
Dedicaces 1

JE dédie ce travail :

- Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant .
- à mes chères sœurs .
- à mes chère frères .
- à tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en électrotechnique .
- à tous mes oncles et mes tantes .
- à tous mes amis .
- Au promo master 2 en Electrotechnique, option Commande des machines .
- enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

Anes Sahraoui
Tlemcen, le 17 juin 2017

JE dédie ce travail :

- Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant .
- à mes chères sœurs .
- à mon chère frère Mohamed .
- à tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en électrotechnique .
- à tous mes oncles et mes tantes .
- à tous mes amis .
- enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

Abdelhafid Rekiouk
Tlemcen, le 17 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 Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Nos remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.

Nous tenons à exprimé notre sincère gratitude à Monsieur **M.A.BRIKCI NIGASSA** Maître de Conférence à l'université de Tlemcen pour avoir accepté de présider et d'honorer de sa présence le Jury de soutenance, qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Nous tenons ensuite à remercier notre encadrant Monsieur **B.YACOUBI** Maître Assistant à l'université de Tlemcen, pour ce soutien, ses conseils et son encadrement qui nous ont été bénéfique pour mener à bien ce travail.

Nous tenons également à adresser nos remerciements à messieurs les membres du jury (**M.C. BENHABIB** et **H.BENARIBA**) pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail .

Nous voudrions également remercier tous les enseignants que nous avons eu L'honneur d'avoir de connaître et d'apprécier durant notre scolarité.

Nous tenons également à remercier nos parents, pour tout le soutien moral, financier, psychologique et particulièrement pour l'amour qu'ils nous portent.

Enfin, Nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail.

Anes Sahraoui Abdelhafid Rekiouk
Tlemcen, le 17 juin 2017

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	x
GLOSSAIRE	xiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 ETAT DE L'ART DE L'AÉROGÉNÉRATEUR	3
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 HISTORIQUE DE L'ÉOLIENNE	4
1.3 EVALUATION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE EN ALGÉRIE	5
1.4 LAÉROGÉNÉRATEUR	6
1.5 LES TYPES D'ÉOLIENNES	7
1.5.1 Éoliennes à axe vertical	7
1.5.2 Éoliennes à axe horizontal	8
1.6 CONSTITUTION - FONCTIONNEMENT DE L'ÉOLIENNE	9
1.6.1 le mât (la tour)	9
1.6.2 Le rotor éolien	9
1.6.3 La nacelle	10
1.7 ÉOLIENNES À VITESSE FIXE ET ÉOLIENNES À VITESSE VARIABLE	11
1.7.1 Les éoliennes à vitesse fixe	11
1.7.2 Les éoliennes à vitesse variable	11
1.8 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	12
1.8.1 Avantages	12
1.8.2 Inconvénients	12
1.9 GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	13
1.9.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation	13
1.9.2 Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable	13
1.9.2.1 Fonctionnement en Mode Moteur Hypo-Synchrone	14
1.9.2.2 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone	14

1.9.2.3	Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone	15
1.9.2.4	Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone	15
1.9.3	Différentes configurations de la MADA	16
1.9.3.1	MADA à énergie rotorique dissipée	16
1.9.3.2	MADA structure de Kramer	16
1.9.3.3	MADA structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	17
1.9.3.4	MADA structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	17
1.9.4	Avantages et Inconvénients de la MADA	18
1.9.4.1	Avantages de la MADA	18
1.9.4.2	Inconvénients de la MADA de la MADA	18
1.10	CONCLUSION	18
2	MODÉLISATION ET COMMANDE D'UNE TURBINE ÉOLIENNE	19
2.1	INTRODUCTION	20
2.2	CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	20
2.2.1	Modélisation du vent	20
2.2.2	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	21
2.3	MODÉLISATION DE LA TURBINE EOLIENNE	22
2.3.1	Modèle du la turbine	22
2.3.2	Modèle du multiplicateur	24
2.3.3	Modélisation de l'Arbre Mécanique	24
2.4	STRATÉGIE DE LA COMMANDE D'UNE ÉOLIENNE À VITESSE VARIABLE	25
2.4.1	Principe de MPPT	25
2.4.2	Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	25
2.5	TECHNIQUE D' EXTRACTION DU MAXIMUM DE PUISSANCE	27
2.5.1	Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique	27
2.5.1.1	Résultats de Simulations	29
2.5.1.2	Interprétations des résultats	30
2.5.2	Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique	30
2.5.2.1	Résultats de Simulations	32
2.5.2.2	Interprétations des résultats	33
2.6	CONCLUSION	33
3	MODÉLISATION ET COMMANDE DES PUISSANCES DE LA MADA	34
3.1	INTRODUCTION	35
3.2	MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION (MADA) :	35
3.2.1	Hypothèses simplificatrices de la modélisation de la MADA	36
3.2.2	Equations de la MADA	36

3.2.2.1	Equations Electriques	36
3.2.2.2	Equations Magnétiques	37
3.2.2.3	Équations mécaniques	37
3.2.3	Application de la Transformation de Park à la MADA	38
3.2.4	Choix du référentiel	39
3.2.4.1	Référentiel lié au stator	39
3.2.4.2	Référentiel lié au rotor	39
3.2.4.3	Référentiel Lié au Champ Tournant	39
3.3	COMMANDE VECTORIELLE	41
3.3.1	Principe de la commande vectorielle de la GADA	41
3.3.2	Application de la commande vectorielle à flux statorique orienté	41
3.3.2.1	Relation entre le courant statorique et le cou- rant rotorique	43
3.3.2.2	Relations entre puissances statoriques et cou- rants rotoriques	43
3.3.2.3	Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques	43
3.3.3	découplage de système	45
3.4	MODÉLISATION ET COMMANDE DE L'ONDULEUR À MLI	45
3.4.1	modélisation de l'onduleur a deux niveaux	45
3.4.2	Principe de la MLI	46
3.4.3	Commande de la MLI	47
3.5	CONTROLE INDÉPENDANT DES PUISSANCE ACTIVE ET RÉACTIVE 48	
3.5.1	Commande Directe des Puissances Active et Réactive	48
3.5.1.1	Synthèse des régulateurs PI	48
3.5.1.2	Résultats de Simulations	50
3.5.1.3	Interprétation des résultats	51
3.5.2	Commande indirecte des Puissances Active et Réactive	51
3.5.2.1	Commande indirecte sans boucle de puissance	51
3.5.2.2	Synthèse des régulateurs PI	52
3.5.2.3	Commande indirecte avec boucle de puissance	53
3.5.3	Résultats de Simulations	53
3.5.3.1	Résultats de Simulations indirecte sans boucles des puissances	53
3.5.3.2	Résultats de Simulations indirecte avec boucles des puissances	55
3.6	CONCLUSION	56
	CONCLUSION GÉNÉRALE	57
	PERSPECTIVES	58
	BIBLIOGRAPHIE	62
	ANNEXE A	1

ANNEXE B	2
ANNEXE C	5

TABLE DES FIGURES

1.1	première ferme éolienne à Adrar	5
1.2	la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol	6
1.3	Correspondance taille-puissance des éoliennes	7
1.4	Eolienne à axe vertical	8
1.5	Eolienne à axe horizontal	8
1.6	Turbines éoliennes en amont et en aval	9
1.7	Principaux composants d'une éolienne	10
1.8	Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage	11
1.9	Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA	12
1.10	Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA	13
1.11	fonctionnement en Mode Moteur Hypo-Synchrone	14
1.12	Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone	14
1.13	Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone	15
1.14	Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone	15
1.15	MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	16
1.16	Machine asynchrone à double alimentation structure de Kramer	16
1.17	Structure de Schérbius avec cyclo convertisseur	17
1.18	structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	17
2.1	Représentation d'une colonne d'aire	21
2.2	Schéma de la turbine éolienne	22
2.3	Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β	23
2.4	Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien	25
2.5	Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne de grande puissance	26
2.6	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse	28
2.7	Profil du vent	29
2.8	Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse	29
2.9	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de vitesse	31
2.10	Boucle de régulation de la vitesse de rotation par un régulateur PI	31
2.11	Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse	33

3.1	Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA	35
3.2	Orientation du flux statorique sur l'axe d	42
3.3	schéma interne de la MADA	44
3.4	Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux	45
3.5	Diagramme signal de commande de gâchette	47
3.6	Schéma bloc de la commande directe	48
3.7	Schéma de régulation des puissances P_s et Q_s	49
3.8	Résultats de simulations pour la commande directe	50
3.9	Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances	51
3.10	Schéma de régulation des courant I_{rd} et de I_{rq}	52
3.11	Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances	53
3.12	Résultats de simulations pour la commande indirecte sans boucles des puissances	54
3.13	Résultats de simulations pour la commande indirecte avec boucles des puissances	55
14	Tube de courant autour d'une éolienne	2
15	Coefficient de puissance	4
16	schéma de simulation de La MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique	5
17	schéma de simulation de La MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique	5

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
Angle d'orientation des pales	β	°
Angle entre l'axe de la première phase de stator et l'axe d	θ_s	rad
Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d	θ_r	rad
Constantes du régulateur <i>PI</i>	K_{pw}, K_{iw}	/
Constante de temps statorique	T_s	s
Constante de temp rotorique	T_r	s
Coefficient de puissance	C_p	/
Coefficient de puissance maximale	C_{pmax}	/
Coefficient de frottement visqueux	B	N.s.rad ⁻¹
Coefficient de dispersion de Blondel	σ	/
Coefficient d'amortissement	ξ	/
Couple électromagnétique	C_{em}	Nm
Couple résistant	C_r	Nm
Couple aérogénérateur	C_{aer}	Nm
Couple de la génératrice	C_{mec}	Nm
Couple électromagnétique	C_{em}	Nm
Couple aérogénérateur	C_{aer}	Nm
Couple électromagnétique référence	c_{em}^*	Nm
Couple aérodynamique estimé	$c_{aerestim}$	Nm

Nom	Symbole	Unité
Courant	I	A
Courant aux bornes d'une phase n du stator	I_{ns}	A
Courants statorique et rotorique	I_s, I_r	A
Courants statorique dans le repère dq	I_{sd}, I_{sq}	A
Courants rotoriques dans le repère dq	I_{rd}, I_{rq}	A
Correspondent aux trois phases du stator	a_s, b_s, c_s	/
Correspondent aux trois phases du rotor	a_r, b_r, c_r	/
Énergie cinétique	E	J
Énergie cinétique d'une colonne d'air	E	J
Flux	ϕ	Wb
Flux statorique et rotorique	ϕ_s, ϕ_r	Wb
Flux statoriques dans le repère dq	ϕ_{sd}, ϕ_{sq}	Wb
Flux rotoriques dans le repère dq	ϕ_{rd}, ϕ_{rq}	Wb
Flux aux bornes d'une phase n du stator	ϕ_{ns}	Wb
Frottement visqueux	J_{turb}	$Kg.m^2$
Gain du multiplicateur	G	/
Glissement	g	/
Inductance cyclique statorique par phase	L_s	H
Inductance cyclique rotorique par phase	L_r	H
Inductance mutuelle cyclique	M_{sr}	H
Inductances propres statoriques et rotoriques	L_s, L_r	H
Inductance mutuelle	M	H
Inductance mutuelle entre phases statoriques	M_s	H
Inductance mutuelle entre phases rotoriques	M_r	H
Inductance mutuelle entre les phases du stator et du rotor	M_{sr}	H
Inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase du rotor	M_0	H
Inertie totale	J	$Kg.m^2$
Inertie de la turbine	J_{turb}	$Kg.m^2$
Inertie de la génératrice	J_m	$Kg.m^2$
longueur d'une colonne d'air	dx	m
Nombre de paires de pôles	P	/

Nom	Symbole	Unité
Masse volumique de l'air	ρ	/
Masse d'air	m	Kg
Matrice de transformation de Park	$[P]$	/
Matrice de transformation inverse de Park	$[P]^{-1}$	/
Moment d'inertie	J	$kg.m^2$
Moment d'inertie du rotor	J	$Kg.m^2$
Opérateur dérivé de Laplace	P	/
Position angulaire du rotor par rapport au stator	θ	rad
Puissance	P	W
Puissances actives statorique et rototrique	P_s, P_r	W
Puissances réactives statorique et rototrique	Q_s, Q_r	Var
Puissance active statorique référence	P_{ref}	W
Puissance réactive statorique référence	Q_{ref}	Var
Puissance nominale	P_{nom}	W
Puissance cinétique du vent	P_{vent}	W
Puissance aérogénérateur	P_{aer}	W
Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé	P_{mt}	W
Pulsation propre	ω_n	$rad.s^1$
Pulsation électrique	ω	$rad.s^1$
Pulsation électrique	ω	$rad.s^1$
Pulsation électrique statorique	ω_s	$rad.s^1$
Pulsation électrique rotorique	ω_r	$rad.s^1$
Pulsation mécanique de rotation	Ω	$rad.s^1$
Rayon de pale	R	m
Résistance de l'enroulement statorique par phase	R_s	Ω
Résistance de l'enroulement rotorique par phase	R_s	Ω
Résistance statorique et rotorique	R_s, R_s	Ω
Régulateur	PI	/

Nom	Symbole	Unité
Surface balayée par le rotor de l'éolienne	S	m^2
Système de courant dans le repère (abc)	$[I_{abs}]$	A
Système de courant dans le repère (dq)	$[I_{dqo}]$	A
Système de tension dans le repère (abc)	$[V_{abs}]$	$volt$
Système de tension dans le repère (dq)	$[V_{dqo}]$	$volt$
Système de flux dans le repère (abc)	$[\phi_{abs}]$	H
Système de flux dans le repère (dq)	$[dqo]$	H
Tension	U	V
Tension aux bornes d'une phase n du stator	V_{ns}	A
Tensions statorique et rototrique	V_s, V_r	$volt$
Tensions statoriques dans le repère	V_{sd}, V_{sq}	$volt$
Tensions rotoriques dans le repère	V_{rd}, V_{rq}	$volt$
Temps	t	t
Temps de réponse du système	τ	s
Vitesse angulaire mécanique	r	$rad.s^{-1}$
Vitesse de la turbine	Ω_{tur}	$rad.s^{-1}$
Vitesse de la génératrice	Ω	$rad.s^{-1}$
Vitesse de la turbine estimée	$\Omega_{turbestim}$	$rad.s^{-1}$
Vitesse du vent	v_{vent}	$m.s^{-1}$
vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne	V_1	$m.s^{-1}$
Vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne	V_2	$m.s^{-1}$
Vitesse instantanée du vent estimée	$v_{ventestim}$	$m.s^{-1}$
Vitesse mécanique de référence	Ω_{mec}^*	$rad.s^{-1}$
Vitesse relative	λ	$/$
Vitesse relative optimal	λ_{opt}	$/$
Vitesse mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne démarrée	Ω_{cutin}	$rad.s^{-1}$
mécanique de la génératrice à laquelle l'éolienne arrêtée	Ω_{cutout}	$rad.s^{-1}$

Glossaire

Acronyme	Signification
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation de Largeur d 'Impulsion
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn Off
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportionnel et Intégral
DFIM	Doubly Fed Induction Machine
FTBO	fonction de transfert en boucle ouverte
FTBF	fonction de transfert en boucle fermé

Introduction générale

La consommation mondiale de l'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique dénotent encore une fois l'importance des énergies renouvelables. Parmi les énergies non polluantes, l'énergie éolienne a été identifiée comme une des plus prometteuses des énergies renouvelables pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Parmi les énergies les plus prometteuses est celle de l'éolienne qui représente une alternative intéressante notamment pour la production de l'énergie électrique. L'évolution des éoliennes a connu un essor ces dernières années, que ce soit sur le plan de leur utilisation dans le monde ou sur le plan de leur conception où ils ont passé de la petite éolienne isolée aux grands parcs des aérogénérateurs connectés sur le réseau électrique.

D'autre part, il apparaît nécessaire de disposer d'un outil de simulation capable de modéliser l'ensemble de la chaîne de conversion d'énergie et de prévoir ses performances. L'objectif général de cette étude est d'optimiser la conversion électromécanique d'énergie des éoliennes, l'élaboration de stratégies appropriées de contrôle.

Les turbines éoliennes basées sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) sont aujourd'hui plus largement utilisées notamment dans les grands parcs éoliens à cause des avantages qu'elle présente. Cette machine fonctionne à une fréquence fixe pour une vitesse d'entraînement variable grâce à un contrôle de courants rotoriques par des convertisseurs dimensionnés à des puissances réduites.

Donc, L 'objectif principal de nos travaux de thèse est d 'étudier la commande de puissance active et réactive d 'une éolienne basée sur un GADA Pour ce faire, la thèse est organisée en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art de l'aérogénérateur : Nous décrirons les différents types d'éoliennes existantes et leurs fonctionnements en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients. Nous schématiserons finalement la MADA en expliquant son fonctionnement et en décrivant les différents composants qui la constituent et leurs modes de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons d 'abord les paramètres de l 'éolienne. Nous modéliserons la turbine éolienne ainsi que l 'arbre mécanique en décrivant l 'utilité du multiplicateur. Ensuite nous expliquerons la notion de MPPT en précisant pourquoi il devient nécessaire de l 'introduire dans toutes les éoliennes à vitesse variable.

Le troisième chapitre, Nous décrirons et modéliserons la machine MADA, Nous procéderons à la mise en équation de la machine asynchrone Afin de simplifier les équations de cette machine, nous utiliserons la transformation de PARK. Elle permet le passage du repère abc au repère dqo. Ensuite nous expliquerons Stratégie de la Commande Vectorielle du Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA) pour le Contrôle Indépendant des Puissances Active et Réactive (Commande Directe+commande indirecte des Puissances Active et Réactive).

Chapitre 1

Etat de l'Art de l'Aérogénérateur

SOMMAIRE

1.1	INTRODUCTION	4
1.2	HISTORIQUE DE L'ÉOLIENNE	4
1.3	EVALUATION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE EN ALGÉRIE	5
1.4	L'AÉROGÉNÉRATEUR	6
1.5	LES TYPES D'ÉOLIENNES	7
1.5.1	Eoliennes à axe vertical	7
1.5.2	Eoliennes à axe horizontal	8
1.6	CONSTITUTION - FONCTIONNEMENT DE L'ÉOLIENNE	9
1.6.1	le mât (la tour)	9
1.6.2	Le rotor éolien	9
1.6.3	La nacelle	10
1.7	ÉOLIENNES À VITESSE FIXE ET ÉOLIENNES À VITESSE VARIABLE	11
1.7.1	Les éoliennes à vitesse fixe	11
1.7.2	Les éoliennes à vitesse variable	11
1.8	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	12
1.8.1	Avantages	12
1.8.2	Inconvénients	12
1.9	GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	13
1.9.1	Description de la machine asynchrone à double alimentation	13
1.9.2	Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable	13
1.9.3	Différentes configurations de la MADA	16
1.9.4	Avantages et Inconvénients de la MADA	18
1.10	CONCLUSION	18

1.1 Introduction

LA cause principale de la pollution et les problèmes environnementaux est l'être humain, pour cela l'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Les aérogénérateurs les plus utilisées sont ceux axe horizontal qui peuvent fonctionner à vitesse variable afin de maximiser la puissance produite dont le contrôle se fait par des convertisseurs statiques associés à un système de commande des gâchettes des interrupteurs.

Dans le domaine éolien, le générateur asynchrone à double alimentation (GADA) est le plus utilisé car il présente bien des avantages tels que : puissance élevée, coût, un entretien non exigeant et le convertisseur raccordé à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, etc.

Donc, dans le premier chapitre on va présenter l'état de l'art sur l'énergie éolienne. Ensuite nous donnons les différents types d'éoliennes, leurs constitutions et leurs fonctionnements. Après, on va donner une représentation générale sur la MADA : les modes de fonctionnement, les différentes configurations, les avantages et les inconvénients de cette machine

1.2 Historique de l'éolienne

Depuis l'antiquité, Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. elle fut utilisée pour la propulsion des navires, ensuite les moulins à blé et les systèmes permettant le pompage d'eau.

En 1888, à Cleveland (Etats-Unis), Charles Brush parvient à alimenter sa résidence en électricité à partir d'un moulin en bois, avec une turbine de diamètre de 17 m, et de 144 pales de cèdre, produisant seulement une puissance de 12kW. [34]

Au Danemark, au même moment ; Poul La Cour tire rapidement les leçons de son homologue américain. En 1891, il bâtit son prototype sur le terrain de l'école d'Askov présentant un nombre plus faible de pales afin de tourner plus vite et produire plus d'électricité. Cette dernière fût la première éolienne dite industrielle. En 1918, dix ans après sa mort, 3% de l'énergie produite au Danemark provient déjà de l'éolien. Suite au développement des lignes électriques à grande échelle, le marché de l'éolien a commencé à ralentir à la fin des années cinquante, par ailleurs, depuis 1941 la plupart des fermes agricoles utilisaient toujours l'électricité éolienne basée sur une turbine à axe horizontal.[1]

En 1973 : La crise pétrolière donne un intérêt pour le Grand éolien et incite les gouvernements de l'Allemagne, de la Suède, du Canada, du Royaume-Uni et des États-Unis à financer des projets de recherche sur les énergies renouvelables. Ces programmes sont à l'origine de la conception et de la mise en œuvre de nouveaux designs d'éoliennes qui réduisent de façon significative le coût de l'énergie éolienne au cours des deux décennies suivantes [2].

L'Algérie a décidé en 2006 de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf avec une puissance de 50MW et une autre à Adrar avec une puissance de 10 MW.



FIGURE 1.1 – première ferme éolienne à Adrar

1.3 Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie

Le potentiel éolien diffère selon la situation géographique. La carte des vents de l'Algérie estimée à 10 m du sol est présentée en figure ci-dessous. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. cependant, on remarque que pour Oran et Bejaia du littorale ainsi que le Tassilli et Beni Abbés présentent un potentiel éolien intéressant avec une vitesse de vent moyenne supérieure à 4.5 m/s [19].

En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 4 à 4.5m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf [26].

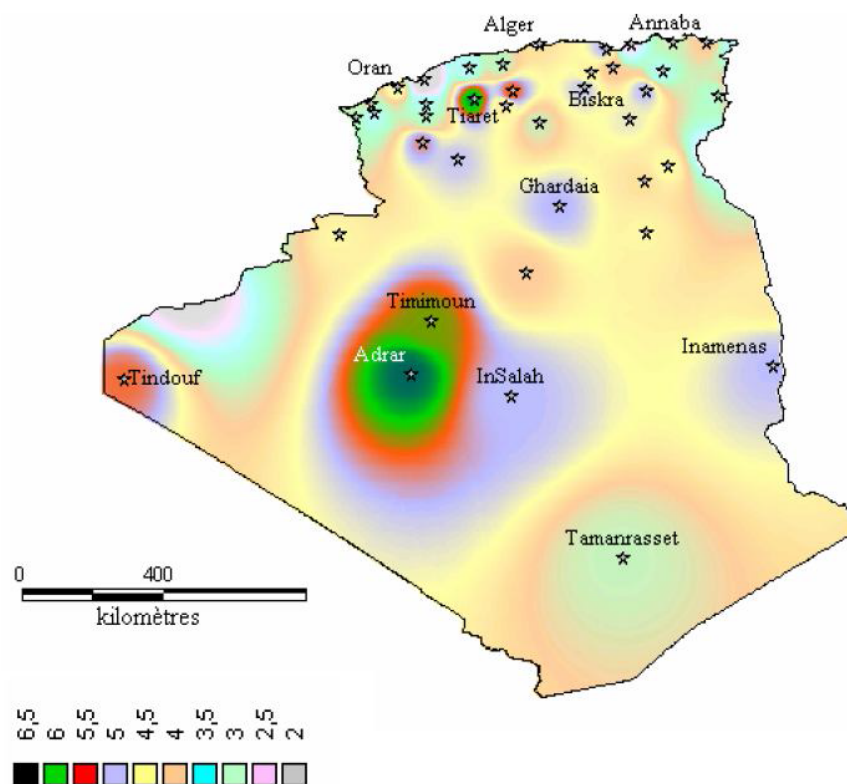


FIGURE 1.2 – la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol

1.4 LAérogénérateur

Un aérogénérateur ou une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de 1 MW
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW

Le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice. [28]

Eolienne	Diamètre de l'hélice	puissance
Petite	Inferieur à 12m	moins de 40Kw
Moyenne	12m à 50m	40Kw à 1Mw
Grande	Supérieur à 50m	1Mw et plus

La figure (1.3) propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice :

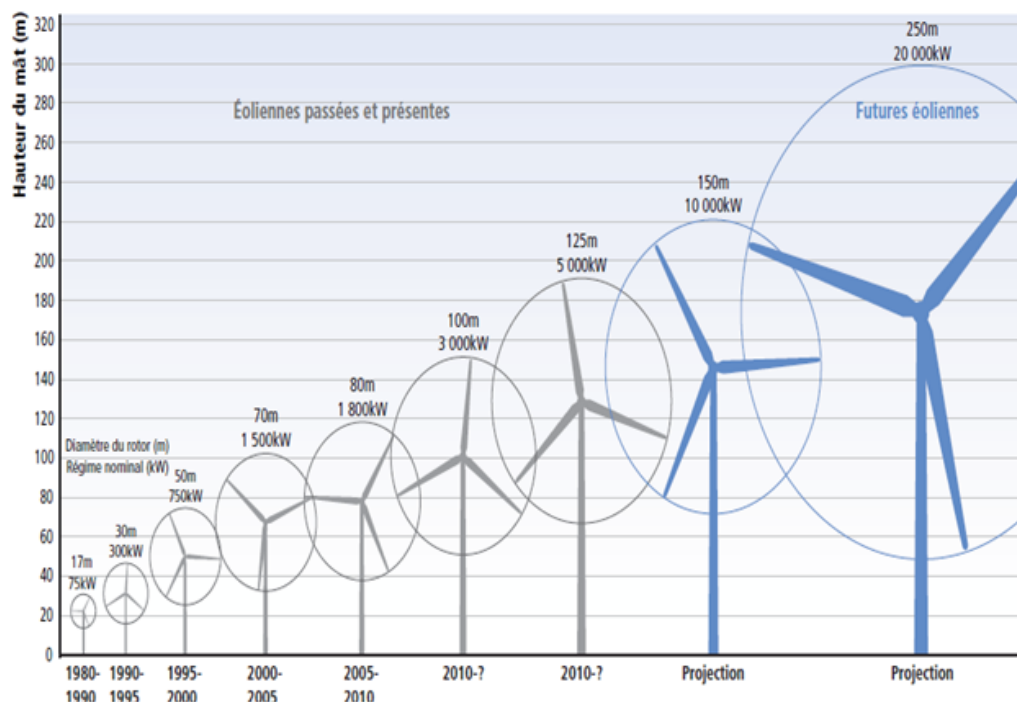


FIGURE 1.3 – Correspondance taille-puissance des éoliennes

1.5 Les types d'éoliennes

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles :

- Éoliennes à axe vertical.
- Éoliennes à axe horizontal.

1.5.1 Éoliennes à axe vertical

Les Éoliennes à axe vertical sont moins utilisées de nos jours car leurs performances sont moins par rapport à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur car freiné par le relief.

Le seul modèle construit de manière industrielle fut l'éolienne de Darrieus, (figure 1.4), d'après l'ingénieur français Georges Darrieus qui en breveta la conception en 1931. La compagnie américaine FloWind fabriquait cette éolienne jusqu'à en 1997. Elle se caractérise avec ses 2 ou 3 pâles en forme de C. [15]

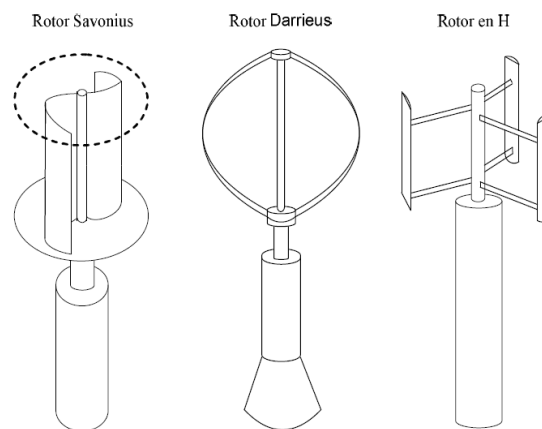


FIGURE 1.4 – Eolienne à axe vertical

1.5.2 Eoliennes à axe horizontal

La plupart des éoliennes installées dans le monde sont à axe horizontal, la conception est basée sur les moulins à vent. Par conséquent l'axe de rotation est parallèle au flux du vent, la turbine est couplée à une machine électrique par l'intermédiaire d'une boîte à vitesses, le système est fixé en haut de la tour afin de capter le maximum du potentiel éolien. Ce choix présente plusieurs avantages, comme la faible vitesse d'amorçage (démarrage), malheureusement il pose des problèmes mécaniques et économiques.

Toutefois, la boîte de vitesses et la machine électrique doivent être installées en haut de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques. Selon son nombre de pales, l'éolienne à axe horizontal est dite mono-pale, bipales, tripales ou multipales.



FIGURE 1.5 – Eolienne à axe horizontal

Il existe deux sortes d'éoliennes à axe horizontal (figure 1.6) : les éoliennes "amont" et les éoliennes "aval".

- Dans le fonctionnement des éoliennes "amont", le vent souffle directement sur les pales de l'éolienne. Ce type de configuration requiert des pales rigides qui permettent de bien résister au vent car celles-ci sont plus exposées. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000kW fonctionnent avec ce principe.
- Dans le fonctionnement des éoliennes à axe horizontal "aval", le vent souffle sur l'arrière des pales. cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes de maison qui présentent des pales moins solides que celles des grandes éoliennes industrielles.

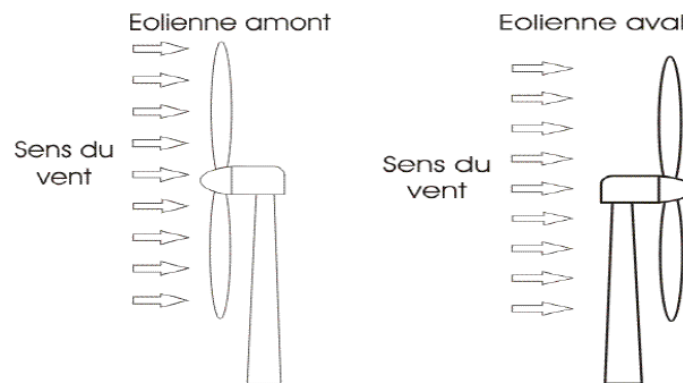


FIGURE 1.6 – Turbines éoliennes en amont et en aval

1.6 Constitution - Fonctionnement de l'éolienne

Un générateur éolien est composé de trois parties à savoir :

1.6.1 le mât (la tour)

c'est un tube d'acier ou un treillis métallique. Pour éviter les perturbations près du sol, ce treillis doit être le plus haut possible. La quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité [18].

1.6.2 Le rotor éolien

il est composé par des pales qui sont assemblées dans leur moyeu.

- Les pales : permettent de capter l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie mécanique au rotor. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est inversement proportionnel à la taille de celles-ci, en effet plus les pales sont grandes, plus la vitesse de rotation est faible. .

- Le moyeu : c'est le support des pales. Au démarrage de l'éolienne ou lors des changements brusques de la vitesse du vent, le moyeu est nécessaire pour supporter des à-coups importants. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé, et non réalisé par soudure, bien que sa forme soit ainsi plus difficile à réaliser[25].

1.6.3 La nacelle

- le générateur électrique (machine synchrone ou asynchrone) qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Afin produire de l'électricité, la vitesse de rotation doit être supérieure à celle de la turbine éolienne (1 000 à 2 000 tours par minute), la tension est d'environ 690 volts qui est alors injectée dans le réseau électrique à travers un transformateur élévateur dont la tension au secondaire allant jusqu'à 20 kvolts.
- tous les éléments mécaniques : arbre lent et rapide, roulements et un multiplicateur de vitesse permettant d'accélérer la vitesse lente des pales.
- le système hydraulique ou électriques d'orientation des pales et de la nacelle nécessaire d'une part à garder la surface balayée par les pales perpendiculaire à la direction du vent lors d'un fonctionnement optimale de puissance et d'autre part il permet d'arrêter le système en cas de surcharge, on dit qu'il fonctionne en frein aérodynamique [21]

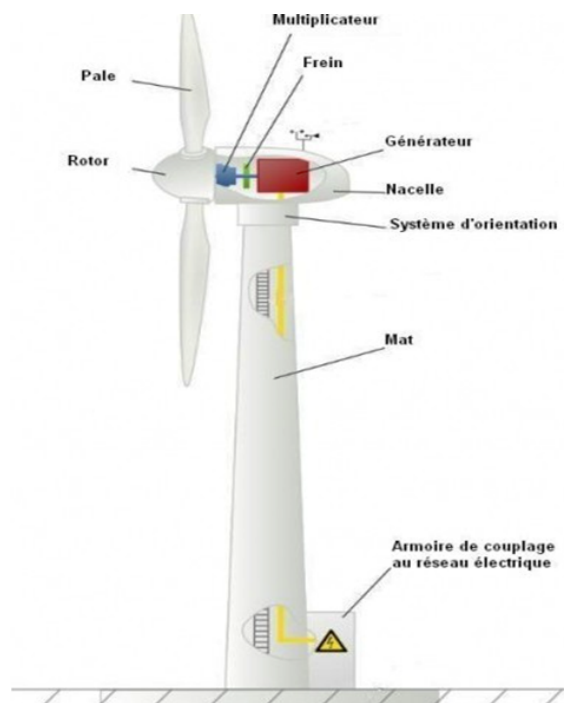


FIGURE 1.7 – Principaux composants d'une éolienne

1.7 Éoliennes à vitesse fixe et éoliennes à vitesse variable

1.7.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique. Cette machine est entraînée par un multiplicateur avec une vitesse approximativement constante à l'aide d'un système mécanique d'orientation des pales. La magnétisation de la machine asynchrone à cage se fait par la compensation de la puissance réactive grâce à une batterie de condensateurs.

La conception des turbines éoliennes à vitesse fixe est fortement liée aux caractéristiques aérodynamiques et mécaniques. Les éoliennes à vitesse fixe présente des inconvénients :

- il est impossible de régler la puissance générée.
- Le mouvement des pales cause des variations fréquentes du couple mécanique, la vitesse reste constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau.

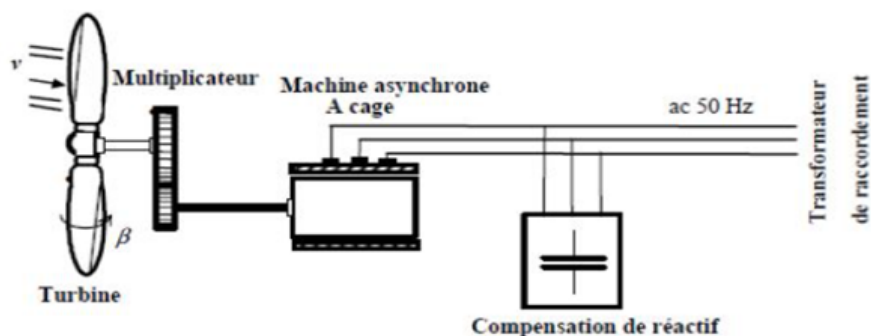


FIGURE 1.8 – Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage

1.7.2 Les éoliennes à vitesse variable

Afin d'optimiser la puissance fournie au réseau, Les éoliennes à vitesse variable utilisent de l'électronique de puissance pour établir une séparation complète entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de l'éolienne adaptée à la vitesse du vent. [36]

Les avantages principaux des éoliennes à vitesse variable sont :

- Une conversation facile pour les faibles vitesses et le maximum de puissance grâce à l'augmentation de la plage de fonctionnement.
- Le système d'orientation des pales est très simple.

- Grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent, il y'a une réduction des efforts mécaniques. Donc, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie.
- Pour des fonctionnements à faible puissance le bruit est réduit [32].

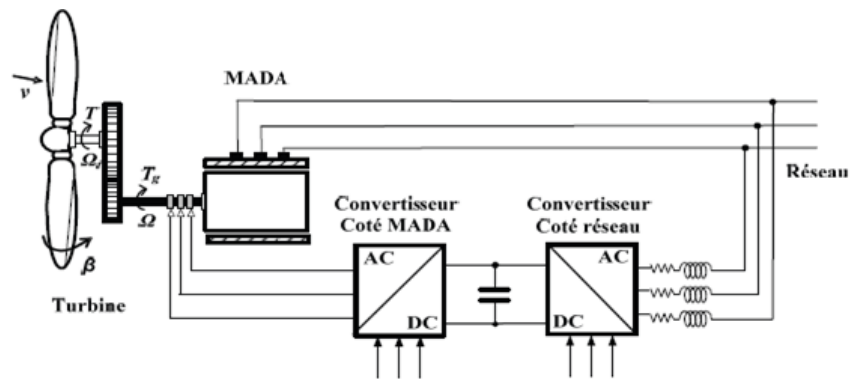


FIGURE 1.9 – Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA

1.8 Avantages et inconvénients de l'Énergie Éolienne

1.8.1 Avantages

- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne. Sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- L'énergie éolienne ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. C'est une énergie strictement propre.
- Vu que la variabilité des prix du baril de pétrole, L'énergie éolienne garantit une sécurité économique. [7]

1.8.2 Inconvénients

- Dans les éoliennes, le multiplicateur produit le bruit, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- il est nécessaire de doubler l'installation par un groupe électrogène Diesel dans le cas d'installations autonomes. Donc, le coût va augmenter.
- les paysages sont en risque à cause d'installations des éoliennes dans la terre. [6] [29][12]

1.9 Génératrice asynchrone a double alimentation

1.9.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (*asynchrone à cage ou synchrone*), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des enroulements décalés de 120° dans l'espace. Il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne[15].

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut alimenter le stator et le rotor en même temps . Dans les domaines d'application à vitesse variable la MADA présente un avantage principale où le glissement peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois[20].

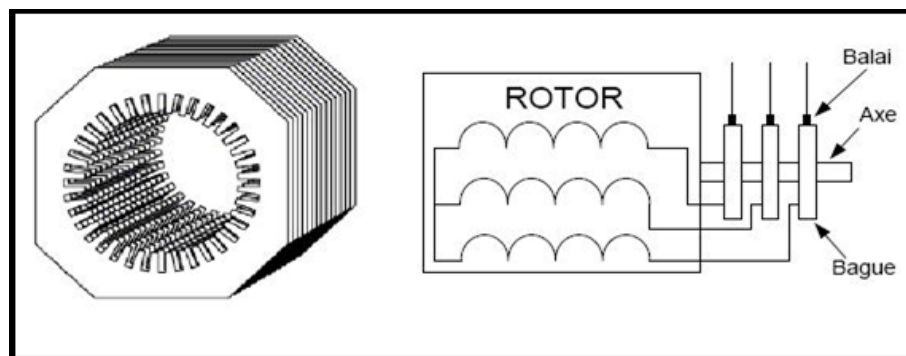


FIGURE 1.10 – Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA

1.9.2 Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable

Généralement, la MADA est capable de travailler en moteur ou en générateur. Pour cette machine, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement.

On sait que la machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur [33]. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper- synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. [6][20]

1.9.2.1 Fonctionnement en Mode Moteur Hypo-Synchrone

La figure (1.11) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.[11]

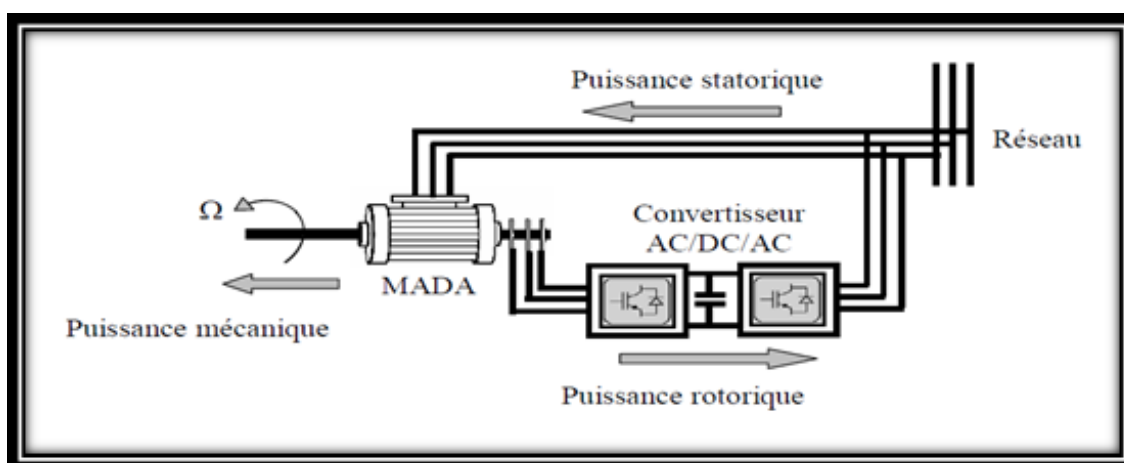


FIGURE 1.11 – fonctionnement en Mode Moteur Hypo-Synchrone

1.9.2.2 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone

La figure (1.12) 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 donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas voir ce fonctionnement [11].

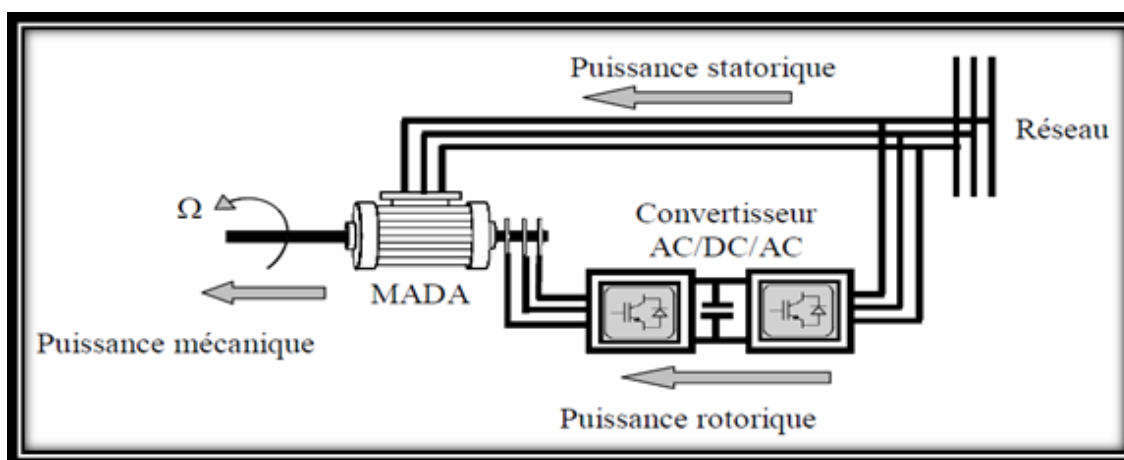


FIGURE 1.12 – Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone

1.9.2.3 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone

La figure (1.13) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement[11].

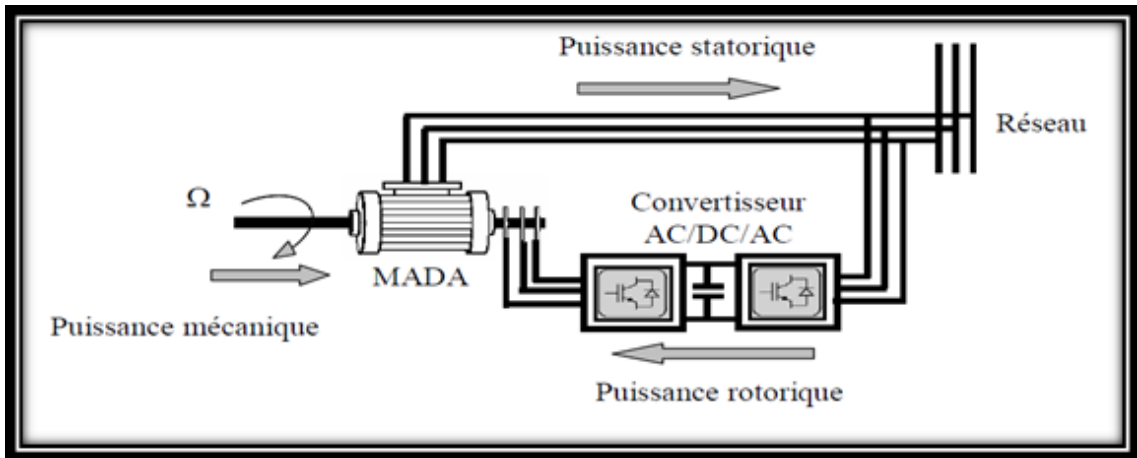


FIGURE 1.13 – Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone

1.9.2.4 Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone

La figure (1.14) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor..[11]

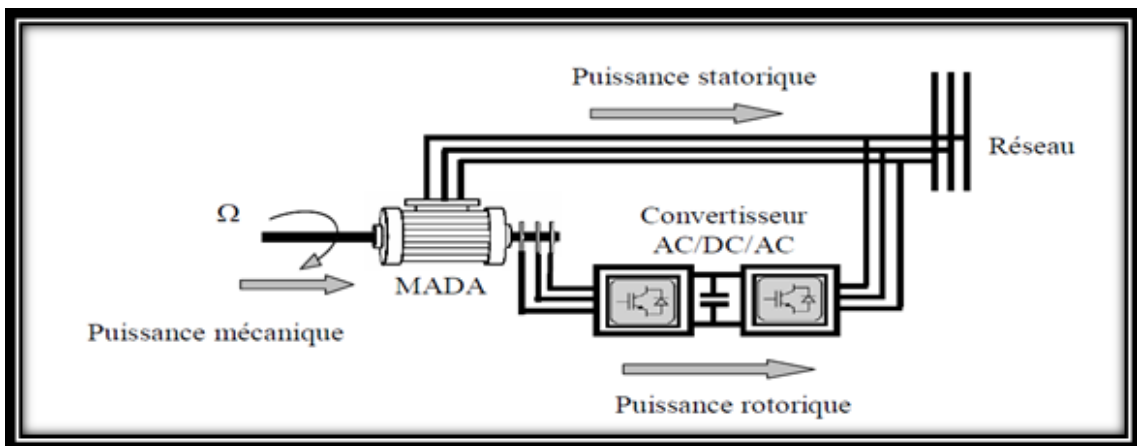


FIGURE 1.14 – Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone

1.9.3 Différentes configurations de la MADA

1.9.3.1 MADA à énergie rotorique dissipée

Dans cette configuration, on voit que le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à une charge résistive à l'intermédiaire d'un redresseur triphasé ce qui permet de varier la puissance rotorique et donc la vitesse de rotation (1.15) [22].

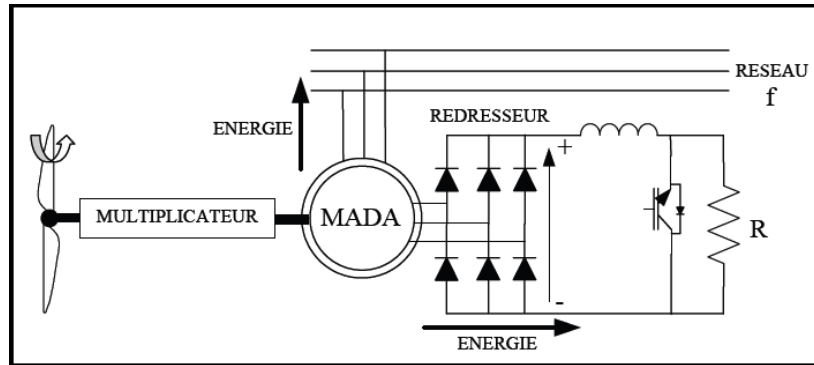


FIGURE 1.15 – MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

1.9.3.2 MADA structure de Kramer

Cette configuration a un avantage de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent (Figure 1.15), l'énergie de glissement est renvoyé au réseau à l'aide d'un onduleur, Figure (1.16) [27]

Le dimensionnement de l'ensemble redresseur-onduleur se fait pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine et le glissement est maintenu inférieur à 30%. Le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau, ce qui confirme que le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme [37].

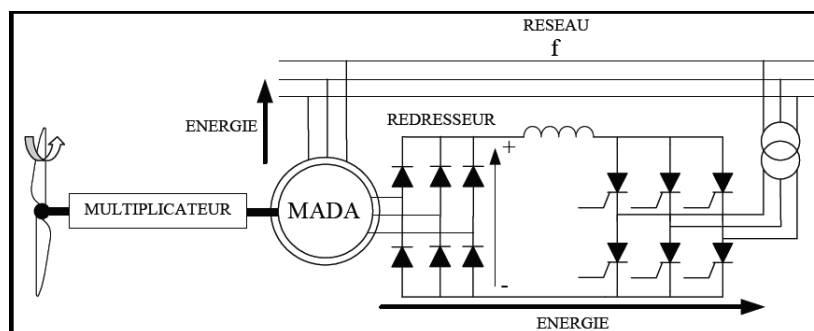


FIGURE 1.16 – Machine asynchrone à double alimentation structure de Kramer

1.9.3.3 MADA structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Dans le but d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, le cyclo convertisseur remplace le rôle de l'ensemble redresseur-onduleur (Figure 1.17). Cette structure est appelée structure de Schérbius avec cyclo convertisseur. Pour maintenir l'efficacité du système il faut que Les variations du glissement restent inférieures à 30%. on dit qu'un fonctionnement hypo-synchrone si ces variations sont positives ou hyper-synchrone si ces variations sont négatives.

Le cyclo convertisseur permet de reproduire une onde de fréquence inférieure à partir des fractions sinusoïdales du réseau. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Ainsi, cette configuration provoque des inconvénients majeurs à cause de sa complexité de la commande et l'augmentation de cout [2].

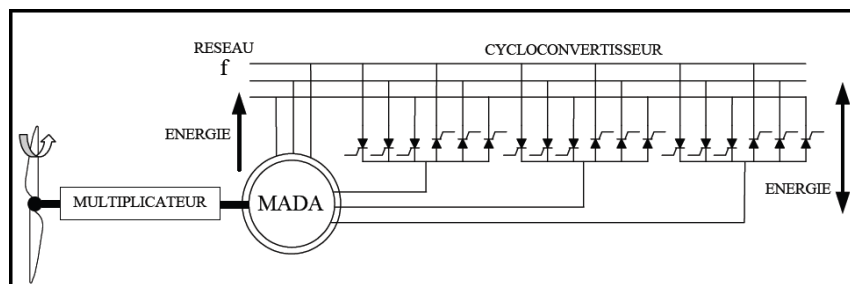


FIGURE 1.17 – Structure de Schérbius avec cyclo convertisseur

1.9.3.4 MADA structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration (Figure 1.18) possède les mêmes caractéristiques que la structure de Schérbius avec cyclo convertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (IGBTs) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture, et leur fréquence de commutation est plus élevée ce qui permet de décaler les harmoniques du courant rotorique vers les hautes fréquences facilitant ainsi le filtrage. La conception de cette configuration est plus conventionnelle et plus simple que les autres [16].

Plusieurs études récentes confirmées par des réalisations industrielles, montrent la fiabilité de ce dispositif dans une éolienne à vitesse variable.

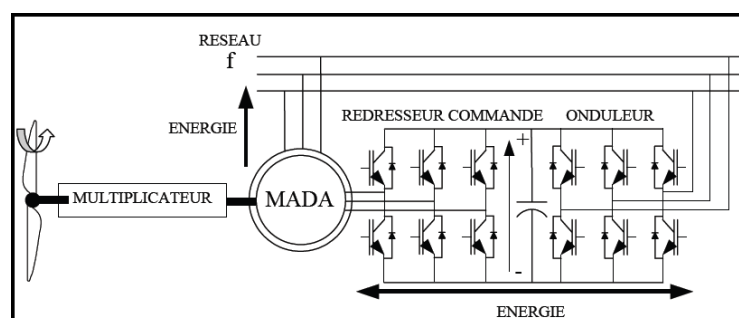


FIGURE 1.18 – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

1.9.4 Avantages et Inconvénients de la MADA

1.9.4.1 Avantages de la MADA

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse [40].
- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent[37][11].

1.9.4.2 Inconvénients de la MADA de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais[31].
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le cout de la maintenance.
- Le cout total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cagenous soulignons que des études récentes, tenant complet de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA[31] [23].

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu général sur l'énergie éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA). On a défini les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Ensuite un rappel sur les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.

De plus, nous avons effectué une présentation sur la MADA : quels sont les éléments composent la MADA, quels sont les quatre modes de fonctionnement et quels sont les différentes configurations, sans oublier les avantages et les inconvénients de cette machine.

Le chapitre suivant, est consacré à la modélisation de la partie mécanique d'éolienne, celle-ci réalisant une commande de la turbine basée sur l'extraction de maximum de puissance.

Chapitre 2

Modélisation et commande d'une turbine éolienne

SOMMAIRE

2.1	INTRODUCTION	20
2.2	CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	20
2.2.1	Modélisation du vent	20
2.2.2	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	21
2.3	MODÉLISATION DE LA TURBINE ÉOLIENNE	22
2.3.1	Modèle de la turbine	22
2.3.2	Modèle du multiplicateur	24
2.3.3	Modélisation de l'Arbre Mécanique	24
2.4	STRATÉGIE DE LA COMMANDE D'UNE ÉOLIENNE À VITESSE VARIABLE	25
2.4.1	Principe de MPPT	25
2.4.2	Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	25
2.5	TECHNIQUE D' EXTRACTION DU MAXIMUM DE PUISSANCE	27
2.5.1	Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique	27
2.5.2	Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique	30
2.6	CONCLUSION	33

2.1 Introduction

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les deux éléments les plus importants, car la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le système turbine-génératrice est intégré avec des convertisseurs, nécessaires pour la conversion (alternatif /continu) ou inversement. Ce chapitre est consacré à la modélisation et la commande d'une turbine éolienne. par la suite, différentes stratégies de commande sont décrites pour contrôler la puissance aérodynamique de la turbine .

2.2 Conversion de l'énergie éolienne

2.2.1 Modélisation du vent

Le vent est la source principale de l'énergie éolienne, c'est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente[34].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ρ .
- développer et affiner la modélisation du rotor.
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- fournir une aide pour l'implantation des machines[34].

Pour définir le modèle du vent, il est nécessaire de connaître les données climatiques et géographiques du site concerné. Le vent est représenté comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par l'équation :

$$V_{vent} = A + \sum_{n=1}^i a_n(\sin(\omega_n t)) \quad (2.1)$$

avec :

- A : la valeur moyenne de la vitesse de vent.
- a_n : amplitude de l'harmonique de l'ordre n .
- ω_n : pulsation de l'harmonique de l'ordre n .
- i : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

2.2.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de masse volumique ρ , animée d'une Vitesse V_{vent} , de longueur dx et de section S telle que représentée sur la figure (2.1) suivant :

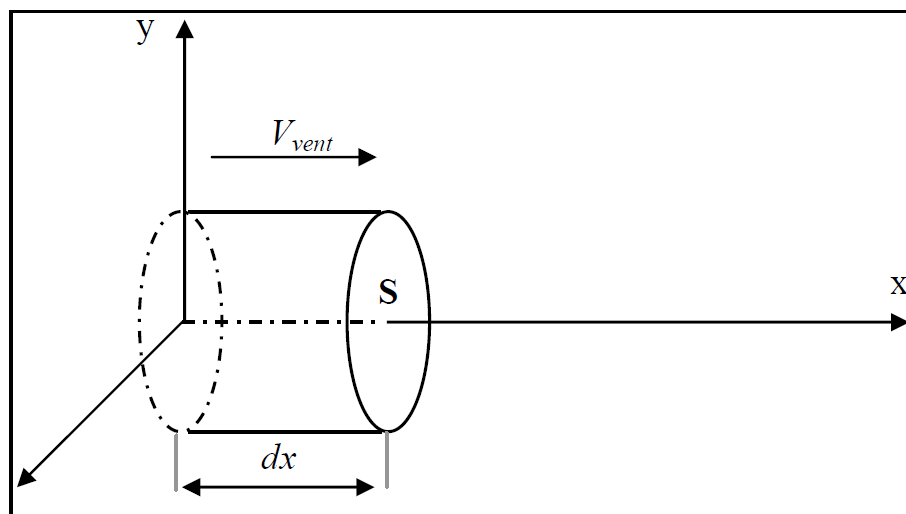


FIGURE 2.1 – Représentation d'une colonne d'air

L'énergie cinétique de colonne d'air exprimé par :

$$dE = \frac{1}{2} dm \cdot V_{vent}^2 \quad (2.2)$$

avec :

- $dm = \rho \cdot S \cdot dl$: masse de cette colonne d'air.
- $V_{vent} = \frac{dl}{dt}$

D'où :

$$dE = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \cdot dt \quad (2.3)$$

On en déduit ainsi l'expression de la puissance disponible :

$$P_{vent} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \quad (2.4)$$

Avec :

- ρ : la masse volumique de l'air [$kg \cdot m^{-3}$].
- V_{vent} : vitesse instantanée du vent [$m \cdot s^{-1}$].
- E : énergie cinétique [J].

L'énergie du vent c'est l'énergie cinétique de l'air récupérable traversant une certaine surface $S = \pi \cdot R^2$, la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (2.5)$$

2.3 Modélisation de la Turbine Eolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air ρ , la surface balayée par le rotor s et la vitesse du vent V_{vent} . La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. [17]

la configuration du système étudié est constituée d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain G , comme le montre la (figure 2.2) suivant :

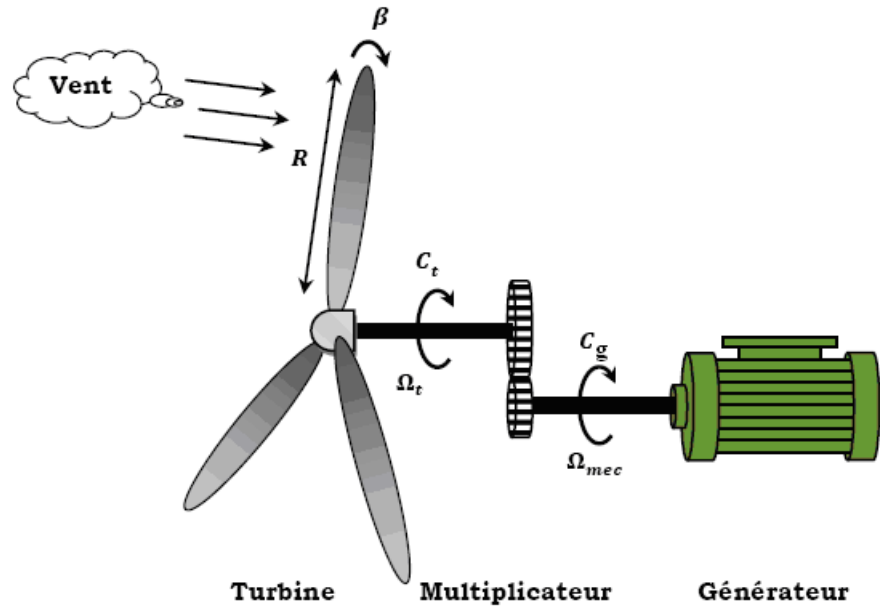


FIGURE 2.2 – Schéma de la turbine éolienne

2.3.1 Modèle du la turbine

La puissance cinétique du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (2.6)$$

La puissance aérodynamique qui est convertie par une turbine du vent P_{aer} dépend du coefficient de puissance $Cp(\lambda, \beta)$. Elle est donnée par [14] :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot Cp(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (2.7)$$

avec :

- P_{vent} : puissance du vent [W].
- P_{aer} : puissance aérodynamique [W] .
- V_{vent} : vitesse instantanée du vent [$m.s^{-1}$] .
- Cp : coefficient de puissance .

- ρ : la masse volumique de l'air [$kg.m^{-3}$] .
- R : rayon de pale [m] .
- λ : vitesse relative .
- β : angle d'orientation des pales[°] .

La turbine éolienne peut convertir juste un pourcentage de la puissance capturée du vent. On représente ce pourcentage par un coefficient C_p qui est en fonction de ratio de vitesse λ et l'angle de l'orientation de pale β . Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Il existe différentes expressions de C_p qui sont développées et proposées. Pour cela ,on le décrit comme suivant [11].

$$C_p(\lambda, \beta) = [0.5 - 0.0167(\beta - 2)] \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (2.8)$$

La figure (2.3) représente la variation de ce coefficient C_p en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de pale β . D'après cette figure (2.3), on trouve si la valeur de beta augment le C_p diminue ainsi que que la valeur maximal de C_p est $C_{p_{max}} = 0.5$ qui correspond à l'angle de l'orientation de pale $\beta = 2^\circ$ et la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{optim} = 9.22$. Pour extraire le maximum de la puissance générée, nous devons fixer le ratio de vitesse λ_{optim} et le coefficient de puissance maximal $C_{p_{max}}$.

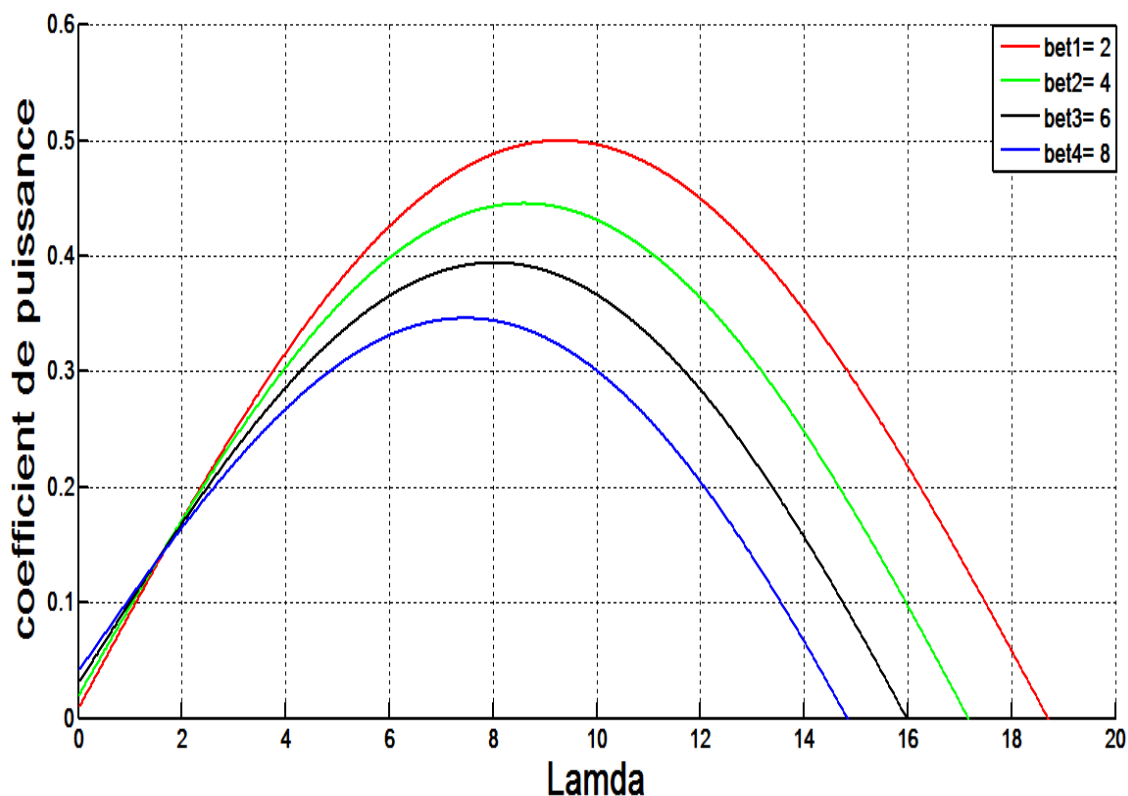


FIGURE 2.3 – Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β

Le couple aérodynamique est le rapport entre la puissance aérodynamique et la vitesse de rotation de la turbine Ω_{turb} :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turb}} \quad (2.9)$$

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales (la vitesse de rotation de la turbine) et la vitesse du vent [5] :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turb} \cdot R}{V_{vent}} \quad (2.10)$$

2.3.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple aérodynamique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [39].

$$C_{mec} = \frac{1}{G} \cdot C_{aer} \quad (2.11)$$

$$\Omega_{tur} = \frac{\Omega}{G} \quad (2.12)$$

avec :

- G : rapport du multiplicateur.
- C_{aer} : couple aérodynamique de la turbine [Nm]
- Ω_{turb} : vitesse de la turbine [$rad.s^{-1}$]
- Ω : vitesse de la génératrice [$rad.s^{-1}$].
- C_{mec} : couple de la génératrice [Nm].

2.3.3 Modélisation de l'Arbre Mécanique

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique exercé sur l'arbre du rotor de la machine électrique C_m et le couple électromagnétique C_{em} :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - f\Omega \quad (2.13)$$

L'inertie totale J est constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et l'inertie de la génératrice J_m [5]

$$J = \frac{J_{turb}}{G^2} + J_m \quad (2.14)$$

avec :

- C_{em} : couple électromagnétique [Nm].
- J_{turb} : inertie de la turbine [$kg.m^2$].
- J_m : inertie de la génératrice [$kg.m^2$].

Le schéma bloc figure (2.4) correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément des équations précédentes :

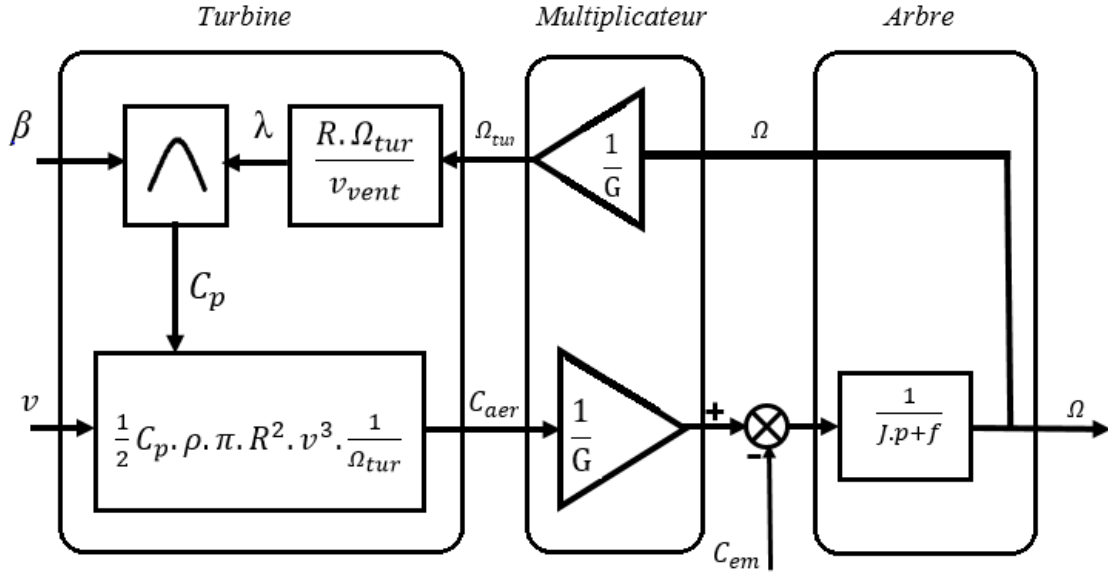


FIGURE 2.4 – Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien

2.4 Stratégie de la commande d'une éolienne à vitesse variable

2.4.1 Principe de MPPT

Le principe de la stratégie MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) consiste pour un angle de pale donné à ajuster en fonction de la vitesse du vent V_{vent} et la vitesse de rotation de la turbine éolienne à une valeur de référence Ω_{turb}^* pour maintenir une vitesse relative optimale et donc un coefficient de puissance maximal C_{pmax} . Nous pouvons donc réécrire l'équation de la façon suivante :

$$\Omega_{Turb} = \frac{V_{vent} \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (2.15)$$

2.4.2 Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

Les quatre zones principales de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable sont illustrées sur la figure (2.5) [5] :

- **Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cutin} .
- **Zone 2** : Lorsque la vitesse du générateur atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire $\beta = 2^\circ$. Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

- **Zone 3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance du générateur atteint des valeurs plus importantes jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- **Zone 4** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control. Au-delà de la vitesse $\Omega_{cut\ out}$, un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

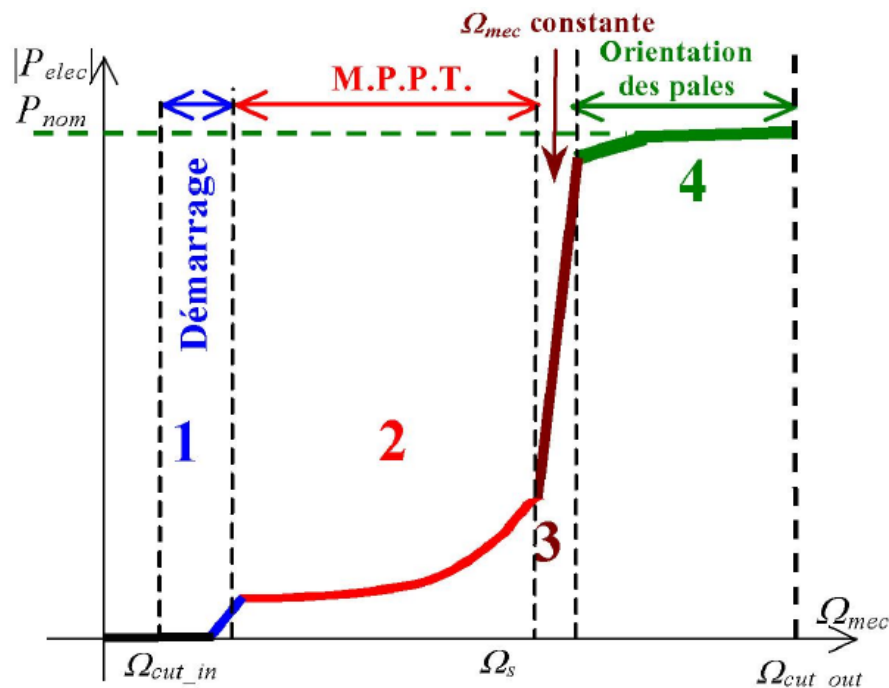


FIGURE 2.5 – Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne de grande puissance

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de contrôle [5] :

- le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.
- le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

2.5 Technique d' extraction du maximum de puissance

Le but de la commande à vitesse variable de la MADA est d'extraire le maximum de puissance de l'éolienne. Pour cela, nous avons besoin d'un algorithme agissant sur les variables de consigne afin d'avoir le meilleur rendement possible du dispositif. A travers l'étude bibliographique, nous avons distingué deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite :

- La commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.
- La commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

2.5.1 Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature très fluctuante. Ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui rend la mesure de la vitesse du vent erroné.
- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1,5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales[5].

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l'équation mécanique, nous pouvons écrire :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = 0 = C_m - C_{em} - f\Omega \quad (2.16)$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ($f\Omega=0$) par rapport au couple mécanique C_m , on peut alors écrire :

$$C_{em} = C_m \quad (2.17)$$

Le couple électromagnétique est déterminé à partir d'une estimation du couple aérogénérateur :

$$C_{em}^* = \frac{C_{aer_{estim}}}{G} \quad (2.18)$$

Le couple aérogénérateur est lui-même estimé en fonction de la vitesse du vent et la vitesse de la turbine :

$$C_{aer_{estim}} = \frac{P_{aer_{estim}}}{\Omega_{turb_{estim}}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot Cp(\lambda, \beta) \cdot V_{vent_{estim}}^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turb_{estim}}} \quad (2.19)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine est calculée à partir de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{tur_{estim}} = \frac{C_m}{G} \quad (2.20)$$

L'estimation de la vitesse du vent est alors exprimée par :

$$V_{vent_{estim}} = \frac{\Omega_{mec}}{\lambda} \quad (2.21)$$

A partir de ces relations on a :

$$C_{em}^* = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \Omega_{mec}^3}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda^3} \quad (2.22)$$

Pour extraire le maximum de puissance générée ,il faut fixer le ratio de vitesse à λ_{opt} qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_{p_{max}}$.

Le couple électromagnétique estimé doit alors être régler à la valeur suivante :

$$C_{em}^* = \frac{C_{p_{max}} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \Omega_{mec}^3}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda^3 \cdot opt} \quad (2.23)$$

La figure (2.6) présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation :

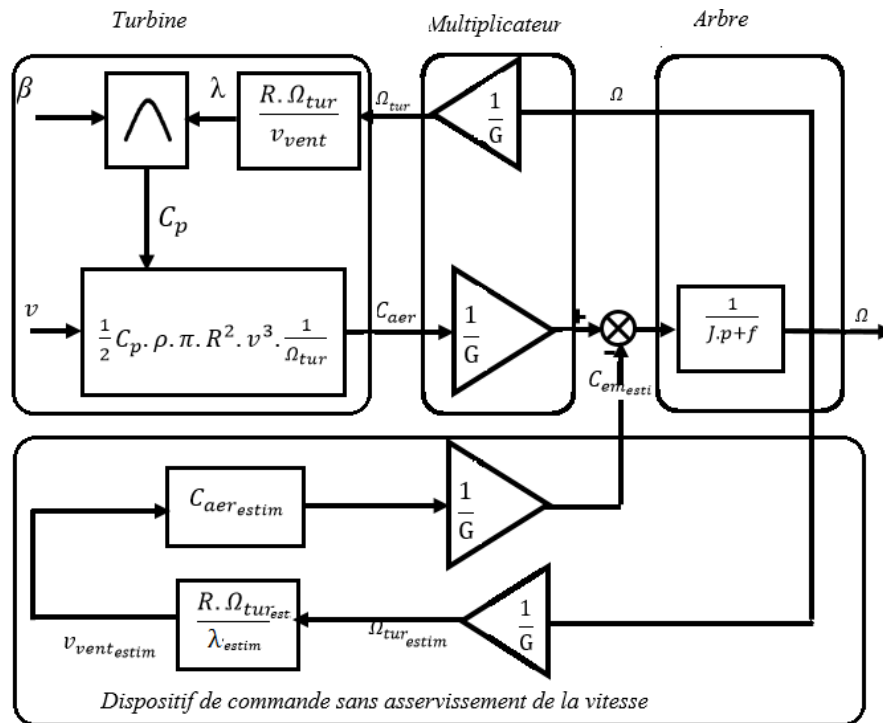


FIGURE 2.6 – Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse

2.5.1.1 Résultats de Simulations

Le modèle du profil du vent utilisé dans notre étude est donné par la relation suivant :

$$V_{vent} = 7.5 + 0.2 \sin(0.1045t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (2.24)$$

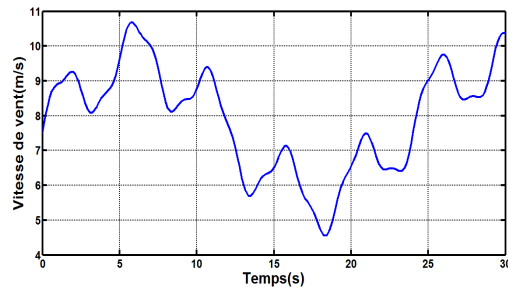


FIGURE 2.7 – Profil du vent

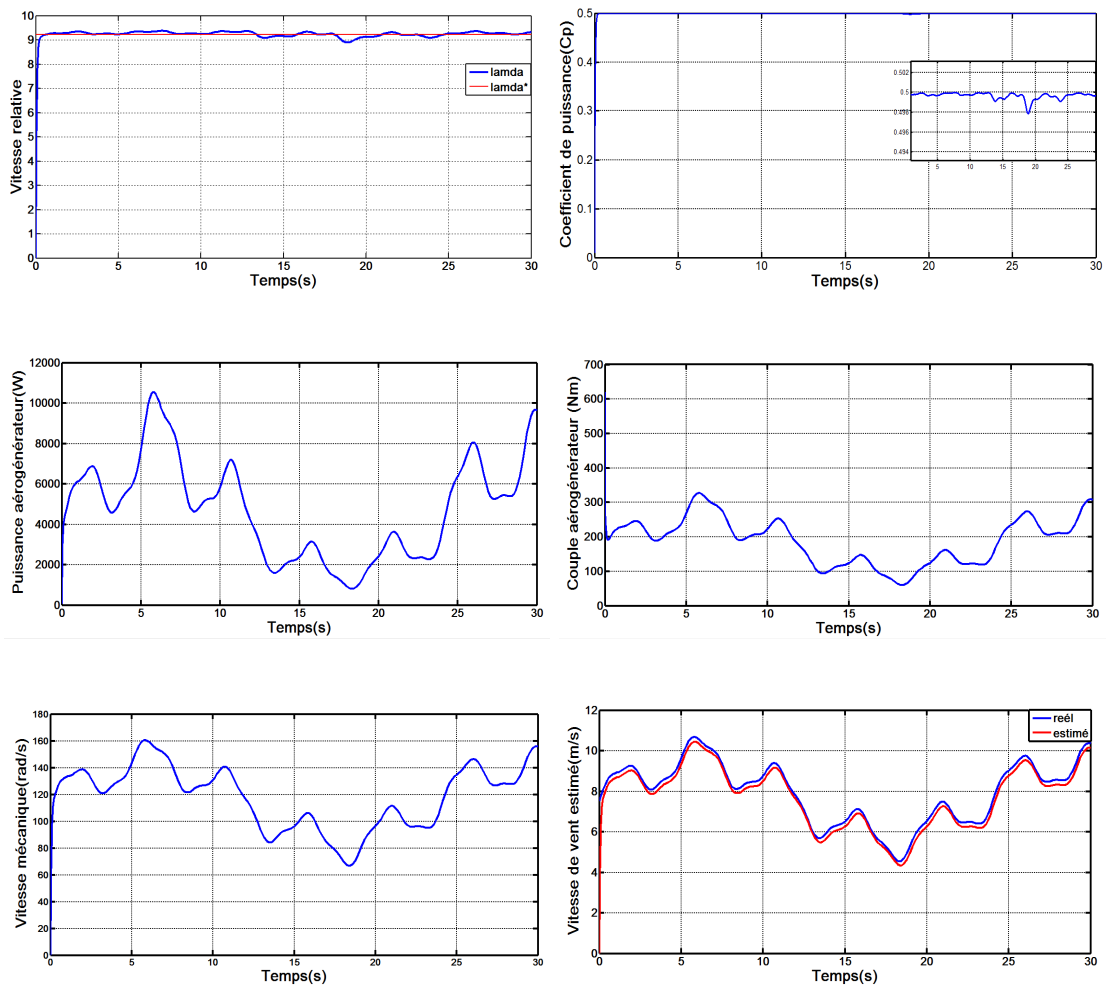


FIGURE 2.8 – Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse

2.5.1.2 Interprétations des résultats

Cette structure de commande a été simulée avec un profil de vent de valeur moyenne autour de 7.5m/s comme le montre la figure (3.5). D'après les résultats (figure 3.8), on voit que la puissance, le couple aérodynamique et vitesse mécanique varient proportionnellement avec la variation du profil de vent. On remarque aussi que la vitesse relative λ et le coefficient de puissance C_p suivent leurs références avec un erreur statique non nulle. Ceci revient à l'absence de régulation de la vitesse de la turbine.

2.5.2 Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique

Les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance. On suppose que la génératrice et son variateur sont idéaux :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_m - C_{em} - C_{visq}) \quad (2.25)$$

La stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à le fixer la vitesse à sa valeur référence. Pour réaliser ceci on utilise un asservissement de vitesse. Cette asservissement consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em}^* = Reg(\Omega_{mec}^* - \Omega_{mec}) \quad (2.26)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondante à la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{opt} (on fixe l'angle de calage $\beta = 2^\circ$).

avec :

- Reg : régulateur de vitesse.
- Ω_{mec} : vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse mécanique de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turb_{ref}}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{mec}^* = G \cdot \Omega_{turb}^* \quad (2.27)$$

$$\Omega_{turb}^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_{vent}}{R} \quad (2.28)$$

La figure (2.9) représente le schéma bloc de cette maximisation :

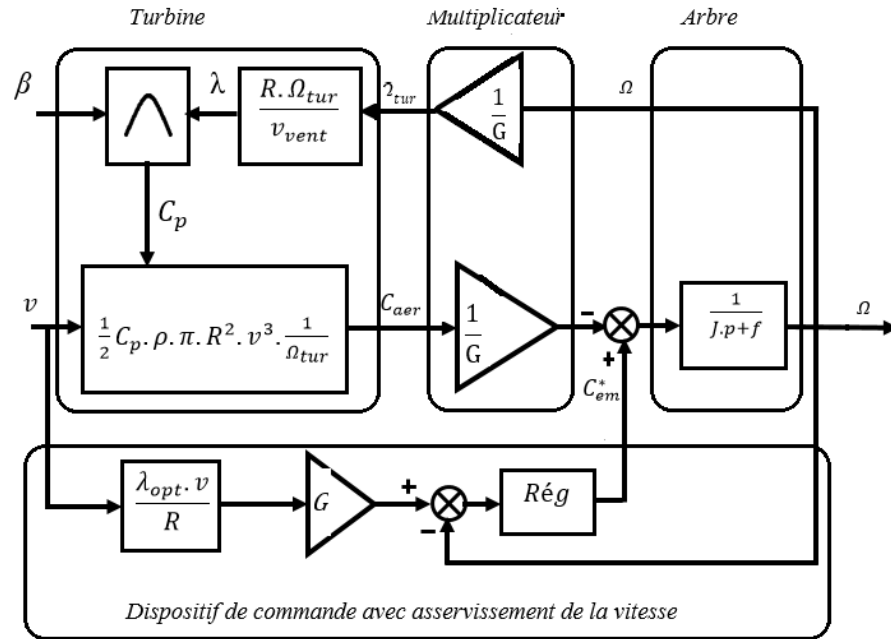


FIGURE 2.9 – Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de vitesse

–Régulateur PI

La boucle de régulation de vitesse sera définie par les paramètres (K_{pw}, K_{iw}) . On établit, à partir de l'équation de la mécanique régissant la dynamique des corps en rotation, la fonction transfert liant la vitesse aux couples (électromagnétique et mécanique)

$$\frac{\Omega}{C_{em} - C_m} = \frac{1}{J.P + f} \quad (2.29)$$

La figure (2.10) montre le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse :

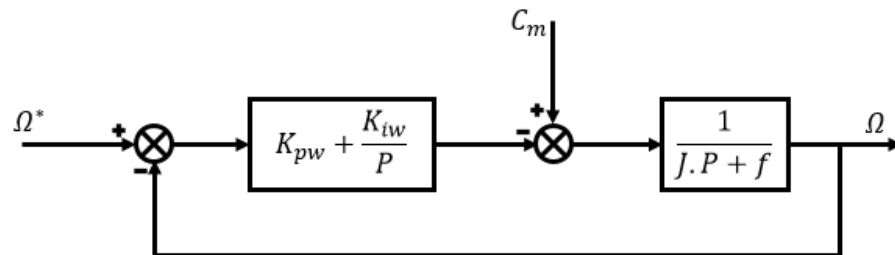


FIGURE 2.10 – Boucle de régulation de la vitesse de rotation par un régulateur PI

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$G_{(BO)} = \frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{K_{pw} \cdot P + K_{iw}}{J \cdot P^2 + f \cdot P} \quad (2.30)$$

En boucle fermée, on obtient une fonction de transfert du deuxième ordre :

$$G_{(Bf)} = \frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{K_{pw} \cdot P + K_{iw}}{P^2 + \frac{K_{pw} + f}{J} \cdot P + \frac{K_{iw}}{j}} \quad (2.31)$$

dont la forme canonique est de la forme :

$$G(P) = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n P + \omega_n^2}{P^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n P + \omega_n^2} \quad (2.32)$$

où ξ représente le coefficient d'amortissement et ω_n la pulsation propre. L'identification terme à terme permet d'écrire :

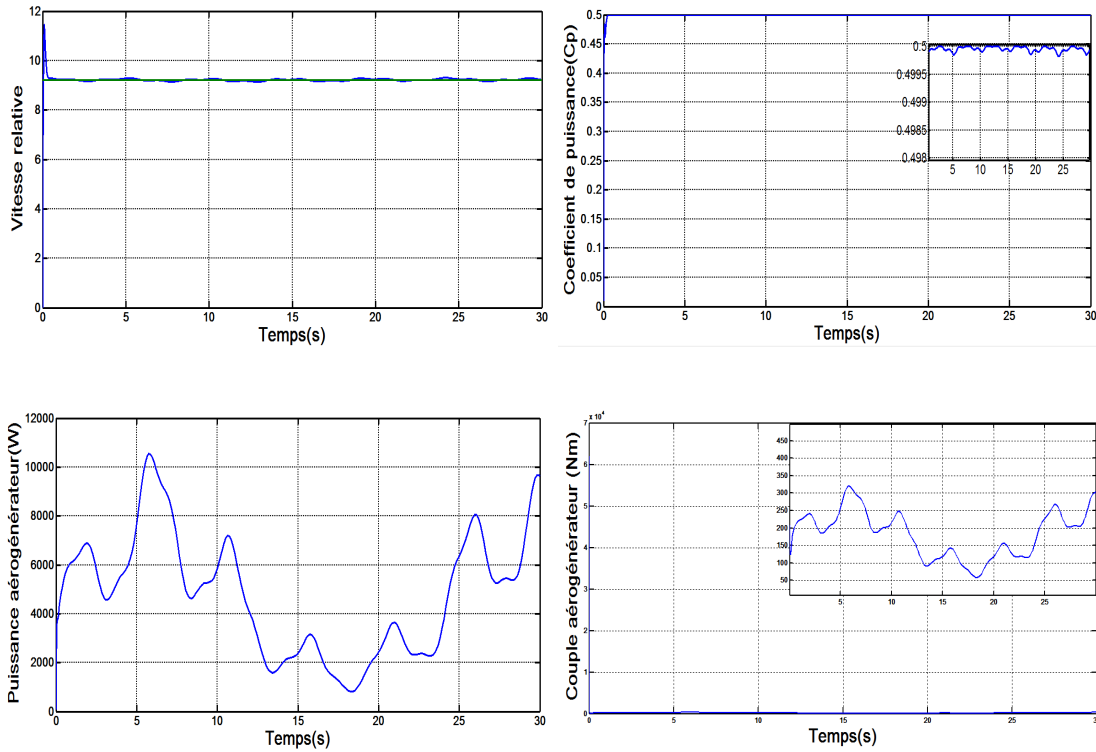
$$\begin{cases} 2 \cdot \xi \cdot \omega_n = \frac{K_{pw} + f}{J} \\ \omega_n^2 = \frac{K_{iw}}{J} \end{cases} \quad (2.33)$$

Finalement, les relations suivantes donnent les expressions des paramètres K_{pw}, K_{iw} :

$$\begin{cases} K_{pw} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot J - f \\ K_{iw} = J \cdot \omega_n^2 \end{cases} \quad (2.34)$$

Pour optimiser les performances dynamiques et la stabilité du système, on opte pour un coefficient d'amortissement en boucle fermée ξ de valeur égale à 0,7.

2.5.2.1 Résultats de Simulations



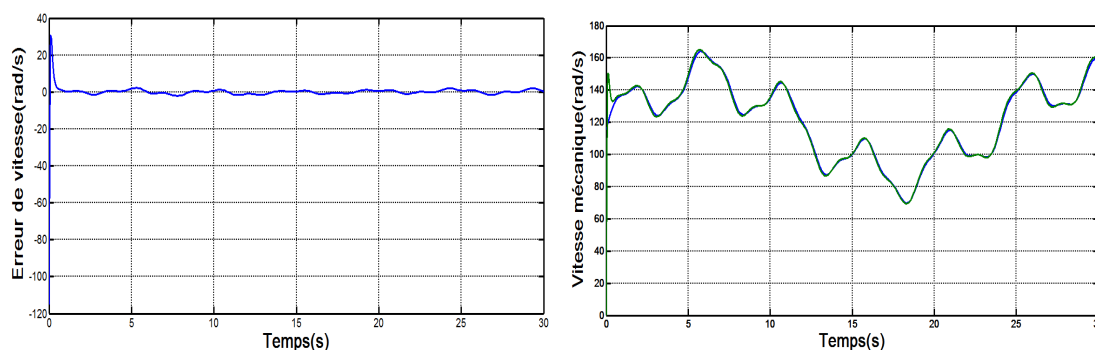


FIGURE 2.11 – Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse

2.5.2.2 Interprétations des résultats

Cette structure de commande a été simulée avec le profil de vent comme le montre la figure (3.5).

Pour les résultats avec asservissement, on remarque que le coefficient de puissance prend une valeur max de 0.5 pour un angle de calage $\beta = 2^\circ$. On remarque aussi que la consigne est suivie de manière identique en régime transitoire et permanent. Dautre part on vu que la vitesse relative et la vitesse mécanique contient un faible dépassement au démarrage.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la modélisation de la partie mécanique qui contient : la turbine, le multiplicateur et l'arbre mécanique. Ensuite, nous expliquons les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne. Dautre part, la réalisation de la stratégie MPPT se fait par deux commandes : sans et avec asservissement de la vitesse (régulateur PI). Le chapitre suivant est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, du convertisseur statique et à la commande vectorielle par orientation du flux statorique, celle-ci réalisant une commande linéaire découplé des puissances active et Réactive statoriques.

Chapitre 3

Modélisation et commande des puissances de la MADA

SOMMAIRE

3.1	INTRODUCTION	35
3.2	MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION (MADA) :	35
3.2.1	Hypothèses simplificatrices de la modélisation de la MADA	36
3.2.2	Equations de la MADA	36
3.2.3	Application de la Transformation de Park à la MADA	38
3.2.4	Choix du référentiel	39
3.3	COMMANDE VECTORIELLE	41
3.3.1	Principe de la commande vectorielle de la GADA	41
3.3.2	Application de la commande vectorielle à flux statorique orienté	41
3.3.3	découplage de système	45
3.4	MODÉLISATION ET COMMANDE DE L'ONDULEUR À MLI	45
3.4.1	modélisation de l'onduleur a deux niveaux	45
3.4.2	Principe de la MLI	46
3.4.3	Commande de la MLI	47
3.5	CONTROLE INDÉPENDANT DES PUISSANCE ACTIVE ET RÉACTIVE	48
3.5.1	Commande Directe des Puissances Active et Réactive	48
3.5.2	Commande indirecte des Puissances Active et Réactive	51
3.5.3	Résultats de Simulations	53
3.6	CONCLUSION	56

3.1 Introduction

Dans la chaîne de conversion électrique, la génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné est la plus utilisée car elle est bien répandue dans les systèmes éoliens à vitesse variable de forte puissance. Elle est appelée aussi machine asynchrone à double alimentation (MADA). La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser des meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la génératrice asynchrone double alimentée (GADA).

Donc dans ce chapitre, on va présenter la modélisation de la partie électrique d'un système éolien. Ensuite, nous expliquerons la Stratégie de la Commande Vectorielle du Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA) pour le Contrôle Indépendant des Puissances Active et Réactive (Commande Directe+commande indirecte des Puissances Active et Réactive). Enfin, on va réaliser des simulations numériques pour montrer et analyser les performances de notre commande étudiée.

3.2 Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :

La modélisation de la machine électrique est une étape primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques [3],[37]. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible via des collecteurs. La figure (3.1) représente l'enroulement triphasé de la MADA.

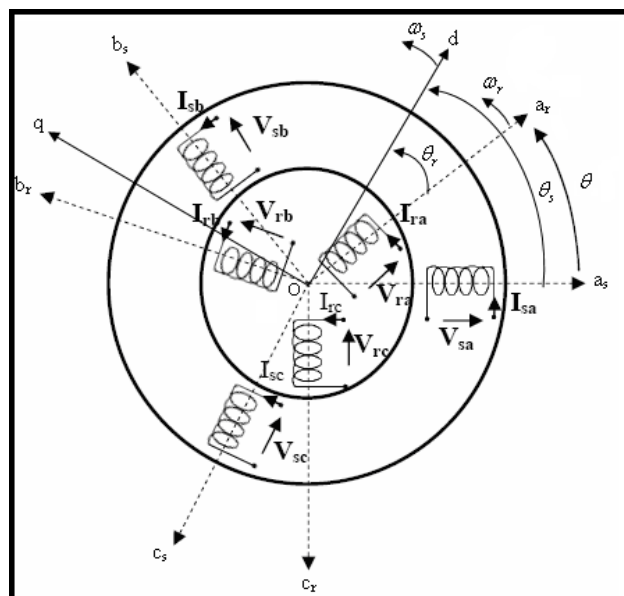


FIGURE 3.1 – Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

Telle que :

- as, bs, cs : correspondent aux trois phases du stator.
- ar, br, cr : correspondent aux trois phases du rotor.

Les deux axes Od et Oq sont perpendiculaires et serviront à transformer les équations de la machine. L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3.1)$$

Avec :

$$\omega = P\Omega \quad (3.2)$$

Ω est la vitesse de rotation angulaire mécanique, et P est le nombre de paires de pôles.

3.2.1 Hypothèses simplificatrices de la modélisation de la MADA

Lors de la modélisation de la MADA, les hypothèses simplificatrices suivantes ont été prises en compte [4] :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé .
- Entrefer constant .
- Les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées .
- Les résistances constantes (ne varient pas avec la température) .
- Distribution sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer [2].

3.2.2 Equations de la MADA

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représenté schématiquement par la figure (3.1) et dont les phases sont repères respectivement as, bs, cs et ar, br, cr et l'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases ar et as choisis comme axes de référence [42][11].

3.2.2.1 Equations Electriques

La MADA est représentée par les équations des phases statoriques et rotoriques suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

- $[V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T, [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T$: Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.
- $[I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T, [I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]^T$: Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.
- $[\phi_{as} \ \phi_{bs} \ \phi_{cs}]^T, [\phi_{ar} \ \phi_{br} \ \phi_{cr}]^T$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.
- R_s, R_r : sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

3.2.2.2 Equations Magnétiques

Les expressions des flux en fonction des courants statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Avec :

- L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques,
- M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques,
- M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor [13] :

$$[M_{sr}] = M_o \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

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

3.2.2.3 Équations mécaniques

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - Cr - f_r \cdot \Omega \quad (3.8)$$

Où :

- J : Le moment d'inertie du rotor en $[\text{Kg.m}^2]$.
- Ω : La vitesse angulaire mécanique en $[\text{rad.s}^{-1}]$.
- C_{em} : Le couple électromagnétique en $[\text{Nm}]$.
- Cr : Le couple résistant $[\text{Nm}]$.
- f_r : Le coefficient de frottement en $[\text{Nm.s.rad}^{-1}]$.
- P : Le nombre de paires de pôles.

3.2.3 Application de la Transformation de Park à la MADA

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-biphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère $(\alpha\beta)$ puis vers le repère (dq) . Le repère $(\alpha\beta)$ est toujours fixe par rapport au repère (abc) , par contre le repère (dq) est mobile. Il forme avec le repère fixe $(\alpha\beta)$ un angle appelé de la transformation de Park ou angle de Park [24][30].

On désire transformer les enroulements de la MADA triphasée en des enroulements biphasés orthogonaux équivalents selon les axes $(d-q)$ lié au champ tournant ainsi la composante homopolaire pour équilibrer le système transformé, c'est à dire :

- Direct selon l'axe (d) .
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q) .
- Homopolaire (o) .

Dans le cas d'un système de courant, la transformation s'écrit :

$$[I_{dqo}] = [P] [I_{abc}] \quad (3.9)$$

et

$$[I_{abc}] = [P]^{-1} [I_{dqo}] \quad (3.10)$$

Celle des tensions :

$$[V_{dqo}] = [P] [V_{abc}] \quad (3.11)$$

et

$$[V_{abc}] = [P]^{-1} [V_{dqo}] \quad (3.12)$$

La transformation des flux :

$$[\phi_{dqo}] = [P] [\phi_{abc}] \quad (3.13)$$

et

$$[\phi_{abc}] = [P]^{-1} [\phi_{dqo}] \quad (3.14)$$

Avec $[P]$ la matrice de transformation de Park qui s'écrit par [38] :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Et $[P]^{-1}$ la matrice de transformation de Park inverse qui s'écrit par :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.2.4 Choix du référentiel

Jusqu'ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la génératrice dans un repère dq faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre [10]. Il existe trois choix importants : on peut fixer le référentiel (dq) :

1. au stator
2. au rotor
3. au champ tournant

3.2.4.1 Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_s = 0$). Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel. L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

3.2.4.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω donc ($\omega_r = 0$). L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones .

3.2.4.3 Référentiel Lié au Champ Tournant

Ce référentiel est caractérisé par ($\omega = \omega_s - \omega_r$). Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine [10][6]

Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au champ tournant pour la modélisation et la commande de la MADA. Alors, le modèle électrique général de la machine asynchrone obtenue en utilisant la transformation de Park est donné par les équations suivantes [9][8].

Équations électriques des tensions statoriques rotoriques

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (3.17)$$

Équations magnétiques des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (3.18)$$

En remplaçant les équations magnétiques des flux eq (3.18) dans les équations électriques eq (3.17), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + L_s \frac{d}{dt} I_{sd} + M \cdot \frac{d}{dt} I_{rd} - L_s \omega_s \cdot I_{sq} - M \cdot \omega_s \cdot I_{rq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + M \cdot \frac{d}{dt} I_{rq} + L_s \omega_s \cdot I_{sd} + M \cdot \omega_s \cdot I_{rd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + L_r \frac{d}{dt} I_{rd} + M \cdot \frac{d}{dt} I_{sd} - L_r \omega_r \cdot I_{rq} - M \cdot \omega_r \cdot I_{sq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + L_r \frac{d}{dt} I_{rq} + M \cdot \frac{d}{dt} I_{sq} + L_r \omega_r \cdot I_{rd} + M \cdot \omega_r \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (3.19)$$

Le couple électromagnétique peut être exprimé, à partir des flux statorique et des courants rotoriques, par :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} \cdot (\phi_{sq} \cdot I_{rd} - \phi_{sd} \cdot I_{rq}) \quad (3.20)$$

Enfin, pour compléter le modèle, la relation fondamentale de la dynamique pour les corps en rotation est ajoutée pour tenir compte de l'influence des différents couples exercés sur l'arbre du rotor :

$$C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f_v \cdot \Omega + Cr \quad (3.21)$$

J , f_v , Cr représentant respectivement le moment d'inertie, le coefficient de frottement visqueux et le couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine.

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont définies comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sd} - V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} \cdot I_{rd} + V_{rq} \cdot I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} \cdot I_{rd} - V_{rd} \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (3.23)$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotoriques est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - P\Omega \quad (3.24)$$

Où ω_s représente la pulsation des courants statoriques en $rad.s^{-1}$. Les angles θ_s et θ_r sont obtenus respectivement par intégration de ω_s et ω_r .

$$\begin{cases} \theta_s = \int_0^t \omega_s dt \\ \theta_r = \int_0^t \omega_r dt \end{cases} \quad (3.25)$$

3.3 Commande vectorielle

3.3.1 Principe de la commande vectorielle de la GADA

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu. Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement producteur de couple. Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator. La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d, q) où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer. Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique [6].

Selon le choix du référentiel, les conditions d'orientation sont exprimées par :

- l'orientation du flux rotorique suivant l'axe d :

$$\phi_{rq} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \phi_r = \phi_{rd} \quad (3.26)$$

- l'orientation du flux statorique suivant l'axe d :

$$\phi_{sq} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \phi_s = \phi_{sd} \quad (3.27)$$

- l'orientation du flux statorique suivant l'axe q :

$$\phi_{sd} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \phi_s = \phi_{sq} \quad (3.28)$$

Les équations des tensions, des flux et du couple électromagnétique de la machine asynchrone peuvent donc être simplifiées en changeant de repère. Par exemple, en alignant le flux statorique sur un axe du repère, sa composante sur l'autre axe s'annule[34].

3.3.2 Application de la commande vectorielle à flux statorique orienté

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [15].

Pour une approche linéaire classique, la difficulté réside dans la non linéarité en sortie. La commande vectorielle contourne cette difficulté par l'orientation du flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant [37] (3.2).

Cette orientation conduit à :

$$\phi_{sq} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \phi_s = \phi_{sd}$$

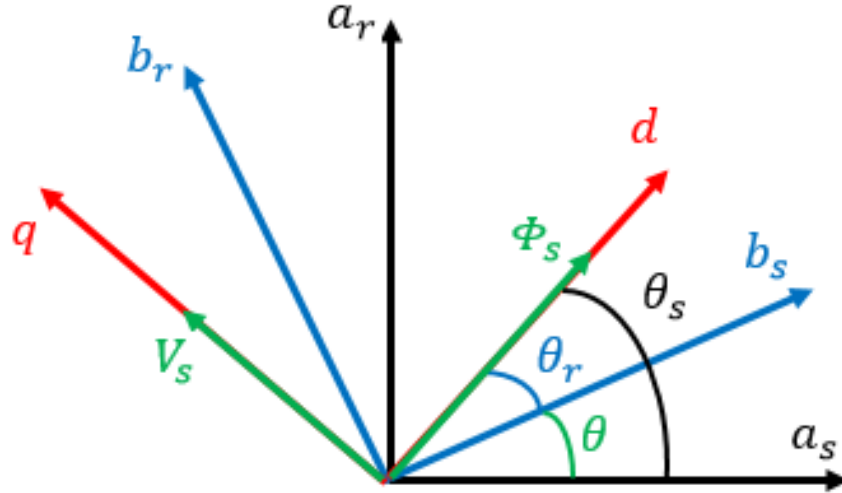


FIGURE 3.2 – Orientation du flux statorique sur l'axe d

Le couple électromagnétique de l'équation s'écrit alors :

$$C_{em} = -P \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \phi_{sd} \cdot I_{rq} \quad (3.29)$$

Et l'équation des flux devient :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \phi_{sq} = 0 = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (3.30)$$

Les tensions statoriques devient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \end{cases} \quad (3.31)$$

Les tensions rotoriques devient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (3.32)$$

3.3.2.1 Relation entre le courant statorique et le courant rotorique

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statoriques, Nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (3.33)$$

3.3.2.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sd} - V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (3.34)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations (3.34) peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_s \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (3.35)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature (3.33) par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive (3.35), on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (3.36)$$

3.3.2.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les équations (??) en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (3.30) :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + \omega_r \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (3.37)$$

Où g est le glissement de la machine asynchrone et la pulsation rotorique avec :

$$\omega_r = g \cdot \omega_s \quad (3.38)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} - \omega_r \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \omega_r \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + \omega_r \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (3.39)$$

V_{rd} et V_{rq} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minimal. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser [37].

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite [5]. Le schéma bloc représentant le modèle mathématique ainsi simplifié de la MADA est illustré dans la figure(3.3) :

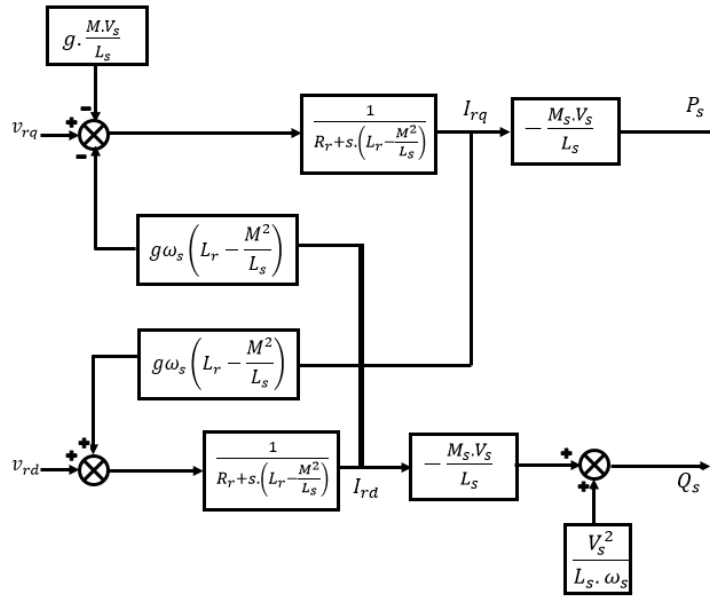


FIGURE 3.3 – schéma interne de la MADA

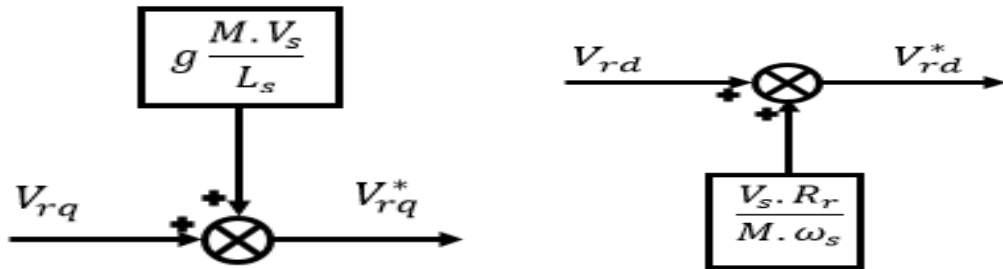
Dans ce schéma nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près. Chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal [41].

3.3.3 découplage de système

découplage interne

- le terme de compensation sur l'axe q est évident car il suffit de mettre le terme de couplage à l'entrée avec un signe opposé.
- le terme de compensation sur l'axe d est obtenu en appel les lois de transformation des schéma fonctionnel.

$$\begin{cases} V_{rq}^* = V_{rq} + \frac{g \cdot M \cdot V_s}{L_s} \\ V_{rd}^* = V_{rd} + \frac{R_r \cdot V_s}{M \cdot \omega_s} \end{cases} \quad (3.40)$$



3.4 Modélisation et commande de l'onduleur à MLI

3.4.1 modélisation de l'onduleur a deux niveaux

Le rotor de la GADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Les six interrupteurs électroniques représentés, et que nous supposons parfaits, peuvent être des transistors (Bipolaires, MOSFET, IGBT) associés à des diodes en tête bêche, ou encore des thyristors équipés de circuit d'extinction en plus du dispositif d'amorçage. On peut remplacer chaque groupe transistor-diode de la figure (3.4 A) par des interrupteurs S_i avec ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), on obtient le schéma simplifié pour chaque onduleur comme l'indique (3.4 B) [37].

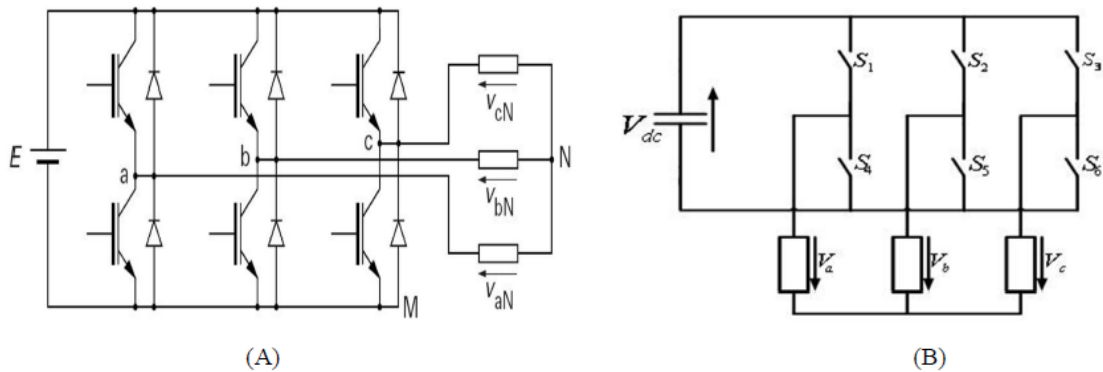


FIGURE 3.4 – Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables S_a, S_b et S_c se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

- Branche1 :
 $S_a=0$ Si S1 est ouvert et S4 est fermé .
 $S_a=1$ Si S1 est fermé et S4 est ouvert.
- Branche2 :
 $S_b=0$ Si S1 est ouvert et S5 est fermé .
 $S_b=1$ Si S1 est fermé et S5 est ouvert.
- Branche3 :
 $S_c=0$ Si S1 est ouvert et S6 est fermé .
 $S_c=1$ Si S1 est fermé et S6 est ouvert.

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc} \cdot (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc} \cdot (S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc} \cdot (S_c - S_a) \end{cases} \quad (3.41)$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (3.42)$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

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

3.4.2 Principe de la MLI

La technique de modulation de largeur d'impulsion triangulo sinusoïdale consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire de fréquence f_p , que nous appellerons porteuse avec un signal de référence. Le rapport cyclique est défini comme le temps T_e pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T, soit :

$$\alpha = \frac{T_e}{T} \quad (3.44)$$

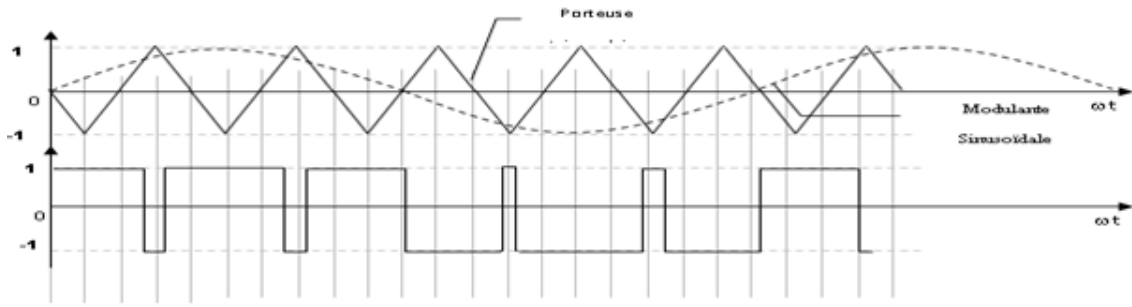


FIGURE 3.5 – Diagramme signal de commande de gâchette

3.4.3 Commande de la MLI

La commande de l'onduleur est faite selon la stratégie MLI. Les signaux de commande des interrupteurs sont déterminés par l'intersection d'une référence sinusoïdale appelée "modulatrice" de fréquence f avec une triangulaire de haute fréquence f_p appelée "porteuse".

Signal sinusoïdal (modulante ou signal de référence) de la forme :

$$e_m(t) = A_m \sin(\omega_0 t + \phi_0) \quad (3.45)$$

avec :

- A_m : amplitude ou profondeur de modulation
- $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$: fréquence du signal modulant.

Signal triangulaire (porteuse) évoluant entre $-A_p$ et $+A_p$ avec une période de découpage :

$$e_p(t) = \begin{cases} A_p \left(-1 + 4 \cdot \frac{t}{T_p} \right) \\ A_p \left(3 - 4 \cdot \frac{t}{T_p} \right) \end{cases} \quad (3.46)$$

avec :

- A_p : amplitude de la porteuse
- $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{1}{T_p}$

On définit par conséquent deux indices :

- Indice de modulation

$$P = \frac{f_p}{f_m} \quad (3.47)$$

- Indice de réglage de tension r compris entre 0 et 1

$$r = \frac{A_m}{A_p} \quad (3.48)$$

3.5 Contrôle indépendant des puissance active et réactive

3.5.1 Commande Directe des Puissances Active et Réactive

Cette commande présente des avantages pour les entraînements à vitesse variable de haute performance ainsi que pour les systèmes de générations d'énergie. Elle est simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performance. Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation[24].

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe présentée sur la figure (3.6).

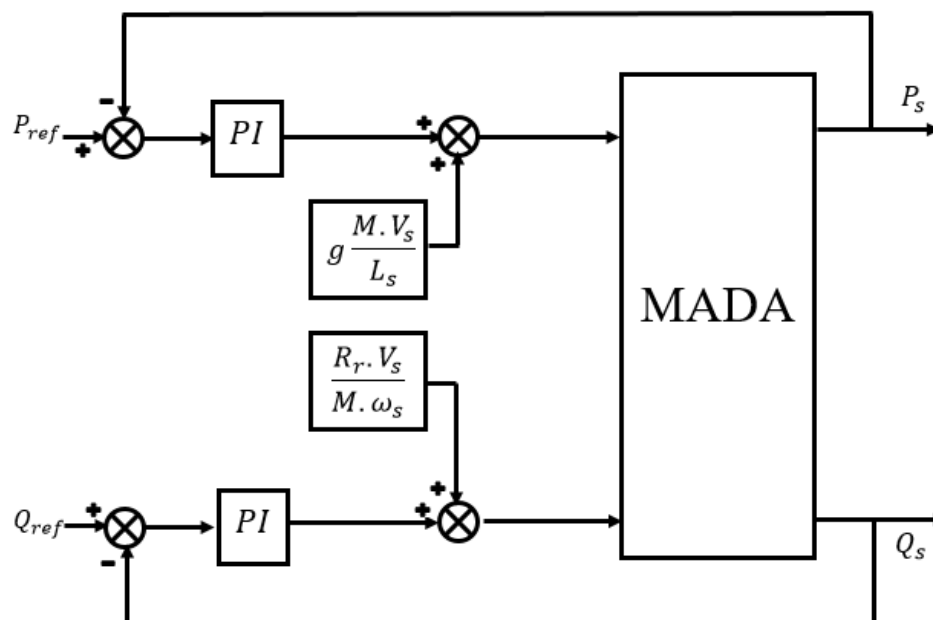
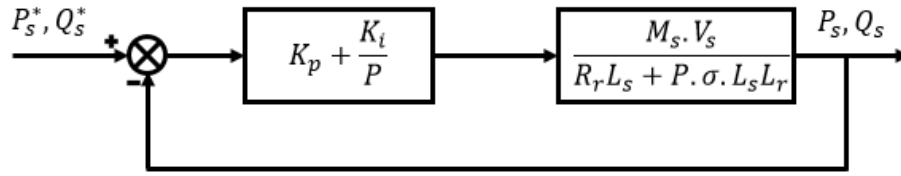


FIGURE 3.6 – Schéma bloc de la commande directe

3.5.1.1 Synthèse des régulateurs PI

Pour s'assurer que les puissances active et réactive du GADA suivent leurs consignes, un régulateur PI est indispensable. Le but d'utilisation du régulateur PI est d'assurer une meilleure robustesse vis-à-vis des perturbations internes ou externes [35].

Les boucles de régulation des puissances active P_s et réactive Q_s peuvent se présenter par le schéma bloc de la figure (3.7) :

FIGURE 3.7 – Schéma de régulation des puissances P_s et Q_s

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q . Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (3.49)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure (3.7) sera :

$$FTBO(p) = \frac{K_i}{p} \left(p \cdot \frac{K_p}{K_i} + 1 \right) \cdot \frac{M \cdot V_s / L_s \cdot R_r}{p \cdot \sigma \cdot T_r + 1} \quad (3.50)$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition :

$$\frac{K_p}{K_i} = \sigma \cdot T_r \quad (3.51)$$

Où :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (3.52)$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(p) = \frac{K_i \cdot M \cdot V_s}{p \cdot L_s \cdot R_r} \quad (3.53)$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau \cdot p} \quad (3.54)$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) de la figure (3.7) sera :

$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + p \cdot \frac{L_s \cdot R_r}{K_i \cdot M \cdot V_s}} \quad (3.55)$$

Par analogie l'expression (3.54) par l'expression (3.55), on trouve :

$$\tau = \frac{L_s \cdot R_r}{K_i \cdot M \cdot V_s} \quad (3.56)$$

De l'expression (3.51) et (3.52), on a :

$$\begin{cases} K_p = K_i \cdot \sigma \cdot T_r = \frac{\sigma \cdot L_s \cdot L_r}{\tau \cdot M \cdot V_s} \\ K_i = \frac{L_s \cdot R_r}{\tau \cdot M \cdot V_s} \end{cases} \quad (3.57)$$

3.5.1.2 Résultats de Simulations

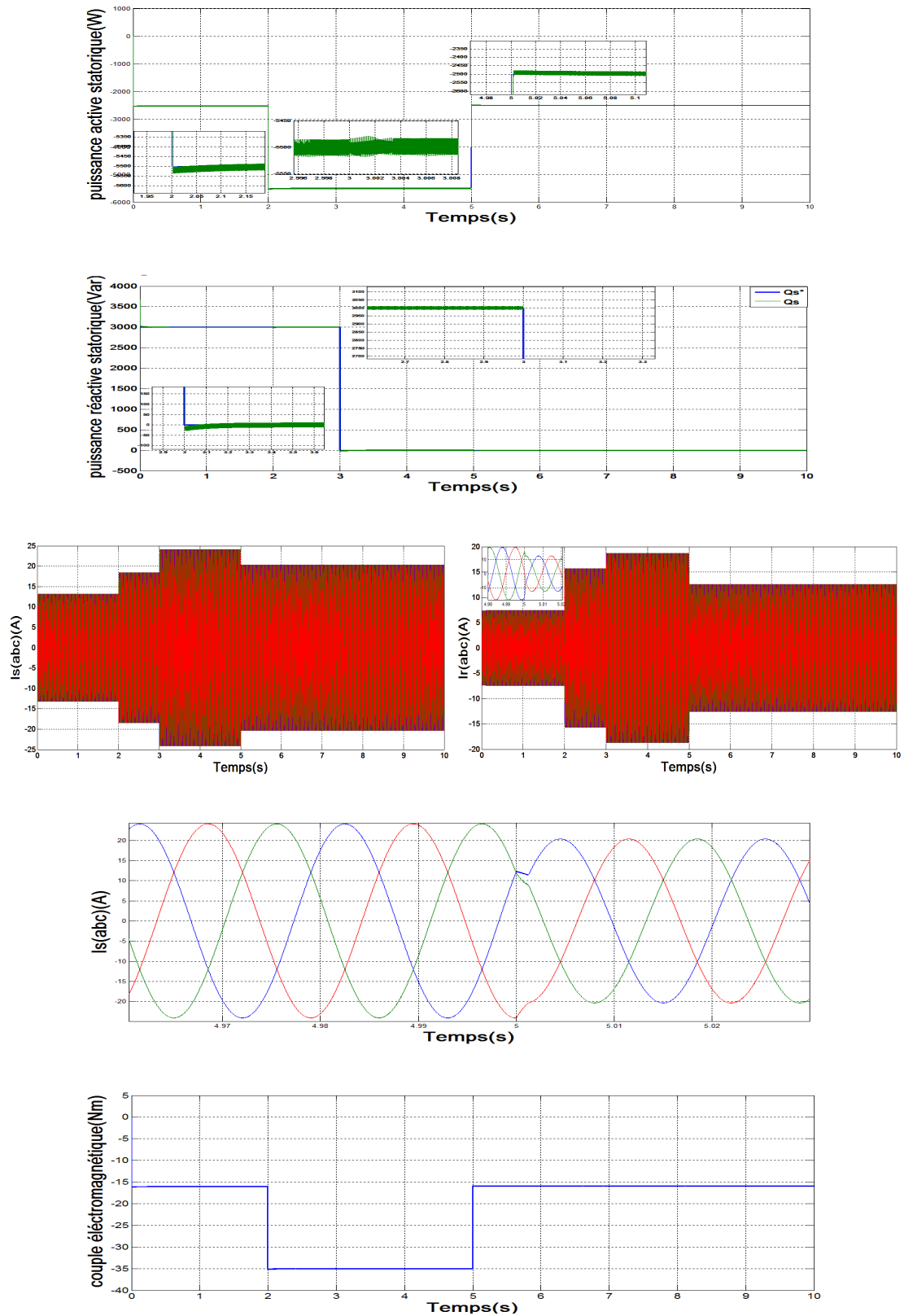


FIGURE 3.8 – Résultats de simulations pour la commande directe

3.5.1.3 Interprétation des résultats

On peut remarquer que les puissances active et réactive suivent bien leur trajectoire de référence sans dépassement et sans erreur statique en régime permanent. le courant triphasé rotorique I_r est faible que I_s . En régime permanent, les courant statorique et rotorique prennent une forme sinusoïdale. On ce qui concerne le couple électromagnétique, ce dernier prend la même allure que la puissance active.

3.5.2 Commande indirecte des Puissances Active et Réactive

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances active et réactive. Ainsi, les courants rotoriques sont régulés indirectement. Dans ce cas deux structures peuvent être élaborées. L'une utilise une boucle de régulation le courant, l'autre se base sur la première tout en ajoutant une boucle pour les puissances [32]

3.5.2.1 Commande indirecte sans boucle de puissance

La commande en boucle ouvert est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q . A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système (3.36), on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations :

$$\begin{cases} I_{rqref} = -\frac{L_s}{MV_s} P_{sref} \\ I_{rdref} = -\frac{L_s}{MV_s} Q_{sref} + \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad (3.58)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive [6], on aboutit alors au schéma bloc suivant :

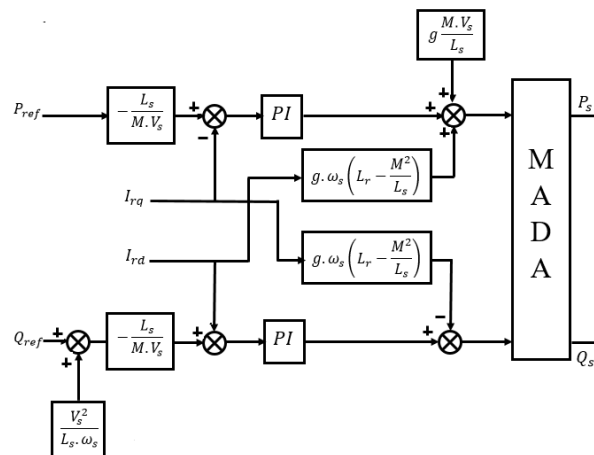


FIGURE 3.9 – Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances

3.5.2.2 Synthèse des régulateurs PI

Les boucles de régulation de courant I_{rd} et de I_{rq} peuvent se présenter par le schéma bloc de la figure (3.10) :

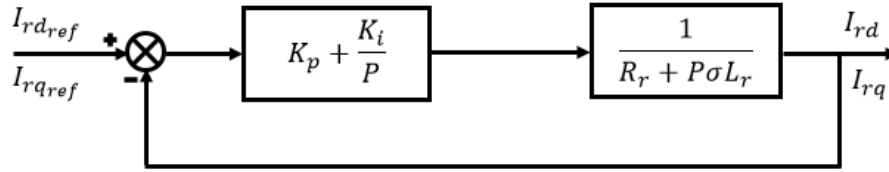


FIGURE 3.10 – Schéma de régulation des courant I_{rd} et de I_{rq}

Calcul des paramètres de régulateur

$$PI(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (3.59)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure (3.10) sera :

$$FTBO(p) = k_i \left(\frac{1 + \frac{k_p}{k_i} P}{P} \right) \left(\frac{\frac{1}{R_r}}{1 + \frac{\sigma L_r P}{R_r}} \right) \quad (3.60)$$

La méthode du compensation des pôles nous donne :

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{\sigma L_r}{R_r} \quad (3.61)$$

La FTBO devient alors :

$$FTBO = \frac{K_i}{P R_r} \quad (3.62)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est exprimée par :

$$FTBF = \frac{1}{1 + P \frac{R_r}{K_i}} \quad (3.63)$$

Donc, les paramètres du régulateur sont donnés par les relations suivantes :

$$K_p = \frac{\sigma L_r}{\tau_r} \quad (3.64)$$

$$K_i = \frac{R_r}{\tau_r} \quad (3.65)$$

3.5.2.3 Commande indirecte avec boucle de puissance

Dans cette méthode le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système qui permet le réglage des puissances. On distingue donc une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances P_s et Q_s en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure. (17).

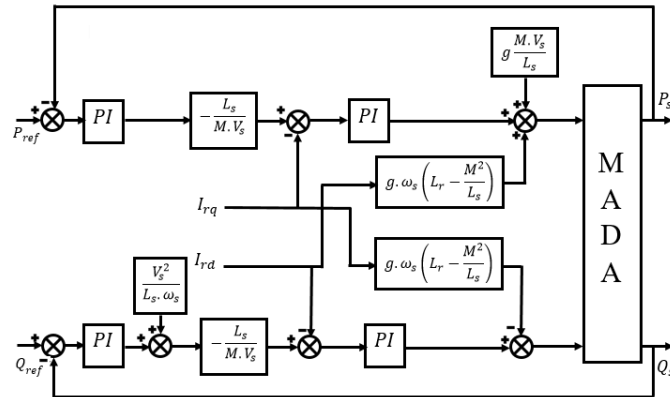
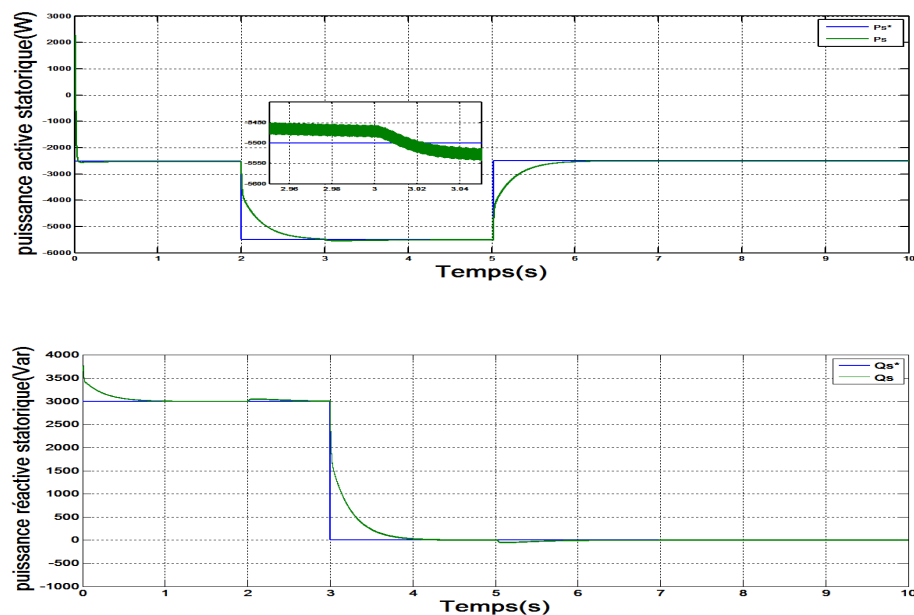


FIGURE 3.11 – Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances

3.5.3 Résultats de Simulations

3.5.3.1 Résultats de Simulations indirecte sans boucles des puissances



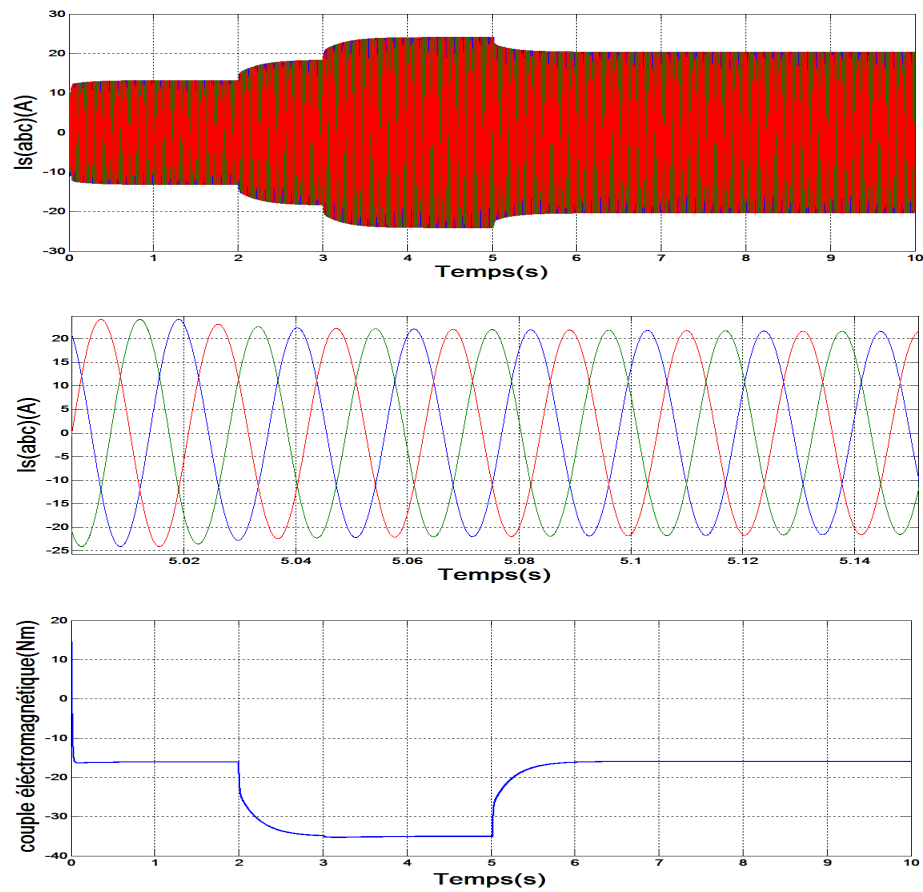


FIGURE 3.12 – Résultats de simulations pour la commande indirecte sans boucles des puissances

Interprétation des résultats

Au niveau de la puissance active et réactive statorique, on remarque une réduction des ondulations et par conséquent une minimisation des harmoniques. Les courants triphasé obtenus au stator I_s et au rotor I_r sont de formes sinusoïdales avec une amélioration de qualité par rapport à ceux obtenus par la commande directe. On ce qui concerne le couple électromagnétique, ce dernier prend la même allure que la puissance active

3.5.3.2 Résultats de Simulations indirecte avec boucles des puissances

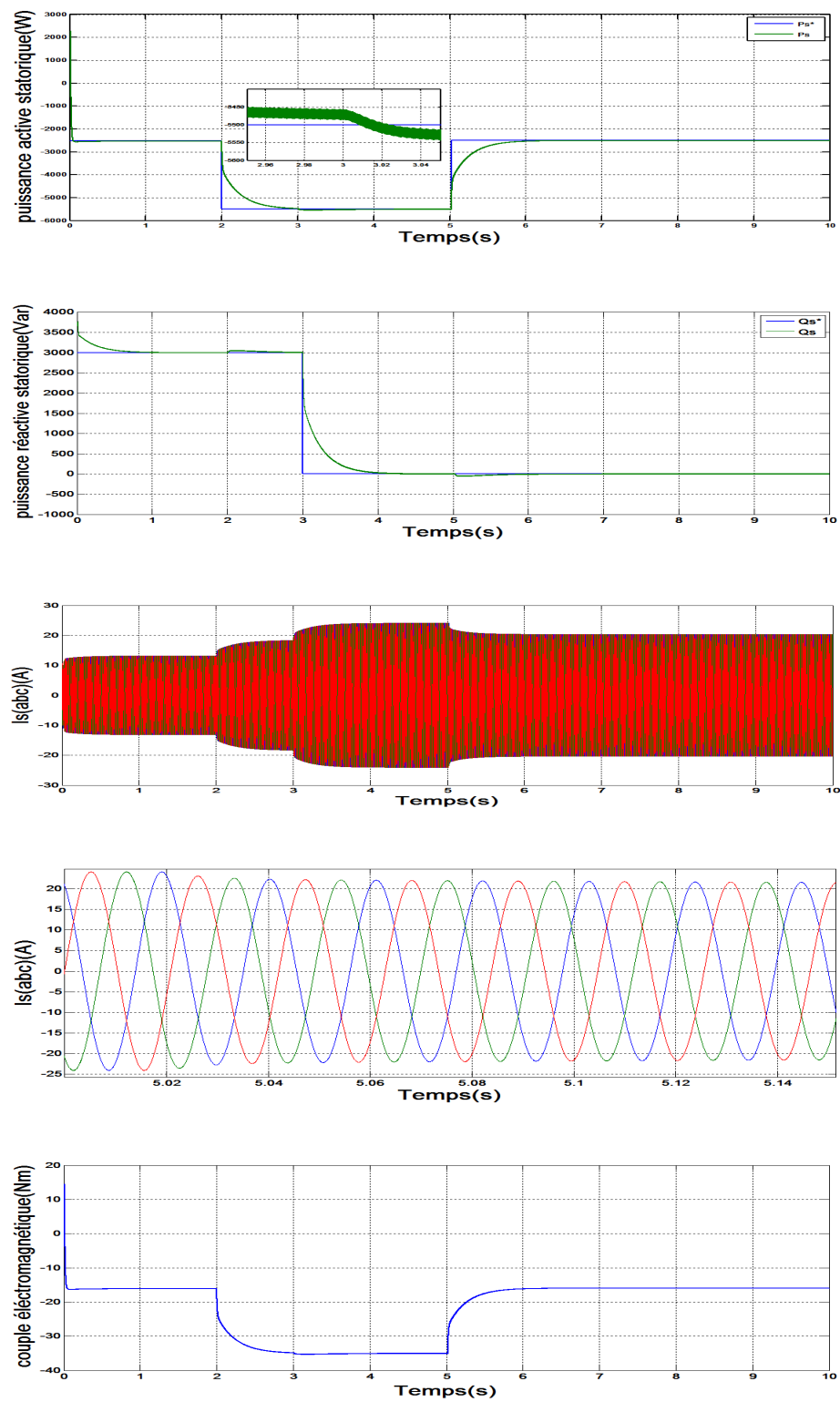


FIGURE 3.13 – Résultats de simulations pour la commande indirecte avec boucles des puissances

Interprétation des résultats

Cette commande prend les mêmes performances que celle sans boucles des puissances, mais cette dernière est plus rapide que celle avec boucles des puissances parce que la commande indirecte avec boucles des puissances utilise quatre (04) régulateurs (02 régulateurs de courant et 02 régulateurs de puissance), par contre la commande indirecte sans boucles des puissances utilise seulement deux (02) régulateurs de courant.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le modèle mathématique de la MADA basée sur les transformations de Park et quelques hypothèses simplificatrices. Ensuite, on a établi la synthèse de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation. D'autre part, deux modes de contrôle ont été détaillés en utilisant un régulateur proportionnel intégral, la commande directe, basée sur l'hypothèse d'un découplage parfait entre les deux axes direct et en quadrature, et la commande indirecte, avec et sans boucle de puissance, qui tient compte du couplage entre les axes et utilise des termes de compensation pour le corriger. Enfin, nous avons développé les deux modèles de la commande « directe et indirecte » des puissances active et réactive dans l'environnement MATLAB/Simulink pour évaluer les performances de cette technique.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est d'étudier par la simulation numérique une commande de la génératrice asynchrone double alimentation qui peut être utilisée dans la production de l'énergie éolienne.

Dans le premier chapitre, nous avons présentés l'histoire de l'énergie éolienne, l'évaluation de cette énergie en Algérie et leur classement mondial. Ensuite, nous avons cités le principe de fonctionnement et la constitution générale d'un système éolien. Puis, on a présenté les différentes configurations de la MADA et leurs modes de fonctionnement. Enfin, nous avons donné l'application de la machine asynchrone à double alimentation, leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ainsi que la modélisation d'un aérogénérateur pour le quelle la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée. Nous avons développé une technique de maximisation de la puissance extraite avec. Les résultats de simulation d'un algorithme ont montré l'efficacité du contrôle pour la poursuite du point de fonctionnement optimal.

La génératrice asynchrone est destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien. Le modèle dynamique de la MADA est formulés dans le référentiel $(d; q)$ lié au champ tournant et de son alimentation constituée d'un onduleur équipé d'une commande MLI de type «sinus-triangle».

Dans cette partie, on a présenté la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Le principe de l'orientation du flux statorique est exposé afin d'obtenir des équations de commande découplé, ou on a exprimé les grandeurs statoriques de la GADA en fonction des grandeurs rotoriques. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances statoriques "active et réactive" par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée.

Perspectives

D'après les résultats obtenus et des observations enregistrées, des perspectives de recherche et de réalisations pratiques intéressantes pouvant contribuer à mieux exploiter l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation sont envisageables :

Application des techniques de commande non linéaire robuste comme : la commande en mode glissant ou la commande par la méthode backstepping .

L'utilisation de l'intelligence artificielle comme les réseaux de neurones pour une autre commande robuste du GADA vis-à-vis les variations paramétriques .

Conception d'un contrôle du GADA pour compenser la puissance réactive dans les réseaux de petites puissances.

L'implantation des commandes proposées sur sites réels.

Bibliographie

- [1] <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=potentiels>.
- [2] A.Chemidi. *Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université Abou bakr Belkaïd de Tlemcen, Faculté de Technologie. 2014.
- [3] A.Dendouga. *Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM)*, Thèse Présentée pour obtention du grade de Doctorat, l'Université de Batna. 2010.
- [4] A.Gaillard. *Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat d'état en génie électrique, université Henry Poincaré, Nancy 1. 2010.
- [5] 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.
- [6] A.Ben Amar. *Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Hadj Lakhdar - Batna . 2009.
- [7] K. Ammour. *Commande de la vitesse d'une éolienne par l'approche multi-modèle*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique, Université de Tlemcen. 2014.
- [8] Y. Bekakra D. Ben Attous. *DFIG sliding mode control driven by wind turbine with using a SVM inverter for improve the quality of energy injected into the electrical grid*, ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol. 11, No. 1, pp. 63-75, February 2013 .
- [9] Y. Bekakra D. Ben Attous. *Sliding mode controls of active and reactive power of a DFIG with MPPT for variable speed wind energy conversion*, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 12, pp. 2274-2286 . 2011.
- [10] R. Azaizia. *Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de magister, université M'Hamed Bougara. 2008.

- [11] Y. Bekakra. *Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de magister, Centre Universitaire d'El-Oued. 2010.
- [12] A Bouhadda. *Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de magister, université Mouloud Maameri, Tizi-ouzou. 2011.
- [13] M. Bouharkat. *Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat de l'université de Batna, . 2006.
- [14] H. Merabet Boulouiha. *Contribution à l'étude et la commande d'une éolienne pour la production de l'énergie électrique*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université d'Oran. 2013.
- [15] 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, de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1. 2006.
- [16] Datta. R et T.Ranganathan. V. *Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine- a Comparison With Alternative Schemes*, IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol.17, No.3, pp.414-421.
- [17] K. Abed et H. Benalla F. Kendouli, K. Nabti. *Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation*, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, No. 1, pp. 109-120. 2011.
- [18] K. Ferkous. *Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne*, Présentation pour obtenir le diplôme de magister de physique école doctorale « Energies Renouvelables » Université Mentouri Costantine. 2009.
- [19] S. Haddouche et N. Kasbadji Merzouk H. Nedjari Daaou. *Amélioration de la Carte des Vents à Partir des Données Interpolées*, Rev. Energ. Ren. : ICPWE (2003)119-124 .
- [20] M.A Hassad. *Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister, université Sétif 1 . 2012.
- [21] A. Hassini. *Comparaison entre les techniques de commande de la puissance de vent dans une éolienne à vitesse variable*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister, université de Ouargla. 2016.
- [22] S. Heier. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Publications John Wiley Sons, ISBN 0-471-97143-X. 1998.
- [23] H.Serhoud. *Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne*. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de master académique, de l'Université d'El-Oued. 2015.

- [24] I.Delhem-S.Dermel. *Application des techniques de commandes intelligentes pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de master académique. 2015.
- [25] I.Hamzaoui. *Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique de l'école nationale polytechnique d'Alger. 2008.
- [26] N. Kasbadji-Merzouk. *Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat de l'Université de Tlemcen. 2006.
- [27] A.G. Jack L. Refoufi, B.A.T. Al Zahawi. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, Issue 3, 1999, pp 333-339.
- [28] Ivan. M. *Modélisation et Réalisation d'une Chaîne de Conversion Eolienne Petite Puissance*, Laboratoire D'électronique de Montpellier (LEM). 2011.
- [29] F. Mazouz. *commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme magister, université Hadj Lakhdar Batna. 2013.
- [30] M.Bensetti. *Etude et application des réseaux de neurones artificiels à la détermination en temps réel des angles d'amorçage d'un convertisseur statique, Commande par les techniques MLI*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, Faculté des Sciences de l'ingénieur, Département d'électrotechnique. 1999.
- [31] M.Bouaraki. *Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de magister de l'université M'hamedbougara, Boumardas. 2011.
- [32] T. Mesbahi. *Amélioration de la Qualité de l'énergie électrique Produite par un Système de Conversion éolien*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université d'Annaba. 2015.
- [33] A. Miricki. *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, institut national polytechnique de Toulouse. 2005.
- [34] M.Loucif. *Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone double alimentation d'étudiée à un système aérogénérateur*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, l'Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, Faculté de TECHNOLOGIE. 2015.
- [35] H.Ben Nadji. *Commande de la puissance active et réactive du GADA par la méthode de mode glissant*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba. 2015.

-
- [36] Poza Javier P. Lobo. *Modélisation, Conception et Commande d'une Machine Asynchrone sans Balais Doublement Alimenté pour la Génération à Vitesse Variable*, Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble . 2003.
- [37] F. Poitiers. *Etude et commande de génératrice asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau* , Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes. 2003.
- [38] M. Kadjoudj R. Abdessamed. *Modélisation des machines électriques* , Presses de l'Université de Batna . 1997.
- [39] R.Defontaines. *«Etude et simulation de la MADA»* ,Thèse présentée pour l'obtention du diplôme d 'ing en Génie Electrique, école de Technologie supérieure Université du QUÉBEC Montréal . 2004.
- [40] R. Rouabhi. *Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation* ,Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas SETIF. 2012.
- [41] A. Mamadie Sylla. *Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone double alimentation* , Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, du Québec à Trois-Rivières. 2013.
- [42] M. Laamayad Tahar. *Commande optimale d'une machine asynchrone apport de la logique floue* ,Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université de Batna. 2008.

Annexe A

Paramètres de la MADA

Nom	Valeur	Unité
Tension nominale	20/380	
Puissance nominale	7.5	<i>Kw</i>
Fréquence nominale	50	<i>Hz</i>
Nombre de paires du pôle	2	
CVitesse nominale	1440	<i>tr.min⁻¹</i>
Résistance statorique	0,445	Ω
Résistance rotorique	0,62	Ω
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	$6,73 \cdot 10^{-3}$	<i>Kg.m²</i>
Moment d'inertie	0,3125	<i>N.s.rad⁻¹</i>

Paramètres de la TURBINE

Nom	Valeur	Unité
Puissance nominale	7.8	<i>W</i>
Densité de l'aire	1,225	
Angle de calage	2	$^{\circ}$
Nombre de pale	3	
Rayon de pale	3	<i>m</i>
Gaine de multiplicateur	5,4	
Moment d'inertie	0,042	<i>Kg.m²</i>
Coefficient de frottement visqueux	0,024	<i>N.s.rad⁻¹</i>

Limite de Betz

la totalité de l'énergie du vent ne peut pas être captée par l'éolienne ainsi le théorème du physicien allemand Betz montre que le maximum de l'énergie récupérée au rotor est égal à 59% de l'énergie totale du vent. Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (14) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

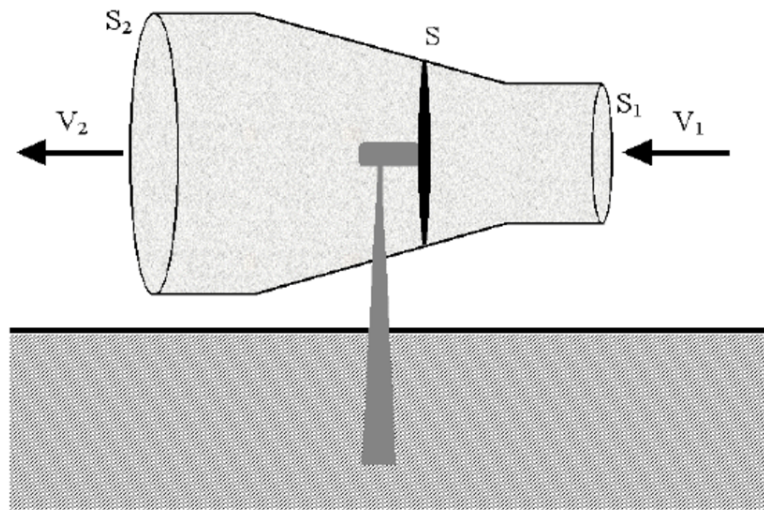


FIGURE 14 – Tube de courant autour d'une éolienne

Soit V la vitesse du vent au niveau des pales, d'où :

$$V_1 > V > V_2 \quad (66)$$

La variation d'énergie récupérée due à la variation cinétique du vent est égale :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \Delta V_{vent}^2 = \frac{1}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad (67)$$

Et la variation de puissance s'écrit :

$$\Delta E_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{vent} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (68)$$

D'autre part l'effort qui s'exerce sur les pales est donné par le théorème de quantité de mouvement :

$$F = \rho \cdot A \cdot V_{vent} \cdot (V_1 - V_2) \quad (69)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{ar} = F \cdot V_{vent} = \rho \cdot A \cdot V_{vent}^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (70)$$

Cette puissance est aussi égale à la variation de puissance donnée par l'équation ci-dessus, il vient :

$$\rho \cdot A \cdot V_{vent}^2 \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{vent} \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (71)$$

par simplification, ceci conduit à :

$$V_{vent} = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (72)$$

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 : $V_{vent} = \frac{(V_1 + V_2)}{2}$

Calcul de coefficient de puissance

Les puissances en amont et en aval de l'aérogénérateur sont :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{vent}^3 \quad (73)$$

$$P_{ar} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{vent} (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{vent} (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) \quad (74)$$

Le rapport appelé coefficient de puissance C_p s'écrit

$$C_p = \frac{P_{aer}}{P_{vent}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{V_1^3} \quad (75)$$

$$C_p = \frac{P_{aer_{max}}}{P_{vent}} \quad (76)$$

Sa valeur max $P_{aer_{max}}$ doit satisfaire la condition ;

$$\frac{dP_{aer}}{dV_2} = 0 \quad (77)$$

$$3V_2^2 + 2V_1V_2 - V_1^2 = 0 \quad (78)$$

Sachant que $V_2 \geq 0$ on obtient :

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (79)$$

Et :

$$P_{aero_{max}} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \quad (80)$$

Donc :

$$C_{p_{max}} = \frac{8}{27} \approx 59\% \quad (81)$$

La figure (15) suivant montre le maximum de puissance

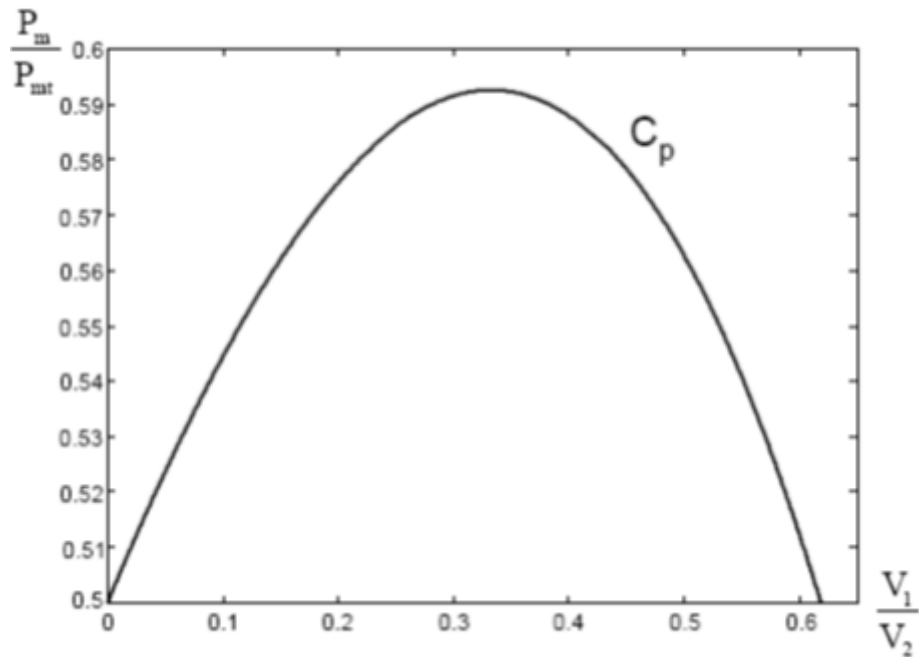


FIGURE 15 – Coefficient de puissance

Annexe C

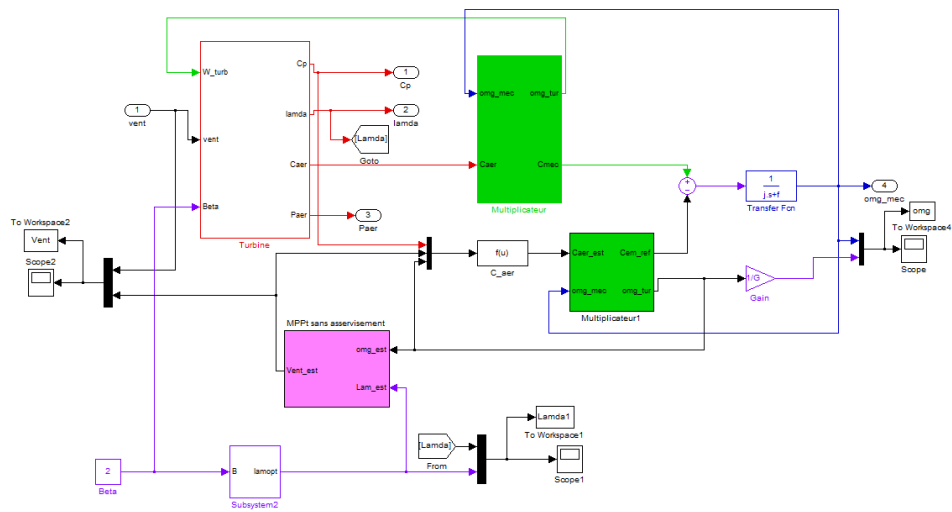


FIGURE 16 – schéma de simulation de La MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique

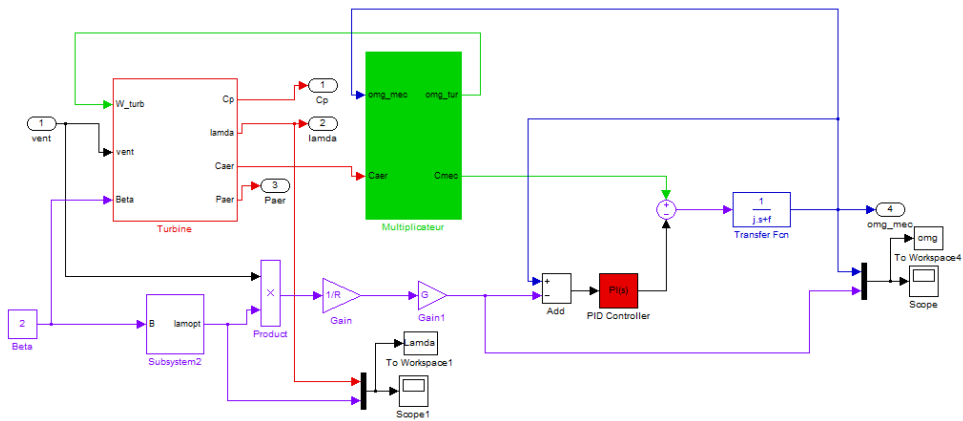


FIGURE 17 – schéma de simulation de La MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique

Cahier de charge de regulation pour la commande des puissance

Nom	Valeur
Erreur statique	<i>nule</i>
Temps de réponce	<i>a5%</i>
La constante de temps électrique τ	0.0001