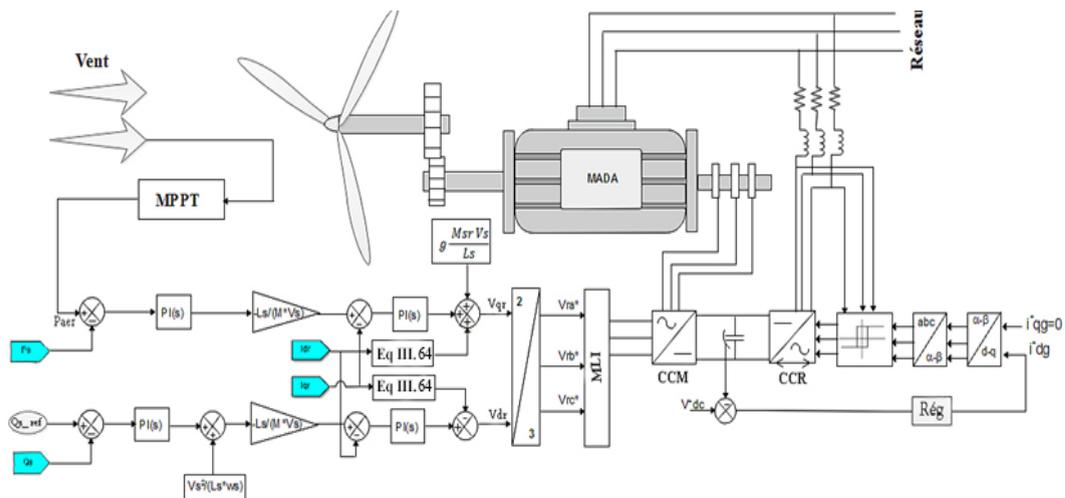


FIGURE IV.12 – Schéma global de la chaîne de conversion avec la commande indirecte des puissances de la MADA en boucle fermé.

## IV.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité la chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est connecté directement au réseau électrique, tant dit que le rotor est relié au réseau à travers deux convertisseurs statiques côté machine et côté réseau.

Dans un premier temps, nous avons réussi d'associer la partie mécanique avec la partie électrique. En ce qui concerne les résultats de simulations du convertisseur côté machine, le découplage et le contrôle des courants rotoriques directe et quadratique ainsi la puissance active et réactive statoriques est réussie pour extraire le maximum de puissance MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique fournie par la turbine pour un fonctionnement hypo synchrone et maintien la consigne de la puissance réactive nulle pour avoir un facteur unitaire côté stator.

Dans un deuxième temps, nous avons présenté la modélisation de convertisseur côté réseau associer d'un filtre  $R - L$  et un bus continue alimentant le convertisseur côté machine pour connecté le rotor au réseau électrique. Enfin, nous avons expliqué la structure de commande des puissances de convertisseur côté réseau par orientation de la tension statorique selon l'axe  $q$  est décrite ainsi la structure globale d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne avec les deux convertisseur pour avoir les deux modes de fonctionnement.

---

## Conclusion générale et perspectives

L'objectif de notre étude est de tirer le maximum de puissance d'une éolienne à vitesse variable par la stratégie de commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique, pour ce type d'application on utilise une machine asynchrone à double alimentation associée à des convertisseurs de l'électronique de puissance piloté à travers les grandeurs rotorique en appliquant une commande indirecte des puissances statorique en boucle ouvert puis en boucle fermé et on l'intégré au réseau électrique pour avoir un fonctionnemnt complet.

Pour atteindre ce objectif, le premier chapitre de ce travail nous avons présenter l'histoire de l'énergie éolienne. Puis, le développement de cette énergie dans le monde, l'Afrique, l'Algérie et leur classement mondial des utilisateurs de cette énergie. Ensuite, nous avons rappelé les principales éléments fondamentaux d'une éolienne avec les différents types d'aérogénérateurs. Enfin, les différents structures de générateurs électriques utilisées dans la production cette conversion d'énergie.

Le deuxième chapitre, nous avons présenter les modèles analytiques de chaque élément de la partie mécanique d'une éolienne ont été établis (turbine éolienne, multiplicateur de vitesse et l'arbre de transmission). Puis, nous avons représenté les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable. Ensuite, nous somme intéressés à la zone de fonctionnement 2 pour extraire de maximum de puissance (MPPT), dans cette zone l'angle de calage des pales est constant avec un coefficient de puissance est maximal. Pour cela, deux méthodes sont envisagées pour faire le contrôle MPPT, la première méthode appelée commande sans asservissement de vitesse et la deuxième méthode commande avec asservissement de la vitesse mécanique en utilisant un régulateur linéaire PI. Enfin, Seule la deuxième méthode a été tester en simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, les résultats de simulation sont suffisantes et montrent un faible dépassement en régime transitoire et un très bon suivie de consigne en régime permanant, ce qui donne un meilleur rendement énergétique.

Le troisième chapitre, nous avons traité la modélisation et la commande indirecte des puissances de la machine asynchrone à double alimentation dont le rotor est alimentée par un convertisseur d'électronique de puissance côté machine. Suivant la procédure qui consiste à utiliser le modèle non linéaire, multi variable et couplé de la MADA dans le

repère diphasé ( $d-q$ ) lié au champ tournant et de son alimentation constituée d'un onduleur équipé d'une commande MLI de type "sinus-triangle". Puis, en lui appliquant le principe de l'orientation du flux statorique selon l'axe directe et en négligeant la résistance statorique, ce qui nous permet d'avoir un modèle de commande des puissances découplé. Ensuite, la synthèse des régulateurs de type PI des commandes indirecte en boucle ouvert (les courants) et en boucle fermé (les puissances) du convertisseur côté machine CCM afin d'évaluer les performances du régulateur PI. Enfin, Nous avons noté un bon comportement de celui-ci pour les différents tests effectués en boucle ouvert et en boucle fermé, toutefois des insuffisances ont été observées concernant la sensibilité aux perturbations dues aux variations brusques de la vitesse. La puissance active, la puissance réactive, le couple électromagnétique sont affectées avec un temps de rejet de perturbation relativement faible. Mais une faible robustesse vis-à-vis des variations des résistances et les inductances n'ont que très peu d'influence sur le temps de réponse et sur l'amplitude des oscillations en régime transitoires.

Le dernier chapitre de ce mémoire a été consacré pour l'association de la partie mécanique constituée de la commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique, la partie électrique qu'on a vu dans le chapitre précédent constituée de la commande du convertisseur coté machine pour le contrôle indirecte des puissances en boucle ouvert et en boucle fermé afin d'analyser les performances des puissances de la MADA pour un fonctionnement hypo synchrone. Puis, nous avons modélisé le deuxième convertisseur côté réseau (CCR), du bus continu, du filtre ( $R_f-L_f$ ). Ensuite, la commande de la tension du bus continu et la régulation de la puissance réactive pour avoir un facteur de puissance unitaire côté stator. Enfin, établir la structure globale de la chaîne de conversion d'énergie éolienne avec les deux convertisseurs pour avoir les deux modes de fonctionnement en hypo synchrone et hyper synchrone.

### **Perspectives pour de futurs travaux**

Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant être contribuer à compléter le travail de recherche présenter ou d'ouvrir des nouveaux axes de recherche sont envisageables :

- Simuler le comportement de la commande des puissances de convertisseur côté réseau CCR pour avoir les deux modes de fonctionnement.
- Etudier d'autres stratégies liés aux zones 3 et 4 du fonctionnement de l'éolienne.
- Utiliser différents régulateurs proposés dans ce mémoire associés aux autres commandes, tels que, le réseau neuronal, l'intelligence artificielle et le régulateur par méthode floue.
- Valider expérimentalement des modèles développés et des stratégies de commande proposées dans laboratoire d'automatique Tlemcen (LAT).

---

## Bibliographie

- [1] <http://afrique.lepoint.fr/economie>. Consulté le 25/05/2017.
- [2] <http://portail.cder.dz/spip.php?article5751>. Consulté le 22/05/2017.
- [3] <http://www.3tier.com>. Consulté le 16/03/2017.
- [4] [www.irena.org](http://www.irena.org). Consultée le 27/05/2017.
- [5] [www.mysti2d.net](http://www.mysti2d.net). Consulté le 25/05/2017.
- [6] S. El Aimani. *Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [7] Y. Bekakra. *Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double Alimentation*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université Mohammed Khider - Biskra, 2014.
- [8] H. Belghitri. *Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université Abou Bekr Blkaid - Tlemcen, 2010.
- [9] M. Bouaraki. *Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : application sur un site à Tindouf*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magiter à Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2012.
- [10] A. Bouhedda. *Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magiter à Université Mouloud Mameri de Tizi Ouzou, 2011.
- [11] A. Boumassata. *Modelisation et simulation d'une chaine de conversion Eolienne*. Thèse Pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3ème cycle en Electrotechnique ,Université des Freres Mentouri de Constantine Faculte des Sciences de la Technologie, 2017.
- [12] A. Boyette. *Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole Doctorale : Informatique, Automatique, Electronique Electrotechnique, Mathématique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [13] M. Jaccard C. Besson, A. Savary. Moteur synchrone avec contrôle de la magnétisation des aimants en fonctionnement. In *Symposium de Génie électrique*, 2014.
- [14] A. De La Faire. Un monde d'énergie. 2016.

- [15] K. Ferkous. *Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université Mentouri- Constantine, 2009.
- [16] R. Franck. *Rapport d'information sur l'énergie éolienne*. Assemblée Nationale, 2010.
- [17] B. Multon G. Beslin. Wind power production : from the characterisation of the wind resource to wind turbine technologies. 2016.
- [18] S. Ghoudelbourk. *Etude et modélisation des convertisseurs statiques dans une chaine éolienne à base de la GADA*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat de l'Université de Anabba, 2016.
- [19] O. Guerri. Recherche et développement. *Energies Renouvelables*, page 14, 2008.
- [20] N. Hamdi. *Modélisation et commande des génératrices éoliennes*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de magister de l'Université Mentouri - Constantine, 2008.
- [21] S. Hamecha. *Etude et commande d'éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de magister de l'Université Mouloud Mammeri à Tizi-Ouzou, 2013.
- [22] M A. Hassad. *Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université de Setif 1, 2016.
- [23] W. Hiber. *Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université de Setif 1, 2013.
- [24] J.P. Caron J.P. Hautier. *Electrotechnique Modélisation et commande de la machine asynchrone*. Presses Universitaires de Strasbourg, 1995.
- [25] B. Kelkoul. *Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université Tlemcen, 2014.
- [26] A. Kessal. *Correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur AC/DC*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat à Université Ferhat Abbas-Setif, 4.
- [27] T M. Latreche. *Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2012.
- [28] L. Leclerco. *Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université de Lille, 2004.
- [29] M. Loucif. *Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aerogénérateur*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat de l'Université Tlemcen, 2016.
- [30] A. Mechernene M. Loucif, A. Boumediene. *Maximum Power Point Tracking Based on Backstepping Control of Wind Turbine*. journal EEA Electrotehnica, Electronica, Automatica(= Electrical Engineering, Electronics, Automation), Vol. 62, no. 3, pp 103-110, July - September 2014.

- [31] J. Marc Noël M. Rapin. *Energie éolienne*. Dunod, 2010.
- [32] P. Leconte M. Rapin, E. Szechenyi. *Eoliennes*. Techniques de l'Ingénieur, BM 4640 22p, Janvier 2001, 2011.
- [33] A. Mechernene M. Zerikat, S. Chekroun. *Dynamical performances of sensorless vector control induction motor drive with a new adaptive neural network speed observer*. Sciences and Techniques of Automatic Control, 2010.
- [34] A. Mechernene. *Apport des techniques de l'intelligence artificielle à la commande sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université d'Oran, 2014.
- [35] J-E. Moncomble P. Boisson. Energie et société. *Ecole Nationale d'Administration*, 2001.
- [36] F. Poitiers. *Etude et commande de génératrice asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [37] D. Roger. *La machine asynchrone double étoile. Régimes transitoires. Alimentation à fréquence variable*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat de l'Université de Lille, 1993.
- [38] R. Rouabhi. *Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application : Energie éolienne*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2012.
- [39] G. Salloum. *Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [40] M. Si-brahim. *Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [41] M. Hada T Y. Moussaoui. *Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Master de l'Université d'El-oued, 2015.
- [42] A. Tamaarat. *Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat de l'Université Mohammed Khider - Biskra, 2016.
- [43] A. Telli. *Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau MT*. Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université des sciences et de la technologie d'Oran, 2012.
- [44] A. Meroufel Y. Djeriri. *Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat de l'Université Djillali Liabes - Sidi-Bel-Abbes, 2015.

## Conditions de simulations

Les différentes simulations réalisées lors de ce travail ont été faites à l'aide du logiciel MATLAB et son outil de simulation SIMULINK.

Les conditions adoptées lors des simulations sont les suivantes :

TABLE 1 – Conditions de simulation

Type : Variable-step	
Ode45 (Runge Kutta ordre 45)	
Variable-step Size ( fundamental sample time)	0.0001
Tasking mode for periodic sample time	auto

## Paramètres de la turbine

TABLE 2 – Paramètres de la turbine

<b>Nom</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
Puissance nominale	7,8	<i>KW</i>
Densité de l'aire	1,225	
Angle de calage	2	°
Nombre de pale	3	
Rayon de pale	3	<i>m</i>
Gaine de multiplicateur	5,4	
Moment d'inertie	0,042	<i>kg.m<sup>2</sup></i>
Coefficient de frottement visqueux	0,024	<i>N.s/rad</i>

## Paramètres de la MADA

TABLE 3 – Paramètres de la MADA utilisée

Nom	Valeur	Unité
Tension nominale	220/380	<i>V</i>
Puissance nominale	7,5	<i>KW</i>
Fréquence nominale	50	<i>Hz</i>
Nombre de paires du pôle	2	
Vitesse nominale	1440	<i>tr/min</i>
Résistance statorique	0,455	$\Omega$
Résistance rotorique	0,62	$\Omega$
Coefficient d'inductance statorique	0,084	<i>H</i>
Coefficient d'inductance rotorique	0,081	<i>H</i>
Coefficient d'inductance mutuelle	0,078	<i>H</i>
Coefficient de frottement	6,73.10-3	<i>kg.m<sup>2</sup></i>
Moment d'inertie	0,3125	<i>N.s/rad</i>

## Réglage de l'onduleur de tension

TABLE 4 – Réglage de l'onduleur

Tension continue : $V_{dc} = 400$ Volts
Indice de modulation : $m = 20$
Coefficient de réglage : $r = 0,9$

## Synthèse des différents régulateurs

### A - Régulateurs PI des courants :

Le schéma fonctionnel de la régulation du courant est représenté sur la figure 13

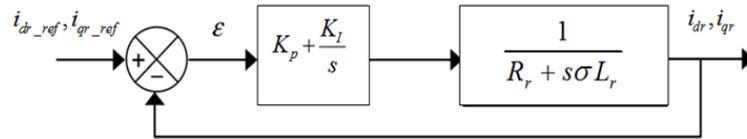


FIGURE 13 – Boucle de régulation des courants

La fonction de transfert en boucle ouvert est donnée par :

$$FT_{BO}(s) = \left( K_p + \frac{K_I}{s} \right) \cdot \left( \frac{1}{R_r + s\sigma L_r} \right) \quad (11)$$

$$FT_{BO}(s) = \frac{s + \frac{K_I}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \cdot \frac{\frac{1}{\sigma \cdot L_r}}{s + \frac{R_r}{\sigma \cdot L_r}} \quad (12)$$

D'après la méthode de compensation des pôles, on élimine le zéro de la fonction de transfert et on obtient l'expression suivante :

$$\frac{K_I}{K_p} = \frac{R_r}{\sigma \cdot L_r} \quad (13)$$

Après compensation, la FTBO devient comme suit :

$$FT_{BO}(s) = \frac{K_p}{L_r \cdot \sigma \cdot s} \quad (14)$$

En boucle fermée, on obtient une fonction de transfert suivante :

$$FT_{BF}(s) = \frac{K_p}{L_r \cdot \sigma \cdot s + K_p} \quad (15)$$

$$FT_{BF}(s) = \frac{1}{1 + \frac{\sigma \cdot L_r}{K_p} \cdot s} \quad (16)$$

d'après l'équation précédant en tire la constante de temps :

$$\tau = \frac{L_r \cdot \sigma}{K_p} \quad (17)$$

Le temps de réponse d'un système du premier ordre  $T_r=95\%$  on a :

$$T_r = 3 \cdot \tau \quad (18)$$

On peut exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse  $T_r=0.001s$  :

$$\begin{cases} K_p = 3 \cdot \sigma \cdot L_r \cdot \frac{1}{T_r} \\ K_I = K_p \cdot \frac{R_r}{\sigma \cdot L_r} \end{cases} \quad (19)$$

## B - Régulateurs PI des puissances

Le schéma fonctionnel de la régulation de puissance est représenté sur la figure 14

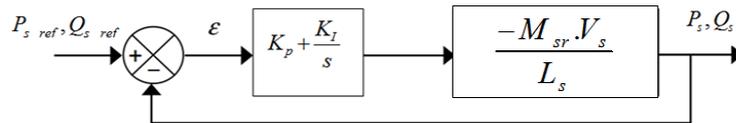


FIGURE 14 – Boucle de regulation des puissances

La fonction de transfert en boucle ouvert est donnée par :

$$FT_{BO}(s) = \left( K_p + \frac{K_I}{s} \right) \cdot \left( \frac{-M_{sr} \cdot V_s}{L_s} \right) \quad (20)$$

$$FT_{BO}(s) = \left( K_p + \frac{K_I}{s} \right) \cdot (A) \quad (21)$$

Avec  $A = \frac{-M_{sr} \cdot V_s}{L_s}$  :

En boucle fermé, on obtient une fonction de transfert de la forme :

$$\begin{cases} FT_{BF}(s) = \frac{(K_p \cdot s + K_I) \cdot A}{s + (K_p \cdot s + K_I) \cdot A} \\ FT_{BF}(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{A \cdot K_p} + \frac{1}{A \cdot K_I} \cdot s} \end{cases} \quad (22)$$

On a la fonction générale d'un système de 1<sup>er</sup> ordre est définie par :

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (23)$$

D'après la méthode d'identification en tire :

$$\begin{cases} \tau = \frac{1}{A \cdot K_I} \\ 1 = 1 + \frac{1}{A \cdot K_p} \end{cases} \quad (24)$$

Et pour un temps de réponse  $T_{r95\%}$  on a :

$$T_{r95\%} = 3 \cdot \tau \quad (25)$$

Alors on peut exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$\begin{cases} K_I = \frac{3}{A \cdot T_r} \\ K_p = 0 \end{cases} \quad (26)$$

Modèles Simulink construit pour les différentes simulations

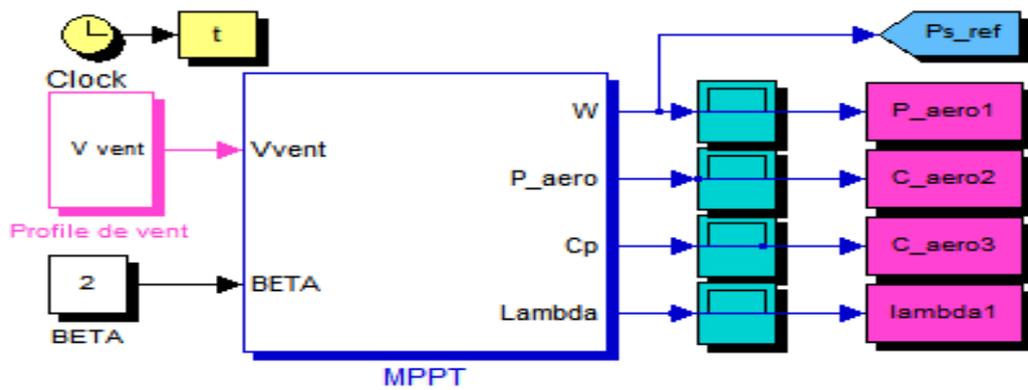


FIGURE 15 – Schéma bloc de la technique d'extraction de maximum de puissance

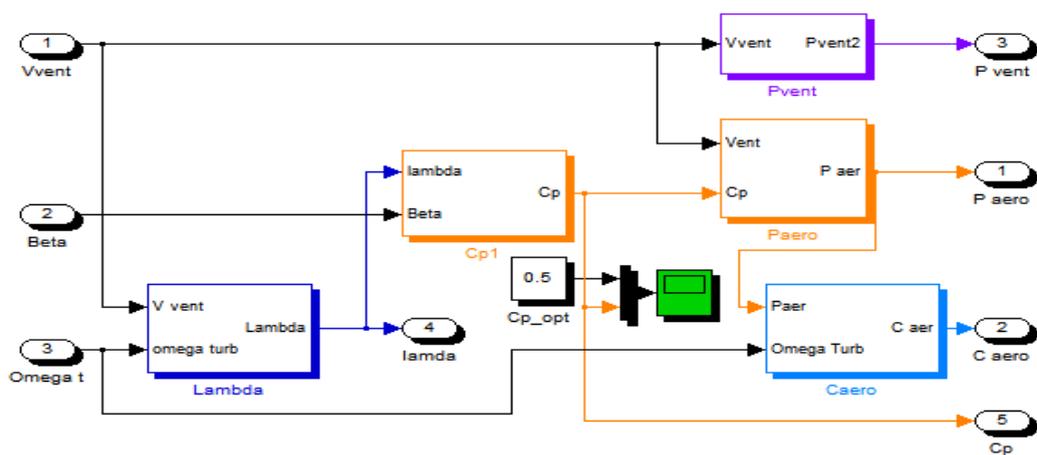


FIGURE 16 – Schéma bloc de la turbine éolienne

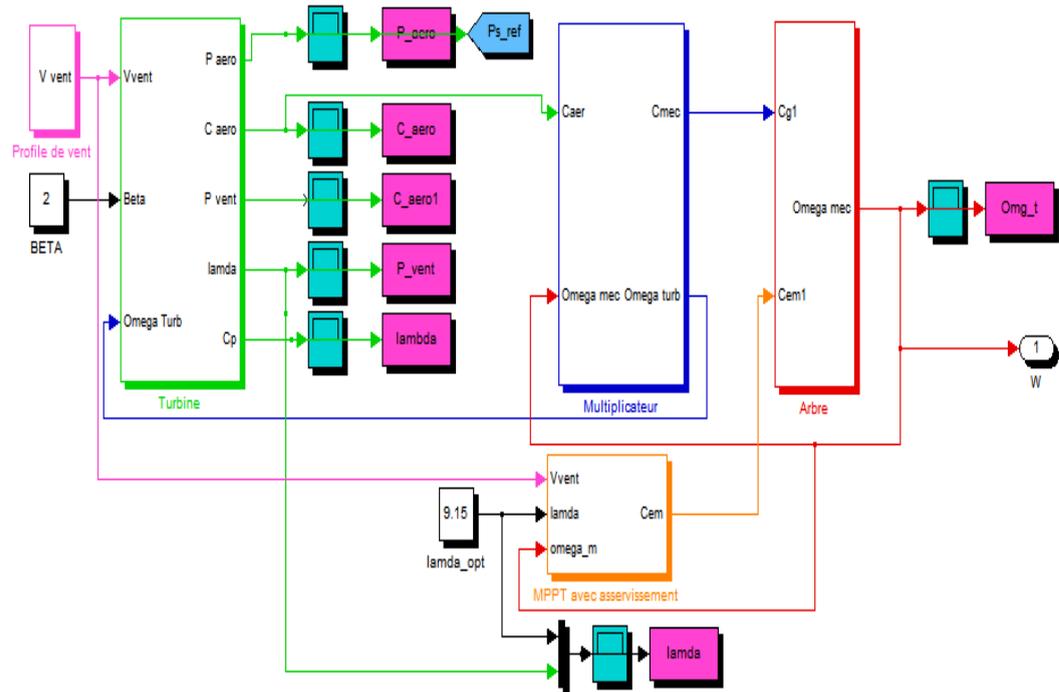


FIGURE 17 – Schéma bloc de la commande MPPT avec asservissement de la vitesse

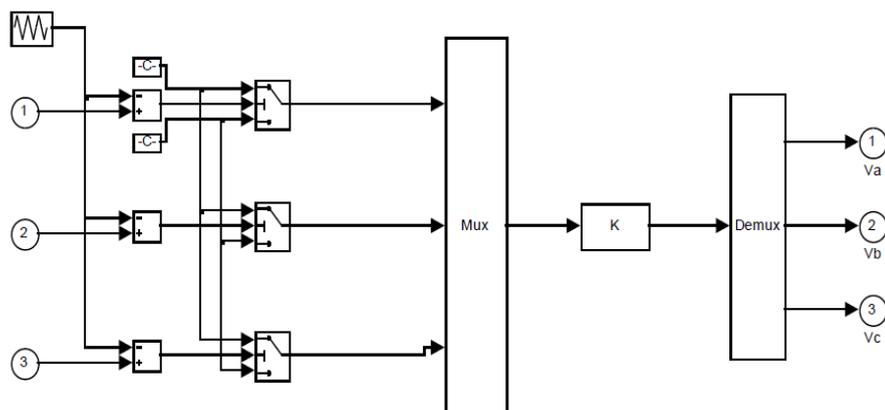


FIGURE 18 – Modèle de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux avec commande MLI sinus-triangle

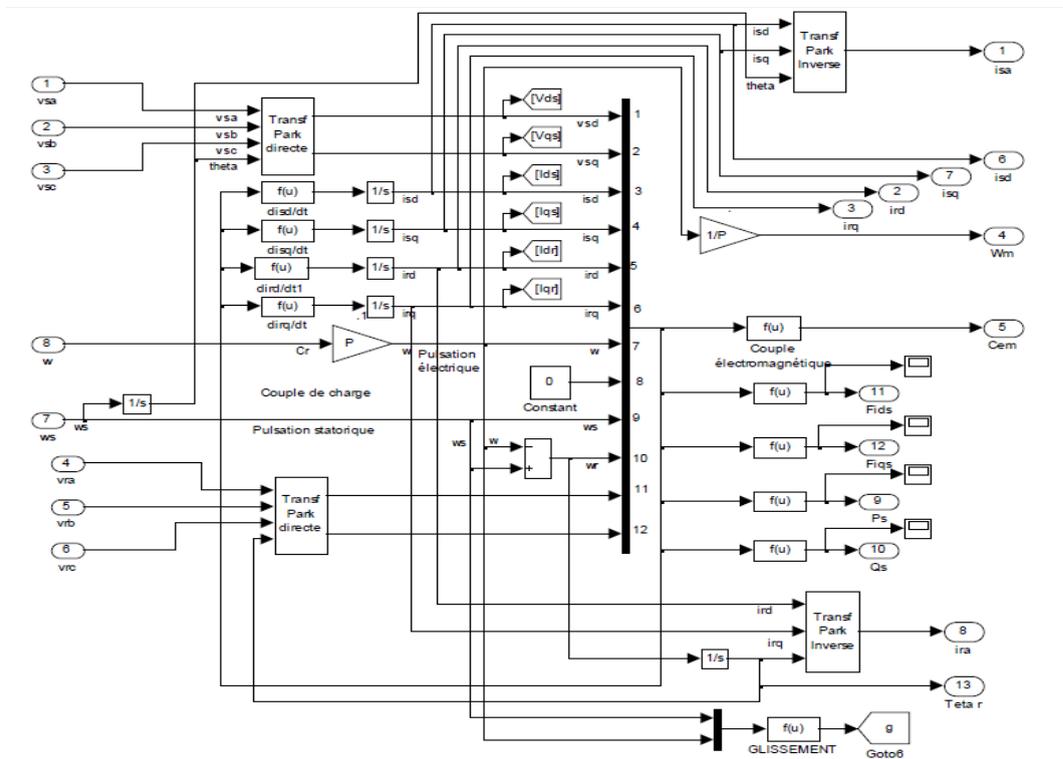


FIGURE 19 – Modèle de la machine asynchrone à double alimentation

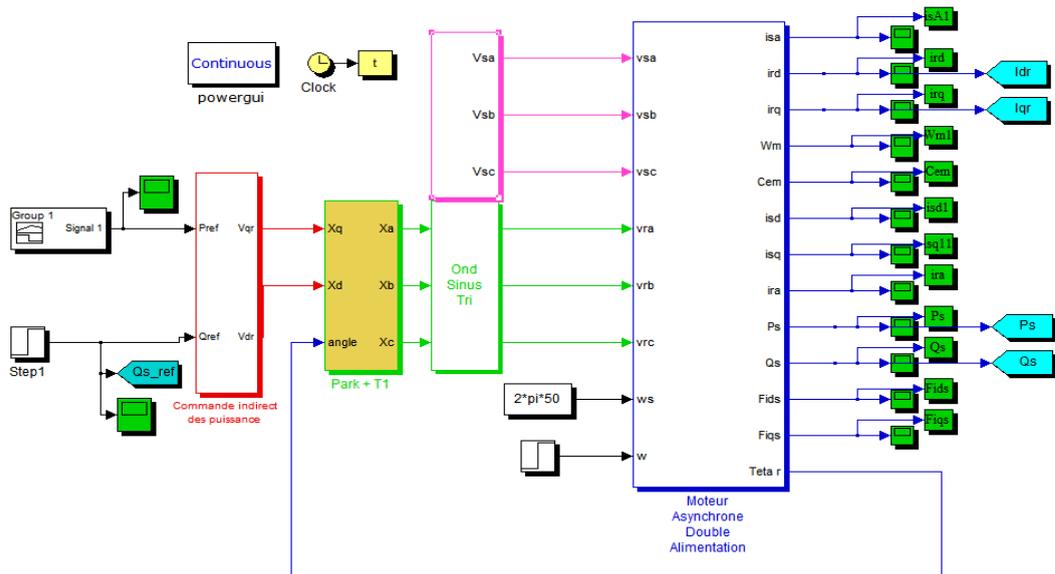


FIGURE 20 – Modèle simulink de la commande indirect des puissances de la MADA

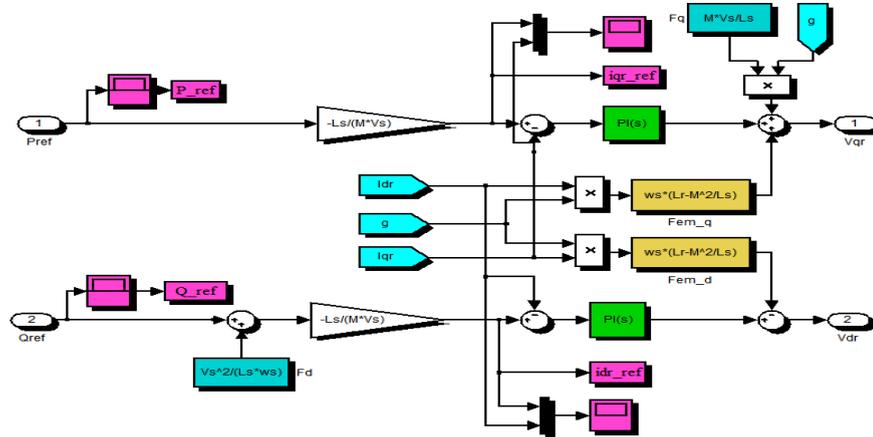


FIGURE 21 – Bloc de commande indirect des puissances de la MADA en boucle ouvert

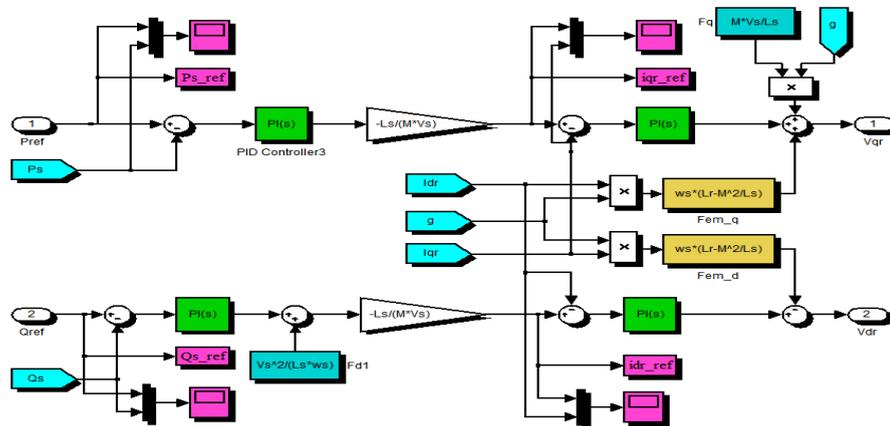


FIGURE 22 – Bloc de commande indirect des puissances de la MADA en boucle fermé

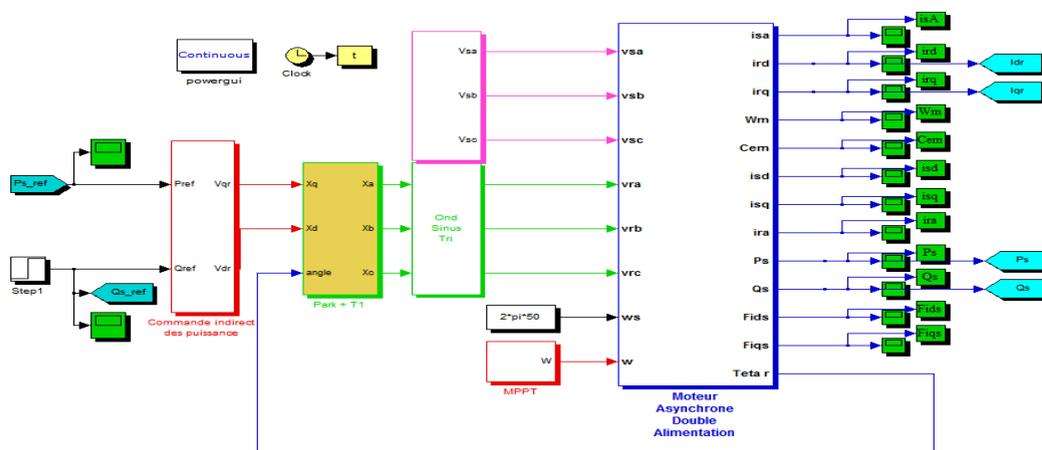


FIGURE 23 – Modèle simulink de la commande indirect des puissance de la MADA avec la commande MPPT avec asservissement de la vitesse

# MODÉLISATION ET COMMANDE INDIRECT DES PUISSANCES DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE Á DOUBLE ALIMENTATION DÉDIÉ Á UN SYSTÉME ÉOLIEN

## Résumé

Cette mémoire traite la modélisation et la commande indirect des puissances de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié a un système éolien, L'objectif étant de modéliser et concevoir un modèle de simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne. L'idée consiste à faire une association de la partie mécanique intégrant la turbine, le multiplicateur, la technique MPPT et la partie électrique (MADA), associée à un contrôle des puissances active et réactive, basée sur une commande à flux statorique orienté selon un repère diphasé. Plusieurs séries de simulation sont envisagées à base de régulateur PI appliquées au convertisseur côté machine en mode de fonctionnement hypo synchrone afin d'évaluer les performances de commandes proposées. Enfin, définir le modèle complet du système éolien en intégrant au processus précédent le réglage du bus continu et le contrôle de la puissance réactive pour le convertisseur côté réseau, le tout est débitant dans le réseau électrique.

**Mots clés :** *Energie éolienne, génératrice asynchrone á double alimentation, MPPT, contrôle des courants, contrôle des puissances.*

---

## MODELING AND INDIRECT POWER CONTROLE OF DOUBLY FED INDUCTION GÉNÉRATOR DRIVEN BY WIND TURBINE

### Abstract

This memory discusses the modeling and indirect power control of double fed induction generator (DFIG) driven by wind turbine. The aim is to model and design a simulation model of a wind energy conversion system. The idea consists in associating the mechanical part integrating the turbine, the gearbox, the MPPT technique and the electrical part (DFIG), associated with an active and reactive power control, based on a stator field oriented control in Park reference. Several simulation series are envisaged based on PI regulator applied to the rotor side converter in sub-synchronous operating mode in order to evaluate the performance of proposed commands. Finally, defining the complete model of the wind system by integrating the DC bus control and the reactive power control for the grid side converter into the previous process, the whole is discharged into the electrical network.

**Keywords :** *wind turbine, doubly fed induction generator, MPPT, currents control, powers control.*