

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Automatique

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN AUTOMATIQUE

THEME

**COMMANDE NON LINEAIRE D'UN SYSTEME
HYBRIDE EOLIEN-PHOTOVOLTAIQUE
CONNECTE AU RESEAU ELECTRIQUE**

Etudié par :

Mlle BOUDIAF Imène et Melle OUZAICH Siham

Proposé et dirigé par

Pr. H. CHEKIREB et Dr. O. STIHI

Jun 2013

Ecole Nationale Polytechnique, 10, Avenue Hassen badi, BP 182 El Harrach 16200, Alger, Algérie

المخلص

إهتمنا في هذه المذكرة بالتحكم في أنظمة الطاقة الهجينة المكونة من طاقة الرياح و الطاقة الكهروضوئية و المتصلة بشبكة الكهرباء

النظام المقترح مكون من سلسلة لإنتاج الطاقة الكهروضوئية و أخرى لإنتاج طاقة الرياح مجموع الطاقة المنتجة تخزن في بطاريات بعد وصف هذا النوع من الأنظمة إقترحنا نماذج لمختلف مكونات هذا النظام . التحكم في هذا النظام يمزج بين التحكم في سلسلتي إنتاج الطاقة المذكورتين سالفًا بغية إستخراج أكبركم من الطاقة و ذلك عن طريق تتبع نقطة الإستطاعة القصوى و أيضا من أجل ضمان نوعية الطاقة الكهربائية التي تمول الشبكة الكهربائية كل هذا عن طريق التحكم في توتر موصل المحول المستمر و توتر المحول جهة شبكة الكهرباء

كلمات مفتاحية

تحكم ، كهروضوئي ، رياحي ، بطاريات ، الشبكة الكهربائية ، نقطة الإستطاعة القصوى ، موصل المحول المستمر ، محول

Résumé

Dans ce mémoire, notre intérêt s'est porté sur la commande d'un système non linéaire hybride éolien-photovoltaïques connecté au réseau. Le système proposé se compose d'une chaîne de production photovoltaïque et éolienne, et l'énergie produite sera stockée dans des batteries.

Après un état de l'art sur ce type des systèmes, des modèles de différents composants du système sont proposés. La commande de ce système a combiné la commande des deux sous-systèmes pour assurer : la maximisation des énergies photovoltaïque et éolienne extraites, en poursuivant leurs points de puissance maximale (MPP), et pour assurer aussi la qualité de l'énergie électrique injecté au réseau, en commandant la tension du bus continu et la tension du convertisseur coté réseau.

Mot clés : commande, photovoltaïque, éolien, batteries de stockage, réseau, MPP, bus continu, convertisseur.

Abstract

In this work, our interest is focused on the control of a networked nonlinear hybrid wind-solar system. The proposed system consists of a chain of solar and wind power, the energy is stored in batteries. After a state of the art for this type of systems, models of different components of the system are proposed. The control of this system combined the control of the two subsystems, to maximize the photovoltaic and wind extracted energy by pursuing their Maximum Power Point (MPP), and also to ensure the quality of the electrical energy injected to the network by controlling the DC bus voltage and line voltage converter side.

Key words: control, photovoltaic, wind, battery storage, network, MPP, DC bus converter.

Remerciements

Nous remercions le bon Dieu de nous avoir accordé la patience, le courage, la volonté et la motivation qui nous ont permis d'achever ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude, notre grand respect et notre sincère reconnaissance à nos promoteurs le Pr. H.CHEKIREB et Dr. O.Stihi de l'Ecole Nationale Polytechnique pour avoir assumé la lourde responsabilité de nous encadrer, de nous avoir orienté et conseillé tout au long de ce travail, pour leurs disponibilité ainsi pour la confiance qu'il nous ont accordée .

Nous remercions chaleureusement messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous accordent d'avoir accepté d'évaluer notre projet.

Nous souhaitons aussi remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, et en particulier, Nos professeurs d'Automatique qui nous ont encadrés auparavant et tous nos enseignants pour les connaissances qu'ils nous ont transmis, leur disponibilité et leurs efforts.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*La personne qui m'est la plus chère au monde : Ma mère...
symbole de tendresse , de sacrifice et d'amour , Sans ton soutien
rien n'aurait été possible que dieu te protège et te garde pour
moi.*

*La mémoire de ma deuxième mère, ma grand-mère, que j'ai
tant voulu avoir à mes cotés ce jour là, que dieu t'accueille dans son
vaste paradis, repose en paix.*

*Mon grand père qui a toujours été à mes cotés, que dieu te garde
pour nous.*

Ma famille

Mes amis

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment...

S mène

Dédicaces

En signe d'amour, de gratitude et de respect, Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont toujours apporté leur amour et leur soutien pour affronter les difficultés de la vie. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance la plus dévouée.

A mes frères : Djelloul , Mounir et Yacine

A mon adorable petite sœur Celya

À tous mes amis et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Un grand merci à amine

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Siham

Tables des matières

<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
------------------------------------	----------

Chapitre I .Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

I.1 Introduction	4
I.2 Les énergies renouvelables	4
I.3. Evaluation des énergies renouvelables en Algérie	5
I.4 Concept de l'éolien, de l'électricité à partir du vent.....	6
I.4.1 Les différents types d'éoliennes	6
I.4.1.1 Types d'éoliennes suivant la structure	6
I.4.1.2 Types d'éoliennes suivant la vitesse	7
I.4.2 Puissance et coefficient de puissance.....	8
I.4.3 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	10
I.4.4 Technologies d'aérogénérateurs de grande puissance.....	11
I.4.5 La Machine Asynchrone à Double Alimentation.....	11
I.5 Concept du photovoltaïque, de l'électricité à partir du soleil.....	13
I.5.1. La cellule solaire.....	13
I.5.2. L'effet photovoltaïque et la jonction P-N.....	14
I.6 Les systèmes hybrides	14
I.6.1 définition d'un système hybride	14
I.6.2 l'intérêt des systèmes hybrides	15
I.6.3 Les différents types des systèmes hybrides.....	15
I.6.3.1 Système hybride PV/génératrice.....	15
I.6.3.2 Système Hybride PV/Diesel/Eolien.....	16
I.6.3.3 Système Hybride Eolien/photovoltaïque.....	17
I.7 Conclusion	19

Chapitre II. Modélisation du système hybride éolien-photovoltaïque

II.1 Introduction.....	20
II.2 Le système hybride	20
II.3 Modélisation de la chaîne photovoltaïque	21
II.3.1 Modèle du générateur photovoltaïque.....	21
II.3.2 Modélisation du générateur photovoltaïque.....	27
II.3.3 Modèle du convertisseur statique DC-DC.....	28

II.4 Modélisation de la chaîne éolienne.....	31
II.4.1 Partie Puissance Electrique.....	31
II.4.1.1 Modèle de la MADA.....	31
II.4.1.2 Modèle des convertisseurs.....	33
II.4.1.3 Modèle du bus continu.....	35
II.4.2 Partie mécanique	36
II.4.2.1 Modèle de la turbine.....	36
II.4.2.2 Modèle de l'arbre.....	39
II.5 Modélisation du système de stockage électrique	39
II.5.1 Modèle d'accumulateur.....	42
II.5.2 Estimation de l'état de charge.....	44
II.5.3 Régulateur de charge et de décharge de la batterie	44
 II.6 Conclusion	 45

Chapitre III. Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

III.1 Introduction	46
III.2. Structure de la commande du système éolien	46
III.3 La maximisation de la puissance extraite de la turbine.....	47
III.3.1 Stratégie avec connaissance de la courbe caractéristique.....	47
III.3.2. Stratégie sans connaissance de la courbe caractéristique.....	48
III.4 Le contrôle de la puissance active et réactive de la MADA	49
III.4.1 Commande de la puissance active et réactive basée sur le critère de stabilité de Lyapunov	49
▪ Résultats de la simulation	50
▪ Interprétation des résultats	54
III.4.2 Commande par mode glissant de la puissance active et réactive de la MADA.....	55
▪ Résultats de la simulation	57
▪ Interprétation des résultats	60
III.5 Contrôle de la tension du bus continu.....	60
III.6 Commande de la puissance électrique produite par le panneau photovoltaïque	61
III.6.1 Commande MPPT d'une chaîne photovoltaïque.....	62
a. Principe de la méthode Perturbation et Observation (P&O).....	63

b. Simulation du générateur photovoltaïque sans MPPT	64
c. Simulation du générateur photovoltaïque avec MPPT (P&O).....	65
III.7 Commande de la charge et de la décharge de la batterie d'accumulateurs électrique	67
III.8 Conclusion.....	68
Conclusion générale.....	70
Références bibliographiques	72
Annexe(1).....	75
Annexe(2).....	88

TABLE DES FIGURES

Figure I.1	le rayonnement solaire dans le monde.....	4
Figure I.2	Le potentiel d'énergie éolienne dans le monde.....	5
Figure I.3	schéma global et les différentes conversions d'énergie intervenant dans un système éolien.....	6
Figure I.4	éoliennes à axe vertical.....	6
Figure I.5	Ferme d'éoliennes à axe horizontal.....	7
Figure I.6	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.....	8
Figure I.7	Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs (éoliennes)....	9
Figure I.8	La vitesse du vent et la vitesse périphérique en bout de pales.....	10
Figure I.9	Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.....	10
Figure I.10	MADA pilotée par son rotor.....	12
Figure I.11	Les différents modes de fonctionnement de la MADA.....	13
Figure I.12	La cellule solaire.....	14
Figure I.13	Transformation du rayonnement solaire en électricité.....	14
Figure I.14	Système hybride PV/Diesel série	16
Figure I.15	Système hybride PV/Diesel parallèle	16
Figure I.16	Modèle général d'un système hybride PV/Diesel/éolien.....	17
Figure I.17	Schéma bloc de principe pour un système hybride PV-Eolien.....	17
Figure I.18	Configuration de SEH à bus CC.....	18
Figure I.19	Architecture à bus CC/CA d'un système hybride.....	19
Figure II.1	Schéma bloc de principe pour un système hybride PV-Eolien.....	20
Figure II.2	cellules, module et panneau photovoltaïque	21
Figure II.3	Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale.....	22
Figure II.4	Modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure II.5	Caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule photovoltaïque.....	24
Figure II.6	Influence de la température sur la caractéristique I(V).....	25
Figure II.7	Influence de la température sur la caractéristique P(V).....	26
Figure II.8	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I(V).....	26
Figure II.9	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P(V).....	27

Figure II.10	Caractéristique P(V) d'un panneau photovoltaïque.....	28
Figure II.11	Caractéristique I(V) d'un panneau photovoltaïque.....	28
Figure II.12	Schéma de principe d'un hacheur Boost.....	29
Figure II.13	Circuit équivalent d'un hacheur Boost lorsque S est fermé.....	29
Figure II.14	Circuit équivalent d'un hacheur Boost lorsque S est ouvert.....	29
Figure II.15	Orientation de la tension statorique sur l'axe d.....	32
Figure II.16	Convertisseur coté machine	33
Figure II.17	Schéma d'un onduleur de tension à deux niveaux.....	33
Figure II.18	Le convertisseur coté réseau.....	34
Figure II.19	Représentation du bus continu	35
Figure II.20	Schéma de principe de la turbine éolienne.....	36
Figure II.21	Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p	37
Figure II.22	la puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse de rotation.....	38
Figure II.23	Modèle équivalent de la batterie au plomb.....	42
Figure II.24	Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant.....	44
Figure III .1	schéma global de la chaine de conversion	46
Figure III.2	Caractéristique de la voilure.....	47
Figure III.3	Commande du convertisseur coté machine.....	49
Fig. III.4	Profil du vent et la puissance statorique désirée.....	51
Figure.III.5	Puissances au stator et au rotor de la MADA dans le cas d'une commande idéale.....	52
Figure.III.6	Grandeurs électriques et Couples de la MADA dans le cas d'une commande idéale.....	52
Figure III.7	Puissances au stator et au rotor de la MADA dans le cas d'une commande perturbée.....	53
Figure III.8	Grandeurs électriques et Couples de la MADA dans le cas d'une commande perturbée.....	54

Figure III.9 Puissances au stator et au rotor de la MADA dans le cas d'une commande idéale.....	57
Figure III.10 Grandeurs électriques et Couples de la MADA dans le cas d'une commande idéale.....	58
Figure III.11 Puissances au stator et au rotor de la MADA dans le cas d'une commande perturbée.....	59
Figure III.12 Grandeurs électriques et Couples de la MADA dans le cas d'une commande perturbée.....	59
Figure III.13 Schéma d'asservissement du bus continu	61
Figure III.14 Réglage de la tension du bus continu du convertisseur AC-DC-AC	61
Figure III.15 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	62
Figure III.16 Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O)	63
Figure III.17 Profil d'ensoleillement	64
Figure III.18 Pilotage du GPV sans la procédure MPPT	65
Figure III.19 Grandeurs électriques du Gpv dans le cas d'un pilotage par MPPT	66
Figure III.20 Puissance fournie par le Gpv sans MPPT ou avec MPPT	66
Figure III.21 Schéma de commande de la charge et de la décharge de la batterie d'accumulateurs	67
Figure III.22 simulation des caractéristiques de la batterie	68

Liste des tableaux

Tableau II.1 : tableau comparatif entre les différents types d'accumulateurs.....	41
Table III.1 Table des règles	48

Abréviations et symboles

Abréviations

AC	Courant Alternatif (Alternating Current)
ANN	Réseau de Neurones Artificiels (Artificial Neuronal Network)
DC	Courant Continu (Direct Current)
F.é.m.	Force électromotrice
GPV	Générateur Photovoltaïque
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MCC	Moteur à Courant Continu
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPP	Point de Puissance Maximal (Maximum Power Point)
MPPT	Poursuite du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking)
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Pb-acide	Plomb-Acide
PI	Régulateur Proportionnel Intégral
P&O	Perturbation et Observation
PV	Photovoltaïque
SEH	Système d'Energie Hybride

Symboles latins

		unités
C	Capacité	F
C_p	Coefficient de puissance	N.m
C_{aero}	Couple aérodynamique	N.m
C_{arbre}	Couple de l'arbre	N.m
C_{em}	Couple électromagnétique	N.m
$C_{em\ ref}$	Couple électromagnétique de référence	N.m
C_{mec}	Couple mécanique	N.m
C_{visq}	Couple des frottements visqueux	N.m
E_0	Tension constante	V
E_{batt}	Tension non linéaire de la batterie	V
E_g	Bande énergétique du gap du semi-conducteur	V

E_r	F.é.m. créé au niveau rotor	N
E_s	F.é.m. créé au niveau stator	N
$Exp(s)$	Zone dynamique exponentielle	V
f	Coefficient du frottement visqueux	N.m.s/rad
f_r	Fréquence des courants rotoriques	Hz
f_s	Fréquence des courants statoriques	Hz
f_s	Fréquence de hachage	Hz
G	l'ensoleillement	W/m ²
G	gain du multiplicateur	
G	conductance de la source	A/V
g	Glissement	
I	courant	A
I^c	Courant de la cellule photovoltaïque	A
I^G	Courant du générateur photovoltaïque	A
I_0	Courant de saturation de la diode	A
I_b	Courant de la batterie	A
I_{diode}	Courant direct de la diode	A
I_{light}	Photo-courant de cellule	A
I_m	Courant de point de puissance maximale	A
I_{pv}	Courant de la cellule	A
I_r	Courant rotorique	A
I_s	Courant statorique	A
I_{sc}	Courant de court-circuit	A
I_{sc}^c	Courant de court-circuit de la cellule photovoltaïque	A
I_{sc}^G	Courant de court-circuit du générateur photovoltaïque	A
J_g	Inertie du générateur	kg. m ²
J_T	Inertie totale	kg. m ²
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine	kg. m ²
K	Constante de Boltzmann	
K_I	Constante d'intégralité	
K_P	Constante de proportionnalité	
L_r	Inductance cyclique rotorique	H
L_s	Inductance cyclique statorique	H

M	rapport de conversion	
M_{sr}	Inductance mutuelle	H
n	coefficient d'idéalité	
N_p	Nombre de cellules en parallèle	
N_r	Nombre de spires des bobinages rotoriques	
N_s	Nombre de spires des bobinages statoriques	
N_s	Nombre de cellules en série	
p	nombre de paire de pôles	
P	puissance	W
P_{aero}	Puissance aérodynamique	W
P_m	Puissance mécanique	W
P_{max}	Puissance maximale	W
P_r	Puissance active au niveau rotor	W
P_{rcp}	Puissance active demandée par le récepteur	W
P_{res}	Puissance active fournie au réseau	W
P_s	Puissance active au niveau stator	W
P_{sh}	Puissance active fournie par le système hybride	W
P_{vent}	Puissance du vent	W
q	charge de l'électron	C
Q_r	Puissance réactive au niveau rotor	VAR
Q_{rcp}	Puissance réactive demandée par le récepteur	VAR
Q_s	Puissance réactive au niveau stator	VAR
R_r	Résistance rotorique	Ω
R_s	Résistance statorique	Ω
R_s	Resistance série	Ω
R_s^C	Resistance interne de la cellule photovoltaïque	Ω
R_s^G	Resistance interne du générateur photovoltaïque	Ω
R_{shunt}	Resistance shunt	Ω
R_t	Rayon de la turbine ou longueur d'une pale	m
$sel(s)$	Mode de la batterie	
S_{eol}	Surface balayée par l'éolienne	m^2
T	Température	$^{\circ}C$
T_C	Température de la jonction	K

T_s	Période de commutation	s
v	vitesse du vent	m/s
v_{est}	vitesse du vent estimée	m/s
V	tension	V
V^c	Tension de la cellule photovoltaïque	V
V^G	Tension du générateur photovoltaïque	V
V_b	Tension de la batterie	V
V_c	Tension du condensateur	V
V_m	Tension de point de puissance maximale	V
V_{oc}	Tension du circuit ouvert	V
V_{oc}^c	Tension du circuit ouvert de la cellule photovoltaïque	V
V_{oc}^G	Tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque	V
V_r	Tension rotorique	V
V_{ref}	Tension de référence	V
V_s	Tension statorique	V
V_T	Potentiel thermique	V
Z	l'impédance équivalente d'entrée	

Symboles grecques

α	rapport cyclique	
β	angle d'inclinaison des pales	°
ΔD	pas d'échantillonnage	s
ΔG	incrémentale conductance	A/V
Φ_r	Flux rotorique	Wb
Φ_s	Flux statorique	Wb
λ	rapport de vitesse	
Ω_{gen}	vitesse mécanique de la génératrice	rad/s
Ω_r	vitesse mécanique du rotor	rad/s
Ω_s	vitesse du champ magnétique dans l'entrefer	rad/s
Ω_t	vitesse de rotation de la turbine	rad/s
ω	pulsation de synchronisme	rad/s
ω_s	Pulsation du réseau (pulsation des courants statoriques)	rad/s
ω_r	pulsation des courants rotoriques	rad/s

ρ	masse volumique de l'air	kg/m^3
θ	l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique	rad
θ_r	Angle électrique rotorique	rad
θ_s	Angle électrique statorique	rad
τ	Constante de temps	s
μI_{sc}	coefficient de température du courant de court-circuit	A/K

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

I.1 Introduction

La consommation humaine d'énergie est devenue très perturbatrice de l'environnement et rend nécessaire de reconsidérer nos ressources notamment en faisant apparaître la part des renouvelables qui, par nature, nous permettent de mieux envisager un réel développement durable.

Après maintes hésitations dans les décennies passées, les sources d'énergie renouvelables s'imposent progressivement comme une des alternatives les plus sûres, à long terme, aux sources traditionnelles que sont les carburants fossiles et l'uranium, notamment pour la production d'électricité [7].

Dans ce premier chapitre, nous allons décrire les différentes caractéristiques des énergies renouvelables les plus utilisées à l'échelle mondiale jusqu'à aujourd'hui : l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, à la fin nous allons entamer l'hybridation entre les deux énergies : c'est les systèmes d'énergies électriques hybrides SEH.

I.2 Les énergies renouvelables :

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental [7].

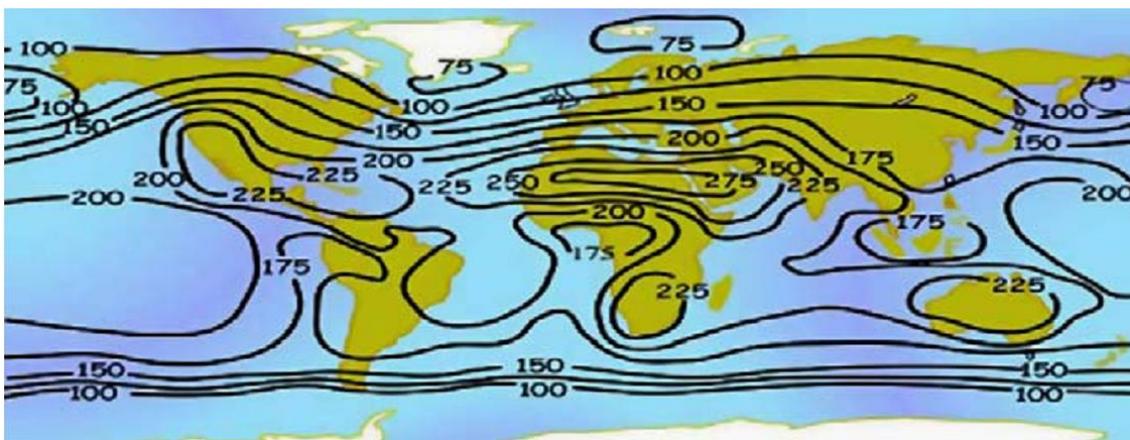


Fig I.1 : le rayonnement solaire dans le monde [16]

Le développement des énergies renouvelables est une question tellement sérieuse que désormais elle concerne non seulement les pays industrialisés, mais aussi ceux en voie de développement, d'autant plus que les experts ne cessent d'avertir que les jours des hydrocarbures sont comptés et que l'avenir en matière énergétique se trouve de ce fait dans le renouvelable [13]. Concernant l'Algérie, un pays très vaste d'un climat très diversifié, ayant deux grandes zones géographiques distinctes, le Nord méditerranéen et le Sud saharien, peut devenir un bon concurrent dans cette course de recours aux

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

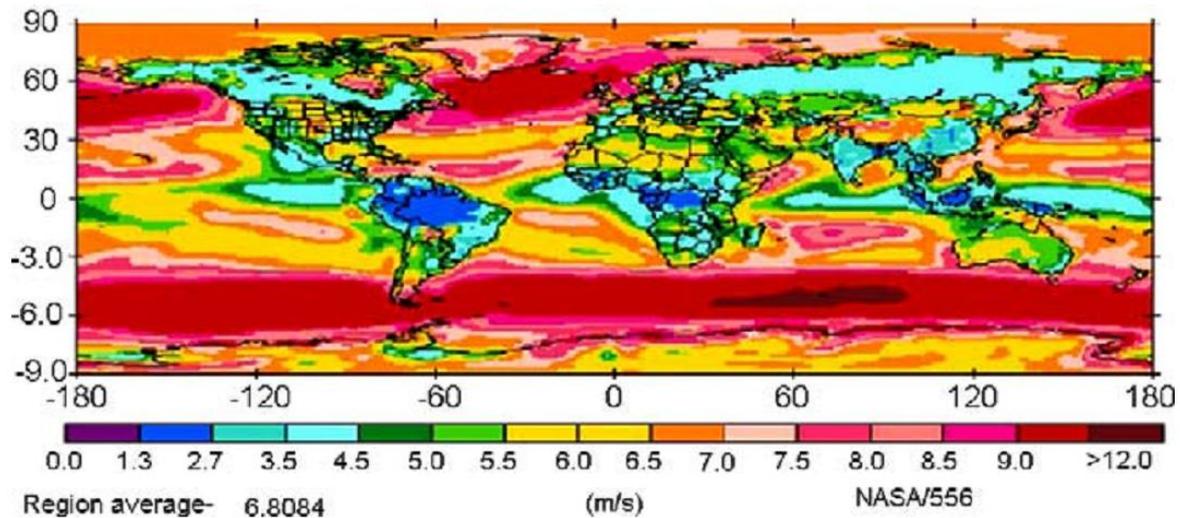


Fig I.2 Le potentiel d'énergie éolienne dans le monde[16]

Énergies renouvelables [12]. Ceci est clairement montré par la carte du rayonnement solaire (fig. I.1) et celle du potentiel de l'énergie éolienne (fig. I.2) dans le monde [11]

I.3. Evaluation des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie, en plus d'avoir des gisements appréciables en énergie fossile, dispose également d'un gisement inestimable et intarissable en énergies renouvelables. Il s'agit de l'énergie solaire et éolienne. [15]

- **L'énergie solaire**

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kwh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays [16]. Il faut savoir que 1/10 du désert algérien peut alimenter toute l'Europe en énergie électrique [15].

- **L'énergie éolienne :**

Le potentiel éolien technique de l'Algérie dans les zones les plus ventées a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable [17], Il est utile de savoir que si on implante des éoliennes sur une superficie de 2025 km^2 , l'Algérie sera en mesure de fournir de l'énergie électrique pour toute l'Europe [14].

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

I.4 Concept de l'éolien, de l'électricité à partir du vent

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [8]

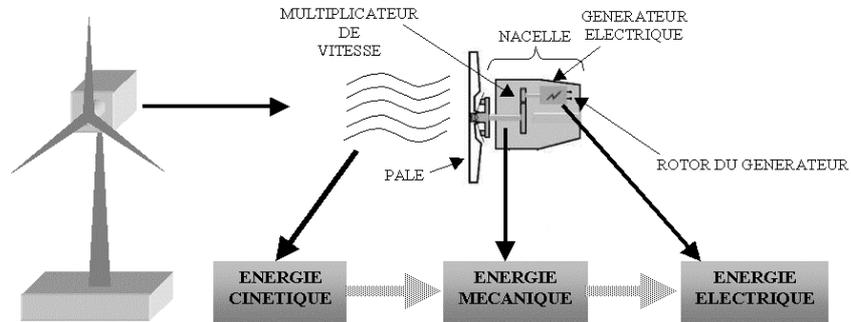


Fig. I.3 : schéma global et les différentes conversions d'énergie intervenant dans un système éolien[8]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée et c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts)

I.4.1 Les différents types d'éoliennes

I.4.1.1 Types d'éoliennes suivant la structure

❖ éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. La figure I.4 montre les plus remarquables éoliennes à axe vertical[8].



Fig. I.4 : éoliennes à axe vertical [8]

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

❖ **Eoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance, qui est utilisée en aéronautique pour maintenir un avion en vol, sert à générer un couple moteur entraînant la rotation de l'aérogénérateur. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [24].

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.



Fig. I.5 : Ferme d'éoliennes à axe horizontal

I.4.1.2 Types d'éoliennes suivant la vitesse

❖ **Les éoliennes à vitesse fixe**

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice.

On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables [24].

❖ **Les éoliennes à vitesse variable**

Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure I.6

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

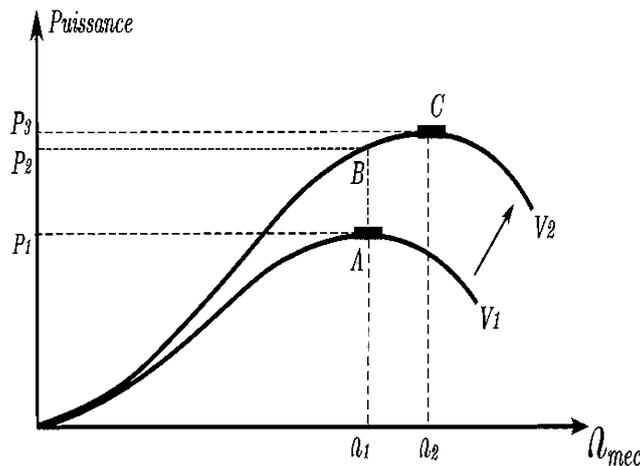


Fig. I. 6 Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent

Pour une vitesse v_1 du vent et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de ramener la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence calculée pour maximiser la puissance extraite.

I.4.2 Puissance et coefficient de puissance

Si on considère un vent qui traverse une surface S (un disque de rayon R) à une vitesse V_v , la puissance cinétique du vent traversant ce disque éolien est donnée par la relation :

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

Tel que :

$$S = \pi R_t^2 \quad (\text{I.2})$$

R_t : correspond pratiquement à la longueur de la pale ;

ρ : masse volumique de l'air

V_v : est la vitesse du vent (en m/s).

Selon la loi énoncée par Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne sera donc égale à la limite de Betz :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_v \quad (I.3)$$

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

$$C_p^{opt} = P_{max}/P_v \quad (I.4)$$

La figure (I.7) montre la limite de Betz et les différents coefficients optimaux pour diverses éoliennes

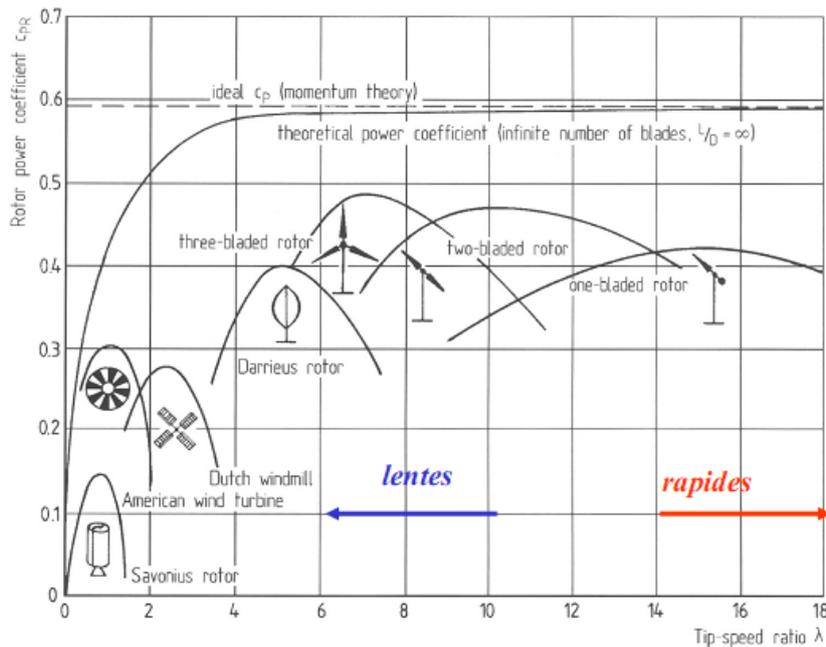


Fig. I.7: Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs (éoliennes)

Comme le montre la figure (I.7), les diverses éoliennes existant atteignent rarement la limite énoncée par Betz. En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent et est différent pour chaque turbine éolienne.

Le coefficient de puissance C_p dépend du rapport de vitesses λ (ou TSR, tip speed ratio), et il est caractérisé par les propriétés de la turbine éolienne (axe horizontal ou vertical, nombre et forme des pales, etc.)

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{V_v} \quad (I.5)$$

Où

R_t : le rayon de la turbine

Ω_t : la vitesse angulaire de rotation de la turbine

V_v : la vitesse du vent

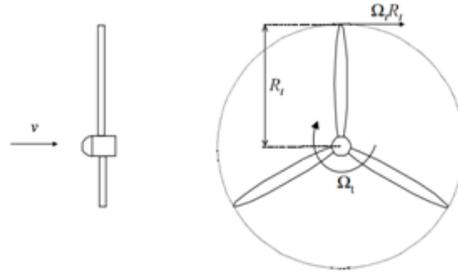


Fig. I.8 La vitesse du vent et la vitesse périphérique en bout de pales.

I.4.3 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnantes : V_v la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_{max} la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [5].

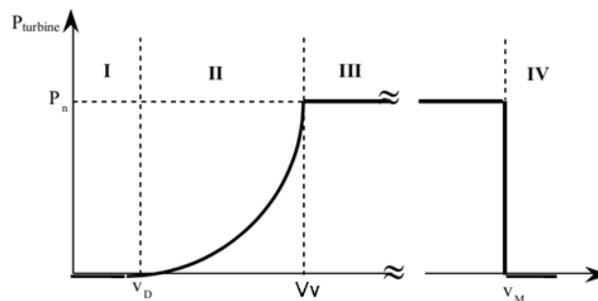


Fig. I.9 Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones (Fig. I.9) :

- la zone I, où $P_{turbine} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_v ;

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

- la zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n ;
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

I.4.4 Technologies d'aérogénérateurs de grande puissance :

Il existe plusieurs types de génératrices adaptées aux éoliennes, elles sont classées suivant les trois variantes ci-dessous

- ✓ Systèmes utilisant la machine synchrone
- ✓ Systèmes utilisant des machines spéciales
- ✓ Systèmes utilisant la machine asynchrone :

Pour le dernier cas, deux structures sont distinguées : la machine asynchrone à cage (MAS) et la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Cette dernière est la plus intéressante, elle fera l'objet de notre étude.

I.4.5 La Machine Asynchrone à Double Alimentation

La machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge.

La MADA se compose d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire dit rotor de forme cylindrique qui est mobile. Le stator comporte trois enroulements couplés en étoile ou en triangle alimentés par un système triphasé de tension.

Contrairement aux machines asynchrones à cage ou aux machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une machine dont la vitesse de fonctionnement est située sur une grande plage de variation [9]. Par cette caractéristique intéressante, la MADA connaît un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique.

Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique, on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à g fois la fréquence du réseau.

Pour contrôler le transfert de la puissance rotorique vers le réseau (puissance de glissement), plusieurs structures ont été proposées, mais nous n'allons prendre en considération que celle se basant sur des convertisseurs (à deux niveaux), une interface électronique composée d'un redresseur et un onduleur commandés en MLI (fig. I.10).

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

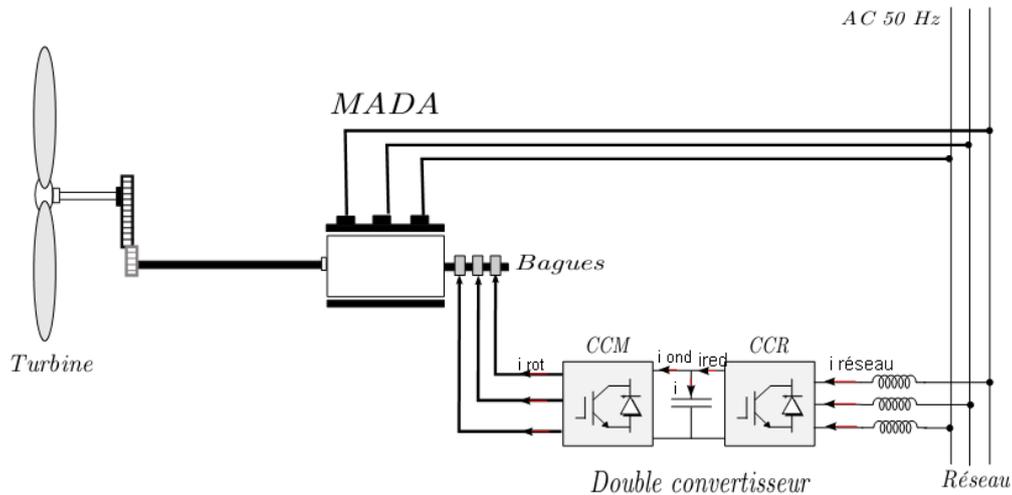


Fig.I.10 MADA pilotée par son rotor

- **Fonctionnement de la MADA à vitesse variable**

La figure (1.11) ci-dessous montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et le rotor, quant à lui, est relié au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs, ou : P_s représente la puissance statorique, P_r la puissance rotorique et P_m la puissance mécanique.

- **Cas moteur : Fonctionnement Hyposynchrone ($g > 0$) et Hypersynchrone ($g < 0$)**

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hyposynchrone (Figure I. 11-1). En mode moteur hypersynchrone (Figure I. 11-2), une partie de la puissance absorbée par le réseau passe par le rotor et est convertie en puissance mécanique.

- **Cas Génératrice : Fonctionnement Hyposynchrone ($g > 0$) et Hypersynchrone ($g < 0$)**

En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hyposynchrone, (Figure I. 11-3) une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hypersynchrone (Figure I.11- 4), la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à gp_m est transmise par l'intermédiaire du rotor [6][19].

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

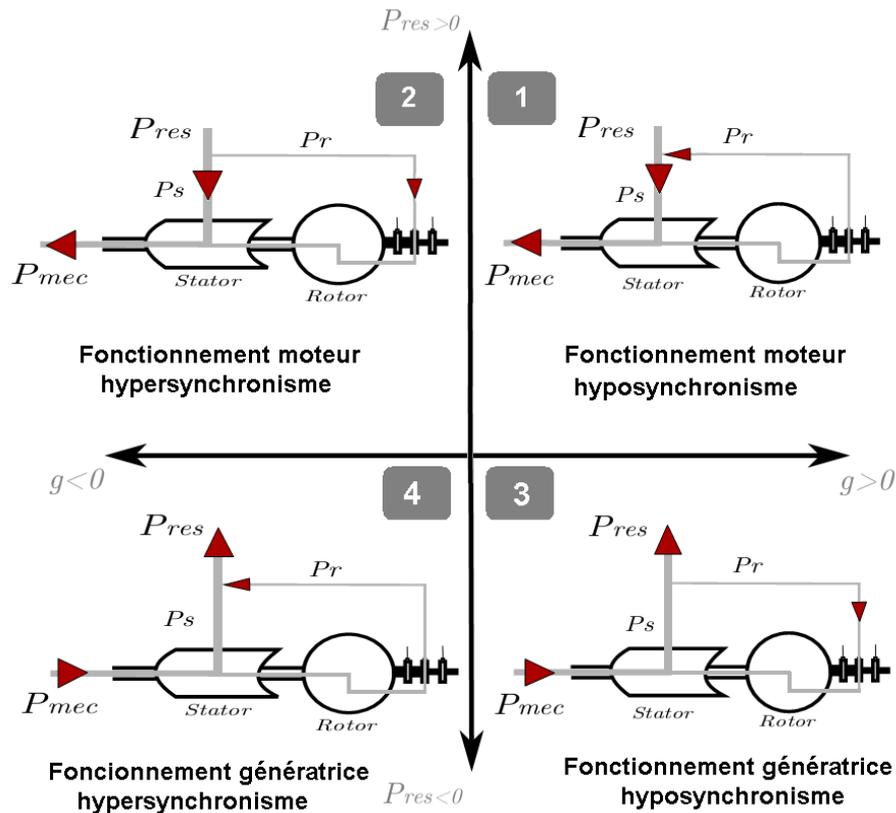


Fig. I.11 Les différents modes de fonctionnement de la MADA

- 1- Fonctionnement moteur hypo synchrone
- 2- Fonctionnement moteur hyper synchrone
- 3- Fonctionnement en génératrice hypo synchrone
- 4- Fonctionnement en génératrice hyper synchrone

I.5 Concept du photovoltaïque, de l'électricité à partir du soleil

I.5.1. La cellule solaire

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé effet photovoltaïque. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [6]. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium.

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate [5].

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un générateur photovoltaïque [5].



Fig. I.12 : La cellule solaire

I.5.2. L'effet photovoltaïque et la jonction P-N

L'effet photovoltaïque, observé la première fois en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel, est le phénomène physique qui permet de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique à travers les cellules photovoltaïques.

Cet effet est illustré sur la figure (I.13). Un photon d'énergie suffisante qui heurte un atome peut arracher un électron et lui communiquer une certaine vitesse, ce qui permet de créer des charges électriques [6].

Ces charges créées ont toutes une chance de se recombiner. En constituant une jonction de deux zones de types opposées (jonction P-N), un champ électrique apparaît au voisinage de cette jonction qui maintient la séparation des charges positives et négatives.

L'électron arraché sera accéléré par le champ électrique et parviendra éventuellement dans la zone de type N, de même la charge positive acquise par l'atome se propagera vers la zone de type P.

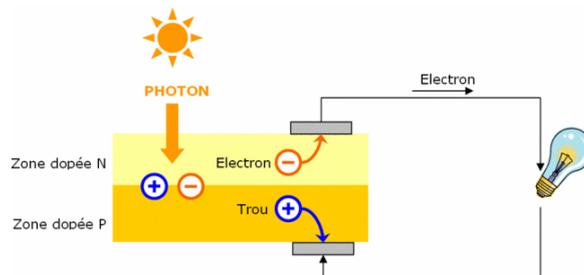


Fig. I.13 Transformation du rayonnement solaire en électricité

Ainsi, une tension électrique apparaît entre les deux phases de la jonction et si elles sont reliées par un circuit extérieur, un courant s'y écoulera. L'énergie des photons est ainsi convertie en énergie électrique [1].

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

I.6 Les systèmes hybrides

I.6.1 Définition d'un système hybride

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables.

Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité.

Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien des régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit [7]. Le système d'énergie hybride permet une meilleure exploitation des ressources renouvelables disponibles, cela le rend économiquement plus compétitif

I.6.2 l'intérêt des systèmes hybrides

Un système d'énergie hybride a les avantages suivants :

- minimiser le coût en optimisant les dimensions des deux systèmes.
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques ;
- Assurer l'énergie demandée par la charge, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie.
- Exploitation du système sans interruption;

I.6.3 Les différents types des systèmes hybrides

Plusieurs architectures de systèmes hybrides sont envisageable citons :

I.6.3.1 Système hybride PV/génératrice

Pour les applications hors réseau, il est possible d'avoir un système PV fonctionnant en parallèle avec une génératrice diesel. Les systèmes sont alors complémentaires : le système PV permet de réduire la consommation en combustible fossile et les coûts d'entretien de la génératrice; l'utilisation de la génératrice permet d'éviter le surdimensionnement du système PV (modules PV et batteries d'accumulateurs) qui serait nécessaire pour répondre à la demande en tout temps.

Les génératrices peuvent utiliser plusieurs types de combustibles fossiles : essence, diesel, propane ou gaz naturel

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

- **Systèmes hybrides PV/Diesel série:**

Dans ce système (voir figure I.14), l'énergie issue du générateur Diesel et du champ PV est utilisée pour charger un parc de batteries. Le générateur diesel est connecté en série avec l'onduleur pour alimenter la charge. L'onduleur convertit la tension continue du parc de batteries à une tension alternative pour alimenter la charge.

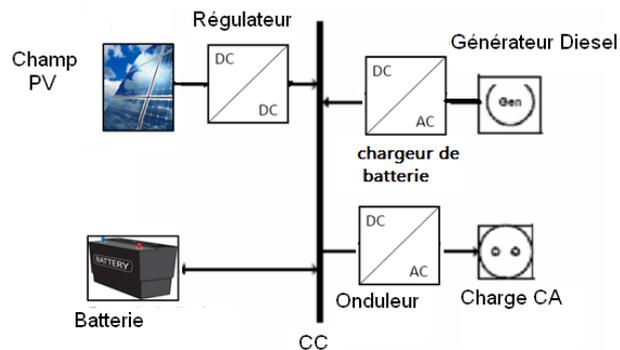


Fig. I.14 Système hybride PV/Diesel série

- **Système hybride PV/Diesel parallèle**

Le système hybride parallèle est illustré dans la figure (I.15). Le générateur Diesel peut alimenter la charge directement. Le champ PV et le parc de batteries sont connectés en série avec le convertisseur bidirectionnel pour alimenter la charge. Durant la période de faible demande d'énergie, l'énergie en excès issue du champ PV est utilisée pour recharger le parc de batteries. Le convertisseur bidirectionnel peut charger le parc de batteries quand l'excès d'énergie est disponible à partir du générateur Diesel.

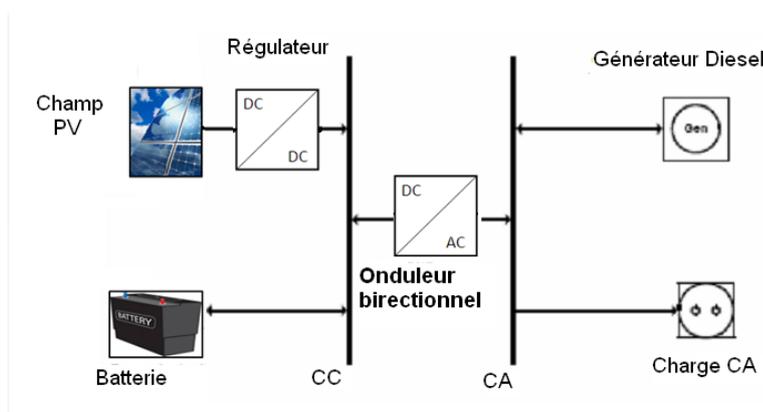


Fig. I.15 Système hybride PV/Diesel parallèle

I.6.3.2 Système Hybride PV/Diesel/Eolien:

Les systèmes PV/Diesel peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles que les turbines éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques. Dans les régions ensoleillées en été avec des vents forts en hiver, les

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

systèmes PV/Eoliens/Diesel permettent d'exploiter en plus l'énergie éolienne pour couvrir une partie des exigences de la charge qui autrement serait alimentée par un groupe diesel.

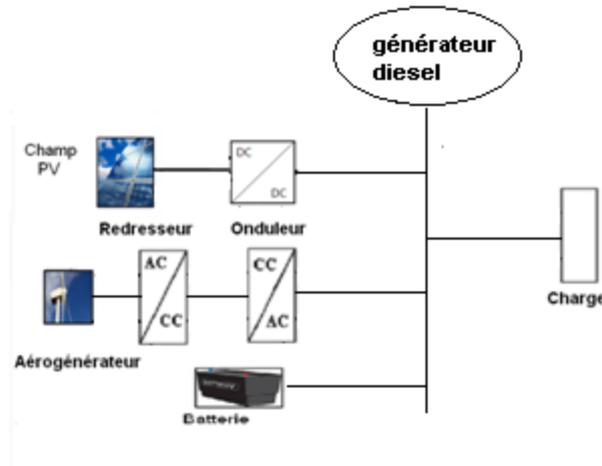


Fig. I.16 Modèle général d'un système hybride PV/Diesel/éolien

I.6.3.3 Système Hybride Eolien/photovoltaïque:

Ce système hybride représenté dans la figure (I.17) est composé de deux générateurs complémentaires : le photovoltaïque et l'éolien qui vont injecter leurs énergie au réseau.

Il est aussi muni d'un système de stockage (batteries).

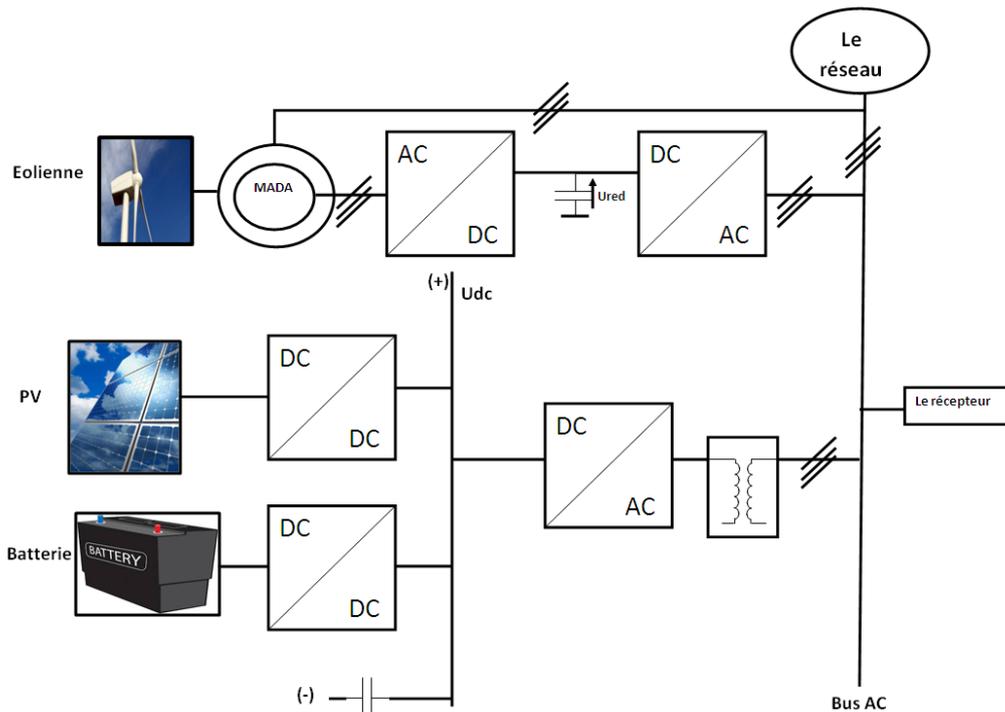


Fig. I.17 Schéma bloc de principe pour un système hybride PV-Eolien

Le système d'énergie hybride représenté à la figure I. 17 utilisant uniquement des sources d'énergies renouvelables (éolien-photovoltaïque) afin d'alimenter une habitation est l'objet de notre étude.

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

Pour ce type de système il y a deux principales configurations: architecture à bus CC et architecture mixte à bus CC-CA.

✓ *Architecture à bus CC :*

Pour l'architecture à bus CC, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un seul bus CC (figure I.18). Ainsi les systèmes de production à CA utilisent des redresseurs [8]. Le système de commande est relativement simple ce qui constitue un grand avantage pour une telle architecture. Le principal désavantage se manifeste par un rendement faible du système à cause de la batterie et des pertes dans les convertisseurs.

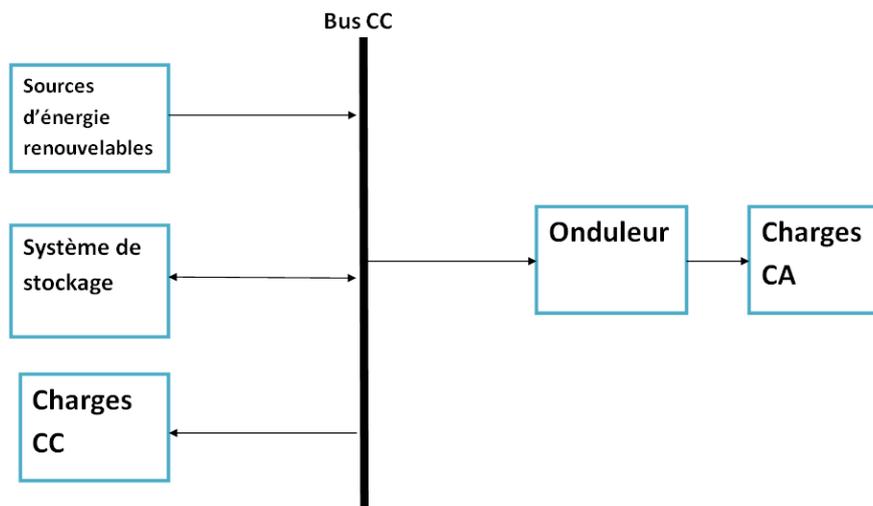


Fig. I.18 : Configuration de SEH à bus CC

✓ *Architecture mixte à bus CC/CA :*

Cette architecture mixte présente des performances supérieures à celles de la configuration à bus CC [8]. En effet dans ce cas l'éolienne peut alimenter directement la charge CA ce qui permet d'augmenter le rendement du système. Le surplus d'énergie peut être stocké dans les batteries (fig. I.19) [8]. Concernant les convertisseurs, un seul bidirectionnel, entre les deux bus CC/CA, peut être utilisé en remplacement des deux autres convertisseurs unidirectionnels.

Chapitre I

Généralités sur le système hybride éolien-photovoltaïque

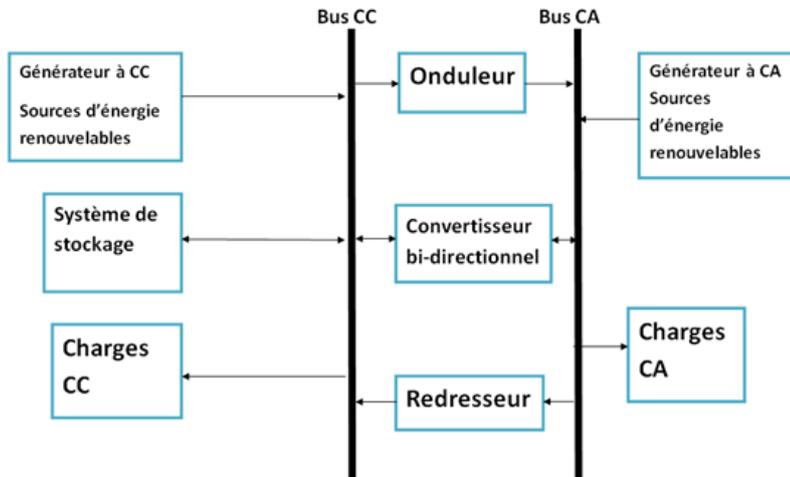


Fig. I.19: Architecture à bus CC/CA d'un système hybride

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les ressources d'énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne. En effet, nous avons exposé les principes de base et les structures générales des systèmes utilisés pour exploiter ces deux sources d'énergie renouvelable. Par la suite, nous avons présenté les systèmes qui assurent l'hybridation de l'éolien et du photovoltaïque qui est le sujet de notre étude. Ici, aussi, nous avons exposés les systèmes hybrides les plus courants : leurs avantages et leurs inconvénients.

Ce chapitre est considéré comme une introduction détaillée de notre travail, afin d'avoir les aspects généraux nécessaires pour pouvoir dans les chapitres qui suivent entamer la modélisation et la commande du système hybride éolienne-photovoltaïque-stockage.

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien-photovoltaïque
--

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

II.1 Introduction

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique. Elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée.

A cet effet, Pour étudier le comportement dynamique du système complet, une modélisation de chaque élément est indispensable. Le système proposé dans cette étude est un système hybride PV/éolien avec batteries de stockage, il est composé essentiellement d'un générateur PV, d'un générateur éolien, des convertisseurs DC/DC et AC/DC et des batteries de stockage. La figure II.1 représente le système hybride à modéliser, dans ce qui suit, nous présentons les modèles mathématiques de chacun des éléments composant ce système.

II.2 Le système hybride

Le schéma bloc de principe :

La configuration du système hybride envisagé est représentée à la figure II.1. La partie photovoltaïque est reliée au bus à courant continu DC à travers un hacheur commandé par une MPPT, tandis que la MADA a ses phases du stator reliées directement au réseau électrique et les phases du rotor sont reliées à travers un convertisseur AC-DC au réseau. Un convertisseur bidirectionnel DC/AC assure le transfert de puissance entre le bus DC principal (U_{dc}) et le bus AC. Un transformateur de liaison est prévu car le bus DC « U_{dc} » opère à basse tension. La tension du bus DC est fixée par un condensateur et une batterie qui assure le stockage du surplus d'énergie et sa fourniture au besoin.

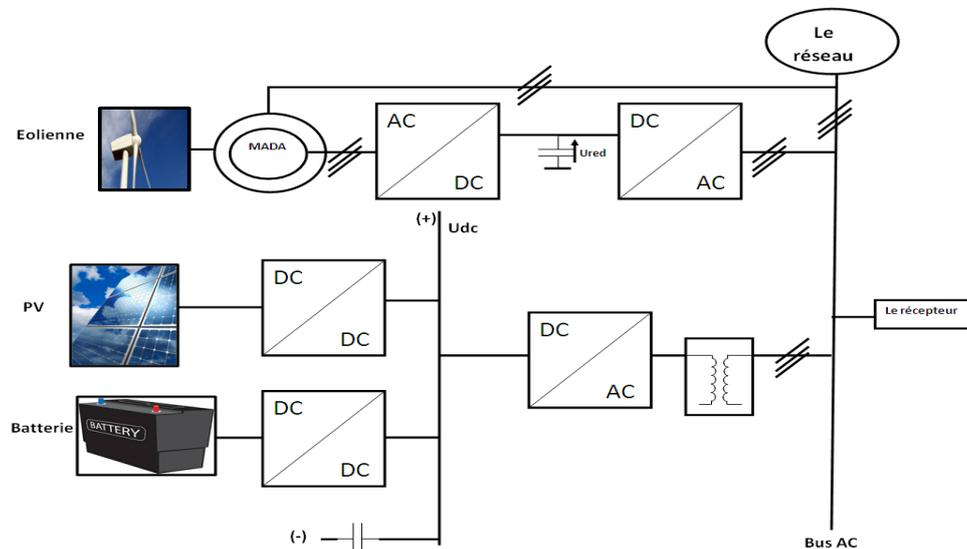


Fig II.1 Schéma bloc de principe pour un système hybride PV-Eolien

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

La puissance nominale installée pour l'éolien est de 4000W et celle maximale que peut produire le panneau photovoltaïque est de 1300W de plus on considère un récepteur consommant une puissance de pointe de 2400W. Ainsi, la puissance théorique que peut fournir le système hybride est supérieure à la puissance consommée donc, le bilan d'énergie est positif.

II.3 Modélisation de la chaîne photovoltaïque

II.3.1 Modèle du générateur photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique. Industriellement, les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium.

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un générateur photovoltaïque [5].

La puissance totale du générateur est égale à la somme des puissances des modules constituant ce dernier [6].

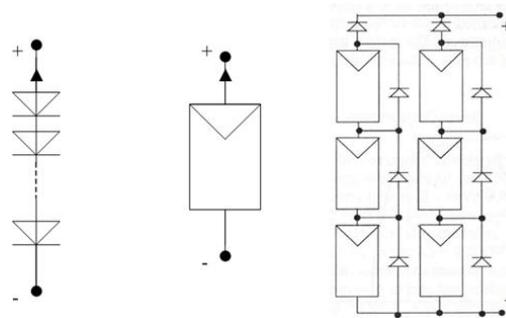


Fig. II.2 : cellules, module et panneau photovoltaïque

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée [5].

Le modèle d'un générateur photovoltaïque se base essentiellement sur le modèle d'une cellule.

- **Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale**

Ce modèle fait intervenir une source de courant qui génère un photo-courant proportionnel à l'ensoleillement (G) liée en parallèle avec une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule [23].

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

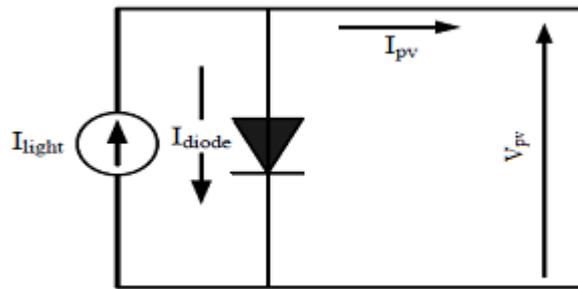


Fig. II.3 Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale

Le courant généré par la cellule est :

$$I_{pv} = I_{light} - I_{diode} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

I_{pv} : Courant fourni par la cellule [A] ;

I_{light} : Photo-courant de la cellule [A] ;

I_{diode} : Courant direct de la diode [A] ;

On approxime le photo-courant par le courant de court-circuit :

$$I_{light} \approx I_{sc} \quad (\text{II.2})$$

D'où, l'équation (II.1) devient :

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv}}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

I_0 : courant de saturation de la diode [A] ;

V_{pv} : tension aux bornes de la cellule [V] ;

$V_T = K \frac{T_c}{q}$: potentiel thermique [V], où K est la constante de Boltzmann ($1,380 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$), T_c est la température de la jonction [$^{\circ}\text{K}$] et q est la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

- **Modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque**

Il y a plusieurs facteurs qui peuvent affecter la réponse de la cellule photovoltaïque :

(a) La résistance série

Une des limitations principales du modèle vient des pertes résistives séries qui sont présentes dans une cellule solaire pratique. En effet, le courant produit au niveau de la cellule solaire se déplace aux contacts par le matériel semi-conducteur résistif.[31]

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

Dans la pratique, les pertes séries sont en général représentées par une résistance R_s appelée la résistance série de la cellule solaire [31].

(b) La résistance shunt

Le passage du courant entre les cellules se fait le long des frontières des cellules en présence des résistances de contacts. Ceci est représenté généralement par une résistance R_{sh} appelée la résistance shunt, en parallèle avec le dispositif [6].

(c) La recombinaison des diodes

La recombinaison des cellules solaires à la région de charge explique les chemins non ohmiques des courants en parallèle à la cellule solaire. Elle peut être représentée dans un circuit équivalent par une deuxième diode avec un courant de saturation I_{02} , qui est différent du courant de saturation de la diode idéale de la cellule solaire. Cette deuxième diode a un coefficient d'idéalité différent de 1, généralement égale à 2 [6].

(d) La non-idéalité des diodes

Dans la pratique, les dispositifs ont une caractéristique I(V) non idéale avec un coefficient d'idéalité différent de l'unité. Pour cette raison, il est courant d'ajouter également le coefficient d'idéalité n (paramètre compris entre 1 et 2) pour exprimer la non idéalité de la diode [6]. En introduisant ces facteurs, le nouveau modèle de la cellule photovoltaïque est représenté par le schéma de la figure II.4 [23]

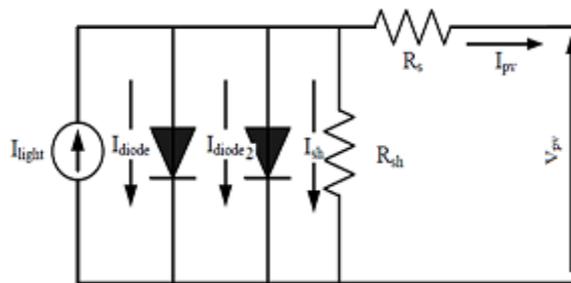


Fig. II.4 Modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

Le modèle du courant généré par la cellule devient :

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V_{pv} + IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + IR_s}{R_{sh}} \quad (II.4)$$

-le terme $\frac{V_{pv} + IR_s}{R_{sh}}$ peut être négligée, puisque habituellement la résistance shunt est très grande devant la résistance série ($R_s \gg R_{sh}$) et devant le terme ($V_{pv} + IR_s$)

-Le courant direct de la deuxième diode est très faible par rapport au courant direct de la diode de la cellule solaire ($I_{02} \ll I_0$)

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

Après ces simplifications, le modèle du courant produit par une cellule est exprimé par:

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + I R_s}{n V_T}} - 1 \right) \quad (II.5)$$

La caractéristique courant-tension $I(V)$ et celle puissance-tension $P(V)$ du modèle de la cellule photovoltaïque sont représentées à la figure II.5.

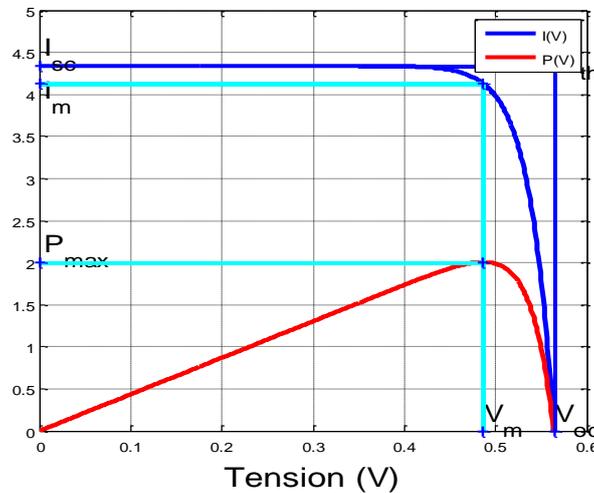


Fig. II.5 Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ de la cellule photovoltaïque

De cette figure, nous pouvons tirer les grandeurs importantes suivantes :

-la tension à vide V_{oc} correspond à $I=0$ aussi, l'équation (II.5) devient :

$$0 = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{n V_T}} - 1 \right) \quad (II.6)$$

De la relation (II.6), on déduit l'expression suivante de V_{oc} :

$$V_{oc} = n V_T \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (II.7)$$

– Le courant de court-circuit I_{sc} correspond à $V=0$, la valeur de cette grandeur est fournie par les fabricants des panneaux solaires.

– Le courant I_m correspond au courant du point de puissance maximale (MPP), en ce point la relation (II.5) donne :

$$I_m = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V_m + I_m R_s}{n V_T}} - 1 \right) \quad (II.8)$$

Où la tension V_m est relative à la tension du point de puissance maximale (MPP), dont l'expression peut être tirée de l'équation (II.8) :

$$V_{oc} = n V_T \ln \left(1 + \frac{I_{sc} - I_m}{I_0} \right) - R_s I_m \quad (II.9)$$

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

Remarques

- Les grandeurs : I_{sc} , V_{0c} et $P_m(I_m; V_m)$ sont fournies par les constructeurs de panneaux solaires.
- Les paramètres utilisés pour la simulation du modèle de la cellule photovoltaïque sont mentionnés dans l'annexe(2).
- **Influence de la température et de l'ensoleillement**

(a) La température

La température de la cellule T_c influence les grandeurs V_T , I_0 , et I_{sc} de la manière suivante [23] :

$$V_T = \frac{kT_c}{q} \quad (\text{II.10})$$

$$I_{sc} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{sc,ref} + \mu_{I_{sc}} (T_c - T_{c,ref})) \quad (\text{II.11})$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \exp\left(\frac{E_g}{nV_T} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} - 1 \right) \right) \quad (\text{II.12})$$

Où :

$\mu_{I_{sc}}$ est le coefficient de température du courant de court-circuit [$A/^\circ K$]

$E_g[V]$ est la bande énergétique du gap du semi-conducteur [V], elle est formulée par :

$$E_g = 1.16 - 7.02 * 10^{-4} \left(\frac{T^2}{T-1108} \right) \quad (\text{II.13})$$

Comme les grandeurs V_T , I_0 , et I_{sc} sont influencées par la température, lesquelles influencent selon (II.5) les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule. L'évolution des caractéristiques I(V) et P(V) pour différentes valeurs de la température sont représentées respectivement à la figure II.6 et II.7.

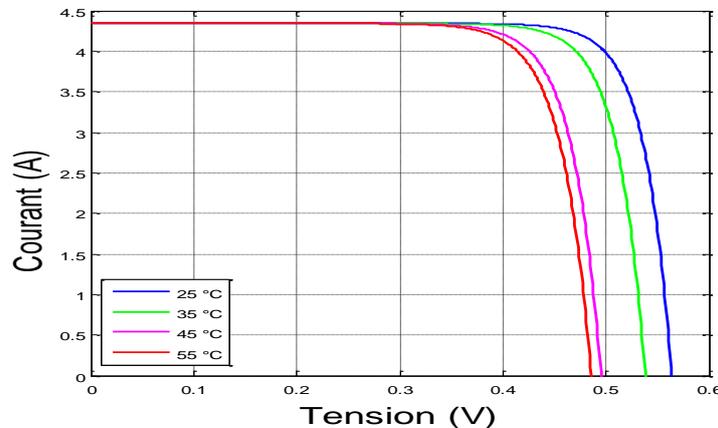


Fig. II.6 Influence de la température sur la caractéristique I(V)

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

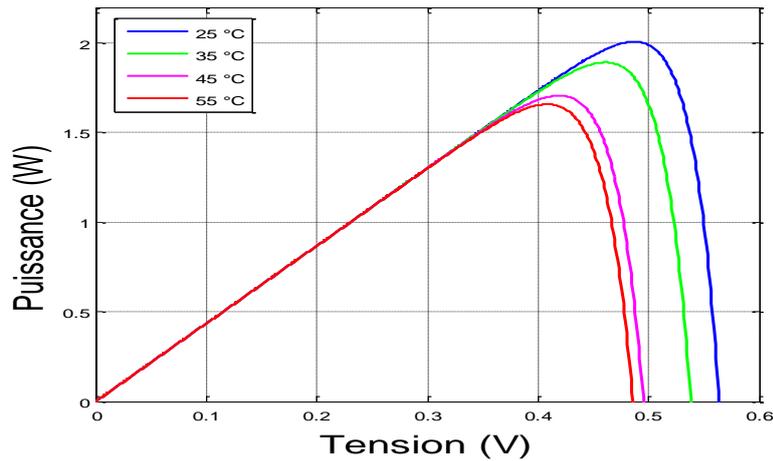


Fig. II.7 Influence de la température sur la caractéristique P(V)

D'après ces figures et en ne variant que la température, il apparaît qu'une cellule produit moins d'énergie lorsqu'elle chauffe.

(b) L'enseillement

L'enseillement G se répercute sur le courant I_{sc} à travers l'équation suivante [23] :

$$I_{sc} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{sc,ref} + \mu I_{sc} (T_c - T_{c,ref})) \quad (\text{II.14})$$

L'effet de la variation de l'enseillement G , sur les caractéristiques I(V) et P(V), est représenté à la figure (II.8)

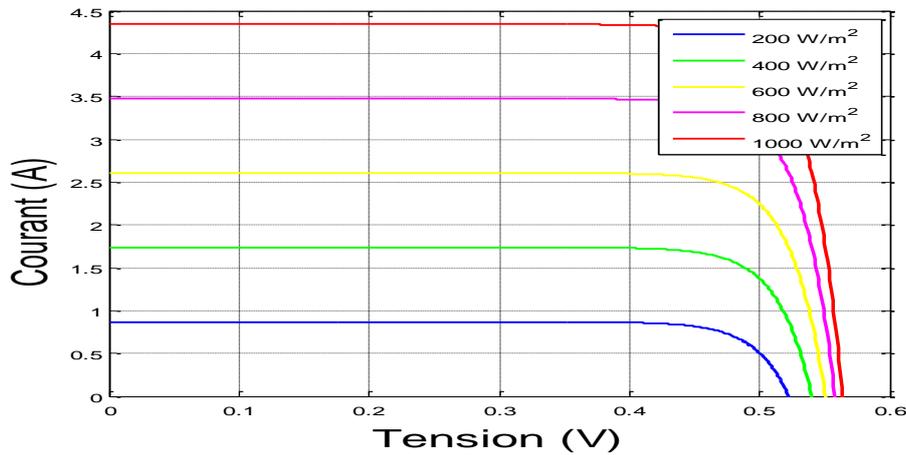


Fig. II.8 Influence de l'enseillement sur la caractéristique I(V)

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

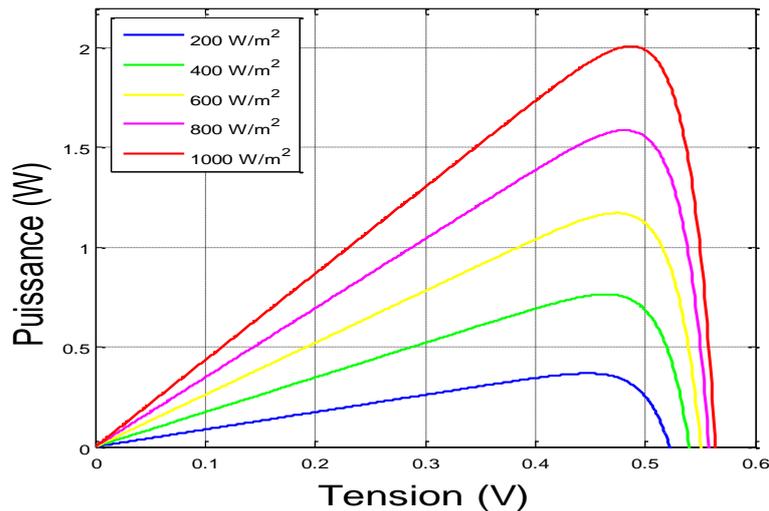


Fig. II.9 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P(V)

D'après ces figures, nous remarquons que l'affaiblissement de l'ensoleillement diminue fortement le courant du court-circuit I_{sc} .

II.3.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

Les résultats précédents des caractéristiques I(V) et P(V) montrent clairement que la puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules pour disposer d'une puissance exploitable. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelques Watts crête et quelques dizaines de Watts crête (1 m^2 de cellules photovoltaïques produit de l'ordre de 100W) [23].

Un générateur photovoltaïque est alors constitué par N_p cellules mises en parallèle et N_s cellules mises en série il est donc caractérisé par les grandeurs suivantes :

$$\begin{cases} I_{sc}^G = N_p I_{sc}^C \\ V_{oc}^G = N_s V_{oc}^C \\ R_s^G = \frac{N_s}{N_p} R_s^C \\ I^G = N_p I^C \\ V^G = N_s V^C \end{cases} \quad (II.15)$$

Où l'exposant C est relatif aux grandeurs d'une cellule et l'exposant G est relatif à celles d'un générateur photovoltaïque.

Les caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur, constitué de $(N_s * N_p) = (36 * 1)$ cellules identiques à celle simulée précédemment, sont telles que représentées aux figures II.10) & II.11.

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

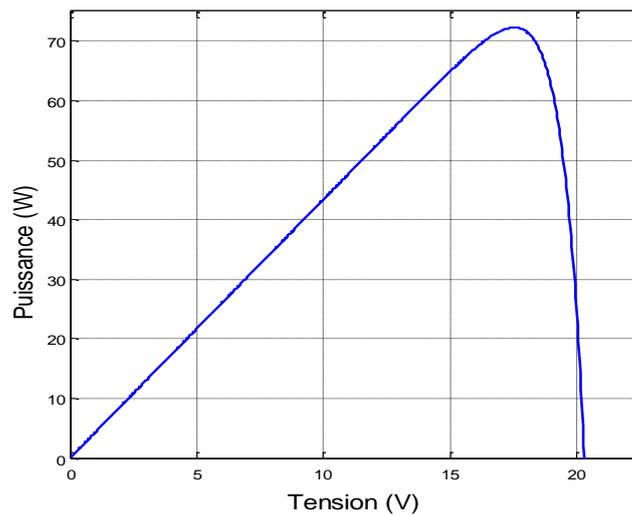


Fig. II.10 Caractéristique P(V) d'un panneau photovoltaïque

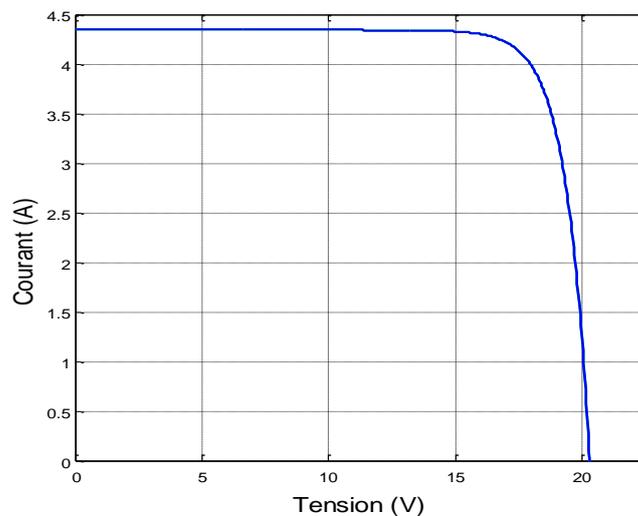


Fig. II.11 Caractéristique I(V) d'un panneau photovoltaïque

La puissance maximale que peut fournir ce panneau est de l'ordre de 72.5 W, aussi cette puissance délivrée a été ramenée à un niveau tel qu'elle peut être maintenant exploitée pour certaines charges.

II.3.3 Modèle du convertisseur statique DC-DC

Pour exploiter l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque, on relie ce dernier à la charge à travers un convertisseur[6].

- **Connexion du générateur PV au Bus DC à travers un hacheur Boost.**

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique la plus usuelle consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge. Cet étage est représenté dans notre cas par un hacheur Boost. Le choix d'un hacheur boost se justifie par le fait que lors de l'exploitation du PV, sa tension reste toujours inférieure à celle du bus DC auquel il devrait être connecté. Son schéma de principe est représenté par la figure II.12.

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

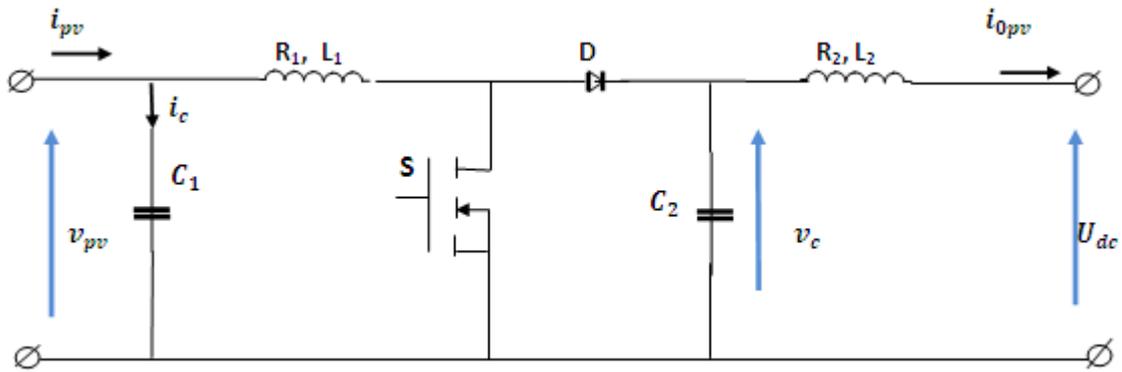


Fig. II.12 Schéma de principe d'un hacheur Boost

L'élément de commande (transistor, thyristor, MOSFET, IGBT...etc.) est représenté par un interrupteur S dans le schéma pour ne pas préjuger sa nature.

- Dans l'état passant, $t \in [0, t_f]$: l'interrupteur S est fermé, la diode est ouverte, le circuit équivalent est montré sur la figure suivante :

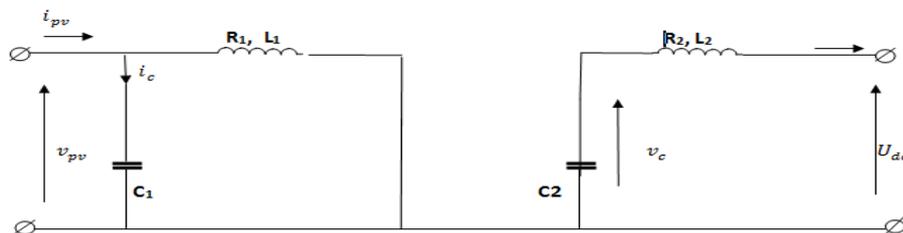


Fig. II.13 : Circuit équivalent d'un hacheur Boost lorsque S est fermé

En appliquant la loi de Kirchoff à ce circuit on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_L}{dt} = v_{pv} - R_1 i_L \\ C \frac{dv_c}{dt} = -i_0 \\ L_2 \frac{di_0}{dt} = v_c - U_{dc} - R_2 i_0 \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

- Dans l'état bloqué, $t \in [t_f, T_d]$: l'interrupteur S est ouvert, la diode est fermée le circuit équivalent devient

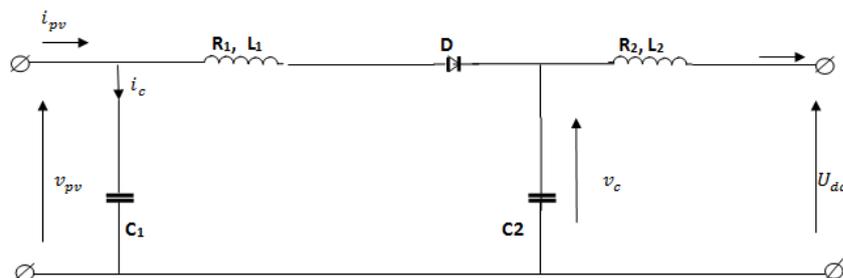


Fig. II.14 : Circuit équivalent d'un hacheur Boost lorsque S est ouvert

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

Le modèle d'équations pour cette configuration est comme suit :

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_L}{dt} = v_{pv} - R_1 i_L - v_c \\ C \frac{dv_c}{dt} = i_L - i_0 \\ L_2 \frac{di_0}{dt} = v_c - U_{dc} - R_2 i_0 \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Les systèmes d'équations de base (II.16), (II.17) représentent le convertisseur Boost pour αT_d et $(1 - \alpha) T_d$ respectivement, le convertisseur commute entre ces deux états à une fréquence élevée.

La dynamique valable pour les deux intervalles de temps est représentée par le système continu d'équations suivant :

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_L}{dt} = \alpha(v_{pv} - R_1 i_L) + (1 - \alpha)(v_{pv} - R_1 i_L - v_c) \\ C \frac{dv_c}{dt} = -\alpha i_0 + (1 - \alpha)(i_L - i_0) \\ L_2 \frac{di_0}{dt} = \alpha(v_c - U_{dc} - R_2 i_0) + (1 - \alpha)(v_c - U_{dc} - R_2 i_0) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Le régime statique est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations (II.18) se réduit alors à :

$$\begin{aligned} (V_{pv} - R_1 I_{pv}) &= (1 - \alpha) V_c \\ I_0 &= (1 - \alpha) I_L \\ V_c &= U_{dc} - R_2 I_0 \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

En négligeant les résistances R_1 et R_2 on obtient

$$\begin{cases} V_{pv} = (1 - \alpha) V_c \\ I_0 = (1 - \alpha) I_L \\ V_c = U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

D'où

$$\begin{cases} V_{pv} = (1 - \alpha) U_{dc} \\ I_0 = (1 - \alpha) I_L \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Pour le condensateur d'entrée :

$$\begin{cases} i_c(t) = i_{pv}(t) - i_L(t) \\ v_{pv}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

II. 4 Modélisation de la chaîne éolienne

II.4.1 Partie Puissance Electrique

Dans cette partie, nous allons développer le modèle de la MADA, le modèle de l'un des convertisseurs de l'électronique de puissance (l'autre est identique), le modèle de la source d'alimentation et celui du bus continu.

II.4.1.1 Modèle de la MADA

Le système d'équations qui représentent la MADA dans le repère (d, q) tournant à une vitesse arbitraire ω_a est donné par [1](annexe 1):

$$\begin{cases} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_a \psi_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_a \psi_{ds} \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} &= -R_r i_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \psi_{qr} + v_{dr} \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} &= -R_r i_{qr} + (\omega_a - \omega_m) \psi_{dr} + v_{qr} \\ \frac{J}{p} \frac{d\omega_m}{dt} &= C_e - k_f \omega - C_r \text{ et } C_e = p(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Les grandeurs (i_{ds}, i_{qs}) et (i_{dr}, i_{qr}) désignent respectivement les composantes (d, q) des courants du stator et du rotor. De même, (ψ_{ds}, ψ_{qs}) et (ψ_{dr}, ψ_{qr}) sont respectivement les composantes (d, q) du flux statorique et du flux rotorique. Enfin la tension du stator est représentée par les composantes (v_{ds}, v_{qs}) .

De plus, les composantes (d,q) du flux statorique (ψ_{ds}, ψ_{qs}) et du flux rotorique (ψ_{dr}, ψ_{qr}) sont liées aux courants par :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Les inductances L_s , L_r et M représentent chacune respectivement l'inductance propre cyclique du stator, celle du rotor et l'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor. Ces inductances sont liées aux inductances physiques de la machine par :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ M = 3M_{sr} / 2 \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Où l_s , l_r , M_s , M_r et M_{sr} représente respectivement l'inductance propre des phases du stator, l'inductance propre des phases du rotor, l'inductance mutuelle entre phases du stator, l'inductance mutuelle entre phases du rotor, l'amplitude de la mutuelle inductance entre phase du stator et du rotor (appelée aussi, inductance du champ principal).

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

En choisissant le vecteur d'état $x^T = [i_{ds} \ i_{qs} \ \psi_{ds} \ \psi_{qs} \ \omega_m]^T$, le système d'équations (II.23) est mis sous le model d'état suivant (voir annexe 01)

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 x_1 + (\omega_a - \omega_m) x_2 + a_2 x_3 + a_3 x_4 x_5 + a_3 v_{ds} - a_4 v_{dr} \\ \dot{x}_2 = -(\omega_a - \omega_m) x_1 - a_1 x_2 + a_3 x_3 x_5 + a_2 x_4 + a_3 v_{ds} - a_4 v_{qr} \\ \dot{x}_3 = -b_1 x_1 + \omega_a x_4 + v_{ds} \\ \dot{x}_4 = -b_1 x_2 - \omega_a x_3 + v_{qs} \\ \dot{x}_5 = c_1 (x_3 x_2 - x_4 x_1) - c_2 x_5 + c_3 C_{tur} \end{cases} \quad (II.26)$$

Où les coefficients du système sont tels que :

$$a_1 = \frac{R_s + R_r}{\sigma L_s L_r}; a_2 = \frac{R_r}{\sigma L_s L_r}; a_3 = \frac{1}{\sigma L_s}; a_4 = \frac{M}{\sigma L_s L_r}; b_1 = R_s; c_1 = \frac{p^2}{J}; c_2 = \frac{K_f}{J}; c_3 = \frac{P}{J}$$

Choix du référentiel

Pour simplifier d'avantage ce modèle, nous avons choisi de travailler dans le référentiel lié au vecteur tension statorique, comme montré à la figure (II.15).

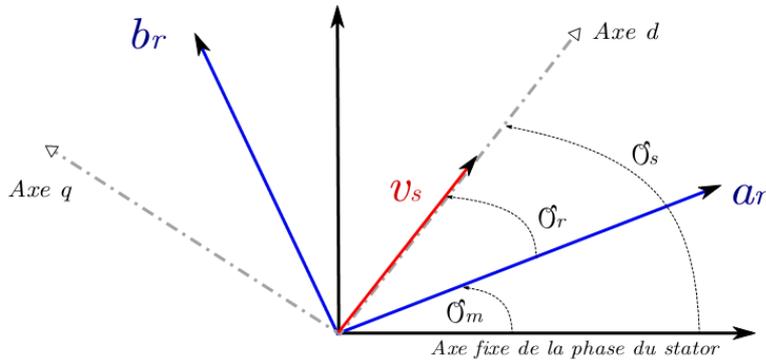


Fig.II.15 Orientation de la tension statorique sur l'axe d

En prenant en considération l'hypothèse de l'orientation du repère suivant le vecteur de la tension statorique, nous pourrions déduire les relations suivantes:

$$\begin{cases} v_{ds} = v_s \\ v_{qs} = 0 \end{cases} \quad (II.27)$$

Les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone, dans le repère (d, q) s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (II.28)$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et donc en tenant compte de la condition (II.27), il en résulte que :

$$\begin{cases} P_s = v_s i_{ds} \\ Q_s = -v_s i_{qs} \end{cases} \quad (II.29)$$

La MADA est connectée au réseau à travers deux convertisseurs à deux niveaux mis en cascade assurant la conversion AC-DC-AC. Ces deux convertisseurs sont le convertisseur coté machine

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

(CCM) et le convertisseur coté réseau (CCR). Ces convertisseurs sont dimensionnés dans notre cas pour le tiers de la puissance nominale qui est dans notre cas de l'ordre de 4 kW.

II.4.1.2 Modèle des convertisseurs

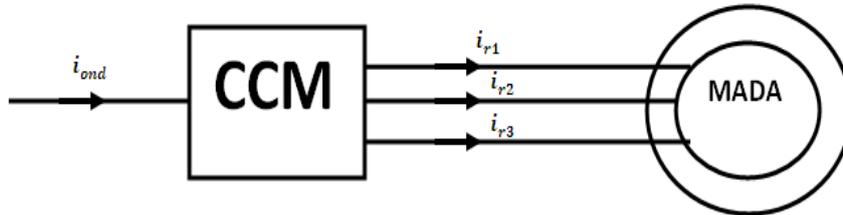


Fig. II.16 Convertisseur coté machine

Le CCM permet de commander les tensions d'alimentation des enroulements du rotor à une amplitude et une fréquence désirées. Cette tension peut s'écrire sous la forme [1]:

$$V_r = \frac{2}{3} (v_{r1}(t) + v_{r2}(t)e^{j2\pi/3} + v_{r3}(t)e^{-j2\pi/3}) \quad (\text{II.30})$$

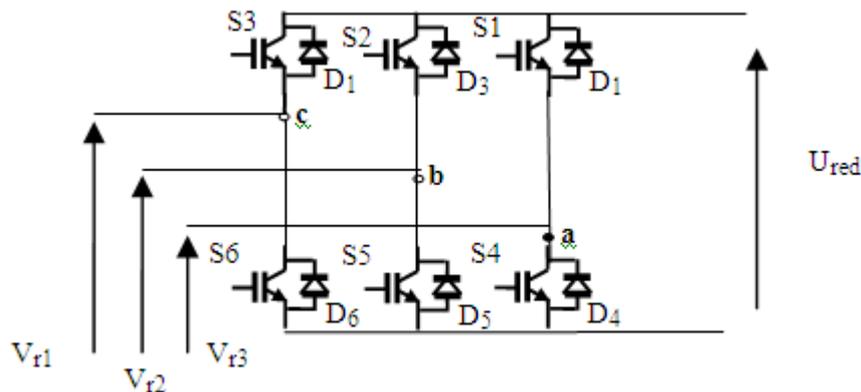


Fig . II.17 Schéma d'un onduleur de tension à deux niveaux

Ou encore :

$$V = v_{r1}(t) + j \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{r2}(t) - v_{r3}(t)) \quad (\text{II.31})$$

Nous pouvons exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étage continu U_{red} et de l'état des commutateurs. Nous définissons pour cela les variables S_{M1} , S_{M2} et S_{M3} en fonction de l'état des commutations dans les trois branches.

Soit S_{M1} , S_{M2} et S_{M3} l'état des commutateurs des trois bras du convertisseur :

Branche 1 :

$$\begin{cases} S_{M1} = 0 & \text{Si S1 Off et S4 On} \\ S_{M1} = 1 & \text{Si S1 On et S4 Off} \end{cases}$$

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

Branche 2 :

$$\begin{cases} S_{M2} = 0 \text{ Si } S2 \text{ Off et } S5 \text{ On} \\ S_{M2} = 1 \text{ Si } S2 \text{ On et } S5 \text{ Off} \end{cases}$$

Branche 3 :

$$\begin{cases} S_{M3} = 0 \text{ Si } S3 \text{ Off et } S6 \text{ On} \\ S_{M3} = 1 \text{ Si } S3 \text{ On et } S6 \text{ Off} \end{cases}$$

A la sortie du convertisseur, nous avons les tensions composées qui sont exprimées en fonction des états des interrupteurs et de la tension continue, elles sont données par la relation:

$$\begin{cases} u_{ab} = U_{red} (S_{M1} - S_{M2}) \\ u_{bc} = U_{red} (S_{M2} - S_{M3}) \\ u_{ca} = U_{red} (S_{M3} - S_{M1}) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Si nous considérons que les tensions sont équilibrées, alors nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} v_{r1} = \frac{1}{3} (u_{ab} - u_{ca}) \\ v_{r2} = \frac{1}{3} (u_{bc} - u_{ab}) \\ v_{r3} = \frac{1}{3} (u_{ca} - u_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

En remplaçant (II.32) dans l'expression (II.33) nous obtenons :

$$\begin{cases} v_{r1} = \frac{U_{red}}{3} (2 S_{M1} - S_{M2} - S_{M3}) \\ v_{r2} = \frac{U_{red}}{3} (-S_{M1} + 2 S_{M2} - S_{M3}) \\ v_{r3} = \frac{U_{red}}{3} (-S_{M1} - S_{M2} + 2 S_{M3}) \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Sous forme matricielle, le système (II.34) devient :

$$\begin{bmatrix} v_{r1} \\ v_{r2} \\ v_{r3} \end{bmatrix} = \frac{U_{red}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{M1} \\ S_{M2} \\ S_{M3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Le courant continu i_{ond} d'entrée de l'onduleur est obtenu par :

$$i_{ond} = [S_{M1} \quad S_{M2} \quad S_{M3}] \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

De même pour le convertisseur coté réseau

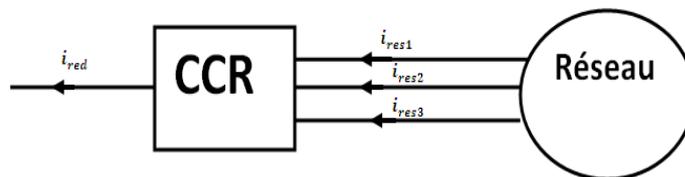


Fig. II.18 : Le convertisseur coté réseau

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

Comme les deux convertisseurs ont la même structure, par conséquent, la modélisation du CCR sera une adaptation de la modélisation du CCM

$$i_{red} = [S_{R1} \ S_{R2} \ S_{R3}] \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} \quad (II.37)$$

II.4.1.3 Modèle du bus continu

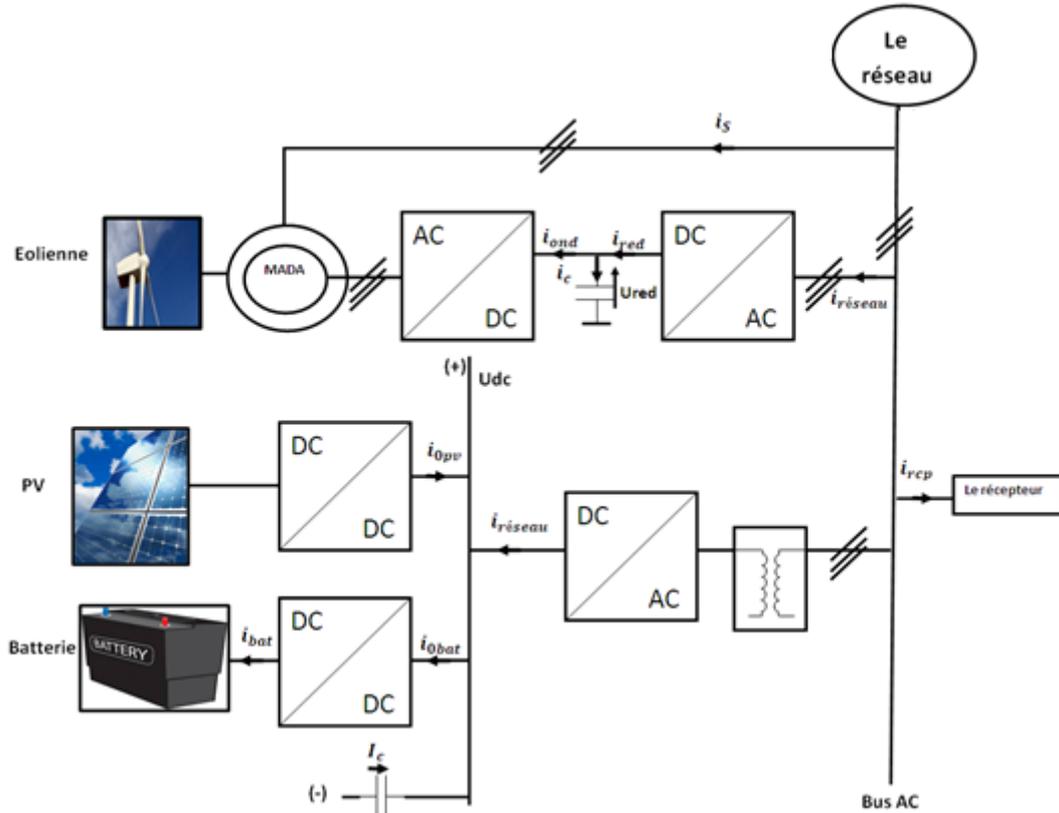


Fig. II.19 : Représentation du bus continu

De la figure II.19 où sont représentés les courants (dans leur sens positif) circulant dans le bus continu, il vient :

$$i_{0pv} - i_{0bat} + i_{réseau} + i_c = 0 \quad (II.38)$$

Donc :

$$i_c = -i_{réseau} - i_{0pv} + i_{0bat}$$

La tension U_{dc} aux bornes du condensateur du bus continu est donnée par :

$$U_{dc} = \frac{1}{c} \int_0^t i_c dt \quad (II.39)$$

Où les grandeurs i_c , i_{0pv} , i_{0bat} et $i_{réseau}$ représente respectivement le courant du condensateur, le courant délivré par le panneau photovoltaïque, le courant à l'entrée du hacheur régulateur de charge de la batterie et le courant continu à la sortie du redresseur à MLI.

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

La tension u_{red} est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{d u_{red}}{dt} = \frac{i_{red} - i_{ond}}{C_f} \quad (II.40)$$

Où :

- ✓ I_{ond} : représente le courant à l'entrée du convertisseur CCM
- ✓ I_{red} : représente le courant à la sortie du convertisseur CCR

II.4.2 Partie mécanique

II.4.2.1 Modèle de la turbine

La figure II.20 montre les principaux constituants d'une turbine éolienne [1].

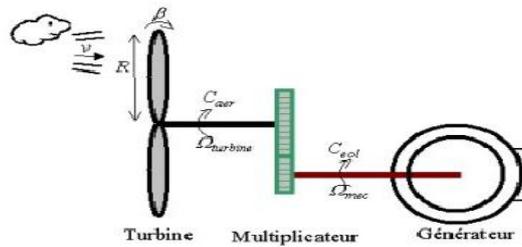


Fig. II.20 : Schéma de principe de la turbine éolienne

Suivant les travaux de Betz, un vent soufflant à une vitesse Vv présente au niveau de la surface S balayée par les pâles une puissance donnée par :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V v^3 \quad (II.41)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air [1.225 kg/m^3] ;

Comme la puissance du vent P_{vent} n'est pas totalement captée par les pales aussi, la puissance aérodynamique $Paero$, apparaissant au niveau du rotor de la turbine, est inférieure à celle du vent. Ces deux puissances sont liées par le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ comme suit :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) P_{vent} \quad (II.42)$$

Le coefficient de puissance correspond au rendement aérodynamique de la turbine, il diffère pour chaque éolienne et dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et du rapport de vitesse λ .

En remplaçant dans (II.41) P_{vent} par son expression (II.42), la puissance aérodynamique est exprimée par :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S V v^3 \quad (II.43)$$

$$= \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R_t^2 V v^3 \quad (II.44)$$

Où R_t représente le rayon de la turbine ou la longueur d'une pale [m] ;

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

Pour les éoliennes dont la puissance nominale et les caractéristiques sont semblables à la nôtre, la caractéristique du $C_p(\lambda, \beta)$ est donnée par la relation [10]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\lambda_1} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_1 + \lambda c_6}} \quad (\text{II.45})$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} + \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (\text{II.46})$$

Où les coefficients c_1, \dots, c_6 sont tels que :

$$\begin{aligned} c_1 &= 0.5176 & c_2 &= 116 & c_3 &= 0.4 \\ c_4 &= 5 & c_5 &= 21 & c_6 &= 0.0068 \end{aligned}$$

Le rapport de vitesse λ est défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{v} \quad (\text{II.47})$$

Où Ω_t représente la vitesse de rotation de la turbine [rad/s].

Une classification des éoliennes, par rapport au coefficient λ , permet de distinguer les éoliennes lentes pour $\lambda < 3$ et les éoliennes rapides pour $\lambda \geq 3$.

La figure II.21 représente la variation du coefficient de puissance C_p en fonction du rapport de vitesse λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β . Cette caractéristique en forme de cloche, nous montre qu'il existe un point où l'éolienne peut être exploitée dans les conditions optimales (à puissance maximale). Ainsi faire fonctionner l'éolienne autour de ce point permet de prélever la puissance maximale afin de garantir un facteur de puissance optimal.

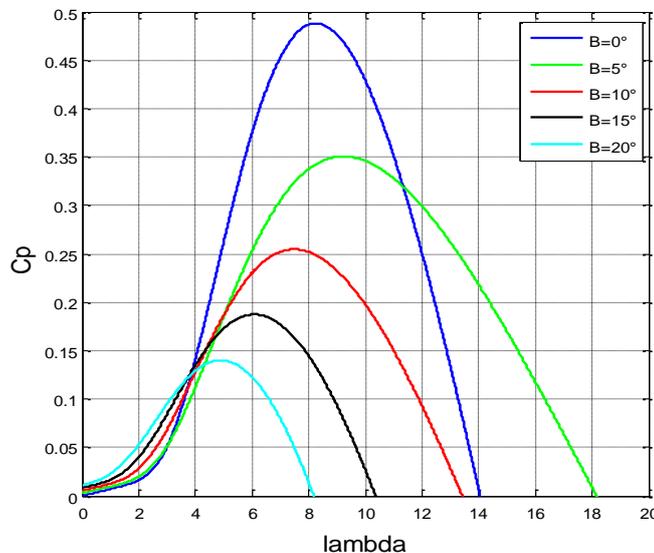


Fig. II.21 Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

Nous relevons $\begin{cases} \lambda_{opt} = 8.27 \\ C_{p_{opt}} = 0.4879 \end{cases}$

La puissance peut s'écrire aussi en fonction du couple aérodynamique $Caer$ disponible sur l'arbre de la turbine (arbre relié à la turbine) :

$$Paer = \Omega_t Caer \quad (II.48)$$

En exploitant la relation (II.42) et (II.48) on obtient l'expression de $Caer$:

$$Caer = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda, \beta) \rho S V v^3 \quad (II.49)$$

En remplaçant S par πR^2 , l'expression du couple prend la forme suivante :

$$Caer = \frac{1}{2\Omega_t} \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R_t^2 V v^3 \quad (II.50)$$

La Figure II.22 donne une information sur la puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur, pour différentes vitesses du vent. Nous remarquons que si l'éolienne fonctionne à vitesse fixe les valeurs maximales théoriques des courbes de la puissance ne seront pas exploitées. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse du vent, l'éolienne devra fonctionner à vitesse de rotation variable [13].

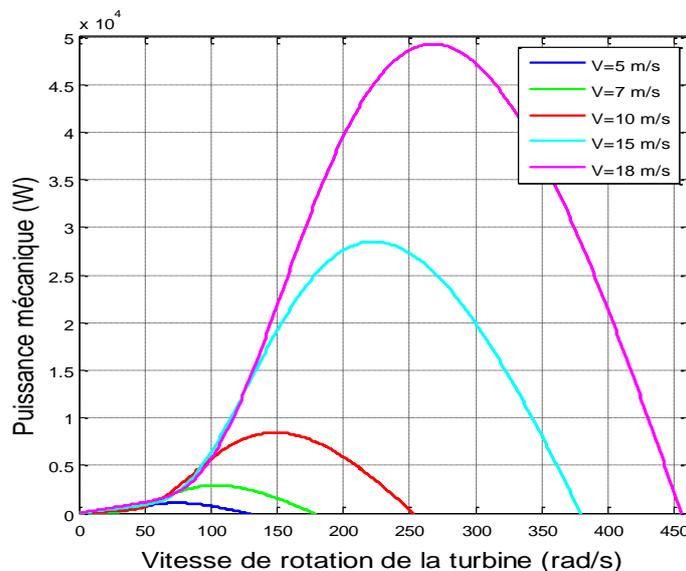


Fig. II.22 : la puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse de rotation

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

II.4.2.2 Modèle de l'arbre

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.51)$$

Ce couple mécanique est représenté par le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{vis} + C_{em} \quad (II.52)$$

Où:

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (II.53)$$

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.54)$$

Le paramètre G représente le gain du multiplicateur de vitesse qui est un organe mécanique adaptant la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice liée à l'arbre rapide

II.5. Modélisation du système de stockage électrique

- **L'accumulateur**

L'accumulateur est un dispositif physique qui transforme l'énergie chimique stockée en une énergie électrique par le biais d'une réaction chimique appelée oxydoréduction [2]. Dans ce type de réactions les électrons se déplacent d'un matériau à un autre à travers un circuit électrique simple. Une batterie accumulateurs peut être composée d'un ou plusieurs éléments appelés cellule électrochimique.

- **La cellule électrochimique**

Une cellule électrochimique est l'élément de base de la batterie d'accumulateurs. Elle est constituée des éléments suivants : deux électrodes, un électrolyte et un séparateur.

- **Caractéristiques d'une cellule électrochimique**

La tension nominale

La tension nominale, est fixée par le potentiel de la réaction chimique de chaque élément du couple d'oxydoréduction utilisé[2].

La tension à vide

C'est la tension mesurée sans charge et elle est presque égale à la tension théorique quand l'accumulateur est complètement chargé [2].

Tension de fin de décharge

A cette tension, l'accumulateur est considéré comme étant déchargé. Généralement, on ne doit pas descendre en dessous de cette tension pour éviter la détérioration de l'accumulateur[2].

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

La résistance interne

L'impédance interne de l'accumulateur est reliée à l'ensemble des éléments qui constituent l'accumulateur, elle comprend alors :

- la résistance de l'électrolyte.
- la résistance des matériaux actifs de chaque électrode.
- la résistance de contact entre les électrodes et les cellules.

Capacité d'une batterie d'accumulateurs

La capacité représente la quantité maximale d'électricité qu'elle peut fournir. Comme le courant est le nombre d'électrons par unité de temps, la capacité d'une cellule est l'intégral du courant $I_b(t)$ fournie par la batterie.

La capacité est mesurée en ampères-heures (Ah) et elle est exprimée par l'équation suivante

$$Q = \int_{t_0}^t I_b(t) dt$$

D'une part la capacité est généralement fonction des matériaux actifs qui constituent la batterie et d'autre part, elle est proportionnelle au volume de la batterie.

Le taux C

Le courant de charge ou de décharge de la batterie d'accumulateurs est mesuré à un taux noté « C ». C'est-à-dire, une batterie d'accumulateurs de capacité 1 Ah peut fournir un courant de 1 A pendant une heure de décharge à un taux 1 C. La même batterie d'accumulateurs déchargée à un taux de 0,5 C fournira un courant de 0.5 A pour deux heures.

Effet mémoire :

L'effet mémoire se définit comme étant la perte de capacité après un certain nombre de cycles de charge et décharge. En réalité, pour remédier à ce problème, il faut décharger la batterie d'accumulateurs complètement avant de la recharger

L'énergie

L'énergie chimique dégagée pendant le processus de décharge est transformée en énergie électrique. Elle dépend de la tension et de la charge stockée. L'unité de mesure est généralement exprimée en joule ou en wattheure (Wh) et elle est définie par l'équation suivante :

$$E = \int_{t_0}^t V_t(t) I_b(t) dt$$

$V_t(t)$ Représente la tension terminale aux bornes de l'accumulateur et $I_b(t)$ le courant de l'accumulateur.

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

- **Types d'accumulateurs**

Parmi les accumulateurs les plus utilisées on peut citer les suivants :

- Accumulateur au plomb (Pb).
- Accumulateur au nickel cadmium (Ni-Cd).
- Accumulateur aux hydrures métalliques de nickel (NiMH).
- Accumulateur aux ions de lithium (Li-ion).

- **Comparaison entre les quatre types d'accumulateurs**

Caractéristiques	Type d'accumulateurs			
	Plomb-acide	Nickel-cadmium	Lithium-ion	Lithium-polymère
Densité d'énergie massique (Wh.kg ⁻¹)	30	50- 45	80-150	190-150
Densité d'énergie (Wh.L ⁻¹)	75	120 80	150 220	330 220
Puissance en pointe (Wh.kg ⁻¹)	Jusqu'à 700	-	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
Température de fonctionnement (°C)	De 20 à 60	De 40 à 60	De 20 à 60	De 0 à 60
Tension nominale d'un élément (V)	2	1,2	3,6	3,7
Auto-décharge par mois (%)	5	20	10	10
Nombre de cycle (charge/décharge)	De 400 à 600 (pour les étanches) 1200 (pour les tubulaires)	2000	De 500 à 1000	De 200 à 300
Domaines d'applications	Stationnaire (secours, télécom,...)	Transport (démarrage, traction,...)	Portable (téléphonie, ordinateurs,...)	-
Avantages	Faible coût	Fiabilité, performantes à froid	Excellente énergie et puissance	Très mince
Inconvénients	Faible énergie, mort subite	Relativement basse énergie, toxicité	Sécurité des gros éléments et le coût	Performances à froid et le coût
Coût (€.kWh ⁻¹)	De 200 à 250 (pour les étanches)	600	2000	De 1500 à 2000

Tableau II.1 : tableau comparatif entre les différents types d'accumulateurs[2]

Nous choisissons de travailler avec l'accumulateur au plomb(Pb) qui fait parti des types d'accumulateurs les plus utilisés pour les systèmes à énergies renouvelables, vu sa résistance interne très faible de plus, ce type de batterie d'accumulateurs a une bonne performance à température ambiante et une faible auto décharge.

Pour utiliser un accumulateur ou une batterie d'accumulateurs avec efficacité, il est bien nécessaire de comprendre le fonctionnement de l'accumulateur, sa dynamique et de connaître les paramètres qui peuvent affecter sa performance. Un bon usage de ces types d'accumulateurs est de réussir à maintenir leur durée d'utilisation le plus longtemps possible et d'optimiser l'utilisation de leur énergie. Pour

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

pouvoir comprendre le fonctionnement des accumulateurs, il est nécessaire de développer un modèle capable de simuler leur comportement.

Dans la majorité des systèmes faisant intervenir un système de stockage d'énergie, on trouve un système de gestion de l'énergie associé à la batterie d'accumulateurs et ceci pour assurer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie fournie par la batterie. L'un des paramètres ou facteurs de ce système de gestion est l'état de charge de la batterie, une information très importante pour gérer cette énergie. D'où le double intérêt de :

- La proposition d'un modèle de batterie.
- La proposition d'un estimateur de l'état de charge de la batterie.

II.5.1 Modèle d'accumulateur

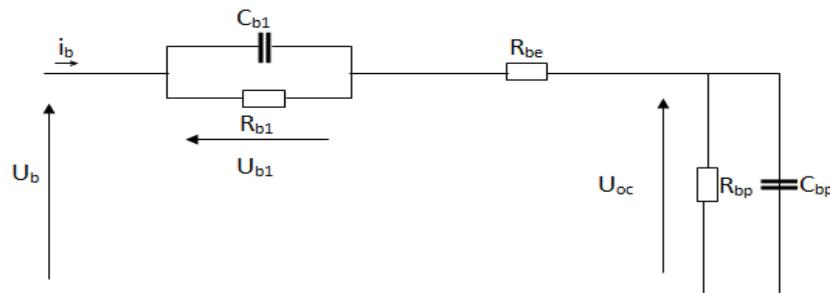


Fig. II.23 : Modèle équivalent de la batterie au plomb

Ce modèle inclut les composants équivalents pour toutes les caractéristiques de fonctionnement principales d'une batterie plomb-acide [20] :

$$\begin{cases} i_b = \frac{U_{b1}}{R_{b1}} + C_{b1} \frac{dU_{b1}}{dt} \\ \frac{dU_{b1}}{dt} = -\frac{U_{b1}}{R_{b1}C_{b1}} + \frac{i_b}{C_{b1}} \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

On pose : $\tau_b = R_{b1}C_{b1}$

$$\frac{dU_{b1}}{dt} = -\frac{U_{b1}}{\tau_b} + \frac{i_b}{C_{b1}} \quad (\text{II.56})$$

$$\begin{cases} i_b = \frac{U_{oc}}{R_{bp}} + C_{bp} \frac{dU_{oc}}{dt} \\ \frac{dU_{oc}}{dt} = -\frac{U_{oc}}{R_{bp}C_{bp}} + \frac{i_b}{C_{bp}} \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

On pose : $\tau_p = R_{bp}C_{bp}$

$$\frac{dU_{oc}}{dt} = -\frac{U_{oc}}{\tau_p} + \frac{i_b}{C_{bp}} \quad (\text{II.58})$$

La tension aux bornes de la batterie est donnée par :

$$U_b = R_{be} i_b + U_{b1} + U_{oc} \quad (\text{II.59})$$

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

La capacité électrochimique de la batterie est représentée par le condensateur C_{bp} et sa valeur de donné par l'expression générale de l'énergie :

$$E_c = \frac{1}{2} C V_c^2 \quad (\text{II.60})$$

Avec :

C : la capacité

V_c : La tension du condensateur

A la différence d'un condensateur, la tension d'une batterie ne sera pas égale à zéro à son plus bas état de charge. Ceci est équivalent à un condensateur ayant un niveau minimum de charge égal à l'énergie $E_{c,min}$.

La capacité entièrement chargée de la batterie est représentée par un niveau maximum de charge $E_{c,max}$. Ceci est indiqué par l'équation suivante :

$$E_b = E_{c,max} - E_{c,min} = \frac{1}{2} C V_{max}^2 - \frac{1}{2} C V_{c,min}^2 = \frac{1}{2} C_{bp} (V_{max}^2 - V_{c,min}^2) \quad (\text{II.61})$$

L'énergie E_b est donnée par le constructeur de la batterie directement en kilowatt par heure (kWh). Les tensions V_{max} et V_{min} sont la tension maximale et la tension minimale de la batterie en circuit ouvert respectivement.

D'après (II.61) on a :

$$C_{bp} = \frac{2E_b}{V_{max}^2 - V_{c,min}^2} \quad (\text{II.62})$$

C_{bp} : est la capacité de la charge de la batterie

- La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances R_{be} et R_{b1} en série. Où la résistance R_{be} représente la résistance du bloc d'électrolyte et de la plaque tandis que la résistance R_{b1} représente la diffusion d'électrolyte.

De même on peut observer un saut soudain de tension avec l'application d'un courant de remplissage.

En utilisant la notation indiquée sur la figure (II.23), on peut exprimer la tension de batterie U_b en fonction de la tension de batterie en circuit ouvert U_{oc} et les autres composants R_{b1} , R_{be} , C_{b1} et la constante de temps $\tau_b = R_{b1} C_{b1}$.

$$U_b = U_{oc} + R_{b1} (1 - e^{-t/\tau_b}) i_b + R_{be} i_b \quad (\text{II.63})$$

Une autre caractéristique très importante d'une batterie est la décharge spontanée, représentée par la résistance R_{bp} en parallèle avec le condensateur principal C_{bp} . Elle est provoquée par électrolyse de l'eau aux tensions élevées et par la fuite lente à travers les bornes de la batterie aux basses tensions.

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

II.5.2 Estimation de l'état de charge

Cette partie concerne l'estimation de l'état de charge souvent noté SOC pour "State Of Charge". Elle nous permet de connaître la capacité résiduelle de la batterie afin d'éviter la charge excessive de la batterie ainsi que la décharge profonde de celle-ci. Ainsi, la durée de vie de la batterie sera prolongée[2].

✓ Estimation basée sur l'intégration du courant

C'est la méthode la plus commune pour calculer l'état de charge étant donné que la charge et la décharge sont liées directement au courant fourni ou retiré de la batterie [2]. Si l'état de charge initiale SOC_0 est connue la valeur de l'intégrale du courant est un indicateur de l'état de charge SOC.

L'état de charge peut être défini par l'équation suivante :

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q} \quad (II.64)$$

Avec :

SOC_0 : représente l'état de charge initiale.

I_b : Est le courant de décharge de la batterie.

$\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau$: représente la charge délivrée par la batterie à l'instant t (charge actuelle).

Q : est la charge nominale de la batterie.

Dans la pratique, il est recommandé que l'état de charge soit maintenu dans un intervalle limité, généralement entre 40% et 80 %, pour éviter la surcharge et la décharge profonde de la batterie.

II.5.3 Régulateur de charge et de décharge de la batterie

Pour contrôler la charge de la batterie on intercale entre celle-ci et le bus DC un hacheur réversible en courant. La structure de ce hacheur réversible en courant est représentée à la figure II.24.

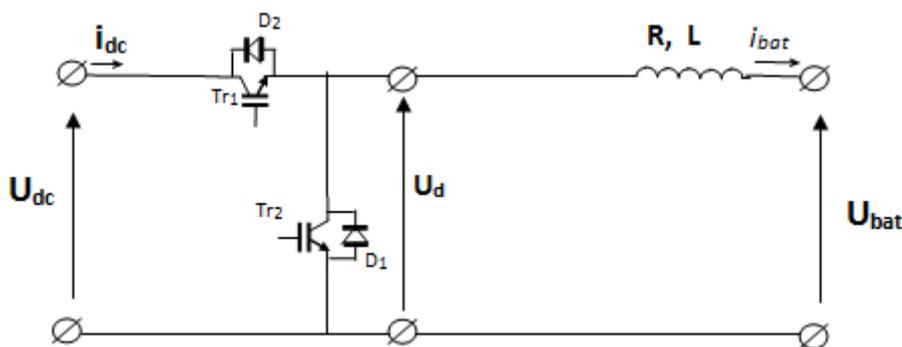


Fig. II.24 Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant

La tension U_{dc} est imposée supérieure à la tension de la batterie U_{bat} et les deux transistors fonctionnent en complémentarité sur une période de découpage T_d . On note par t_f la durée de fermeture du transistor T_{r1} (c'est aussi la durée d'ouverture du transistor T_{r2}).

Chapitre II

Modélisation du système hybride éolien photovoltaïque

Aussi, pour $t \in [0, t_f]$, la commande du transistor T_{r1} est à l'état opératif ON ($Sw_1=1$) et la commande de son complémentaire T_{r2} est à l'état inopérant zéro ($Sw_2=0$). Pour l'intervalle $t \in [t_f, T_d]$, les commandes sont à l'état inverse du précédent intervalle (i.e. $Sw_1=0$ et $Sw_2=0$).

- Lorsque le courant $i_{dc} > 0$

pour $t \in [0, t_f]$, T_{r1} est conducteur et diode D1 est bloquée on a donc :

$$\begin{cases} U_d = U_{dc} \\ i_{bat} = i_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.65})$$

Pour $t \in [t_f, T_d]$, T_{r1} est bloqué et c'est la diode D1 qui est conductrice :

$$U_d = 0$$

- Lorsque le courant $i_{dc} < 0$

pour $t \in [0, t_f]$, T_{r2} est bloqué et c'est la diode D2 qui est conductrice on a donc :

$$\begin{cases} U_d = U_{dc} \\ i_{bat} = i_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.66})$$

Pour $t \in [t_f, T_d]$ T_{r2} est conducteur et diode D2 est bloquée donc on :

$$U_d = 0$$

Par conséquent dans tous les états de fonctionnements cités plus haut, le courant de la batterie vérifie l'équation suivante :

$$L \frac{di_{bat}}{dt} = U_d - R i_{bat} - U_{bat} \quad (\text{II.67})$$

II.6 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons développé les modèles de la chaîne photovoltaïques, ainsi que l'étage d'adaptation qui lui est associé. Ensuite, nous avons modélisé chaque partie de la chaîne éolienne : la partie mécanique et la partie électrique.

Pour la partie électrique, nous avons modélisé, la MADA, les deux convertisseurs statiques, le bus continu et la source d'alimentation.

Pour la partie mécanique, nous avons modélisé sous certaines hypothèses simplificatrices, la turbine, le multiplicateur de vitesse et l'arbre.

En dernier lieu, nous avons présenté un modèle équivalent de la batterie plomb -acide ainsi que le hacheur de courant assurant le réglage de sa charge et sa décharge.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser au dispositif de commande du système hybride.

Chapitre III

Commande des sous-systèmes éolien-photovoltaïque

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons traiter la commande du système hybride (SH) proposé à l'étude, nous sommes donc amenés à traiter les points suivants :

- La maximisation de la puissance extraite de la turbine
- Le contrôle des puissances active et réactive de la MADA
- Le contrôle de la tension du bus continu.
- Le contrôle de la puissance électrique produite par le panneau photovoltaïque
- Le contrôle de la charge et de la décharge de la batterie d'accumulateurs électrique

III.2. Structure de la commande du système éolien :

La figure (III.1) montre l'architecture du dispositif de commande de la MADA entraînée par la turbine éolienne où le convertisseur CCM est connecté au bus continu. La puissance active de référence au stator doit être maximisée par rapport au fonctionnement de la turbine en d'autres termes la référence de la puissance doit correspondre à la puissance maximale produite par la turbine. Par conséquent, la commande de la puissance active passe tout d'abord par la détermination de sa référence à l'aide d'un algorithme MPPT.

Pour la commande de la puissance active et réactive produite par la MADA, nous considérons que la tension U_{red} du bus continu est constante.

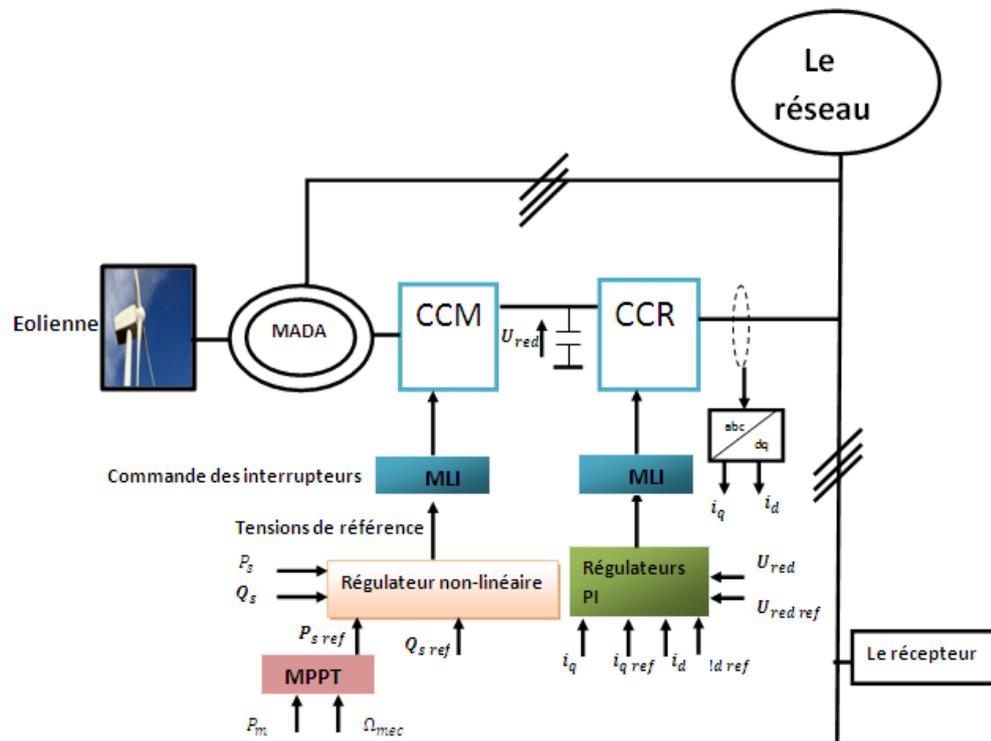


Fig.III .1 schéma global de la chaîne de conversion

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

III.3 Maximisation de la puissance extraite de la turbine

L'un des objectifs à atteindre est la maximisation de la puissance délivrée par la chaîne éolienne. Afin d'extraire le maximum de puissance possible, un algorithme appelé MPPT (maximum power point tracking) est implémenté. Le principe du MPPT consiste à chercher le point optimal de puissance et cela en influant sur la vitesse de rotation de la turbine par la modification du couple électromagnétique. Cet algorithme nous permet donc de détecter la puissance de référence à suivre pour chaque vitesse du vent [1]

Il existe deux stratégies pour détecter cette puissance maximale :

- 1) Stratégie avec connaissance de la courbe caractéristique
- 2) stratégie sans connaissance de la courbe caractéristique.

III.3.1 Stratégie avec connaissance de la courbe caractéristique

Cette stratégie consiste à l'asservissement de la vitesse de rotation de la turbine, tel que pour chaque vitesse du vent, nous chercherons à faire fonctionner le tout sous vitesse optimale et cela en se basant sur la caractéristique de la figure III.2.

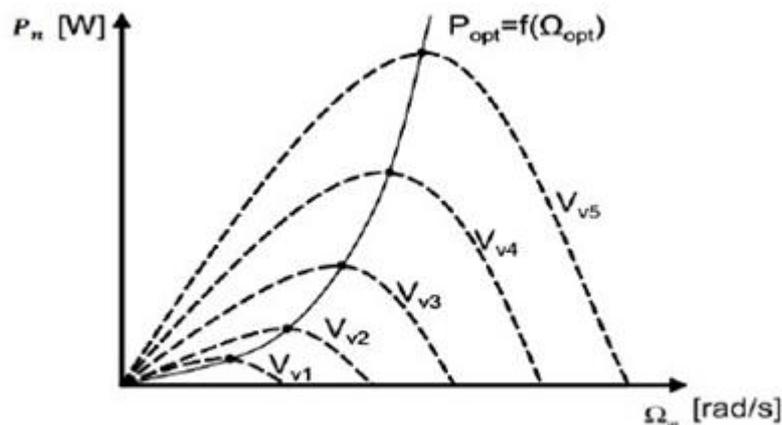


Fig.III .2 Caractéristique de la voilure

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de cloche (fig. III.2). Pour chaque vitesse du vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale qui correspond aussi à un couple de charge strictement défini. Le schéma de la figure (III.2) donne les courbes caractéristiques d'une turbine éolienne dans le plan puissance-vitesse de rotation de la turbine.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale de forme cubique, laquelle est déterminée par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \rho C_p^{opt} S V_v^3 \quad (III.1)$$

Idéalement, cette courbe doit être suivie à tout instant du fonctionnement du système éolien. Dans notre

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

cas, en supposant que cette caractéristique est connue, il nous suffit tout simplement de suivre la courbe de la puissance optimale pour faire fonctionner l'éolienne dans les conditions optimales.

C'est la méthode la plus utilisée, elle permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples. Mais elle présente des inconvénients de taille tel que la nécessité d'un capteur de la vitesse du vent et l'exigence du constructeur de la voilure de fournir les essais de caractérisation (extérieur, soufflerie) ou des simulations du profil des pales, ce qui n'est pas une chose facile surtout pour les éoliennes de forte puissance.

Et pour palier à ces problèmes, une autre stratégie plus simple et efficace a été proposée, c'est celle qui se passe de la connaissance de cette caractéristique.

III.3.2. Stratégie sans connaissance de la courbe caractéristique

La recherche du point optimal de puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique s'effectue en générale à l'aide de règles simples connues a priori pour permettre la convergence vers le point optimal.

Par exemple : si on note à l'instant k une augmentation de puissance ($\Delta P > 0$) ($\Delta P(k) = P(k) - P(k-1)$) suite à un incrément ($\Delta \Omega$) positif de vitesse ($\Delta \Omega(k) = \Omega(k) - \Omega(k-1)$), cela voudrait dire que le point de fonctionnement se trouve du côté gauche de la courbe caractéristique et qu'il faut accélérer la machine pour converger vers l'optimum. On s'impose alors pour l'échantillon ($k+1$) les conditions suivantes :

$$\Delta \Omega_{ref}(k+1) > 0 \text{ et } \Delta P_{ref}(k+1) > 0$$

On obtient alors :

$$\Omega_{ref}(k+1) = \Omega(k) + \Delta \Omega_{ref}(k+1) \quad \text{(III.2)}$$

$$P_{ref}(k+1) = P(k) + \Delta P_{ref}(k+1) \quad \text{(III.3)}$$

Par conséquent et en se basant sur la connaissance de $\Delta P(k)$ et $\Delta \Omega(k)$ l'algorithme doit permettre de déterminer la paire :

$$\Delta \Omega(k+1), \Delta P_{ref}(k+1)$$

L'algorithme le plus utilisé est celui basé sur la logique des règles illustrées par la table III.1 :

Etat constaté	Conséquence
$\Delta P(k) > 0$	$\Delta P_{ref}(k+1) > 0$
$\Delta \Omega(k) > 0$	$\Delta \Omega_{ref}(k+1) > 0$
$\Delta P(k) > 0$	$\Delta P_{ref}(k+1) > 0$
$\Delta \Omega(k) < 0$	$\Delta \Omega_{ref}(k+1) < 0$
$\Delta P(k) < 0$	$\Delta P_{ref}(k+1) > 0$
$\Delta \Omega(k) > 0$	$\Delta \Omega_{ref}(k+1) < 0$
$\Delta P(k) < 0$	$\Delta P_{ref}(k+1) > 0$
$\Delta \Omega(k) < 0$	$\Delta \Omega_{ref}(k+1) > 0$

Table III.1 Table des règles

L'introduction de l'algorithme basé sur les règles de la table III.1, permet de faire converger le point de fonctionnement vers le point de puissance optimal.

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

III.4 Le contrôle de la puissance active et réactive de la MADA

Comme déjà établi, la référence de la puissance active P_{ref} provient de l'algorithme MPPT et celle de la puissance réactive Q_{ref} dépend du facteur de puissance exigé au point commun de raccordement au réseau. Le régulateur fournit les tensions de référence v_{dr}^* et v_{qr}^* définies dans un référentiel lié au vecteur de la tension du réseau. La transformation de ces références dans le plan (d,q) permet d'obtenir les tensions triphasées v_{ar}^* , v_{br}^* et v_{cr}^* qui doivent être appliquées aux enroulements du rotor. En exploitant une des techniques MLI, le convertisseur CCM délivre les tensions en MLI au rotor. Ce convertisseur est du type MLI à deux niveaux, bidirectionnels en puissance.

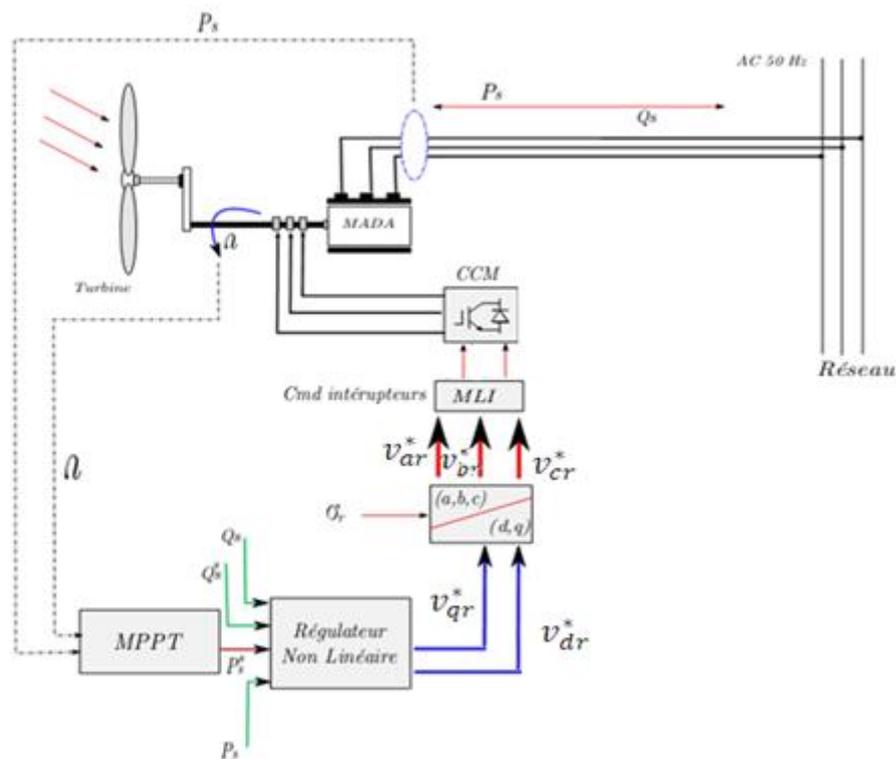


Fig.III.3 Commande du convertisseur coté machine

III.4.1 Commande de la puissance active et réactive basée sur le critère de stabilité de Lyapunov

La synthèse de la commande, basée sur le critère de stabilité au sens de Lyapunov, permet de calculer un retour d'état stabilisant. Elle se fait en deux étapes :

- choisir une fonction $V(x)$ qui soit définie positive (FDP) sur \mathbb{R}^n (dite alors fonction de Lyapunov) ;
- déterminer la commande qui rend $\dot{V}(x)$ négative (FDN) sur \mathbb{R}^n .

Le choix d'une fonction de Lyapunov n'est pas toujours évident mais généralement la forme quadratique des erreurs de réglage est la plus souvent utilisée.

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

Dans notre cas, l'objectif de commande étant d'annuler les erreurs de réglage des puissances active et réactive statoriques qui sont définies comme suit :

$$e_i = y_i - y_{iref} \text{ et } i=(1,2)$$

Avec :

$$\begin{cases} y_1 = P_s \\ y_2 = Q_s \end{cases}$$

Nous choisissons les fonctions de Lyapunov comme suit :

$$V_i = \frac{1}{2} a e_i^2 \text{ et } i=(1,2) \quad (\text{III.4.a})$$

Où le coefficient a est un scalaire positif défini par :

$$a = 1/(v_{ds} a_4)$$

La dérivée temporelle de l'équation (III.4) conduit à

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = a \dot{e}_1 e_1 = a e_1 (v_{ds} f_1 - a_4 v_{ds} u_1 - \dot{y}_{1ref}) \\ \dot{V}_2 = a \dot{e}_2 e_2 = a e_2 (-v_{ds} f_2 + a_4 v_{ds} u_2 - \dot{y}_{2ref}) \end{cases} \quad (\text{III.4.b})$$

Où on rappelle que les fonctions $f_1(x)$ et $f_2(x)$ sont données par :

$$\begin{cases} f_1 = -a_1 x_1 + (\omega_s - \omega_m) x_2 + a_2 x_3 + a_3 x_4 x_5 + a_3 v_{ds} \\ f_2 = -(\omega_s - \omega_m) x_1 - a_1 x_2 + a_3 x_3 x_5 + a_2 x_4 + a_3 v_{qs} \end{cases}$$

En substituant dans (III.4.b) le coefficient a par son expression, on aura :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = e_1 \left(\frac{f_1}{a_4} - a \dot{y}_{1ref} - u_1 \right) \\ \dot{V}_2 = e_2 \left(-\frac{f_2}{a_4} - a \dot{y}_{2ref} + u_2 \right) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Pour imposer la dynamique $\dot{V}_i = -\lambda_i e_i^2$ et $\lambda_i > 0$, il suffit de choisir les commandes u_1 et u_2 comme suit :

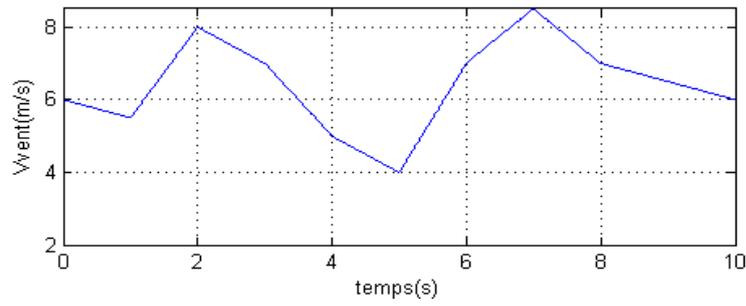
$$\begin{cases} u_1 = \frac{f_1}{a_4} - a \dot{y}_{1ref} + \lambda_1 e_1 \\ u_2 = \frac{f_2}{a_4} + a \dot{y}_{2ref} - \lambda_2 e_2 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

➤ Résultats de la simulation

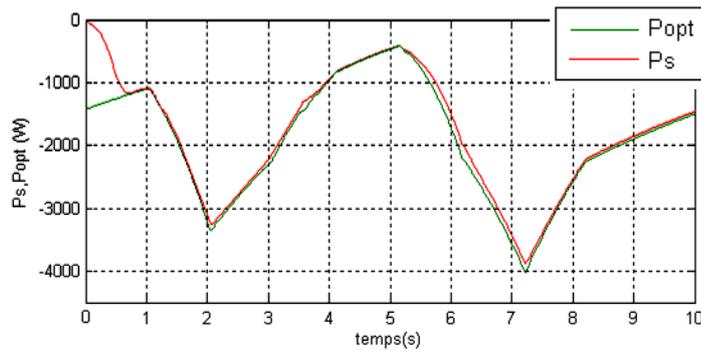
Les paramètres utilisés pour la simulation sont donnés dans l'annexe 02 et la référence (P_{sd}) de la puissance active au stator correspond à celle obtenue par l'algorithme MPPT développé précédemment pour un profil du vent présenté à la figure III.4 [3]. Les résultats obtenus après simulation sont illustrés dans les figures III.5 & III.6

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

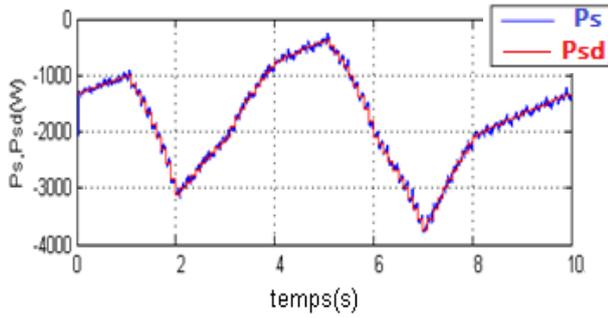


(a) Profil du vent

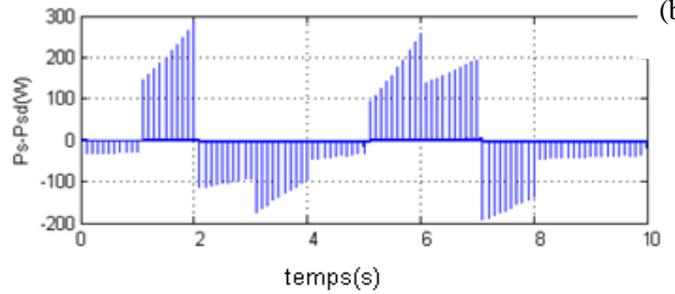


(b) Puissance statorique P_s et Puissance optimale P_{opt}

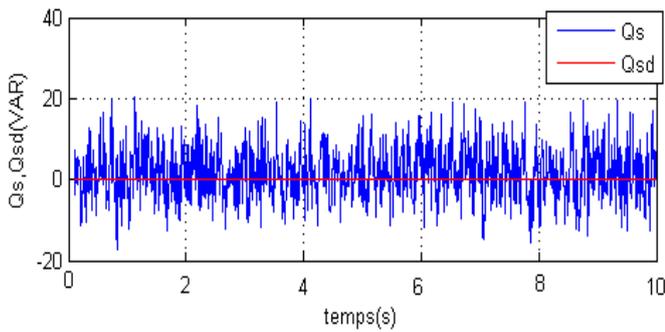
Fig. III.4 : profil du vent et Puissance statorique désirée



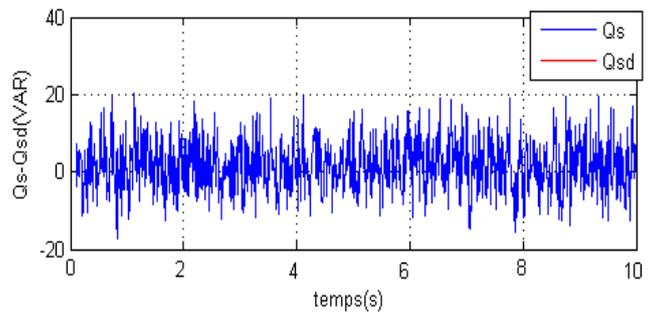
(a) Puissances actives P_s et P_{sd}



(b) Erreur de réglage de P_s



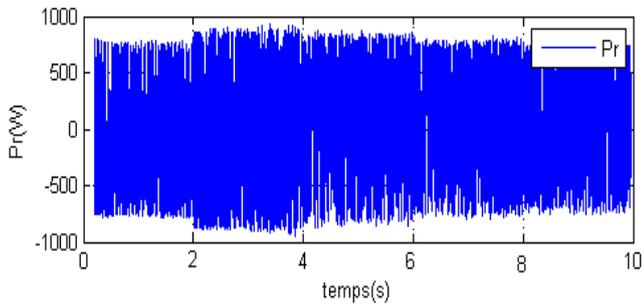
(c) Puissances réactives Q_s et Q_{sd}



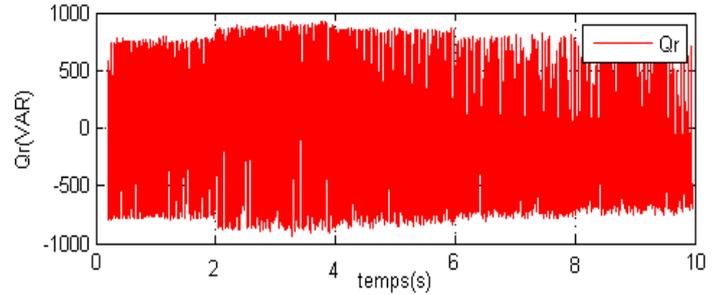
(d) Erreur de réglage de Q_s

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

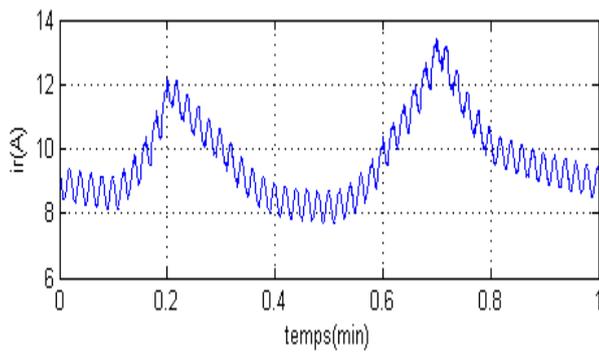


(e) Puissance active rotorique P_r

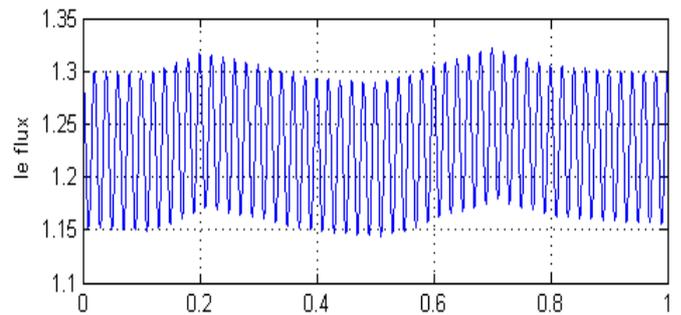


(f) Puissance réactive rotorique Q_r

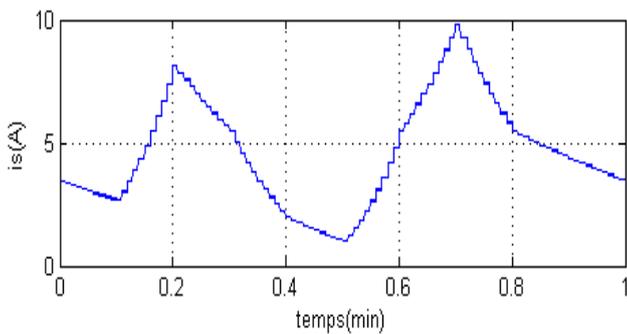
Fig.III.5 Puissances au stator et au rotor de la MADA dans le cas d'une commande idéale



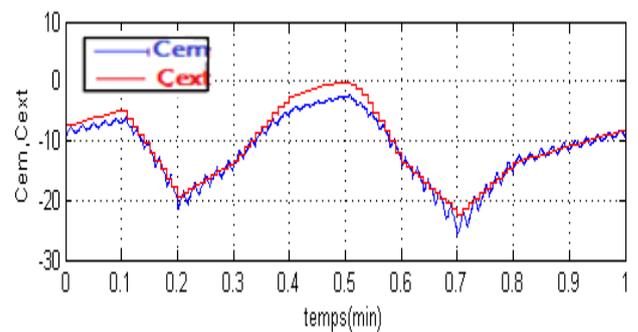
(a) Module du courant rotorique I_r



(b) Flux statorique



(c) Module du courant statorique I_s



(d) Couples électromagnétique et mécanique

Fig.III.6 Grandeurs électriques et Couples de la MADA dans le cas d'une commande idéale

Chapitre III

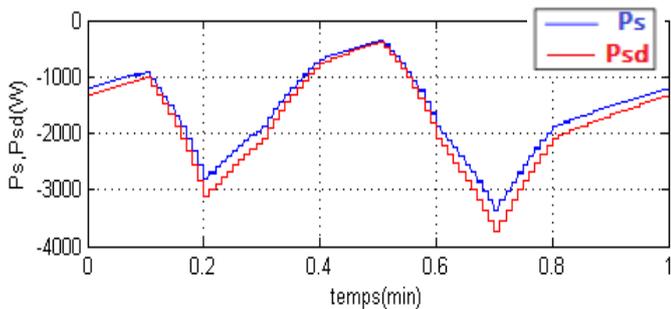
Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

Avec test de robustesse

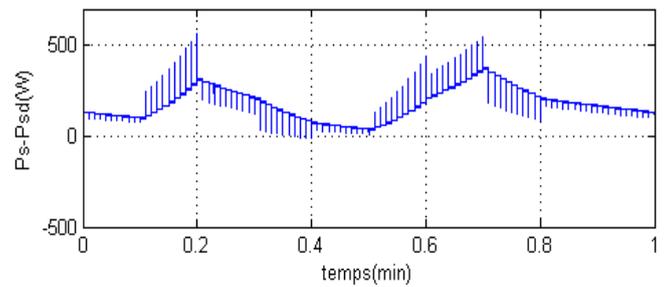
Les tests de robustesse sont effectués pour un fonctionnement de l'éolienne dans les mêmes conditions initiales et pour le même profil du vent (fig.III.3) que lors de la simulation précédente sauf que dans ce cas nous avons introduit des variations paramétriques. Ces variations sont comme suit :

- Variation de +20% sur les résistances rotoriques et statoriques.
- Variation de -10% sur les inductances rotoriques et statoriques.

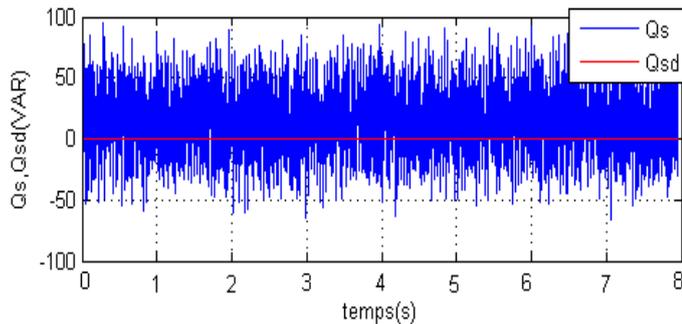
Les résultats obtenus après simulation sont représentés aux figures III.7 & III.8 :



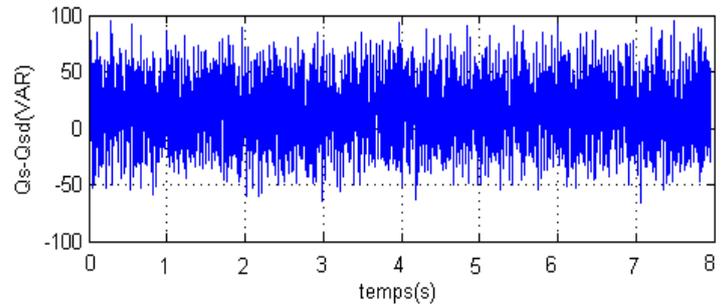
a) Puissances actives P_s et P_{sd}



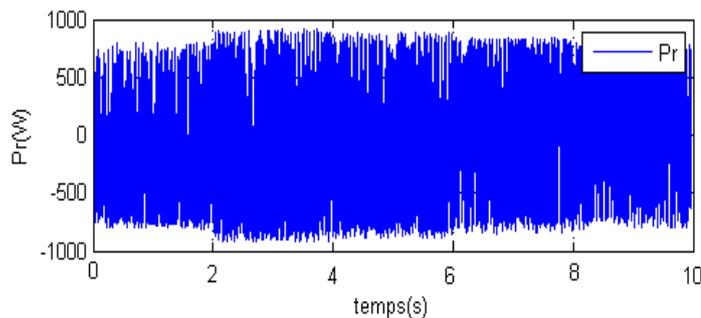
b) Erreur de réglage de P_s



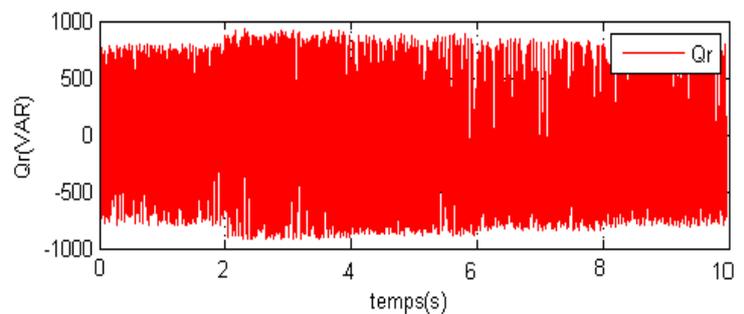
(c) Puissances réactives Q_s et Q_{sd}



(d) Erreur de réglage de Q_s



(e) Puissance active rotorique P_r



(f) Puissance réactive rotorique Q_r

Fig.III.7 Puissances au stator et au rotor de la MADA dans le cas d'une commande perturbée

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

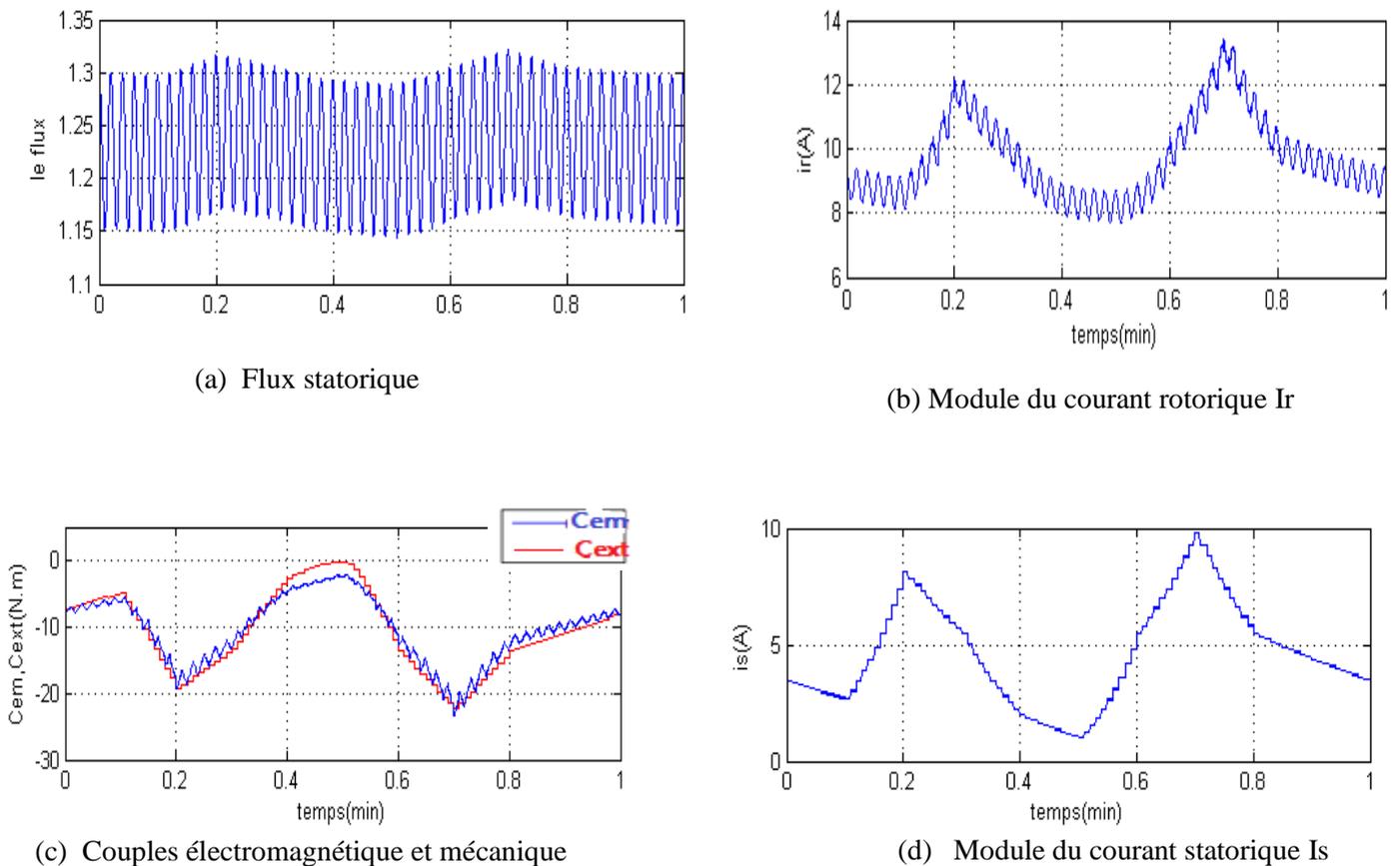


Fig.III.8 *Grandeurs électriques et Couples de la MADA dans le cas d'une commande perturbée*

Interprétation des résultats

D'après les figures (III.5.a) et (III.5.c) nous remarquons que les puissances actives et réactives statoriques suivent leurs références, avec une erreur faible d'environ 5%). Cependant, lors de l'apparition des variations paramétriques la bande d'oscillation des puissances statoriques s'élargit. Aussi, le système suit la dynamique des consignes mais avec une erreur ; la commande est donc sensible aux variations paramétriques.

L'amplitude des courants statoriques et celle des courants rotoriques demeurent dans les limites admissibles pour la machine utilisée, nous enregistrons une légère augmentation de ces grandeurs due aux variations paramétriques.

La puissance active rotorique moyenne varie en fonction du glissement de la machine. Cette puissance représentée à la figure (III.7.e) est bornée et reste toujours dans la bande admissible

Les figures (III. 8.b) et (III.8.c) montrent que le couple électromagnétique ainsi que le courant rotorique sont affectés par les variations paramétriques.

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

Ces résultats montrent que la commande par la méthode de Lyapunov n'est pas robuste vis-à-vis des variations paramétriques. Nous sommes amenées ainsi à développer une autre commande à essence robuste : la commande par les modes glissants.

III.4.2 Commande par mode glissant de la puissance active et réactive de la MADA

La commande par les modes glissants est une commande non linéaire de la classe des commandes robustes à structure variable. Elle est basée sur la commutation de fonctions de variables d'état, utilisées pour créer une variété ou surface de glissement. Quand les états sont maintenus sur cette surface, le système se trouve en régime glissant. Sa dynamique est alors insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques tant que les conditions du régime glissant sont assurées.

Cette commande est très appliquée pour les systèmes ayant un modèle imprécis ou variable dans le temps et cela en raison de sa haute précision, sa robustesse et sa simplicité.

✓ **Choix de la surface de glissement :**

La forme de surface de glissement la plus utilisée est celle proposée par Slotine:

$$S_i(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_i\right)^{r_i-1} e_i \quad (\text{III.7})$$

Avec :

- x : Vecteur d'état.
- λ_i constante positive imposant la dynamique de la surface.
- r_i : Degré relatif de la sortie y_i
- e_i : Erreur de poursuite.

Dans notre cas, nous allons commander la puissance active et celle réactive du stator, cela nécessite donc deux surfaces de glissement indépendantes.

✓ **L'établissement des conditions d'existence**

La surface de glissement doit vérifier les conditions d'existences et de convergences qui sont les critères qui assurent aux états du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Pour assurer le mode de convergence, il faut assurer les conditions suivantes :

- ✓ $S_i(x) = 0$: condition de maintien
- ✓ $S_i(x)\dot{S}_i(x) < 0$, cette condition de convergence ou d'attractivité est généralement imposée par la loi du type relais $\dot{S}_i(x) = -k_i \text{sign}(S_i(x))$ où $\text{sign}(\cdot)$ est la fonction signe et $k_i > 0$.

✓ **La détermination de la loi de commande**

Dans notre cas, les tensions de commande v_{dr} et v_{qr} de la MADA sont à déterminer dans le but de

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

réguler la puissance active et réactive au stator. Et comme établi précédemment, leurs commandes sont découplées ; en d'autres termes v_{dr} agit sur la puissance active et v_{qr} sur la puissance réactive.

Pour un réglage de puissance, on définit les erreurs comme suit :

$$e_i = y_i - y_{iref} \text{ et } i=(1,2) \quad (\text{III.8.a})$$

Où les grandeurs de sorties y_i correspondent à :

$$y_1 = v_s i_{ds} \text{ et } y_2 = -v_s i_{qs}$$

La dérivée temporelle des erreurs de réglage donne :

$$\dot{e}_i = \dot{y}_i - \dot{y}_{iref} = v_s f_i - \dot{y}_{iref} - v_s a_4 u_i \quad (\text{III.8.b})$$

Où :

$$u_1 = v_{dr} \text{ et } u_2 = v_{qr}$$

$$f_1 = -a_1 x_1 + (\omega_s - \omega_m) x_2 + a_2 x_3 + a_3 x_4 x_5 + a_3 v_{ds}$$

$$f_2 = -(\omega_s - \omega_m) x_1 - a_1 x_2 + a_3 x_3 x_5 + a_2 x_4 + a_3 v_{qs}$$

D'après la relation (III.8.b), les commandes apparaissent à la première dérivée de chacune de ces erreurs ; par conséquent le degré relatif de chacune d'elles est de un ($r=1$) et d'après Slotine, les surfaces de glissement peuvent être choisies comme suit:

$$S_i = e_i = y_i - y_{iref} \text{ et } i=(1,2) \quad (\text{III.9})$$

L'objectif de la commande par les modes glissants est de ramener les états du système vers la surface de glissement et de les maintenir, la condition d'attractivité peut être satisfaite par la condition :

$$S_i(x) \dot{S}_i(x) < 0$$

On impose à la dynamique de la surface \dot{S}_i la forme relais:

$$\dot{S}_i = -k_i \text{sign}(S_i) \text{ avec } k_i > 0 \quad (\text{III.10})$$

Tenant compte de (III.8.b), (III.9) et (III.10), il en résulte :

$$v_s f_i - \dot{y}_{iref} - v_s a_4 u_i = -k_i \text{sign}(e_i) \quad (\text{III.11})$$

Par conséquent, les commandes sont déterminées telles que :

$$u_i = \frac{1}{a_4 v_s} [k_i \text{sign}(S_i) + v_s f_i] \quad (\text{III.12})$$

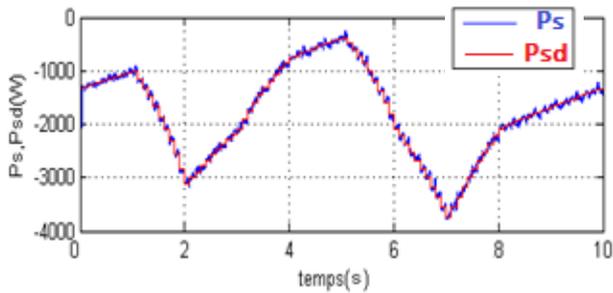
La relation (III.12) montre que la commande ne peut exister que si le terme $a_4 v_s \neq 0$, cette condition est assurée dans notre cas du fait que v_s est le module de la tension du réseau donc $v_s > 0$ et $a_4 = \frac{1-\sigma}{\sigma} > 0$ car le coefficient de dispersion est toujours inférieur à l'unité ($\sigma < 1$) et donc le terme $a_4 v_s$ est tel que $a_4 v_s > 0$.

Chapitre III

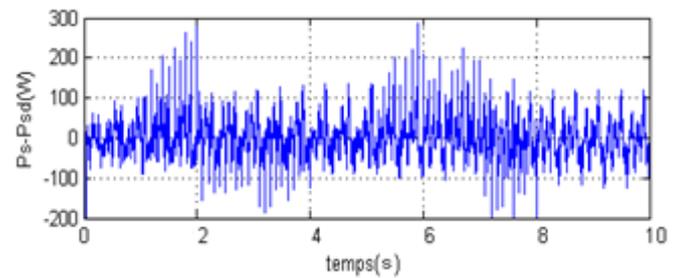
Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

- **Résultats de la simulation**

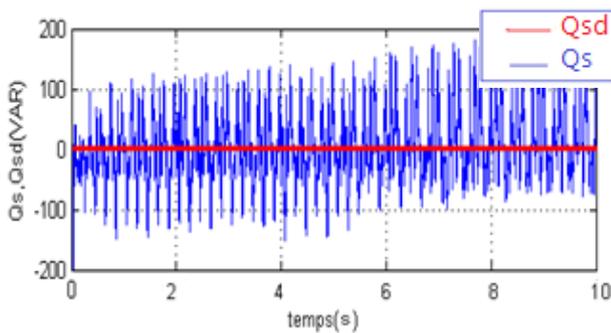
La simulation de la turbine éolienne –MADA est effectuée avec les paramètres donnés à l'annexe (02). La référence de la puissance active statorique est obtenue via l'algorithme MPPT du type (P&O) en présence d'un vent correspondant au profil représenté à la figure (III.3) [3].



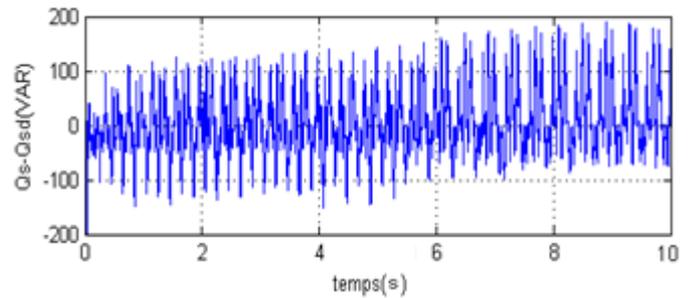
(a) Puissances actives P_s et P_{sd}



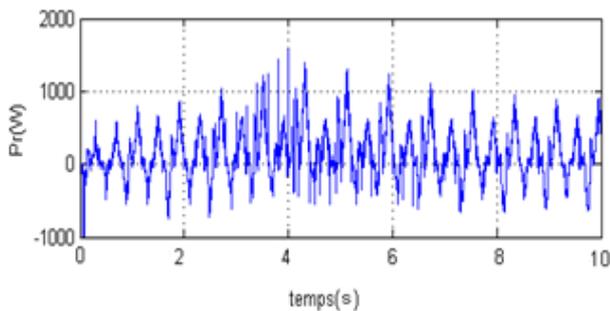
(b) Erreur de réglage de la puissance P_s



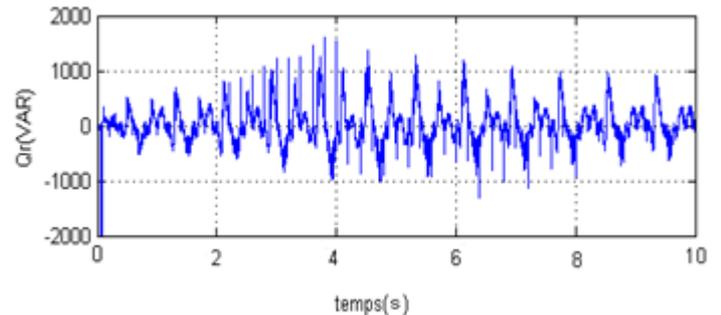
(c) Puissance réactive statorique Q_s



(d) Erreur de réglage de la puissance Q_s



(e) Puissance active rotorique P_r

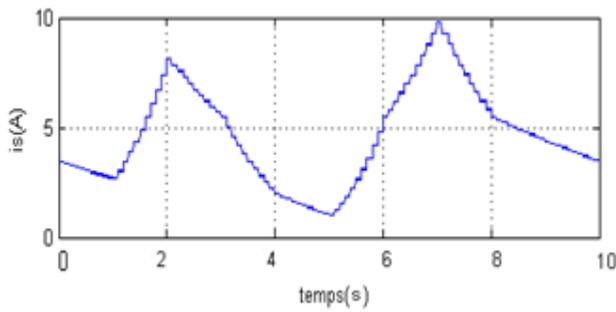


(f) Puissance réactive rotorique Q_r

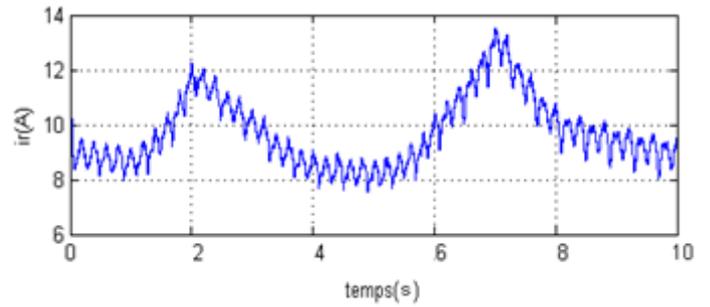
Fig.III.9 Puissances au stator et au rotor de la MADA dans le cas d'une commande idéale.

Chapitre III

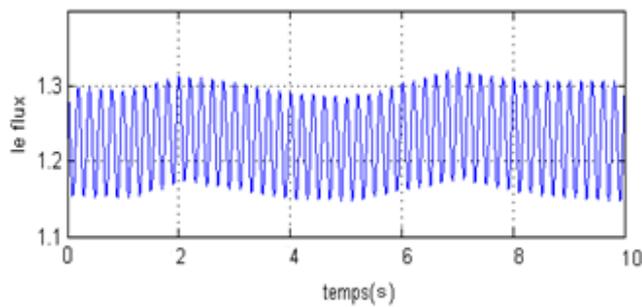
Commande du système hybride éolien-photovoltaïque



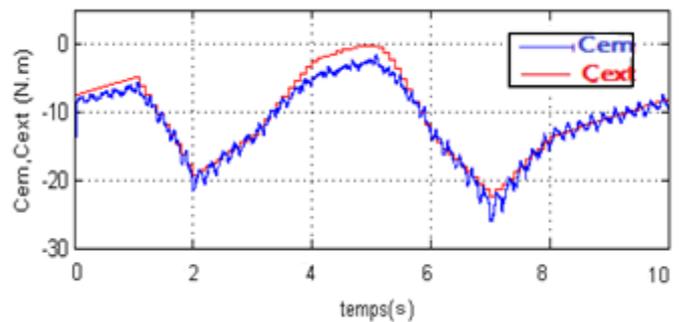
(b) Module du courant statorique I_s



(c) Module du courant statorique I_r



(d) Flux statorique



(e) Couple électromagnétique et couple mécanique

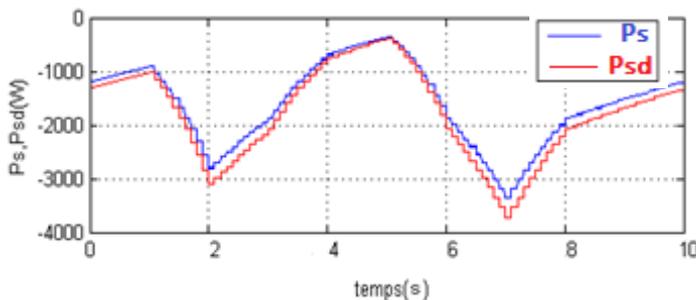
Fig.III.10 Grandeurs électriques et Couples de la MADA dans le cas d'une commande idéale.

Avec Test de robustesse

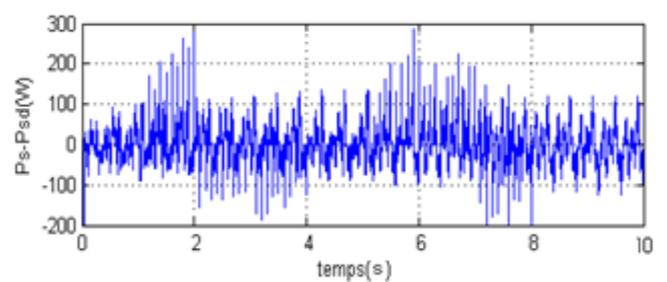
Les essais de simulation sont effectués dans les mêmes conditions initiales et le même profil du vent que lors des essais précédents sauf que nous avons introduit en plus des variations paramétriques affectant les paramètres de la MADA. Ces variations sont comme suit :

- variation de +20% des résistances rotoriques et statoriques ;
- variation de -10% des inductances rotoriques et statoriques.

Les résultats obtenus après simulation sont illustrés aux figures III.11 & 12:



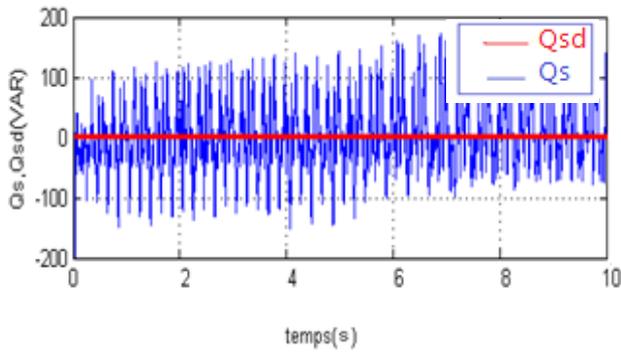
(a) Puissances actives P_s et P_{sd}



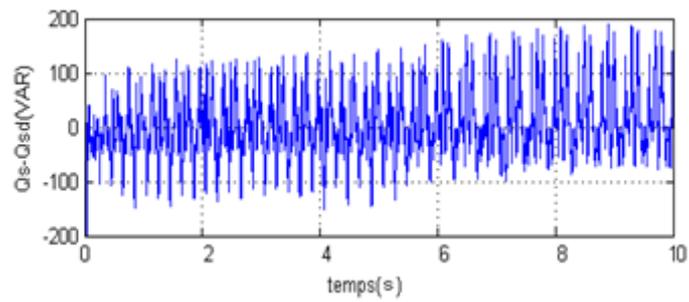
(b) Erreur de réglage de la puissance P_s

Chapitre III

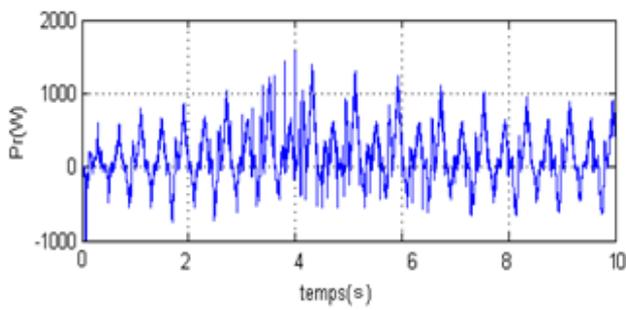
Commande du système hybride éolien-photovoltaïque



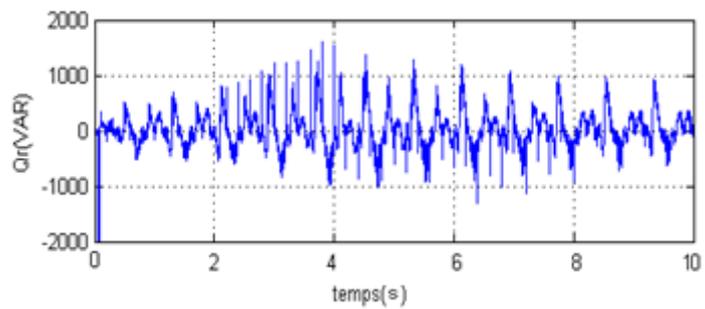
(c) Puissances réactives Q_s et Q_{sd}



(d) Erreur de réglage de la puissance réactive Q_s

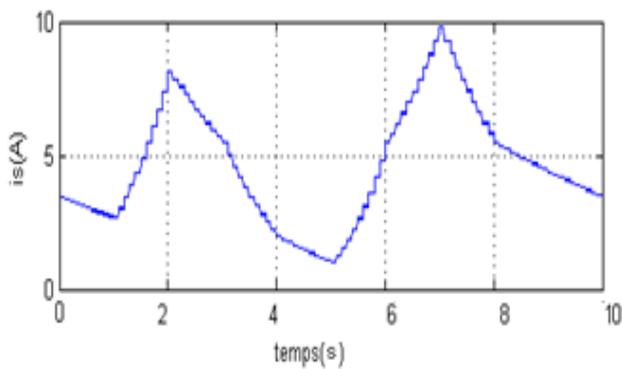


(e) Puissance active rotorique P_r

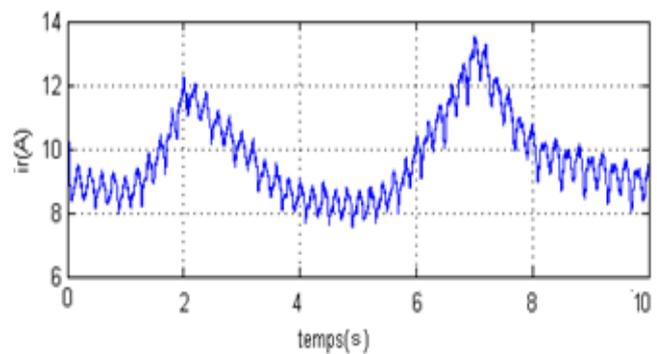


(f) Puissance réactive rotorique Q_r

Fig.III.11 Puissances au stator et au rotor de la MADA dans le cas d'une commande perturbée



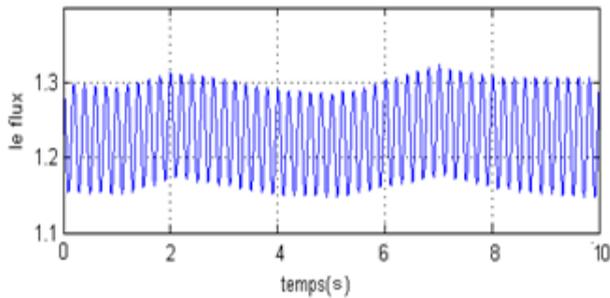
(b) Module du courant statorique I_s



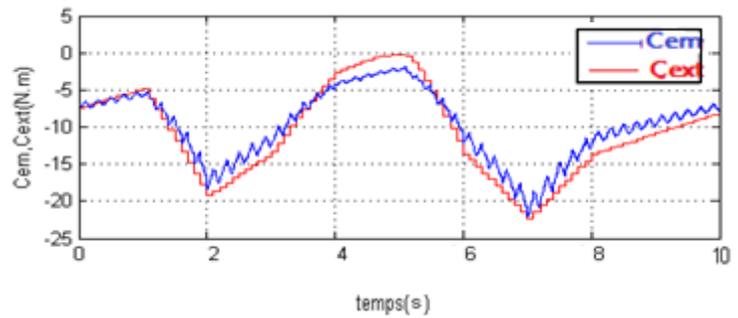
(c) Module du courant rotorique I_r

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque



(d) Flux statorique



(e) Couples électromagnétique et mécanique

Fig.III.12 Grandeurs électriques et Couples de la MADA dans le cas d'une commande perturbée.

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus lors de l'implémentation de la commande par les modes glissants témoignent de la précision de cette dernière par rapport à la méthode de Lyapunov. En effet, les objectifs de commande sont bien réalisés, l'erreur moyenne obtenue de la poursuite de la puissance active statorique est faible. Même après l'apparition des variations paramétriques, ces erreurs restent faibles donc les objectifs de commande sont assurés même en régime perturbé.

Nous observons une bonne dynamique du système qui est principalement due au caractère énergique de la commande par les modes glissants. La moyenne du module de la commande appliquée reste bornée. Pour les puissances rotoriques, nous remarquons qu'elles évoluent dans la bande admissible. On ne remarque aucun changement même après l'application des variations paramétriques. Le module du courant rotorique, change légèrement d'amplitude lors des variations paramétriques. Le couple électromagnétique et le couple extérieur (celui de la turbine) restent en équilibre même après l'apparition des variations paramétriques. Ces résultats, confirment la bonne robustesse de la commande par les modes glissants.

III.5 Contrôle de la tension du bus continu

Le contrôle de la tension du bus continu se fait en commandant le convertisseur côté réseau CCR. Ce convertisseur a pour objectif le maintien de la tension du bus continu constante indépendamment du sens de transfert de la puissance et de son amplitude.

La mise en œuvre de la commande de ce convertisseur consiste à mesurer la tension du bus continu et de la comparer à une valeur de référence désirée (qui est dans notre cas de l'ordre de 600V). Après une

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

correction par un régulateur PI, nous obtenons la puissance active de référence P_{res}^* laquelle correspond à une valeur de référence $i_{d,res}^*$ du courant d'axe (d) dans un repère (d,q) lié au vecteur de la tension du réseau. De même, la référence de la puissance réactive Q_{res}^* correspond à une valeur de référence $i_{q,res}^*$ du courant d'axe (q). A l'issue de cela, les courants du réseau coté CCR sont régulés à leur valeur de référence en exploitant une commande vectorielle c.à.d. dans un référentiel lié au vecteur de la tension du réseau. Les tensions issues du régulateur $v_{d,res}^*$ et $v_{q,res}^*$ sont transformées en grandeurs triphasées $v_{a,res}^*$, $v_{b,res}^*$ et $v_{c,res}^*$ et elles constituent les tensions de références pour la commande en MLI du convertisseur CCR.

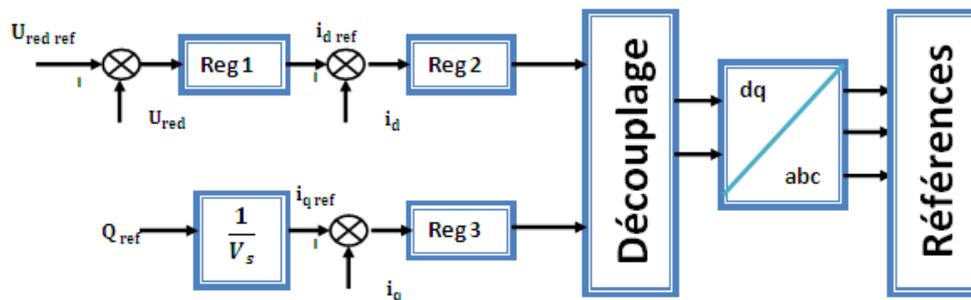


Fig.III.13 Schéma d'asservissement du bus continu

La figure (III.14) donne le résultat de la simulation du réglage de la tension continue de liaison entre les deux convertisseurs CCR et CCM. Le réglage est satisfaisant dans le sens où l'erreur de réglage obtenue après application d'une variation du courant de 10A au niveau du bus reste tolérable pour le système.

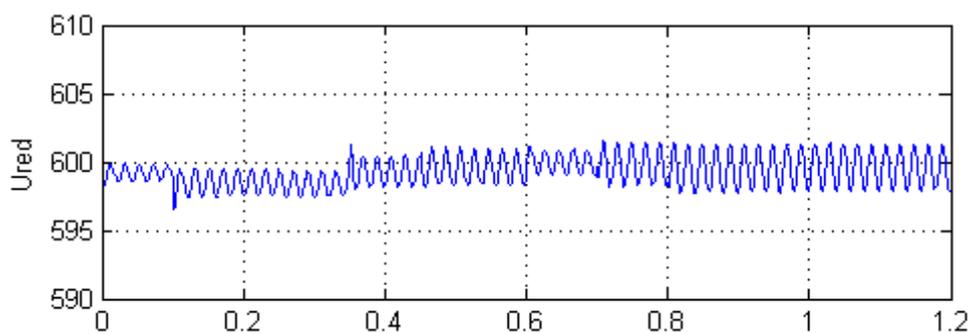


Fig.III.14 Réglage de la tension du bus continu du convertisseur AC-DC-AC

III.6 Commande de la puissance électrique produite par le panneau photovoltaïque

Dans un premier temps, nous allons commander la chaîne photovoltaïque (fig.III.15) constituée par la mise en cascade d'un générateur photovoltaïque et d'un hacheur boost dont la sortie est connectée au bus continu. Les caractéristiques du générateur correspondent à celles du générateur photovoltaïque déjà simulé au chapitre II.

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

La figure III.15 représente le schéma de principe de la commande de la chaîne photovoltaïque où une commande MPPT est utilisée pour piloter le hacheur boost.

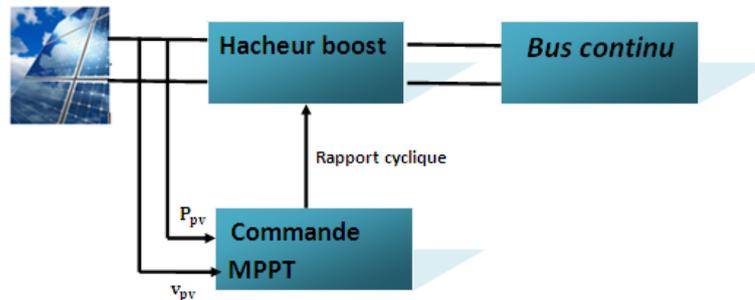


Fig.III.15: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

III.6.1 Commande MPPT d'une chaîne photovoltaïque

La commande MPPT d'un système solaire photovoltaïque est une technique qui consiste à faire varier la tension à la sortie du PV (à l'entrée du hacheur boost), en modifiant le rapport cyclique du convertisseur statique, de telle sorte que le générateur photovoltaïque puisse fournir la puissance maximale à ses bornes. Un générateur PV possède une caractéristique I-V fortement non linéaire.

En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet de piloter le hacheur, reliant le panneau PV à la charge de manière à ce que le PV puisse fournir en temps réel le maximum de puissance.

Plusieurs publications sur des méthodes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature. La méthode la plus utilisée est celle dite 'perturbation&observation' (**P&O**). Dans notre étude, nous allons appliquer l'algorithme P&O pour sa simplicité et sa rapidité.

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

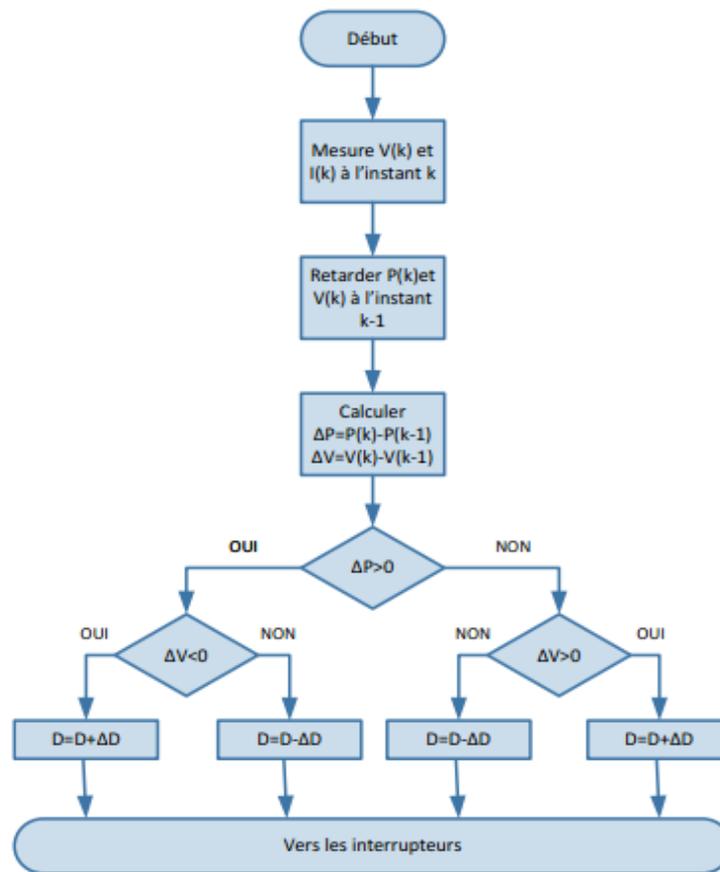


Fig.III.16 : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O).

a. Principe de la méthode Perturbation et Observation (P&O)

Le principe de la méthode (P&O) peut être expliqué en se basant sur l'organigramme de la figure III.16. Cette méthode consiste à perturber le fonctionnement du système en modifiant la tension aux bornes du champ de modules PV et à analyser la variation de puissance qui en résulte. Ainsi une incrémentation positive de la tension peut engendrer soit :

- un accroissement de la puissance signifiant par là que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point 'PPM' ;
- une décroissance de la puissance signifiant par là que le point de fonctionnement se trouve à droite du point 'PPM'.

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique $P=f(V)$, il est alors possible de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de le faire converger vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance du PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau point 'PPM'.

Cette méthode est utilisée pour sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques inconvénients liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi, car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

b-Simulation du générateur photovoltaïque sans MPPT

Dans cette partie, nous simulons le comportement de la chaîne photovoltaïque, dans le cas d'un profil d'ensoleillement variant entre 200 et 1000 W/m² (Fig. III.17.a) et pour une température de 25°C.

Le générateur photovoltaïque mis en essai est composé de 5 voies identiques en parallèles (N_p=5) où chaque voie est formée par 5 panneaux mis en série. De plus chaque panneau est constitué de 36 cellules photovoltaïques (N_s= 36*5). Il est à noter que chaque cellule a les caractéristiques de celle simulée au chapitre II. Ces résultats sont obtenus en utilisant une tension de référence V_{ref} à l'entrée du hacheur tel que $V_{ref}=0.75 V_{oc}$ où V_{oc} est la tension à vide du générateur PV. Cette technique ne permet pas toujours d'atteindre le point MPP car la tension V_{oc} dépend de la température du PV.

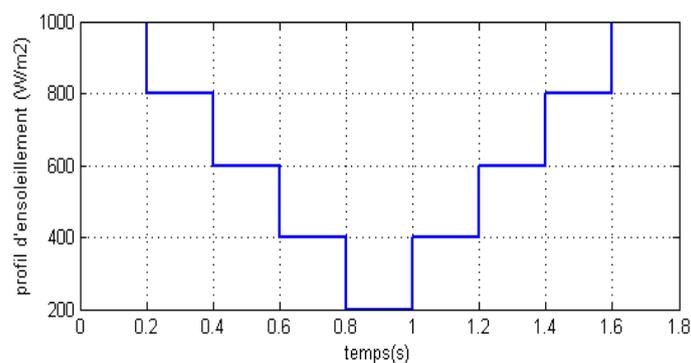


Fig.III.17 : Profil d'ensoleillement

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

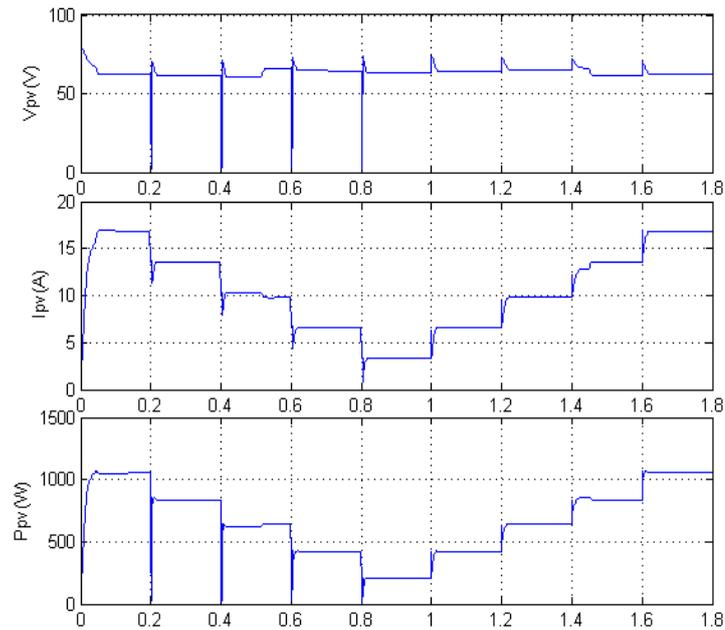


Fig.III.18 : Pilotage du GPV sans la procédure MPPT

c-Simulation du générateur photovoltaïque avec MPPT (P&O)

Pour cette partie, nous allons appliquer l'algorithme de poursuite du MPP le plus utilisé, qui est l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).

Nous simulons le fonctionnement de la chaîne photovoltaïque dans le cas où le Gpv est soumis à un ensoleillement variable représenté par le même profil que pour le test précédent (Fig. III.17) et où la tension du bus continu U_{dc} est supposée constante ($U_{dc}=120V$).

Pour ces conditions, la tension du générateur, le courant et la puissance délivrée par le GPV piloté par la MPTT du type (P&O) sont représentés à la figure III.19.

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

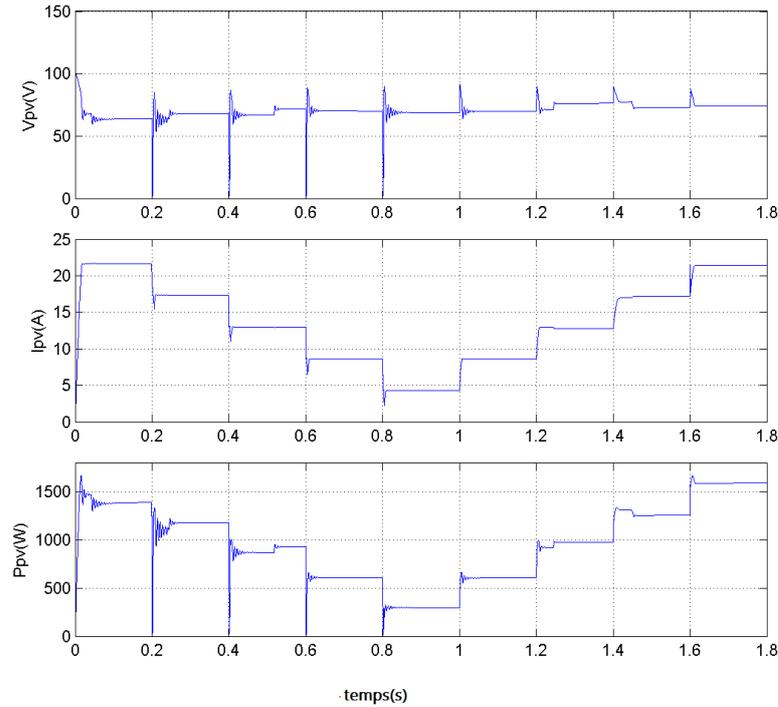


Fig.III.19 : Grandeurs électriques du Gpv dans le cas d'un pilotage par MPPT

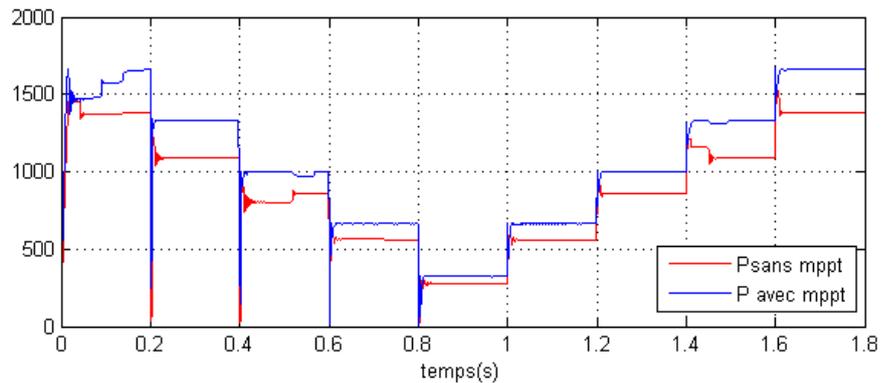


Figure III.20 Puissance fournie par le Gpv sans MPPT ou avec MPPT

Pour le même profil d'ensoleillement (fig.17), nous avons reporté sur la même figure III.20, la puissance produite par le Gpv avec ou sans utilisation de l'algorithme MPPT. Cette figure montre clairement que le Gpv piloté par MPPT produit plus de puissance tout le long du profil de l'ensoleillement. Ainsi, l'intérêt de l'utilisation d'un algorithme MPPT est mis en évidence. On voit bien que l'écart entre les puissances est important ; ce qui prouve la nécessité de l'utilisation d'un algorithme MPPT pour optimiser le fonctionnement du système et diminuer les pertes.

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de notre algorithme dans la poursuite du point de puissance maximale. On remarque que son utilisation entraîne des oscillations, néanmoins, on voit que son temps de réponse est très rapide ce qui est l'une des qualités les plus importantes de cet algorithme.

III.7 Commande de la charge et de la décharge de la batterie d'accumulateurs électrique

La batterie permet de récupérer l'excès ou fournir le manque d'énergie nécessaire au fonctionnement, elle est reliée au bus continu à travers un convertisseur réversible en courant qui assure l'adaptation de la tension entre la batterie et le bus DC. Ce convertisseur permet aussi le contrôle de l'intensité du courant délivré ou consommé par la batterie.

Afin de commander ce convertisseur deux régulateurs PI sont mis en cascade. Le premier est relatif au réglage de la charge de la batterie (Q_c) dont la sortie correspond à la référence de courant (I_{b_ref}) et le second régulateur se charge du réglage du courant de la batterie à sa valeur de référence.

La figure (III.21) représente le schéma de commande de la charge et de la décharge de la batterie d'accumulateurs électrique.

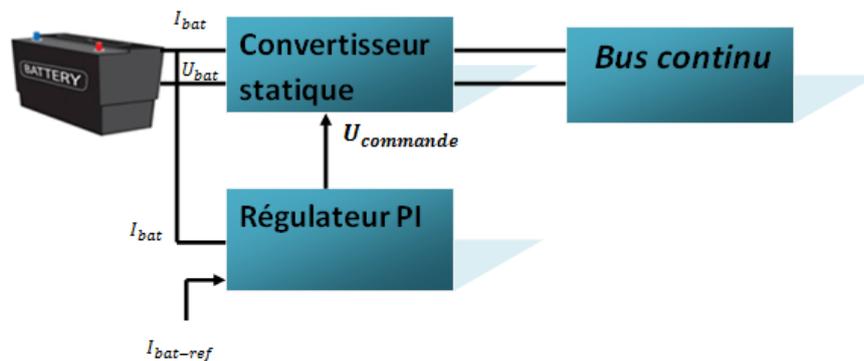
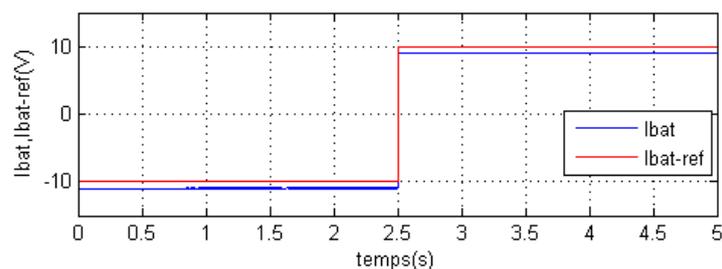


Fig.III.21 Schéma de commande de la charge et de la décharge de la batterie d'accumulateurs

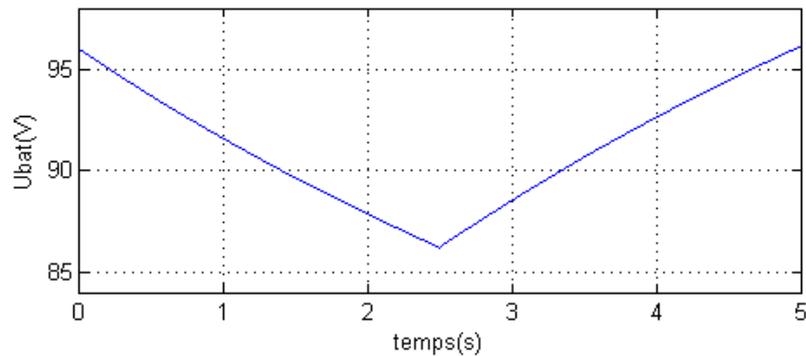
Simulation des caractéristiques de la batterie



(a)

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque



(b)

Fig.III.22 : simulation des caractéristiques de la batterie

Le courant négatif à l'entrée de la batterie veut dire que la batterie est en état de décharge car elle produit de l'énergie au système (processus de décharge) tandis qu'un courant positif à l'entrée veut dire que la batterie est en état de charge (processus de charge).

Nous avons donné un courant de référence (fig. III.22.a) et nous avons observé les variations de la tension aux bornes de la batterie :

[0, 2.5s] : le courant de référence est négatif, nous remarquons la chute de tension aux bornes de la batterie (processus de décharge)

[2.5, 5s] : le courant de référence est positif, nous remarquons l'augmentation de la tension aux bornes de la batterie (processus de charge)

Ceci est assuré grâce au régulateur proportionnel dérivé.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité la commande des éléments suivants : la chaîne de conversion éolienne, la tension du bus continu, le générateur photovoltaïque et finalement le système de stockage d'énergie par batterie d'accumulateurs.

Pour la commande du système éolien, nous avons en premier temps utilisé la commande par la méthode de Lyapunov, le problème de cette commande est qu'elle n'est pas robuste vis-à-vis des variations paramétriques. Pour y remédier nous avons utilisé la commande par les modes glissants qui est plus robuste envers les variations paramétriques.

Chapitre III

Commande du système hybride éolien-photovoltaïque

Concernant la commande du système photovoltaïque, nous avons exploité un algorithme MPPT du type (P&O) afin d'extraire la puissance maximale du Gpv. Cet algorithme s'est montré efficace pendant les variations de l'ensoleillement.

La commande du convertisseur relié à la batterie (hacheur réversible en courant) permet d'assurer le réglage de la charge et la décharge de la batterie, garantissant ainsi un bon usage de la batterie.

Nous avons également présenté la structure de réglage qui peut assurer le réglage de la tension des bus continus : le bus continu du convertisseur AC-DC-AC (CCM-CCR) et le bus continu sur lequel sont branchés le Gpv, la batterie et le convertisseur à MLI pour le transfert de puissance entre le bus DC et le bus AC.

Dans ce chapitre, nous avons simulé séparément le fonctionnement de chaque bloc du système hybride. Dans le chapitre qui va suivre nous étudions le fonctionnement du système hybride en tenant compte des interactions pouvant existées entre les différents blocs de ce système.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent, l'étude, la modélisation et la simulation d'un système de production d'électricité, à partir de ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne) et équipé d'un système de stockage par des batteries d'accumulateurs.

Arrivés au terme de ce projet et avant d'en évoquer les perspectives, nous proposons de faire un bilan rapide des principaux résultats obtenus, à travers le résumé du contenu des chapitres qui ont été développés.

En premier, nous avons présenté les connaissances de base relatives aux énergies renouvelables, plus particulièrement éoliennes et photovoltaïques et avons rappelé que l'Algérie dispose d'un potentiel important dans ce secteur. Après avoir passé en revue quelques systèmes hybrides, nous avons fait le choix d'une structure qui soit appropriée à un petit producteur abonné du réseau électrique.

Pour atteindre les objectifs astreints à ce projet, il était nécessaire de passer par l'étape de modélisation de chaque dispositif du système hybride. Ainsi, nous avons effectué tour à tour la représentation mathématique de l'aérogénérateur et de son alimentation par convertisseur AC-DC-AC, de la chaîne photovoltaïque et enfin du système de stockage par batterie d'accumulateurs. Bien sûr que les modèles établis intègrent les paramètres métrologiques (température, ensoleillement, vitesse du vent) influant sur la production de l'électricité éolienne et photovoltaïque.

Une bonne exploitation du système hybride exige une sûreté de fonctionnement, une bonne durée de vie et surtout une optimisation de l'énergie produite. Ces objectifs peuvent être atteints entièrement ou partiellement par une commande appropriée de chaque dispositif du système. En effet, l'optimisation de l'énergie éolienne est obtenue en déterminant la référence de la puissance à extraire par un algorithme du type 'MPPT' pour commander la MADA. La synthèse de la commande de cette dernière a été effectuée en appliquant deux méthodes : celle basée sur le critère de stabilité de Lyapunov et celle des modes glissants. De même, la maximisation de l'énergie produite par le Gpv a nécessité le recours à la MPTT du type 'perturber observer' pour piloter le hacheur boost intercalé entre le bus continu et le Gpv.

Nous avons également proposé une commande de la charge et la décharge de la batterie à travers un hacheur réversible de courant placé entre celle-ci et le bus continu. Ce dispositif doit pouvoir assurer une durée de vie satisfaisante de la batterie.

Conclusion générale

Un bon fonctionnement du convertisseur AC-DC-AC qui est une interface entre le rotor de la MADA et le réseau AC nécessite un réglage de la tension du bus continu. Là aussi, nous avons proposé un réglage PI avec découplage de la tension du bus continu.

Pour valider les méthodes proposées, nous avons simulé numériquement le fonctionnement de chaque dispositif en tenant compte des conditions inhérentes à son exploitation. Ainsi, nous avons pu vérifier que les méthodes proposées permettent effectivement de réaliser les objectifs astreints.

Le but intime de notre travail est l'exploitation du système hybride par une gestion rationnelle des ressources disponibles. En effet, dans le cadre de la structure proposée à l'étude et des objectifs du petit producteur et abonné au réseau électrique, nous avons dégagé un organigramme pour une gestion rigoureuse de ce système. Ensuite, nous avons simulé le fonctionnement de ce système dans les situations les plus importantes :

- fonctionnement de jour et charge de la batterie à partir du Gpv ;
- fonctionnement de nuit et décharge de la batterie aux heures de forte demande.

Ces situations ont montré que le petit producteur a effectivement dégagé un surplus d'énergie fourni au réseau électrique tout en s'astreignant aux exigences du gestionnaire du réseau électrique. De plus, nous avons constaté qu'effectivement, un système hybride équipé d'un système de stockage permet une bonne flexibilité dans la gestion de l'énergie.

La filière concernant les systèmes hybrides d'exploitation des énergies renouvelables est relativement neuve sur le plan mondial. Son champ d'application est très vaste et nécessite l'apport de tous les spécialistes travaillant indépendamment sur les différentes parties du système.

Les résultats de travail présentés dans ce mémoire permettent de dégager les perspectives suivantes :

- Parvenir à valider les résultats théoriques par des résultats expérimentaux
- Optimisation du système hybride afin de réduire le coût de l'installation
- Tenir compte, lors de la modélisation, de l'influence des perturbations du réseau sur le système
- Utilisation des techniques intelligentes de poursuite des points de puissance maximale: réseaux de neurones, logique floue...

Références bibliographiques

[1] BENLAHRACHE Mohamed, SADOUD Sofiane, Commandes non-linéaires et adaptatives d'une éolienne basée sur une MADA, Projet de fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2011

[2] DEKKICHE Abdelillah, Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge, Mémoire pour l'obtention de la Maîtrise en Génie de la Production Automatisée, Ecole Supérieure de Technologie, Montréal, 2008

[3] NASA Surface meteorology and Solar Energy: www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/ RETScreen

RETScreen Data (Mars 2013)

[4] www.mathwork.com

[5] Olivier GERGAUD , Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur-thèse de doctorat-Ecole Normale Supérieure de Cachan-2002

[6] BELAOUDMOU Oussama, BAHLOUL Abdelkrim, Etude et Commande d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau ,mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur et du diplôme de Master en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger,2012

[7] FELLAH Boumediene, Système hybride photovoltaïque -éolien de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah, Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid, TLEMEN,2012

[8] Bouharchouche Abderrezzaq,Bouabdallah Ahmed Nasrallah, Etude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne, Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2010

[9] Benamira Brahim, Behloui Asma, Commande non-linéaire de la puissance optimale d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA couplée au réseau électrique, Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état et de master en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2012

[10] J. Bosche , A.Kebairi et A. El Hajjaji ,Commande non-linéaire d'une grande éolienne-Laboratoire : Modélisation, information et systèmes (MIS),Université de Picardie Jules Verne, Amiens, France , 2009

Références bibliographiques

- [11] Pragya Nema, R.K. Nema, Saroj Rangnekar , A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review, Maulana Azad National Institute of Technology, India, 2009
- [12] D. Rekioua, Z. Roumila , T. Rekioua ,Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel , Université A. Mira, Bejaia,Algérie, 2008
- [13] Tahar Mehdi ,DESERTEC : Energies renouvelables : L'Algérie ne veut pas être en reste ,LCE Algérie,2011
- [14] M'hamed Houaoura,Energies nouvelles: Le Sahara pourrait alimenter toute l'Europe, Journal El Watan,2010
- [15] Tahar A.O. l'Algérie exportera de l'électricité vers l'Allemagne, La Voix de L'Oranie ,2011
- [16] Site officiel du Ministère de l'Energie et des Mines : www.mem-algeria.org
- [17] Dr Nachida Kasbadji Merzouk, Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?-Centre de Développement des Energies Renouvelables -2008
- [18]L'observatoire des énergies renouvelables,France: www.energies-renouvelables.org/
- [19] <http://electronique1.blogspot.com>
- [20] C.F. Lu, C.C. Liu, and C.J. Wu, dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability , IEE proceedings, generation, transmission an distribution, volume 142(4) IEE Stevenage, Herts, UK, July 1995
- [21] FERRAI AHMED , Dimensionnement des infrastructures utilisant diverses sources énergétiques renouvelables potentielles pour l'alimentation électrique d'un village, Mémoire de magister,Ecole Nationale Polytechnique,Alger, 2008
- [22] Zakaria ZIADI , Commande Hybride d'une Maison à Energie Positive, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique,Alger,2010
- [23] HELALI Kamelia, modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative, mémoire de magistère en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique,Alger, 2012
- [24] DJOUDI Abdelhak, Commandes Non Linéaires d'une Eolienne à base d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Pilotée Par un Convertisseur Matriciel, Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique,Alger, 2010
- [25]Calcul des capacité des batteries : www.bannerbatteries.com

Références bibliographiques

- [26] BISKER asma, mériem CHIRI, Commande d'un Système Photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau , Ecole Nationale Polytechnique , Alger, 2012
- [27] Giovanni petrone, Giovanni Spagnuolo, Solar power conversion, Univertà di Salerno, Salerno, Italie 2011
- [28] D. Rovas ,D. Kolokotsa, E. Kosmatopoulos, K. Kalaitzakis, A roadmap towards intelligent net zero- and positive- energy buildings, Technical University of Crete, Grèce ,2010
- [29] S.R. Vosen, J.O. Keller ,Hybrid energy storage systems for stand-alone electric power systems: optimization of system performance and cost through control strategies, Sandia National Laboratories, California, USA
- [30] O. GERGAUD, G. ROBIN, B. MULTON and H. BEN AHMED. "Energy Modeling of a Lead-Acid Battery within Hybrid Wind /Photovoltaic Systems". EPE, Toulouse, France, 2003.
- [31] L. CASTANER and S. SILVESTRE., Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice .England, Wiley, 2002, pp.41-103.
- [32] Nazila Kahina Hannachi-Belkadi, Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie, Thèse de Doctorat, Université Paris Est, France, 2008.

Annexe 01

Modélisation de la MADA

Annexe 01

Modélisation de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Afin d'établir un modèle simple, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, citons :

- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température
- La machine est constituée d'un stator et d'un rotor cylindrique et coaxiaux dont les enroulements sont symétriques triphasés et répartis d'une façon sinusoïdale dans les encoches. Les trois enroulements statoriques, respectivement rotoriques, sont supposés identiques.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme ce qui conduit à une perméance d'entrefer constante
- L'effet des encoches est négligeable.
- Les forces magnétomotrices d'entrefer ont une distribution spatiale sinusoïdale
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte ;
- La composante homopolaire du courant est nulle.
- Le circuit magnétique est considéré non saturé et ayant une perméabilité constante
- Les pertes ferromagnétiques sont négligeables

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [01]

Mise en équation➤ **Equations électriques**

En appliquant la loi de Faraday et la loi d'Ohm à chaque phase du stator et du rotor nous aboutissons aux formes matricielles suivantes :

- **Pour le stator :**

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} [\Psi_s]_{abc} \quad (A1.1)$$

- **pour le rotor :**

$$[V_r]_{abc} = [R_r][i_r]_{abc} + \frac{d}{dt} [\Psi_r]_{abc} \quad (A1.2)$$

➤ **Equations magnétiques**

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne. Alors les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques, sont données par les expressions suivantes :

- **Pour le stator :**

$$[\Psi_s]_{abc} = [L_s][i_s]_{abc} + [M_{sr}][i_r]_{abc} \quad (A1.3)$$

- **Pour le Rotor :**

$$[\Psi_r]_{abc} = [L_r][i_r]_{abc} + [M_{sr}]^T [i_s]_{abc} \quad (A1.4)$$

- **Les tensions, courants, flux et inductance statoriques :**

$$[V_s]_{abc} = \begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix}, [i_s]_{abc} = \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix}, [\Psi_s]_{abc} = \begin{pmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \end{pmatrix}, [L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}$$

- **Les tensions, courants, flux et inductance rotoriques :**

$$[V_r]_{abc} = \begin{pmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{pmatrix}, [i_r]_{abc} = \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix}, [\Psi_r]_{abc} = \begin{pmatrix} \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{pmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

- **La matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor :**

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} m_{sr} \cos(\theta) & m_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ m_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta) & m_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ m_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & m_{sr} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (A1.5)$$

Avec :

- L_s : La matrice d'inductance statorique ;
- L_r : La matrice d'inductance rotorique ;

- Msr est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor.
- ls : C'est l'inductance propre d'une phase statorique ;
- lr : C'est l'inductance propre d'une phase rotorique ;
- ms : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques ;
- mr : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques ;
- msr : C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

➤ Equation mécanique

La dernière relation importante complétant le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, est l'équation fondamentale mécanique décrivant la dynamique du rotor [01]. Cette équation est obtenue par l'application de la relation fondamentale de la dynamique. Elle est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - C_{vis} \quad (A1.6)$$

Avec:

- C_{em} : est le couple électromagnétique ;
- C_r : est le couple résistif ;
- C_{vis} : est le couple visqueux.

La résolution analytique dans ce repère est très difficile, et pour cette raison nous allons utiliser la transformée de Park qui va nous permettre d'avoir un système d'équations à coefficients constants [01].

Transformation de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée- biphasée et d'une rotation. Elle consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes (a, b, c) en un système équivalent à deux enroulements biphasés en rotation d'axes (d, q) [01].

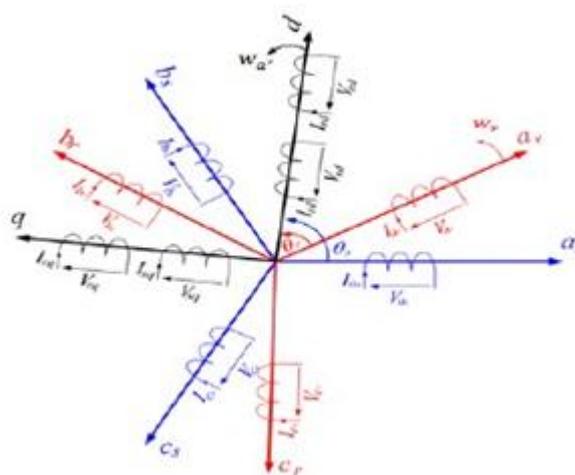


Figure A1.1 Passage du repère (a, b, c) vers le repère (d, q)

Où :

- θ : Est l'angle entre l'axe rotorique ar et l'axe statorique as ;
- θ_s : est l'angle entre l'axe statorique , et l'axe de Park direct d ;
- θ_r : Est l'angle entre l'axe rotorique , et l'axe de Park direct d ;
- w_r : Est la vitesse angulaire électrique rotorique;
- w_a : Est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q) .
- Pour effectuer cette transformation une matrice de passage est nécessaire, cette dernière, appelée matrice de Park s'obtient par la diagonalisation des matrices inductances.

❖ Diagonalisation des matrices inductances :

Pour accomplir cette diagonalisation, une recherche de valeurs propres s'impose comme suit :

$$\det ([L] - \lambda[I]_3) = 0$$

La résolution du système obtenu, nous donne ces valeurs propres :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_2 = l - m ; \\ \lambda_3 &= l + 2 . \end{aligned}$$

Donc les matrices inductances $[L_s]$ et $[L_r]$ dans la nouvelle base s'écrivent :

$$\begin{aligned} [L_s] &= \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - 2m_s \end{bmatrix} \\ [L_r] &= \begin{bmatrix} l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r - 2m_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Après avoir trouvé les valeurs propres, on cherchera les vecteurs propres linéairement indépendants correspondants qui donneront naissance à la matrice de passage P et cela est réalisé à l'aide de la relation suivante :

$$[L] [v_i] = \lambda_i [v_i]$$

La résolution de cette équation pour chacune des valeurs propres trouvées précédemment permet d'avoir les vecteurs propres suivant :

- Pour λ_1 : $v_1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix}$
- Pour λ_2 : $v_2 = \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix}$

- Pour $\lambda_3 : v_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

Le regroupement de ces vecteurs propres nous donne la matrice de passage :

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

Pour simplifier les calculs, on cherchera à avoir une matrice orthonormée ($[M]^{-1}=[M]^T$)

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

$$[P(\theta)]^{-1}=[P(\theta)]^T$$

Application de la transformation de Park

En appliquant la transformée de Park sur les équations électriques et magnétiques, nous obtenons :

- **Equations électriques :**

- ✓ **Pour le stator :**

$$(v_s)_{abc} \rightarrow (v_s)_{dq}$$

$$P(\theta_s)(v_s)_{dq} = P(\theta_s)[R_s]_{dq} P^T(\theta_s)P(\theta_s)(i_s)_{dq} + \frac{d}{dt}[P(\theta_s)(\psi_s)_{dq}]$$

$$(v_s)_{dq} = [R_s]_{dq}(i_s)_{dq} + \frac{d(\psi_s)_{dq}}{dt} + P^T(\theta_s) \frac{d}{dt} [P(\theta_s)] (\psi_s)_{dq}$$

$$\frac{d}{dt} [P(\theta_s)] (\psi_s)_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} -\sin(\theta_s) & -\cos(\theta_s) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{sq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_0 \end{pmatrix}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \omega_s \begin{bmatrix} -\psi_{sd} \sin(\theta_s) - \psi_{sq} \cos(\theta_s) \\ -\psi_{sd} \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) - \psi_{sq} \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ -\psi_{sd} \sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) - \psi_{sq} \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$P^T(\theta_s) \frac{d}{dt} [P(\theta_s)] (\psi_s)_{dq} = \omega_s \begin{bmatrix} -\psi_{sq} \\ \psi_{sd} \\ 0 \end{bmatrix}$$

A la fin on aura :

$$(v_s)_{dq} = \begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s i_{ds} + \frac{d(\psi_{ds})}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ R_s i_{qs} + \frac{d(\psi_{qs})}{dt} - \omega_s \psi_{sd} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d(\Psi_{ds})}{dt} - \omega_s \Psi_{sq} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d(\Psi_{qs})}{dt} - \omega_s \Psi_{sd} \end{cases} \quad (A1.7)$$

✓ **Pour le rotor :** de la même manière que précédemment, on aura :

$$(v_r)_{dq} = \begin{pmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s i_{dr} + \frac{d(\Psi_{dr})}{dt} - \omega_s \Psi_{rq} \\ R_s i_{qr} + \frac{d(\Psi_{qr})}{dt} - \omega_s \Psi_{rd} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d(\Psi_{dr})}{dt} - \omega_s \Psi_{rq} \\ v_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d(\Psi_{qr})}{dt} - \omega_s \Psi_{rd} \end{cases} \quad (A1.8)$$

Où : $\omega_r = \omega_s - \omega_m$

• **Equations magnétiques :**

✓ **Pour le stator :**

$$(\Psi_s)_{abc} = [L_s]_{dq} (i_s)_{abc} + [M_{sr}] (i_r)_{abc}$$

$$[P(\theta_s)] (\Psi_s)_{dq} = P(\theta_s) [L_s]_{dq} P^T(\theta_s) P(\theta_s) (i_s)_{dq} + P(\theta_s) [M_{sr}]_{dq} P^T(\theta_s) P(\theta_r) (i_r)_{dq}$$

A la fin on aura :

$$(\Psi_s)_{dq} = [L_s]_{dq} (i_s)_{dq} + P^T(\theta_s) [M_{sr}]_{abc} P(\theta_r) (i_r)_{dq}$$

Avec :

θ_r : L'angle entre l'axe d et une phase du rotor.

θ_s : L'angle entre l'axe d et une phase du stator

θ : L'angle qui est entre une phase du stator et une du rotor.

Et on a la relation suivante entre ces angles : $\theta_s = \theta_r + \theta$

Pour le calcul de la matrice $P^T(\theta_s) [M_{sr}]_{abc} P(\theta_r)$ on aura besoin des transformations trigonométriques (avec la relation : $\theta_s = \theta_r + \theta$) pour avoir à la fin :

$$P^T(\theta_s) [M_{sr}]_{abc} P(\theta_r) = \frac{3}{2} m_{sr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En posant :

$\frac{3}{2} m_{sr} = M$, on obtient :

$$P^T(\theta_s) [M_{sr}]_{abc} P(\theta_r) = M \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donc le flux pourra s'écrire :

$$(\Psi_s)_{dq} = \begin{pmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{A1.9})$$

✓ **Pour le rotor :**

On aura de la même manière

$$(\Psi_r)_{dq} = \begin{pmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ L_s i_{qr} + M i_{qs} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_s i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{A1.10})$$

• **Equation mécanique :**

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{P^2}{J} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) - \frac{K_f}{J} \omega_m + \frac{P}{J} C_g \quad (\text{A1.11})$$

En regroupant les équations (A1.6) jusqu'à (A1.10) nous obtenons le système d'équations dans le repère biphasé (d, q) :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d(\Psi_{ds})}{dt} - \omega_s \Psi_{sq} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d(\Psi_{qs})}{dt} - \omega_s \Psi_{sd} \\ v_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d(\Psi_{dr})}{dt} - \omega_s \Psi_{rq} \\ v_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d(\Psi_{qr})}{dt} - \omega_s \Psi_{rd} \\ \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Psi_{dr} = L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_s i_{qr} + M i_{qs} \\ \frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{P^2}{J} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) - \frac{K_f}{J} \omega_m + \frac{P}{J} C_g \end{array} \right. \quad (\text{A1.12})$$

A partir du système d'équations (A1.12) et en prenant comme vecteur d'état

$x^T = [i_{ds} \ i_{qs} \ \psi_{ds} \ \psi_{qs} \ \omega_m]^T$, nous allons faire sortir les équations mathématiques qui représentent notre machine

Des équations (A1.12a) et (A1.12.b) nous allons tirer directement

$$\dot{\psi}_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_a \psi_{qs} + v_{ds}$$

$$\dot{\psi}_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_a \psi_{ds} + v_{qs}$$

De (A1.11.e) et (A1.11.f) on tire i_{dr} et i_{qr}

$$i_{dr} = -\frac{I_s}{M} i_{ds} + \frac{1}{M} \psi_{ds} \quad (\text{A1.13})$$

$$i_{qr} = -\frac{I_s}{M} i_{qs} + \frac{1}{M} \psi_{qs} \quad (\text{A1.14})$$

En remplaçant (A1.13) et (A1.14) dans (A1.12.g) et (A1.12.h) ; on aura

$$\psi_{dr} = \left(M - \frac{I_s I_r}{M}\right) i_{ds} + \frac{I_r}{M} \psi_{ds} \quad (\text{A1.15})$$

$$\psi_{dr} = \left(M - \frac{I_s I_r}{M}\right) i_{qs} + \frac{I_r}{M} \psi_{qs} \quad (\text{A1.16})$$

Or $\sigma = 1 - \frac{M^2}{I_s I_r}$ donc on aboutit

$$\psi_{dr} = -\frac{I_s I_r}{M} \sigma i_{ds} + \frac{I_r}{M} \psi_{ds} \quad (\text{A1.17})$$

$$\psi_{dr} = -\frac{I_s I_r}{M} \sigma i_{qs} + \frac{I_r}{M} \psi_{qs} \quad (\text{A1.18})$$

En remplaçant dans (A1.12.c) et (A1.12.d) : i_{dr} , i_{qr} , ψ_{dr} et ψ_{qr} on aura :

$$\dot{\psi}_{dr} = \frac{R_r I_s}{M} i_{ds} - \frac{R_r}{M} \psi_{ds} - \frac{I_s I_r}{M} \sigma (\omega_a - \omega_m) i_{qs} + \frac{I_r}{M} (\omega_a - \omega_m) \psi_{qs} + v_{dr} \quad (\text{A1.19})$$

$$\dot{\psi}_{dr} = \frac{R_r I_s}{M} i_{qs} - \frac{R_r}{M} \psi_{qs} - \frac{I_s I_r}{M} \sigma (\omega_a - \omega_m) i_{ds} + \frac{I_r}{M} (\omega_a - \omega_m) \psi_{ds} + v_{qr} \quad (\text{A1.20})$$

En dérivant par rapport au temps les équations (A1.17) et (A1.18) :

$$\dot{\psi}_{dr} = -\frac{I_s I_r}{M} (\dot{i}_{ds}) + \frac{I_r}{M} [-R_s i_{ds} + \omega_a \psi_{qs} + v_{ds}] \quad (\text{A1.20})$$

$$\dot{\psi}_{qr} = -\frac{I_s I_r}{M} \sigma (\dot{i}_{qs}) + \frac{I_r}{M} [-R_s i_{qs} + \omega_a \psi_{ds} + v_{qs}] \quad (\text{A1.21})$$

En égalant (A1.20) et (A1.19) on aura :

$$\dot{i}_{ds} = -\frac{1}{I_s I_r \sigma} [R_s I_s + R_s I_r] i_{ds} + (\omega_a - \omega_m) i_{qs} + \frac{R_r}{I_s I_r \sigma} \psi_{ds} + \frac{1}{I_s \sigma} \omega_m \psi_{qs} + \frac{1}{I_s \sigma} v_{ds} - \frac{M}{I_s I_r \sigma} v_{dr}$$

En égalant aussi (A1.21) et (A1.20) on aura :

$$\dot{i}_{qs} = -(\omega_a - \omega_m) i_{ds} - \frac{1}{I_s I_r \sigma} [R_s I_s + R_s I_r] i_{qs} + \frac{1}{I_s \sigma} \omega_m \psi_{ds} + \frac{R_r}{I_s I_r \sigma} \psi_{qs} + \frac{1}{I_s \sigma} v_{qs} - \frac{M}{I_s I_r \sigma} v_{qr}$$

Et d'après la relation fondamentale de la dynamique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_s - C_r \quad (\text{A1.22})$$

Qui peut s'écrire :

$$\dot{\omega}_m = \frac{P_2}{j} [\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}] - \frac{K_f}{j} \omega_m + \frac{P}{j} C_{tur} \quad (\text{A1.23})$$

Nous obtenons un modèle d'état :

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{I_s I_r \sigma} [R_s I_s + R_s I_r] x_1 + (\omega_a - \omega_m) x_2 + \frac{R_r}{I_s I_r \sigma} x_3 + \frac{1}{I_s \sigma} x_4 + x_5 + \frac{1}{I_s \sigma} v_{ds} - \frac{M}{I_s I_r \sigma} v_{dr}$$

$$\dot{x}_2 = -(\omega_a - \omega_m) x_1 - \frac{1}{l_s l_r \sigma} [R_s I_s + R_s I_r] x_2 + \frac{1}{l_s \sigma} x_3 x_5 + \frac{R_r}{l_s l_r \sigma} x_4 + \frac{1}{l_s \sigma} v_{ds} - \frac{M}{l_s l_r \sigma} v_{qr}$$

$$\dot{x}_3 = -R_s x_1 + \omega_a x_4 + v_{ds}$$

$$\dot{x}_4 = -R_s x_2 - \omega_a x_3 + v_{qs}$$

$$\dot{x}_5 = \frac{P_2}{j} (x_3 x_2 - x_4 x_1) - \frac{K_f}{j} x_5 + \frac{P}{j} C_{tur}$$

Qui peut se mettre sous la forme contractée suivante

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 x_1 + (\omega_a - \omega_m) x_2 + a_2 x_3 + a_3 x_4 x_5 + a_3 v_{ds} - a_4 v_{dr} \\ \dot{x}_2 = -(\omega_a - \omega_m) x_1 - a_1 x_2 + a_3 x_3 x_5 + a_2 x_4 + a_3 v_{ds} - a_4 v_{qr} \\ \dot{x}_3 = -b_1 x_1 + \omega_a x_4 + v_{ds} \\ \dot{x}_4 = -b_1 x_2 - \omega_a x_3 + v_{qs} \\ \dot{x}_5 = c_1 (x_3 x_2 - x_4 x_1) - c_2 x_5 + c_3 C_{tur} \end{cases}$$

Avec

$$a_1 = \frac{1}{l_s l_r \sigma} [R_s I_s + R_s I_r]; a_2 = \frac{R_r}{l_s l_r \sigma}; a_3 = \frac{1}{l_s \sigma}; a_4 = \frac{M}{l_s l_r \sigma}; b_1 = R_s; c_1 = \frac{P_2}{j};$$

$$c_2 = \frac{K_f}{j}; c_3 = \frac{P}{j}$$

II.1.1.2 choix du référentiel :

Pour simplifier d'avantage ce modèle, nous avons choisi de travailler dans le référentiel lié au vecteur tension statorique, comme montré à la figure (A.2).

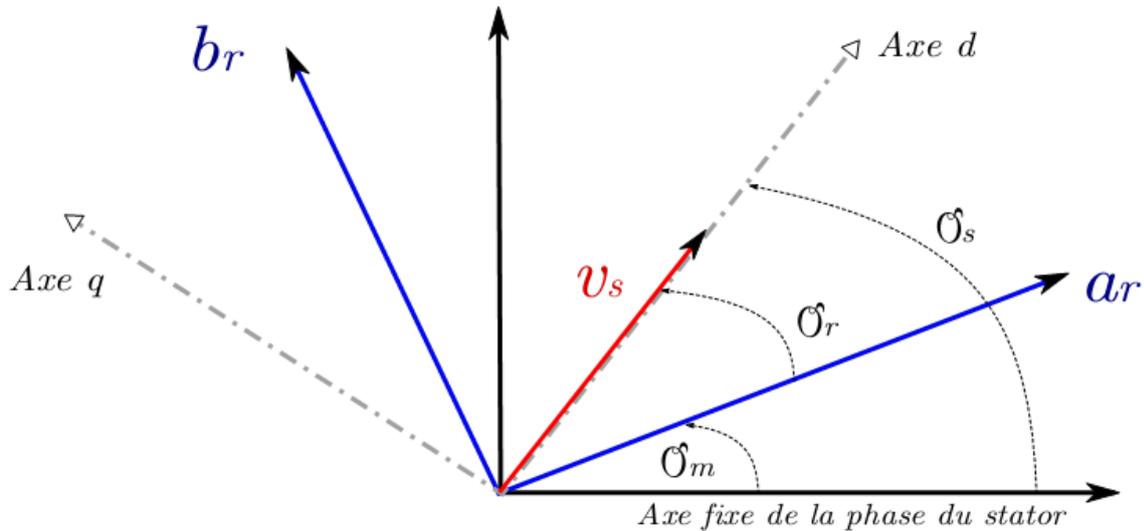


Figure 1.2A Orientation de la tension statorique sur l'axe d

En prenant en considération l'hypothèse de l'orientation du repère suivant le vecteur de la tension statorique, nous pouvons déduire les relations suivantes:

$$\begin{cases} v_{ds} = v_s \\ v_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{A1.24})$$

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

$$\begin{aligned} P_s &= v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s &= v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{aligned} \quad (\text{A1.25})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et en tenant compte de la condition (A1.25), il résulte que :

$$\begin{aligned} P_s &= v_s i_{ds} \\ Q_s &= -v_s i_{qs} \end{aligned} \quad (\text{A1.26})$$

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

$$v_{ns} = R_s i_{ns} + \frac{d}{dt} \psi_{ns} \quad (\text{A1.27})$$

Si nous négligeons la résistance, cette relation devient

$$v_{ns} = \frac{d}{dt} \psi_{ns} \quad (\text{A1.28})$$

Cette relation montre qu'un repère lié au vecteur tension statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur flux statorique et qu'il est en retard de $(\pi/2)$ par rapport à ce dernier [25].

Nous pouvons alors écrire:

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= 0 \\ \psi_{qs} &= -\psi_s \end{aligned} \quad (\text{A1.29})$$

II.1.1.3 Nouvelles équations de la MADA dans ce référentiel

En prenant en considération les équations (A1.24) et (A1.27), le modèle de la MADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte le sera également

Nous pouvons écrire alors les équations des tensions statoriques et rotoriques

$$v_s = R_s i_{ds} + \omega_s \psi_s \quad (\text{A1.30})$$

$$0 = R_s i_{qs} - \frac{d}{dt} \psi_s \quad (\text{A1.31})$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_s - \omega_m \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \quad (\text{A1.32})$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} - \omega_s - \omega_m \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (\text{A1.33})$$

Les équations des tensions statoriques et rotoriques

$$0 = l_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (\text{A1.34})$$

$$-\psi_s = l_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (\text{A1.35})$$

$$\psi_{dr} = l_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (\text{A1.36})$$

$$\psi_{qr} = l_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{A1.37})$$

II.1.1.3.1 Relations entre courants rotoriques et statoriques

Des équations (A1.32) et (A1.33) nous pouvons tirer les relations entre courants rotoriques et courants statoriques :

$$i_{ds} = -\frac{M}{l_s} i_{dr} \quad (\text{A1.38})$$

$$i_{qs} = -\frac{1}{l_s} \psi_s - \frac{M}{l_s} i_{qr} \quad (\text{A1.39})$$

En remplaçant dans les expressions des composantes « directe et quadrature » des équations des flux rotoriques, nous obtenons :

$$\psi_{dr} = \sigma l_r i_{dr} \quad (\text{A1.40})$$

$$\psi_{qr} = \sigma l_r i_{qr} - \frac{M}{l_s} \psi_s \quad (\text{A1.41})$$

L'expression du couple devient :

$$C_{em} = -P \frac{M}{l_s} \psi_s i_{dr} \quad (\text{A1.42})$$

Nous voyons de manière claire que l'orientation du repère selon l'axe du vecteur de la tension statorique nous a permis d'écrire le couple électromagnétique de manière analogue à celui de la machine à courant continu.

II.1.1.3.2 Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent [22]:

$$p_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (\text{A1.43})$$

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (\text{A1.44})$$

Nous avons donc ψ_{qs} qui est maintenu constant. Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine dépendant du courant rotorique d'axe d. De l'équation (A1.24) nous pouvons réécrire les expressions des puissances statoriques comme suit :

$$p_s = v_s i_{ds} \quad (\text{A1.45})$$

$$Q_s = -v_s i_{qs} \quad (\text{A1.46})$$

En remplaçant (A1.36) et (A1.37) données auparavant dans les équations (A1.45) et (A1.46), nous obtenons

$$p_s = -v_{ds} \frac{M}{l_s} i_{dr} \quad (\text{A1.47})$$

$$Q_s = v_{ds} \frac{M}{l_s} i_{qr} + \frac{v_{ds}}{l_s} \psi_s \quad (\text{A1.48})$$

Nous avons, d'après la supposition précédente :

$$\psi_s = \frac{v_s}{\omega_s}$$

L'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q_s = \frac{v_s^2}{\omega_s l_s} + \frac{M v_s}{l_s} i_{qr} \quad (\text{A1.49})$$

Si nous considérons l'inductance magnétisante M constante et compte tenu du repère choisi et des approximations faites, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe d et la puissance réactive au courant rotorique d'axe q à la constante près ($\frac{v_s^2}{\omega_s l_s}$) imposée par le réseau

II.1.1.3.3 Relation entre courants rotoriques et tensions rotoriques

Des équations (A1.38) et (A1.39) nous pouvons tirer :

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = \sigma l_r \frac{di_{dr}}{dt} \quad (\text{A1.50})$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = \sigma l_r \frac{di_{qr}}{dt} - \frac{M}{l_s} \frac{d\psi_s}{dt} \quad (\text{A1.51})$$

En remplaçant ces expressions dans les équations (A1.30) et (A1.31) nous aboutissons :

$$v_{dr} = (R_r + \sigma l_r) i_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \sigma l_r i_{qr} + \frac{M}{l_s} (\omega_a - \omega_m) \psi_s \quad (\text{A1.52})$$

$$v_{qr} = (R_r + \sigma l_r) i_{qr} + (\omega_a - \omega_m) \sigma l_r i_{dr} - \frac{M}{l_s} \frac{d\psi_s}{dt} \quad (\text{A1.53})$$

En posant $\omega_s - \omega_m = g \omega_s$ et en tenant compte de la négligence de la résistance statorique, nous pouvons réécrire les expressions (A1.52) et (A1.53) comme suit :

$$v_{dr} = (R_r + \sigma l_r) i_{dr} - g \omega_s \sigma l_r i_{qr} + \frac{M v_s}{l_s} g \quad (\text{A1.54})$$

$$v_{qr} = (R_r + \sigma l_r) i_{qr} + g \omega_s \sigma l_r i_{dr} \quad (\text{A1.55})$$

v_{dr} et v_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour

obtenir les courants rotoriques voulus et par la même occasion, les puissances statoriques active et réactive désirées, σl_r est le terme de couplage entre les deux axes, $\frac{Mv_s}{l_s} g$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation

Les équations précédentes montrent que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence près des couplages, chaque axe peut être commandé chacun avec son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe **d** rotorique et la puissance réactive pour l'axe **q** 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.

Annexe 2

- Paramètres de la cellule photovoltaïque utilisée

- Surface de la cellule : 126.6 cm^2
- Courant de court-circuit : $I_{sc} = 4.3423 \text{ A}$
- Courant de saturation : $I_0 = 126.6 \cdot 10^{-11} \text{ A}$
- La résistance série : $R_s = 0.01 \Omega$
- Coefficient d'idéalité $n = 1$ [30]

Dans les conditions normales de température et d'ensoleillement : $T = 25^\circ\text{C}$ et $G = 1000 \text{ W/m}^2$

-Paramètres de la MADA :

Valeurs nominales : 4 kW, 220/380V-50Hz , 15/8.6A , 1440 tours /min , p=2

- Résistance statorique : $R_s = 1.2 \Omega$
- Résistance rotorique : $R_r = 1.8 \Omega$
- Inductance mutuelle : $M = 0.15 \text{ H}$
- Inductance cyclique statorique : $L_s = 0.1554 \text{ H}$
- Inductance cyclique rotorique : $L_r = 0.1568 \text{ H}$
- Inertie de la MADA : $J_g = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
- Coefficient de frottement : $f = 0.001 \text{ N.m.s/rad}$

-Paramètres de la cascade éolienne :

- Les tensions du réseau sont équilibrées d'amplitude 220 V
- La ligne est caractérisée par une résistance $R = 0.25$ et une inductance $L = 1 \text{ mH}$
- La tension référence du redresseur : $U_{red_ref} = 600 \text{ V}$
- La largeur de la bande d'hystérésis est $\Delta i = 0.01 \text{ A}$
- La capacité du filtrage est $C = 1 \text{ mF}$
- Le gain du multiplicateur de la turbine : 8.23

-caractéristiques de la turbine

- Nombre de pâles : 03
- Le rayon de la turbine : 2.4 m
- La densité de l'air : 1.225 kg/m^3
- $\lambda_{opt} = 8.27$
- $Cp_{opt} = 0.4879$

-Les gains des régulateurs PI

Régulateur PI de la tension U_{red} du CCR

$$K_p = 22.5$$

$$K_i = 3.34$$

Annexe 02

Régulateur PI du courant d'axe (d) pour le réglage en cascade de la tension Ured du CCR :

$$K_{p1}=1500$$

$$K_{i1}=5$$

Régulateur PI du courant d'axe (q) pour le réglage en cascade de la tension Ured du CCR :

$$K_{p2}=1500$$

$$K_{i2}=5$$

Régulateur PI de la tension Ucd du CONV :

$$K_p=22.5$$

$$K_I=3.34$$

Régulateur PI du courant d'axe (d) pour le réglage en cascade de la tension Udc du CONV :

$$K_{p1}=150$$

$$K_{i1}=7.5$$

Régulateur PI du courant d'axe (q) pour le réglage en cascade de la tension Udc du CONV

$$K_{p2}=300$$

$$K_{i2}=15$$

Régulateur Non linéaire de la puissance active de la MADA

- $K_1=1.25$
 $K_{s1}=0.5$
 $K_{i1}=0.01$
- $\lambda_1 = 26$

Régulateur Non linéaire de la puissance réactive de la MADA

- $K_2=1.25$
 $K_{s2}=0.5$
 $K_{i2}=0.01$
- $\lambda_2 = 26$