

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



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

ARDJOUN Sid Ahmed El Mehdi

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences

Spécialité : Electrotechnique
Option : Convertisseurs électromécaniques

Intitulé de la thèse :

**Commande d'un système d'énergies
renouvelables
Multisources relié au réseau électrique**

Présenté devant le jury composé de :

Mr. NACERI Abdelatif	MC A (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
Mr. ABID Mohamed	Pr (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Rapporteur
Mr. BENABDALLAH Mohammed Badreddine	MC A (U.S.T.M.B Oran)	Examineur
Mr. TAHOUR Ahmed	Pr (U. Mascara)	Examineur
Mr. AISSAOUI Abdelghani	Pr (U. Béchar)	Examineur
Mr. BENTAALLAH Abderrahim	MC A (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Examineur

Soutenu le : 18/ 04 / 2016

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ملخص

تقدم هذه الدراسة استراتيجيات التحكم الخطي وغير الخطي لنظام متعدد مصادر الطاقة المتجددة (طاقة الرياح، والطاقة الكهروضوئية)، لتحسين التحكم في القوة الفاعلة والمتفاعلة المولدة و لتكامل الجيد مع الشبكة الكهربائية والمشاركة في خدمة النظام. أولاً، نقدم ونصمم مختلف الهياكل الأنظمة المدروسة (نظام توربينات الرياح متغيرة السرعة تستند على مولد لا متزامن مزدوج التغذية و نظام الضوئية يستند على محولين). ثم نضع استراتيجيات التحكم التي تعتمد على التعديل الكلاسيكي. ثم أجريت الدراسة من خلال إدخال تقنيات التحكم المتين. وينصب التركيز على تصميم وحدات التحكم الغير الخطية بناء على تهجين اثنين من تقنيات التحكم الغير الخطية وهي النمط المنزلق والمنطق الغامض، لتحسين أداء نظام توليد الطاقة. نتائج اختبارات الأداء ومثانة لأستراتيجية التحكم المقترحة مرضية.

كلمات مفتاحية

التحكم بالنمط المنزلق الغامض، نظام متعدد مصادر الطاقة، طاقة الرياح، طاقة الكهروضوئية، الشبكة الكهربائية.

Résumé

Cette étude présente des stratégies linéaires et non-linéaires de contrôle appliquées à la commande d'un système d'énergie renouvelable multisources (éolienne, photovoltaïque), afin de mieux contrôler les puissances actives et réactives générées, pour une bonne intégration au réseau électrique et de participer au service système.

Tout d'abord, nous présentons et nous modélisons les différentes structures des systèmes étudiés (système éolien à vitesse variable basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation et un système photovoltaïque basé sur deux convertisseurs). Puis nous développons une stratégie de commande qui se repose sur la régulation classique PI.

Ensuite l'étude a été menée en introduisant des techniques de commande robuste. L'accent est mis sur la conception de contrôleurs non linéaires basés sur l'hybridation des deux techniques non linéaires de contrôle ; à savoir le mode glissant et la logique floue, afin d'améliorer les performances du système de production d'énergie.

Les résultats des tests de performance et de robustesse des commandes proposées sont satisfaisants.

Mots clés

Commande par mode glissant flou, système multisource, éolienne, photovoltaïque, réseau électrique.

Abstract

This study presents linear and nonlinear control strategies applied to the control of a multi-source renewable energy system (wind turbine, photovoltaic), in order to better control the active and reactive generated power, for a good integration in the grid and participate in the service system.

First, we present and we model the different structures of the studied systems (variable speed wind system based on a double-fed induction generator and a photovoltaic system based on two converters). Then we develop a control strategy that is based on the classic PI control.

Next the study was conducted by introducing techniques of robust control. The focus is on the design of nonlinear controllers based on the hybridization of two nonlinear control techniques; namely the sliding mode and fuzzy logic, in order to improve the performance of the power generation system.

The results of the performance and the robustness tests of the proposed controls are satisfactory.

Keywords

Fuzzy sliding mode control, multi-source system, wind turbine, photovoltaic, electrical network.

Remerciement

Cette thèse a été préparée au sein du laboratoire *IRECOM* du département d'électrotechnique de l'Université de Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès.

Je tiens à remercier particulièrement **Pr. ABID Mohamed**, professeur au département d'électrotechnique de l'UDL SBA, pour avoir accepté d'être le rapporteur de cette thèse et pour son aide précieuse et ses conseils judicieux.

Je tiens à remercier aussi très profondément :

Dr. NACERI Abdelatif, Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'UDL SBA, pour sa participation au jury de soutenance de cette présente thèse en tant que président.

Dr. BENABDELLAH Badreddine, Maître de conférences à U.S.T.M.B Oran,

Pr. TAHOUR Ahmed, professeur à l'université de Mascara,

Pr. AISSAOUI Abdelghani, professeur à l'université de Béchar,

Dr. BENTAALLAH Abderrahim, Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'UDL SBA,

pour avoir accepté de juger ce travail, en tant que membres de Jury.

Toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, directement ou indirectement, continue ou ponctuelle, à l'achèvement de ce travail.

Dédicace

*A mon cher père et ma chère mère
pour l'éducation et le grand amour
dont ils m'ont entouré*

Et

pour leur patience et leurs sacrifices.

A mes chères sœurs.

A ma femme et sa famille.

A tous mes proches.

A tous mes amis.

A tous ce que j'aime.

Cette thèse leur est dédiée.



ARDJOUN Sid Ahmed El Mehdi

Notations

✓ Principaux indices et exposants

$(\cdot)_{As}, (\cdot)_{Bs}, (\cdot)_{Cs}$: Composantes (A, B, C) dans un repère triphasé lié au stator
$(\cdot)_{Ar}, (\cdot)_{Br}, (\cdot)_{Cr}$: Composantes (A, B, C) dans un repère triphasé lié au rotor
$(\cdot)_{\alpha}, (\cdot)_{\beta}$: Composantes (α, β) dans un repère diphasé.
$(\cdot)_d, (\cdot)_q$: Composantes (d, q) dans un repère diphasé tournant
$(\cdot)_s, (\cdot)_r, (\cdot)_h$: Composantes statorique, rotorique et d'entrefer
$(\cdot)_{ref}$: Grandeur de référence
$(\cdot)_0, (\cdot)_n$: Grandeur nominale
$\widehat{(\cdot)}$: Grandeur estimée
$(\cdot)'$: Grandeur ramenée au stator
$\overline{(\cdot)}, \underline{(\cdot)}$: Grandeur complexe
$(\cdot)^T, (\cdot)^*$: Matrice transposée, matrice transposée et conjuguée

✓ Sigles :

GADA	: Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.
CCG	: Convertisseur Coté Génératrice.
CCR	: Convertisseur Coté Réseau.
MLI	: Modulation à Largeur d'Impulsions.
PI	: Action Proportionnelle et Intégrale.
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor.
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.
FTBO	: Fonction de Transfert en Boucle Ouverte.
FTBF	: Fonction de Transfert en Boucle Fermée.
GPV	: Générateur Photovoltaïque.
MPPT	: Maximum Power Point Tracking.

Tables De Matières

Résumé.....	i
Remerciement.....	ii
Dédicace.....	iii
Notations.....	iv
Tables De Matières.....	vii

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

Chapitre I

L'état de l'art

I.1. Introduction.....	5
I.2. Production de l'électricité à partir des sources d'énergies renouvelables.....	5
I.2.1. Energie hydroélectrique.....	6
I.2.2. Energie solaire thermique	7
I.2.3. Energie Biomasse	8
I.2.4. Energie géothermique.....	8
I.2.5. Energies marines.....	9
I.2.6. Energie éolienne	10
I.2.7. Energie photovoltaïque	10
I.3. Système de conversion d'énergie éolienne.....	11
I.3.1. Conversion cinétique mécanique	11
I.3.2. Conversion mécanique électrique	13
I.3.2.1. Machine asynchrone à cage	13
I.3.2.2. Machine asynchrone à rotor bobinée	14
I.3.2.3. Machine synchrone à excitation en courant continu.....	15
I.3.2.4. Machine synchrone à aimants permanents	17

I.3.3. Modes opérationnels pour la production de l'énergie éolienne.....	17
I.3.3.1. Eolienne à vitesse fixe.....	18
I.3.3.2. Eolienne à vitesse variable.....	19
I.3.3.3. Commande de l'angle d'attaque des pales	19
I.3.3.4. Commande à angle fixe.....	19
I.3.3.5. Commande stall active.....	20
I.3.3.6. Commande de l'orientation de la turbine.....	20
I.3.3.6. Commande de la vitesse de la génératrice.....	20
I.3.4. Maximum de la production de l'énergie éolienne.....	21
I.3.4.1. Méthodes indirectes.....	22
I.3.4.2. Méthodes directes.....	22
I.4. Système de conversion d'énergie photovoltaïque.....	23
I.4.1. Principe de la conversion photovoltaïque.....	24
I.4.2. Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	25
I.4.3. Structure d'un système photovoltaïque.....	25
I.4.3.1. Structure avec convertisseur CC/CC, convertisseur CC/CA et transformateur.....	26
I.4.3.2. Structure avec convertisseur CC/CC et convertisseur CC/CA.....	26
I.4.3.3. Structure sans convertisseur CC/CC avec transformateur.....	27
I.4.3.4. Structure sans convertisseur CC/CC sans transformateur.....	28
I.4.4. Maximum de la production de l'énergie photovoltaïque.....	28
I.4.4.1. Méthodes indirectes.....	30
I.4.4.2. Méthodes directes.....	31
I.5. Intégration des énergies renouvelables au réseau électrique.....	31
I.5.1. Système d'énergie renouvelable multisource.....	31
I.5.2. Réglementations techniques pour la connexion des énergies renouvelables au réseau électrique	34
I.5.2.1. Contrôle absolu de la puissance active.....	34

I.5.2.2. Allocation d'une puissance de réserve.....	35
I.5.2.3. Contrôle du gradient de puissance.....	35
I.5.2.4. Contrôle de l'équilibre en puissance.....	36
I.5.2.5. Contrôle de la puissance pour la protection du système.....	36
I.5.3. Organisation de la supervision du système étudié.....	37
I.10. Conclusion.....	38

Chapitre II

Commande de la puissance d'un système de conversion d'énergie éolienne

II.1. Introduction.....	39
II.2. Modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne	39
II.2.1. Modélisation de la turbine.....	40
II.2.2. Modélisation du multiplicateur.....	40
II.2.3. Modélisation de la GADA.....	41
II.2.4. Modélisation du convertisseur d'électronique de puissance.....	43
II.2.5. Modélisation du bus continu.....	45
II.2.6. Modélisation du filtre.....	45
II.2.6. Modélisation de la connexion de la GADA avec le réseau.....	46
II.3. Stratégie de commande d'un système de conversion d'énergie éolienne.....	46
II.3.1. Commande du convertisseur coté GADA (CCG).....	46
II.3.1.1. Commande vectorielle de la GADA.....	46
II.3.1.2. Synthèse des régulateurs PI.....	51
II.3.2. Commande du convertisseur coté réseau (CCR).....	54
II.3.2.1. Contrôle indépendant des puissances active et réactive.....	54
II.3.2.2. Contrôle de la tension de bus continu.....	55
II.3.2.3. Synthèse des régulateurs PI.....	56

II.4. Résultats obtenus.....	57
II.4.1. Résultat du premier test (profil du vent lisse).....	58
II.4.2. Résultat du deuxième test (profil du vent aléatoire).....	60
II.4.3. Résultat du troisième test (test de robustesse).....	62
II.4.3.1. Profil du vent lisse.....	62
II.4.3.1. Profil du vent aléatoire.....	64
II.4.4. Interprétation des résultats.....	66
II.5. Conclusion.....	68

Chapitre III

Commande de la puissance d'un système de conversion d'énergie photovoltaïque

III.1. Introduction	69
III.2. Modélisation d'un système de conversion d'énergie photovoltaïque.....	69
III.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	70
III.2.2. Modélisation du bus continu photovoltaïque.....	71
III.2.3. Modélisation de l'hacheur.....	71
III.2.4. Modélisation du filtre de l'hacheur.....	72
III.2.5. Modélisation du bus continu réseau, de l'onduleur et du filtre réseau.....	72
III.2.6. Modélisation du transformateur.....	72
III.3. Stratégie de commande d'un système de conversion d'énergie photovoltaïque.....	73
III.3.1. Commande de l'hacheur.....	73
III.3.1.1. Synthèse du régulateur PI.....	75
III.3.2. Commande de l'onduleur.....	75
III.4. Résultats obtenus.....	75
III.4.1. Résultat du premier test.....	76

III.4.2. Résultat du deuxième test (test de robustesse).....	78
III.4.1. Interprétation des résultats.....	80
III.5. Conclusion	81

Chapitre IV

Commande par mode glissant flou

IV.1. Introduction.....	82
IV.2. Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement.....	83
IV.2.1. Présentation de la structure par commutation au niveau de l'organe commande, avec ajout de la commande équivalente.....	83
IV.3. Principe de la commande par mode glissant.....	84
IV.3.1. Définition des systèmes à structure variable.....	84
IV.3.2. Formulation des expressions générales de la commande par mode de glissement...	86
IV.3.3. Conception de la commande par mode glissant.....	90
IV.3.3.1. Choix de la surface de glissement.....	90
IV.3.3.2. Conditions de convergence et d'existence.....	91
IV.3.3.3. Synthèse des lois de commande du mode glissant.....	91
IV.3.4. Le phénomène de réticence ou 'chattering'.....	92
IV.3.4.1. Commande avec un seuil.....	93
IV.3.4.2. Commande adoucie.....	94
IV.3.4.3. Commande intégrale.....	94
IV.3.4.4. Commande SAT.....	95
IV.3.4.5. Commande par logique floue.....	96
IV.4. Application de la commande par mode glissant flou au CCG.....	97
IV.4.1. Résultats obtenus.....	99
IV.4.1. 1. Résultat pour un profil du vent lisse.....	100

IV.4.1. 2. Résultat pour un profil du vent aléatoire.....	102
II.4.4. Interprétation des résultats.....	103
IV.5. Application de la commande par mode glissant flou à l’hacheur du GPV.....	104
IV.5.1. Résultats obtenus.....	105
IV.5.1.1. Résultat du premier test.....	105
IV.5.1.2. Résultat du deuxième test (teste de robustesse).....	107
IV.5.1.3. Interprétation des résultats.....	108
IV.6. Conclusion.....	108
Conclusion générale.....	109

Annexe

Paramètres de simulation et cahier de charges

1. Paramètres de simulation.....	111
2. Cahier de charges.....	113

Références bibliographiques

Références bibliographiques.....	114
-----------------------------------------	------------

Introduction générale

Introduction générale

L'exploitation à outrance des énergies fossiles a engendré des effets collatéraux causant ainsi : le réchauffement climatique de la planète et la diminution des réserves de ces énergies fossiles. Seulement la demande de cette source d'énergie ne cesse de s'accroître vu que le développement industriel et économique est tributaire de ces besoins énergétiques. Comment donc trouver le juste équilibre pour sauvegarder les réserves d'énergies fossiles tout en préservant l'environnement pour les générations futures. Face à ce défi, on a opté pour des solutions alternatives, à savoir le recours aux énergies renouvelables.

Ces énergies renouvelables offrent plusieurs avantages ; elles sont inépuisables et leurs impacts sur l'environnement sont beaucoup plus faibles que les sources d'énergie traditionnelles. La dépendance de notre société sur le charbon, le gaz naturel et le pétrole sera sensiblement réduite par le déploiement plus large des énergies renouvelables et l'utilisation plus efficace de l'énergie disponible. Ainsi, le développement durable des sources non polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics.

En ce qui concerne l'Algérie, le programme national de développement des énergies renouvelables dans sa version actualisée (2015-2030) par les services du ministère de l'énergie a été adopté par le gouvernement. En effet, l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constitue un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable.

A la faveur du programme de développement des énergies renouvelables 2011-2030 adopté par le Gouvernement en février 2011, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie. Ce programme a connu une première phase consacrée à la réalisation de projets pilotes et de tests des différentes technologies disponibles, durant laquelle des éléments pertinents concernant les évolutions technologiques des filières considérées sont apparus sur la scène énergétique et ont conduit à la révision de ce programme. Parmi ces éléments nouveaux, il convient de citer [1]:

- une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables, notamment pour le solaire et l'éolien, suite aux études engagées.
- la baisse des coûts des filières photovoltaïques et éoliennes qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer.
- les coûts encore élevés de la filière solaire thermique induisant une croissance très lente du développement de ce marché à travers le monde.
- le parachèvement d'une réglementation nationale cohérente et attractive en direction des investisseurs.

La révision de ce programme porte ainsi, sur le développement du photovoltaïque et de l'éolien à grande échelle, sur l'introduction des filières de la biomasse (valorisation des déchets), de la cogénération et de la géothermie, et également sur le report, à 2021, du développement du solaire thermique. La consistance du programme en énergies renouvelables à réaliser pour les besoins du marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, dont plus de 4500 MW seront réalisés d'ici 2020. La répartition de ce programme par filière technologique, se présente comme suit :

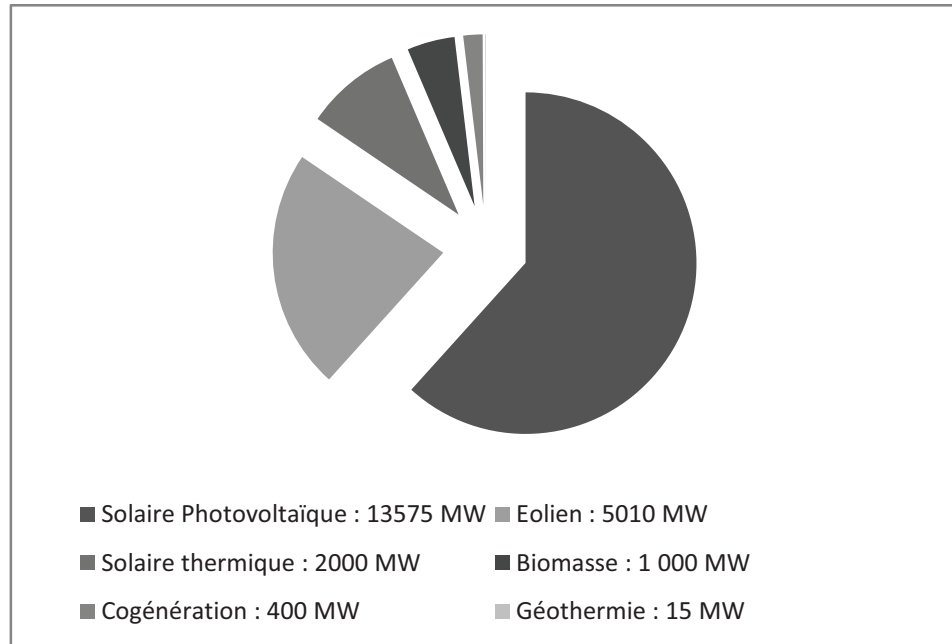


Figure 1. Objectif du programme Algérien des énergies renouvelables 22GW à l'horizon 2030 [1].

La réalisation du programme permettra d'atteindre à l'horizon 2030 une part de renouvelables de près de 27% dans le bilan national de production d'électricité. Le volume de gaz naturel épargné par les 22 000 MW en renouvelables, atteindra environ 300 milliards de m³, soit un volume équivalant à 8 fois la consommation nationale de l'année 2014.

La production à base d'énergie renouvelable a toujours existé dans les réseaux de distribution, mais sa présence n'a jamais été d'une ampleur significative pour avoir un impact sur le fonctionnement du réseau. Aujourd'hui la situation commence à changer car la production d'électricité à base d'énergie renouvelable augmente d'année en année [2]. Au-delà d'une « masse critique » cela peut avoir des conséquences négatives pour les réseaux et pour les consommateurs avec des :

- Impacts sur les niveaux de tension,
- Impacts sur la fréquence du réseau,

- Impacts sur le fonctionnement des protections dues à la modification des transits de puissance,
- Impacts sur la stabilité des réseaux et sur les temps d'élimination de défauts.

Le caractère stochastique, parfois peu prévisible et surtout non-pilotable des générateurs à base d'énergies renouvelables renforcent encore plus ces impacts. Les systèmes de réglage déjà en place ne sont plus suffisants, car leur fonctionnement n'est pas adapté à faire face à la dynamique et aux besoins additionnels de puissance.

Ces problèmes ont poussé au changement de la structure du réseau (système multisource) et conduit à la définition des règles ou des conditions techniques de raccordement de la production sur les réseaux. En effet, c'est un challenge à la fois nouveau et important pour les gestionnaires de réseau.

La participation aux services système deviendra techniquement indispensable pour permettre le développement significatif des sources aléatoires (éolien, photovoltaïque).

Plusieurs pistes de recherche complémentaires contribueront à lever ce verrou grâce aux convertisseurs électroniques de puissance et à l'utilisation de moyens de stockage dans le réseau.

Les convertisseurs électroniques de puissance permettent de connecter sur le réseau des dispositifs de production de technologies variées et d'introduire des possibilités de réglage qui amènent :

- à imaginer des structures adaptées pour les unités de production à base d'énergie renouvelable conduisant à de meilleurs rendements,
- à influencer sur les flux de puissance et la répartition énergétique des différentes sources présentes dans un réseau électrique.

Cependant, leur exploitation nécessite de concevoir de nouvelles lois de commande, d'intégrer des services « systèmes » et de revoir les stratégies locales de supervision pour ces unités de productions auxquelles les convertisseurs électroniques de puissance sont raccordés.

L'ensemble de ces travaux à mener vise à rendre compatible les unités de production à base d'énergie renouvelable avec le système de gestion du réseau électrique de manière à lever les limitations actuelles à leur expansion.

Dans le cadre de notre thèse, une architecture basée sur un système photovoltaïque et éolien connecté au réseau a été considérée. Nos travaux se sont concentrés sur le développement d'une commande par mode glissant flou pour contrôler la puissance issue du système éolien et photovoltaïque pour mieux intégrer le réseau électrique et participer au service système. Pour ce faire, on a réparti le manuscrit en quatre chapitres:

Le premier chapitre est consacré à la présentation d'un état de l'art sur les différentes sources d'énergies renouvelables pour la production de l'électricité, telles que l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. On présentera également, l'intégration de ces énergies (éolienne et photovoltaïque) au réseau électrique, en montrant l'intérêt d'un système multisource et les réglementations techniques pour la connexion de ces énergies au réseau électrique.

Le deuxième chapitre a pour objectifs de présenter la modélisation et la commande du système éolien à vitesse variable basé sur une GADA. Dans un premier temps, on présentera les modèles des différents éléments constituant la chaîne de conversion de l'éolienne. Dans un deuxième temps, on détaillera la loi de commande permettant un contrôle indépendant des puissances active et réactive. La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats obtenus, validant ainsi la commande établie.

Le troisième chapitre a pour objectifs de présenter la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque basé sur deux convertisseurs. Dans un premier temps, on présentera les modèles des différents éléments constituant la chaîne de conversion. Dans un deuxième temps, on détaillera la loi de commande permettant le contrôle de la puissance issue du système photovoltaïque, ensuite la loi de commande permettant le contrôle indépendant des puissances active et réactive. La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats obtenus, validant ainsi la commande établie.

Le dernier chapitre est consacré entièrement au concept de la commande par mode glissant flou. Nous présenterons d'abord les principes fondamentaux de ce type de commande puis nous l'appliquerons au contrôle de la puissance issue du système éolien et photovoltaïque.

Finalement on conclura ce travail par un résumé de l'ensemble des étapes suivies, ainsi que par des recommandations et des suggestions sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

Chapitre I

L'état de l'art

Chapitre I

L'état de l'art

I.1. Introduction

La richesse des sources d'énergies renouvelables se retrouve dans la variété des produits et vecteurs énergétiques qu'elles permettent de fournir : énergie thermique (capteurs solaires thermiques, géothermie...), combustibles solides, liquides et gazeux (biocombustibles et biocarburants, biogaz), électricité (hydroélectricité, centrales géothermiques et à biomasse, énergie éolienne, photopiles...).

Cette variété permet aux énergies renouvelables de pénétrer le marché des services énergétiques de tous les secteurs économiques : agriculture, industrie, habitat et transports. Cette pénétration peut se faire soit par le biais de l'accès aux réseaux électriques, ou par le biais d'applications décentralisées (chaudières à bois et chauffage solaire intégrés à chaque bâtiment, électrification rurale décentralisée par petits aérogénérateurs et systèmes photovoltaïques, pompes solaires, etc).

La possibilité d'intégrer le réseau électrique représente une opportunité irremplaçable pour amener le minimum de services énergétiques modernes. Or, malgré le fait qu'elles sont inépuisables et pour la plupart d'accès gratuit, ces énergies nécessitent pour être exploitées des ressources en capital, en matières premières et en main-d'œuvre.

Nous présenterons dans ce chapitre les différentes sources d'énergies renouvelables pour la production de l'électricité et nous détaillerons plus sur l'énergie éolienne et photovoltaïque. Nous présenterons également, l'intégration de ces énergies (éolienne et photovoltaïque) au réseau électrique, en montrant l'intérêt d'un système multisource et les réglementations techniques pour la connexion de ces énergies au réseau électrique.

I.2. Production de l'électricité à partir des sources d'énergies renouvelables

Toutes les énergies inépuisables, sont considérées comme énergies renouvelables. Elles sont issues directement ou indirectement du soleil, mais en quantité limitée, à un endroit et en un instant donné. La figure I.1 fournit une vue d'ensemble des principales ressources énergétiques sur terre qui peuvent être exploitées pour créer de manière viable de l'électricité.

Ces énergies n'exercent que peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux.

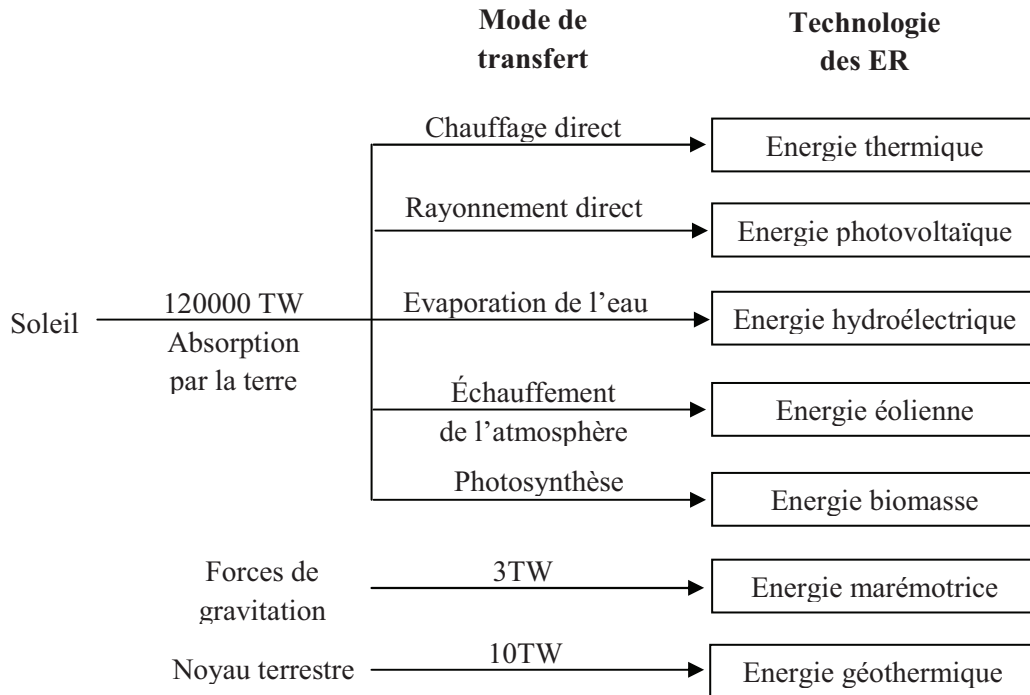


Figure I.1. Les parcours de conversion pour les énergies renouvelables

Les principales sources d'énergies renouvelables ainsi que leurs principes, leurs avantages et leurs inconvénients sont données ci-dessous.

I.2.1. Energie hydroélectrique

Rappelons d'abord que l'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus mature et la plus développée. L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques. La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine.

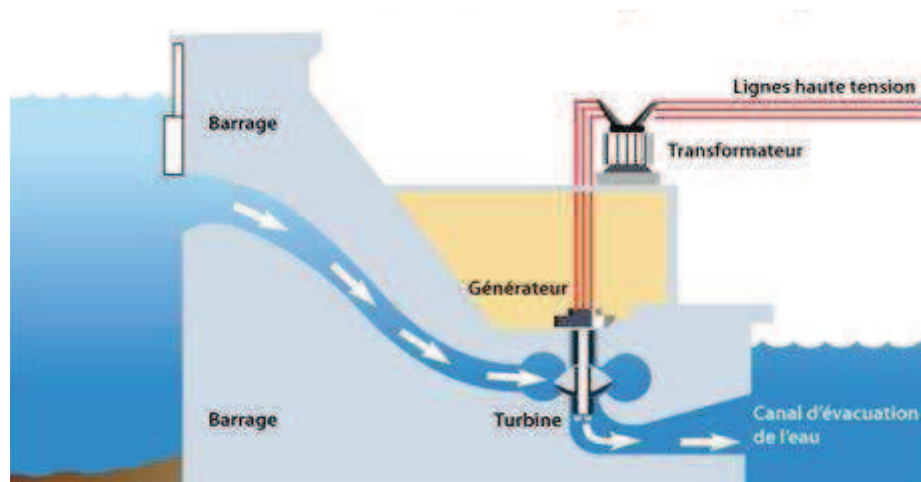


Figure I.2. Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique [4].

Le principal avantage énergétique de cette énergie est qu'elle n'est pas intermittente [5]. La technologie nécessaire à son utilisation est maîtrisée, les coûts de maintenance sont raisonnables, les installations sont prévues pour fonctionner longtemps [3].

Cependant le coût de réalisation, le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations lourdes, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [6].

I.2.2. Energie solaire thermique

Les systèmes thermo-solaires consistent le plus souvent à focaliser les rayons solaires pour produire des températures élevées afin d'obtenir un bon rendement pour les machines thermiques (selon le principe de Carnot). Les deux types principaux de générateurs fournissant une forte puissance sont basés sur le rayonnement direct du soleil.

La technologie thermo-solaire à rayonnement direct est donc utilisée sous les deux formes suivantes :

- Soit un parc solaire composé de réflecteurs paraboliques sous forme de portions de cylindre. Les rayons provoquent le chauffage de « tuyaux » parcourus par un fluide intermédiaire, de l'huile ou de l'eau sous pression. Ce fluide à haute température est envoyé vers un échangeur (une chaudière) où l'on obtient de la vapeur d'eau qui ira entraîner une turbine. La température de fonctionnement varie entre 350°C et 400°C, et on peut construire des centrales solaires de ce type atteignant des puissances de l'ordre de 80 MW. Pour améliorer le fonctionnement de la turbine et donc son rendement, la température de la vapeur peut être encore augmentée par un moyen de chauffage classique.
- Soit une tour solaire centrale, qui reçoit au sommet les rayons lumineux provenant d'un ensemble de miroirs (héliostats) qui suivent le soleil. Les héliostats réfléchissent et concentrent la lumière vers le haut de la tour, où l'énergie est absorbée par un fluide intermédiaire, qui peut être de l'eau, du sel fondu, ou tout liquide à haute température. Celle-ci peut atteindre 1000 °C.

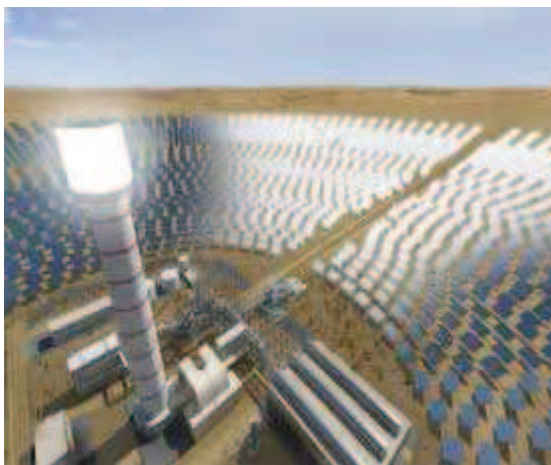


Figure I.3. Energie solaire thermique : tour solaire et parc solaire.

Cette technologie possède de multiples avantages : l'installation est créée pour des zones désertiques donc dépourvues d'intérêts (pas de possibilité d'aménagement) mais riches en soleil. Le coût est moins cher par rapport à l'énergie photovoltaïque. La maintenance nécessaire est peu importante [7].

Mais l'énergie thermo- solaire possède quelques désavantages : l'espace demandé pour la construction est très important (plusieurs dizaines de km²) et doit être exposé suffisamment aux rayons du soleil toute l'année, avec une température ambiante supérieure à 25°C pour assurer un bon rendement [7].

I.2.3. Energie Biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux [3].

La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie,
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans tous les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans des centrales thermiques. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites.

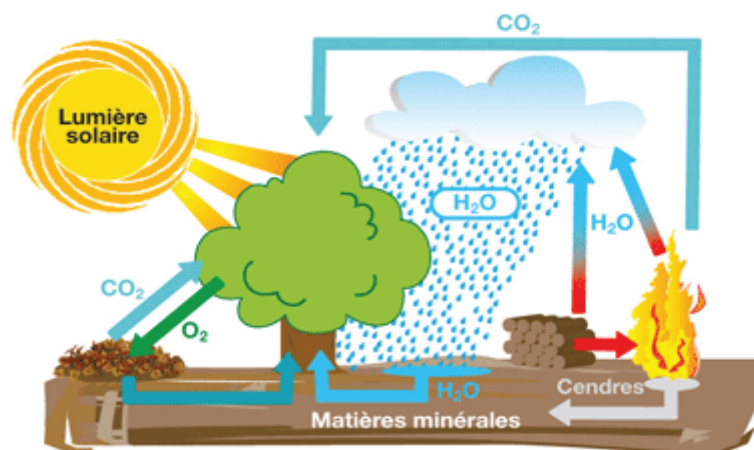


Figure I.4. Bilan de cycle biomasse [8].

L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui, entre autres, sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéro [3].

Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable. Quand on l'exploite de manière naturelle elle est peu menacée mais lorsqu'il s'agit d'une biomasse

cultivée (pour les biocarburants par exemple) ou en cas de surexploitation massive de la ressource (comme la déforestation), la production d'une telle énergie peut rapidement avoir de lourds impacts environnementaux [9].

I.2.4. Energie géothermique

Il existe dans la croûte terrestre un gradient de température qui est en moyenne de 3 °C par 100 mètres [6]. La géothermie vise à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur. L'exploitation de cette ressource consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour la transformer en électricité à l'aide des turbines.

Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure. Le principe d'utilisation de la géothermie pour générer l'électricité est présenté dans la figure I.5.

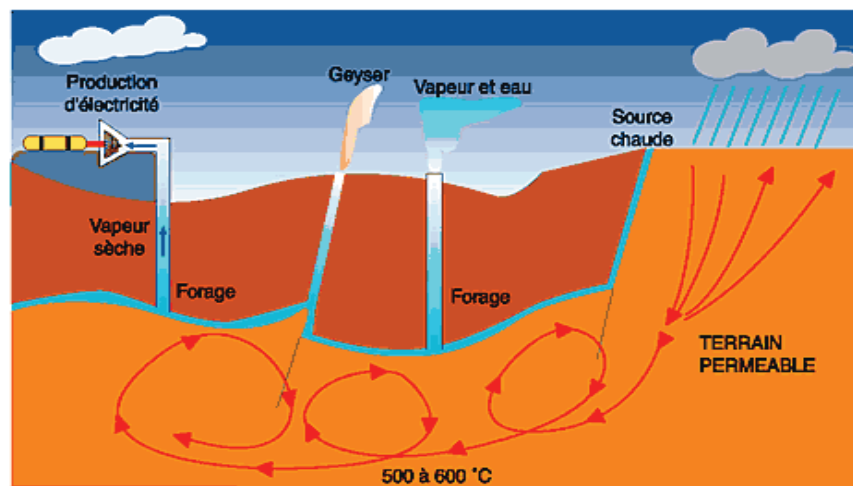


Figure I.5. Génération d'électricité par une source d'énergie géothermique [10].

Cette ressource a l'avantage de préserver l'environnement et d'être indépendante des conditions météorologiques (disponible continuellement), elle est donc fiable et stable dans le temps. Malheureusement cette ressource nécessite des forages dont les résultats sont parfois aléatoires et dont le temps de mise en place de l'installation pour son utilisation est assez important, elle peut durer jusqu'à un quart de siècle [11].

I.2.5. Energies marine

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice issue du mouvement de l'eau créé par les marées, l'énergie des vagues utilise la puissance du mouvement des vagues, ou une autre technologie, utilisant les courants sous-marins.

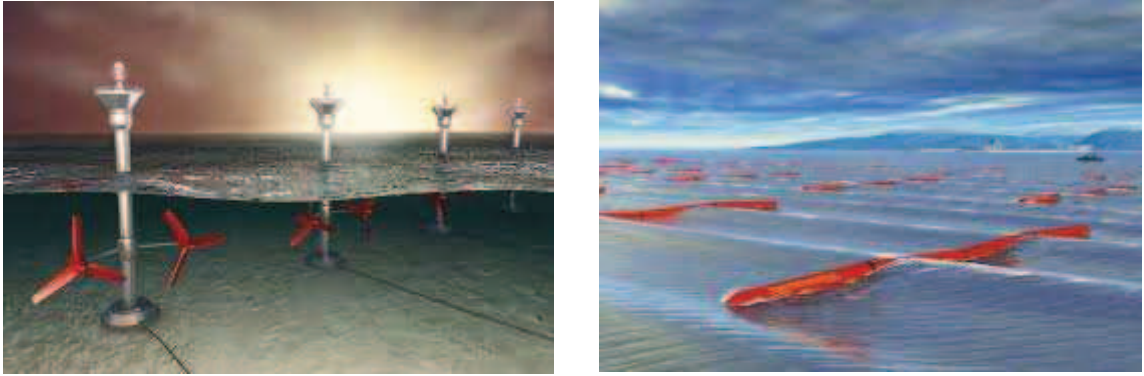


Figure I.6. L'énergie marémotrice et vague.

Tout comme les autres sources d'énergie renouvelable, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir devant elle [6].

Mais cette énergie est très difficilement récupérable, et les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible [12].

I.2.6. Energie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les termes "parc éolien" ou "ferme éolienne" sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre « onshore » ou dans la mer « offshore ».



Figure I.7. Ferme éolienne onshore et offshore.

L'avantage principal de cette source est son coût d'installation qui est moins cher par rapport à d'autres énergies renouvelables. Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [6].

I.2.7. Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir de l'irradiation solaire. Cette ressource a donc

l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire. Cette ressource a toutefois deux inconvénients, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et un rendement relativement faible (typiquement entre 10 et 18 %) [6].



Figure I.8. Plaques photovoltaïques.

I.3. Système de conversion d'énergie éolienne

Un système de conversion d'énergie éolienne, quel que soit sa technologie, convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- la conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique au niveau de la turbine,
- la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique au niveau de la génératrice.

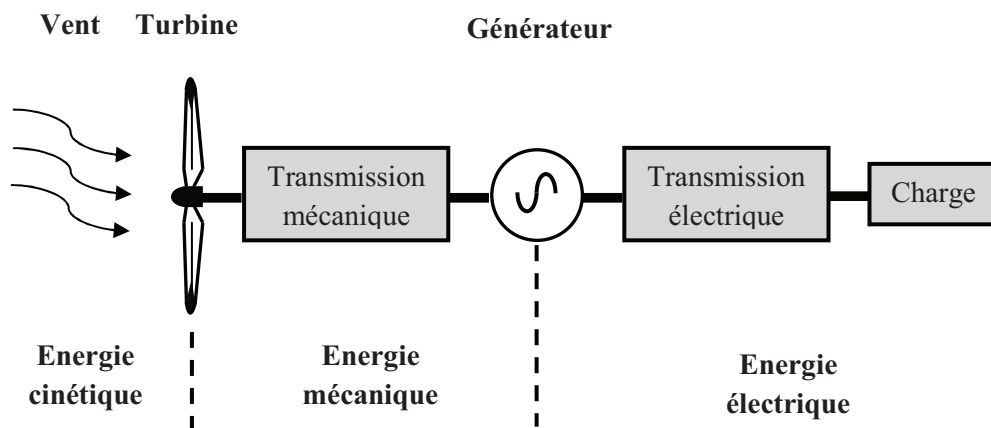


Figure I.9. Système de conversion d'énergie éolienne.

I.3.1. Conversion cinétique mécanique

Cette conversion est faite par la turbine de l'éolienne, cette turbine peut être classée en fonction de l'orientation de l'axe de rotation : les turbines à axe horizontal ou les turbines à axe vertical [13], comme illustré dans la figure I.10.

Les turbines à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement. Elles sont placées face au vent dont l'orientation de l'axe de rotation est parallèle au sol. La tour élève la nacelle pour fournir un espace suffisant pour la rotation des pales afin d'atteindre de meilleures conditions du vent. La nacelle soutient le moyeu de rotor qui possède des pales et abrite également la boîte de vitesses, une génératrice, et les convertisseurs de puissance. Ces turbines sont constituées de plusieurs pales, le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [14].

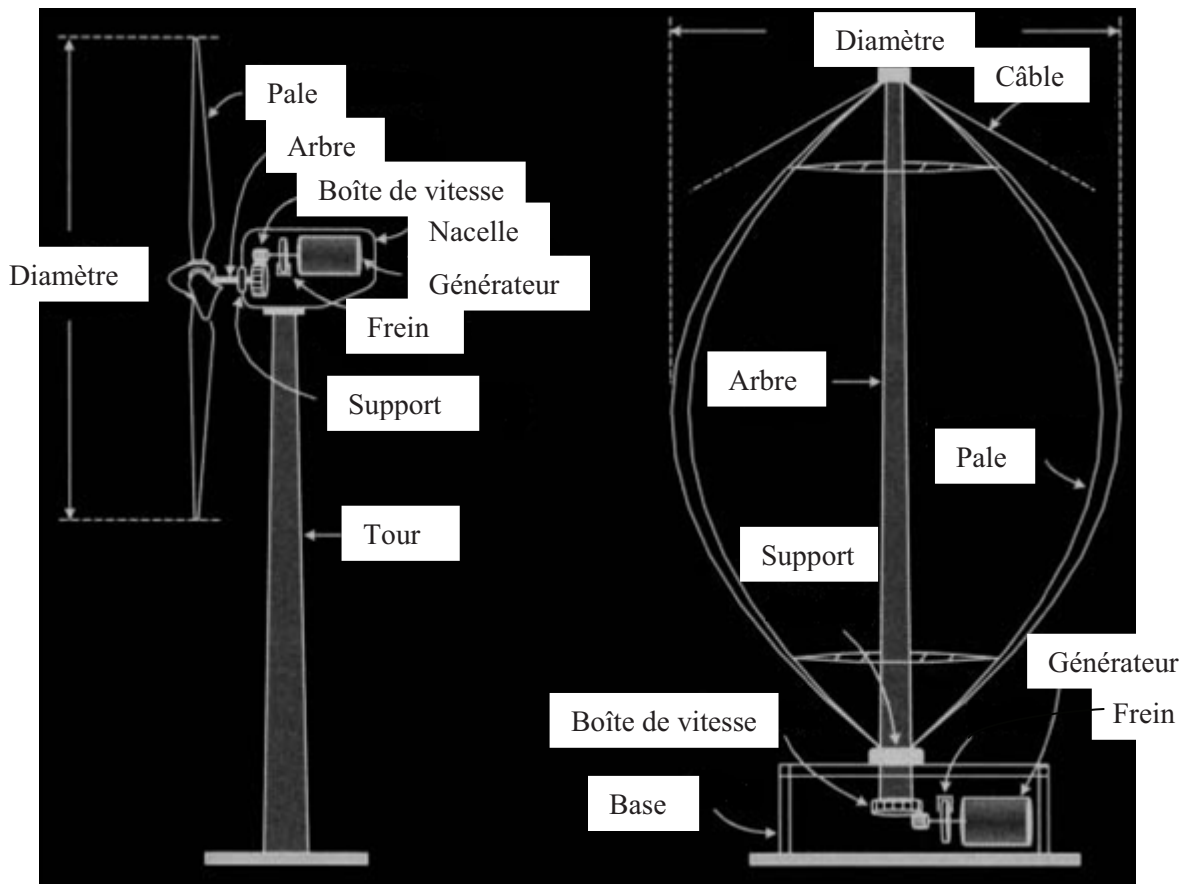


Figure I.10. Turbine à axe horizontal ou vertical

Concernant les turbines à axe vertical, l'orientation de l'axe de rotation est perpendiculaire au sol. Elles utilisent des pales courbées montées verticalement. La génératrice et la boîte de vitesse sont placées à la base de l'éolienne au niveau du sol. Les pales de la turbine à axe vertical ont une variété de modèles avec des formes et de nombre différents. La conception donnée dans la figure I.10 est une des conceptions les plus utilisées. La turbine à axe vertical a besoin de câbles de guidage pour maintenir l'arbre du rotor dans une position fixe et pour minimiser d'éventuelles vibrations mécaniques.

Une comparaison entre les technologies des turbines à axe horizontal et vertical est résumée dans ce paragraphe. La turbine à axe horizontal apporte une grande efficacité de conversion de l'énergie éolienne en raison de la conception des pales et l'accès à un vent plus fort, mais elle a besoin d'une forte tour pour supporter le poids de la nacelle. Malgré que le coût d'installation est plus élevé, ils restent les plus utilisées dans les grands parcs

éoliens commerciaux. Par contre, la turbine à axe vertical a l'avantage d'un coût d'installation moins élevé et d'un entretien facile en raison de l'emplacement de la boîte de vitesses et de la génératrice au niveau du sol. Seulement son rendement de conversion d'énergie est faible en raison du faible vent sur la partie inférieure. En outre, l'arbre du rotor est long, donc soumis à des vibrations mécaniques. Ce sont ces inconvénients qui entravent l'application pratique pour la conversion de l'énergie éolienne à grande échelle.

I.3.2. Conversion mécanique électrique

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est faite par l'intermédiaire des machines électriques en fonctionnement génératrice. Le choix de l'utilisation des génératrices dans les applications éoliennes dépend de [14]:

- la simplicité d'utilisation
- la longue durée de vie
- le coût de maintenance qui doit être le plus faible que possible
- le faible coût de construction et de réalisation.

Dans cette partie nous allons présenter les génératrices les plus utilisées dans la production éolienne ainsi que les systèmes d'électronique de puissance qui leurs sont associés.

I.3.2.1. Machine asynchrone à cage

L'une des machines les plus utilisées dans les applications éoliennes, est la machine asynchrone à cage. Elle est très robuste, nécessite peu d'entretien, et son coût de construction est faible. Son utilisation est simple et elle est aussi facile à connecter au réseau.

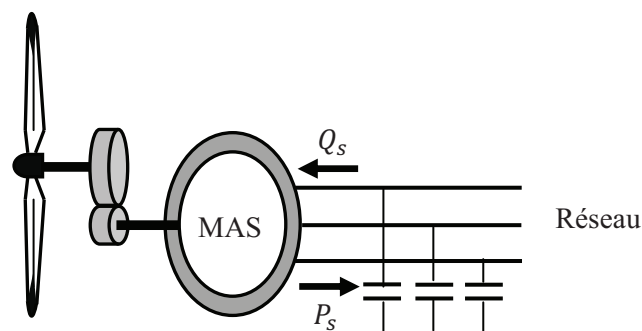


Figure I.11. Machine asynchrone à cage connectée directement au réseau.

Dans les éoliennes équipées d'une machine asynchrone à cage (figure I.11), la plage de variation du glissement est comprise entre 0 et 0.08, d'où l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable [16]. De plus comme la turbine tourne à une vitesse lente, il est alors nécessaire d'utiliser une boîte à vitesse. L'énergie réactive de la machine n'est pas contrôlée, elle dépend de la vitesse du rotor. Souvent des batteries de condensateur sont mises en parallèle et connectées au stator de la machine pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la machine.

Avec l'utilisation des convertisseurs d'électronique de puissance, le rendement des éoliennes est amélioré. La gamme de vitesse de la génératrice à laquelle on fait fonctionner les éoliennes est plus grande (la vitesse peut varier entre 0,8 et 1,2 de la vitesse de synchronisme). La tension produite par la génératrice au stator est d'abord redressée puis transformée en tension alternative à la fréquence du réseau grâce à un onduleur (figure I.12). L'utilisation des convertisseurs a pour avantage de permettre de contrôler le facteur de puissance côté réseau, par contre pour magnétiser la machine, le réactif est toujours fourni par les batteries de condensateurs. Le coût de l'onduleur est élevée car ce dernier est dimensionné pour la puissance totale produite par l'éolienne, de plus la nécessité d'une boîte à vitesse rend cette configuration très coûteuse et peu exploitée.

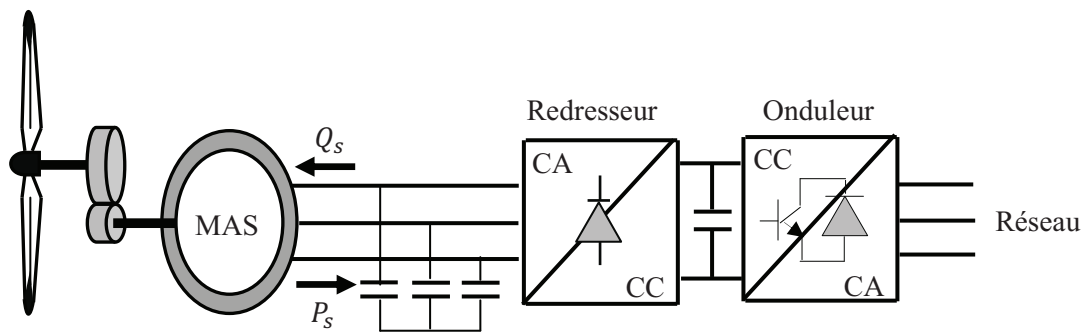


Figure I.12. Machine asynchrone à cage connectée au réseau à l'aide d'un convertisseur mono directionnel.

I.3.2.2. Machine asynchrone à rotor bobinée

Cette machine nécessite l'utilisation d'une boîte à vitesse, par contre sa robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais. La machine asynchrone à un rotor bobiné à un réglage électronique qui assure la variation du glissement. Ceci permet à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse plus grande par rapport à la machine asynchrone à cage. Le fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants tel que Vestas, Gamesa [14], utilisent ce type de machine.

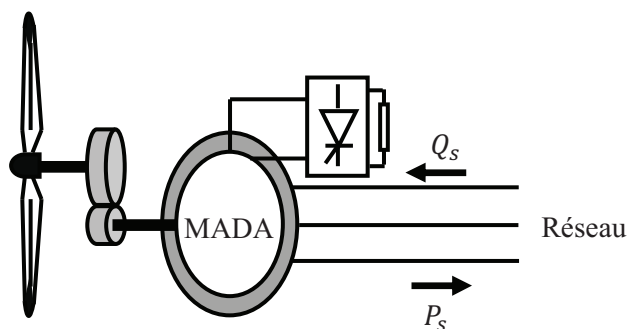


Figure I.13. Machine asynchrone à rotor bobiné connectée directement au réseau

La figure I.13 montre le schéma du principe permettant de faire varier le glissement entre 0, 0.1 et 0.3 [15]. L'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance du rotor dans les éléments résistifs, de plus la machine consomme de l'énergie réactive.

L'un des grands avantages de la machine asynchrone à double alimentation (figure I.14) est le contrôle du glissement. La puissance dans le rotor peut avoir deux sens différents, ce qui augmente la plage d'exploitation de cette machine en vitesse 0,3 et 1,3 de la vitesse de synchronisme. Le rotor de la génératrice à double alimentation est couplé au réseau à travers deux convertisseurs. Le dimensionnement de la chaîne rotorique se limite à 30% de la puissance nominale de la machine. Le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du rotor vers le réseau [17] [18]. De plus l'angle rotorique ne dépend pas de la position du rotor, ce qui donne une meilleure stabilité à la machine en comparaison à la machine synchrone [15].

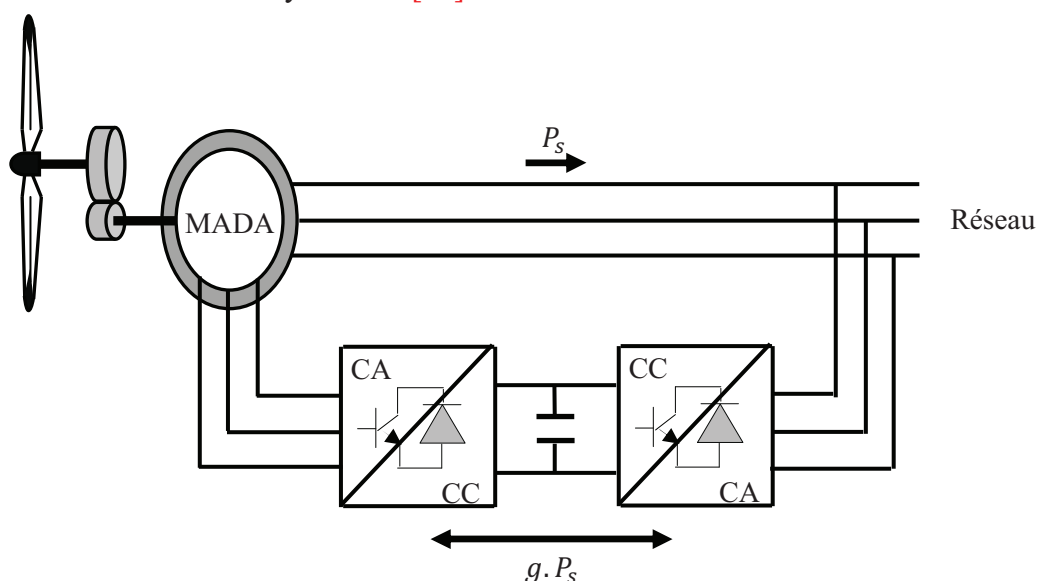


Figure I.14. Machine asynchrone à double alimentation

I.3.2.3. Machine synchrone à excitation en courant continu

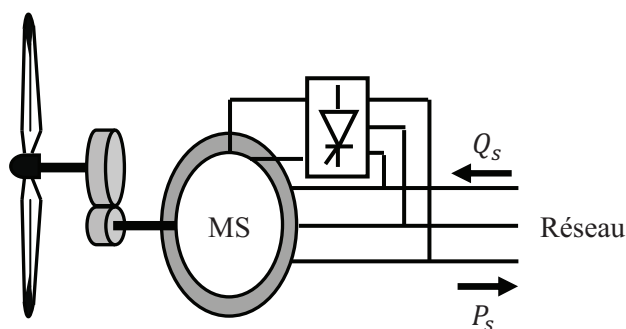


Figure I.15. Machine synchrone à excitation en courant continu connectée directement au réseau

Avec une structure connectée directement au réseau sans convertisseur d'électronique de puissance. La machine synchrone n'a pas beaucoup été utilisée dans les installations

éoliennes, comme le cas d'une machine asynchrone, car elle est plus complexe à commander et elle demande une vitesse constante au rotor pour créer une tension à fréquence constante au stator. La figure I.15 représente le schéma principal de la machine synchrone connectée directement au réseau, où la régulation du système de la turbine doit maintenir une vitesse constante [15].

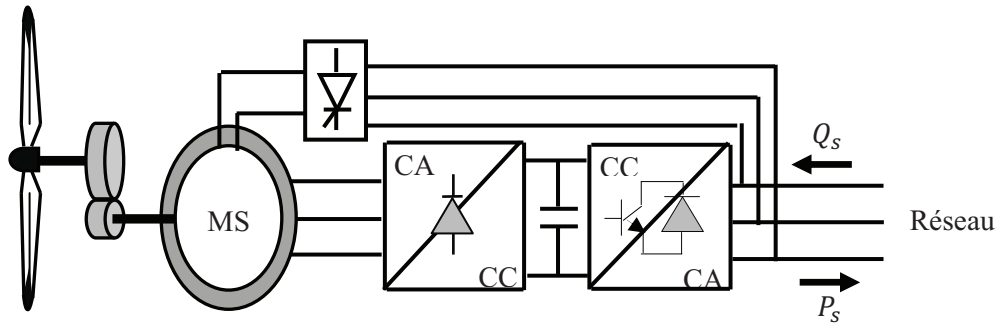


Figure I.16. Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/DC/AC

Une autre solution est proposée pour faire fonctionner la machine synchrone à vitesse variable. Elle consiste à utiliser un ensemble onduleur redresseur tel que représenté sur la figure I.16. La plage de variation de la vitesse est de 0.5 jusqu'à 1.2 de la vitesse de synchronisme. Mais, contrairement aux cas de la génératrice asynchrone à Double Alimentation, la chaîne de conversion placée sur le stator doit être dimensionnée pour la totalité de la puissance du système de production.

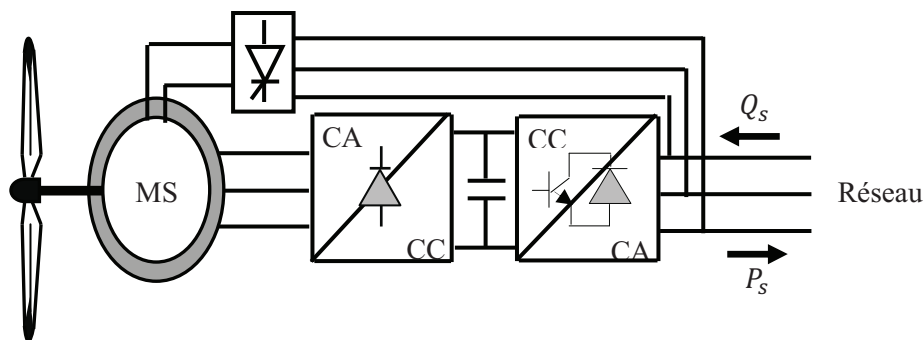


Figure I.17. Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/DC/AC « configuration d'éolienne sans boîte à vitesse »

Une autre alternative permet de supprimer la boîte à vitesse (figure I.17) qui présente de grands problèmes pour la production de l'énergie éolienne. Dans ce cas la machine a un très grand nombre de paires de pôles pour compenser la fréquence par rapport à la vitesse réduite, mais ces avantages sont contrebalancés par une complexité de conception et une réactance synchrone importante qui dégrade le facteur de puissance. Il existe des problèmes liés à la commande causés par la forme non sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer et aux fortes saturations locales [18]. La plage de variation de vitesse reste

grande, elle varie de 0.5 à 1.2 de la vitesse de synchronisme, et les deux convertisseurs utilisés pour contrôler la puissance débitée au réseau sont dimensionnés pour la puissance totale de la génératrice.

I.3.2.4. Machine synchrone à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Ce type de machine utilise un aimant permanent au rotor à plusieurs pôles, ce qui donne l'avantage de développer un très grand couple massique (figure I.18) et de supprimer la boîte à vitesse. De plus la machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le circuit rotorique. La plage de variation de vitesse est de 0.6 jusqu'à 1.2 de la vitesse de synchronisme.

Les systèmes sans boîte à vitesse ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple).

Les machines synchrones à aimants permanents ont généralement un bobinage fractionnaire qui permet d'obtenir un grand nombre de paires de pôles avec un nombre réduit d'encoches au stator. Ce type de bobinage crée un champ d'entrefer contenant de nombreux harmoniques qui produisent des pertes joule [15], (cuivre et isolat, ce qui accélère le claquage des isolants et réduit la durée de vie du cuivre).

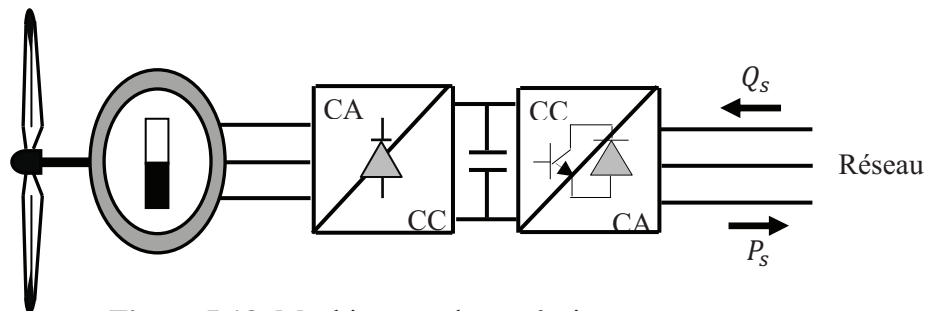


Figure I.18. Machine synchrone à aimants permanents

I.3.3. Modes opérationnels dans la production de l'énergie éolienne

Jusqu'à aujourd'hui, tous les systèmes de commande réalisés sont appliqués à deux types de structure d'éolienne, ces structures sont :

- éolienne à vitesse fixe;
- éolienne à vitesse variable.

Les méthodes les plus courantes de la commande de la puissance de l'énergie éolienne sont:

- Commande de l'angle d'attaque de la pale (blade pitch control) ;
- Commande à angle fixe (passive stall control) ;
- Commande stall active (active stall control) ;
- Commande de l'orientation de la turbine (turbine yaw control) ;
- Commande de la vitesse de la génératrice.

I.3.3.1. Eolienne à vitesse fixe

Dans le cas des éoliennes à vitesse fixe, la puissance de la turbine est optimisée pour un seul point de fonctionnement, et la génératrice est connectée directement au réseau. Le problème avec ce type d'installation est que les fluctuations sur la vitesse de vent mènent automatiquement à des fluctuations sur le couple, donc des fluctuations de tension à l'origine de stress mécanique pour le rotor [15].

Les principaux avantages de ce type d'installation peuvent être classés comme suit [16]:

- système électrique plus simple, pas de convertisseur
- peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne
- pas besoin d'un système d'électronique de commande
- moins chère au niveau de l'installation.

I.3.3.2. Eolienne à vitesse variable

En utilisant les systèmes à vitesse variable il est possible de faire fonctionner les éoliennes pour à un bon rendement. Le principe se base sur un fonctionnement en maximisant la puissance extraite du vent par un contrôle (MPPT) pour les basses vitesses. Ensuite une fois arrivée à de très grandes vitesses de vent, on passe à un fonctionnement à puissance nominale à vitesse variable. Les avantages de ce type d'éolienne sont :

- augmentation du rendement énergétique
- réduction du stress sur l'arbre mécanique
- l'amélioration de la qualité d'énergie
- réduction des oscillations du couple mécanique

I.3.3.3. Commande de l'angle d'attaque des pales

Le contrôle par variation de l'angle de calage des pales est souvent utilisé pour les éoliennes à vitesse variable. Elle opère de deux manières différentes :

- Une première partie où l'angle de calage des pales est fixé, la vitesse du rotor est variable et la vitesse spécifique est à sa valeur optimale.

- Une fois arrivé à la vitesse nominale du générateur, le couple mécanique est contrôlé par la variation de l'angle des pales. Il est maintenu constant et l'éolienne produit sa puissance nominale.

Il existe divers types de système de régulation de l'angle de calage des pales. Le pas peut être variable tout au long de la pale, ou simplement sur le bout des pales. L'angle de calage est commandé soit par un système hydraulique « éolienne de petite puissance » ou des moteurs électriques qui nécessitent une source d'énergie externe « éolienne de grande puissance ». Le transfert de cette énergie externe jusqu'aux pales en rotation augmente considérablement le coût de la fabrication [19].

I.3.3.4. Commande à angle fixe

Ce type de commande en boucle ouverte est basé sur une conception appropriée du profil de la pale. Lorsque la vitesse du vent dépasse la valeur nominale, le flux d'air de la cote supérieure de la pale commence à perdre de la vitesse, ce qui forme des vortex, ces turbulences causent une perte de sustentation aérodynamique de la pale et permettent la dissipation de l'excès de puissance. Cette commande agit uniquement pour limiter la puissance à des vents forts, régulant la puissance à sa valeur nominale ou plus faible. Le fonctionnement à vents faibles reste sans aucune commande donc la puissance obtenue dépend des caractéristiques mécaniques de la turbine et des caractéristiques électriques de la machine.

Cette commande n'a pas besoin d'un mécanisme de réglage d'angle de pale. Néanmoins, les pales doivent être construites spécialement et une technologie sophistiquée est nécessaire pour cela. De même, sans une analyse aérodynamique soignée, des problèmes de vibrations peuvent se présenter [20].

I.3.3.5. Commande stall active

Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme des pales). Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence devient important, c'est à dire quand la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, l'aspiration créée par la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface des pales et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors l'augmentation de la vitesse de rotation [21].

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

I.3.3.6. Commande de l'orientation de la turbine

La commande de l'orientation est basée sur le positionnement de la turbine de l'éolienne partiellement hors de la direction du vent. Cette orientation se fait soit verticalement (un basculement de la nacelle) ou horizontalement (rotation autour de l'axe du mât). Pour les vents trop forts, supérieurs à la limite de la turbine, la position du rotor est complètement perpendiculaire au vent, ce qui annule toute génération. Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue [22].

Ce type de commande est cependant limité aux petites turbines éoliennes car cette méthode engendre d'importants efforts mécaniques au niveau du mât et des pales. Les éoliennes de plus grande taille ne peuvent pas adopter cette méthode de régulation de puissance sans provoquer des efforts pouvant endommager l'éolienne.

I.3.3.6. Commande de la vitesse de la génératrice

Par le biais de la génératrice accouplée à une chaîne de conversion statique pilotée pour gérer le transfert d'énergie, la vitesse de rotation peut être pilotée selon le point de fonctionnement souhaité [23] [24]. Cette méthode permet de contrôler la puissance de l'éolienne.

Cette commande est très rapide, ce qui permet de mener des changements impossibles à effectuer avec des systèmes mécaniques. Ceci, d'une part, évite les changements brusques de charge au niveau du rotor, et permet d'autre part de convertir l'énergie qui serait normalement perdue à cause du retard engendré par l'ajustement des pales et d'améliorer l'efficacité énergétique du système [25].

I.3.4. Maximum de la production de l'énergie

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, comme illustre la Figure I.19 [17].

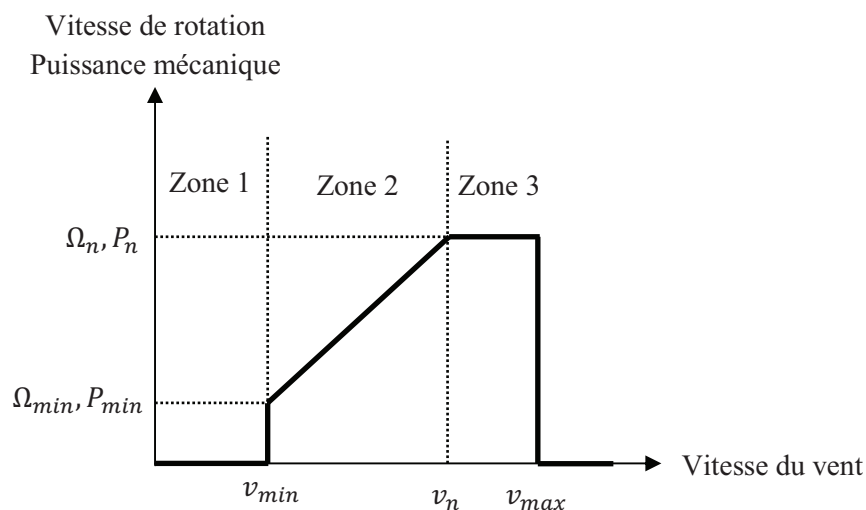


Figure I.19. Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

La zone 1 : l'éolienne est arrêtée car le vent n'est pas assez fort pour que la production d'énergie soit rentable vis-à-vis de l'énergie de fonctionnement.

La zone 2 : l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal.

La zone 3 (vent fort) : correspond au fonctionnement à pleine charge. Il faut limiter la puissance afin de ne pas abîmer le système. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne. Dès que le vent a atteint sa valeur maximale (v_{\max}), une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

La puissance capturée par la turbine peut être maximisé en ajustant le coefficient de puissance (C_p) à son maximum, ce coefficient est dépendant du ratio de vitesse λ (ou de la vitesse de génératrice). Il est donc nécessaire de concevoir une commande permettant de maximiser la puissance en ajustant la vitesse de rotation de la turbine quelque soit la vitesse du vent considérée. Et pour ce faire plusieurs stratégies ont été développées, et qu'on peut les classer en deux méthodes : méthode indirecte et méthode direct [26].

1.3.4.1. Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes sont basées sur la courbe de puissance de l'éolienne. Cette courbe utilise les spécifications de la turbine d'une éolienne fournies par le constructeur, d'où on obtient la loi optimale qui lie la puissance maximale que la turbine peut produire à la vitesse de rotation. Celle-ci est alors implantée dans un tableau préenregistré dans le système de commande. Cette façon de procéder exige du constructeur de l'éolienne des essais de caractérisation (extérieur, soufflerie) ou des simulations du profil de pales. Une telle caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale et d'utiliser les structures des convertisseurs plus classiques et moins coûteuses [24].

La méthode la plus utilisée dans la pratique est la PSF (Power Signal Feedback). Cette technique de réglage, fournit pour chaque vitesse de rotation de la turbine une référence de puissance maximale à produire. Celle ci nécessite uniquement un capteur de la vitesse de rotation, et permet de s'affranchir du problème de mesure de la vitesse du vent effective tout en assurant une stratégie de poursuite du point de puissance maximal lorsque la vitesse du vent varie. La stabilité de ce type d'asservissement de puissance est démontrée en [27].

Dans [28] les auteurs proposent qu'à partir de la courbe de puissance on peut déterminer la vitesse optimale selon chaque vitesse du vent et commander la vitesse du rotor pour suivre cette vitesse optimale, ou dans [29] par contrôleur feed-forward. Et dans [23] les auteurs, proposent un algorithme basé sur l'utilisation des mémoires et la valeur initiale de la vitesse réduite. Sur la base des caractéristiques de la génératrice, l'algorithme proposé s'adapte et effectue avec précision le réglage automatique de mise à jour des données de vitesse de référence comme les changements de vitesse du vent.

Il existe aussi des commandes en couple : à partir de la vitesse optimale, on calcule le couple optimal pour chaque vitesse du vent et cette référence est suivie ensuite par une commande, par modes glissants [30] ou par un contrôleur flou [14]. De plus, il y a la commande par le pilotage du courant de charge. Dans cette méthode, on contrôle le courant de charge (côté DC) qui débite dans une batterie selon le point de fonctionnement de l'éolienne. Contrairement aux cas précédents, le contrôle de la charge mécanique de voilure s'effectue de façon indirecte à travers le pont de diodes [14].

Un inconvénient des méthodes indirectes est que la courbe de puissance d'une éolienne n'est pas disponible avec haute précision et elle va changer après la vieillesse de l'éolienne [24]. Un autre inconvénient est que certaines méthodes nécessitent la mesure de la vitesse du vent.

I.3.4.2. Méthodes directes

Les méthodes directes sont indépendantes de la connaissance des courbes de puissance. Pourtant, le processus de conversion d'énergie éolienne est plus compliqué à cause de la nature stochastique du vent, de l'aérodynamique complexe et du comportement non-linéaire de la génératrice et du système électrique.

L'algorithme MPPT proposé dans [31] exploite le fait que la courbe de puissance optimale d'une éolienne est caractérisée par une constante k_{opt} unique. Ainsi, si on arrive à atteindre le maximum et le détecter avec succès, nous pouvons extraire k_{opt} en mesurant la puissance et la vitesse de rotation. Une fois que k_{opt} est connue, il peut servir comme référence précise pour la taille et la direction de la perturbation suivante.

Dans [32], les auteurs ont proposé un contrôleur MPPT basé sur le courant d'entrée de l'éolienne et la vitesse de vent. Ce contrôleur génère le rapport cyclique approprié pour le convertisseur, et de ce fait, le point de puissance maximale est suivi. Le courant optimisé sert de référence de manière à obtenir la puissance maximale de sortie générée à partir de l'éolienne pour différentes vitesses du vent.

Néanmoins, dans les méthodes présentées ci-dessus, il faut mesurer la vitesse de rotor qui nécessite un capteur de vitesse. Pour cela, une méthode de poursuite basée sur l'équation $dP/dD = 0$ qui permet de calculer la puissance maximal quand la vitesse du vent change [24]. Dans [26] l'auteur a proposé une méthode basée sur l'équation $dP/d\Omega = 0$, mais en utilisant un contrôleur flou pour suivre le PPM.

I.4. Système de conversion d'énergie photovoltaïque

La technique de transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique (effet photovoltaïque) a été découverte par E. Becquerel en 1839, puis développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell. Ces chercheurs ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés" (c'est une technique de dopage qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs).

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque a progressé régulièrement, et même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance (montres, calculatrices, pompes, réfrigérateurs solaires...). En effet, cette source d'énergie représente une solution idéale pour produire une électricité sans pollution et alimenter les réseaux électriques.

I.4.1. Principe de la conversion photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteurs. Une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée au bore (P) présentant un déficit en électrons et l'autre dopée au phosphore (N) présentant un excès d'électrons [33]. Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode.

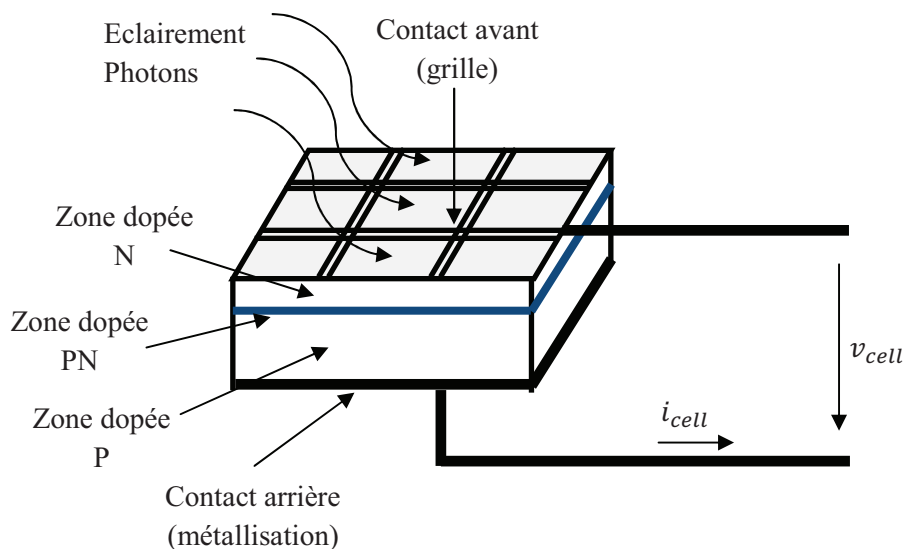


Figure I.20. Schéma d'une cellule photovoltaïque élémentaire

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créés dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique qui règne dans

cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule [34].

Les cellules qui composent les modules photovoltaïques sont de trois types :

- Cellules monocristallines : sont des photopiles de la première génération, élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Elles ont un rendement de 12 à 16%.
- Cellules poly-cristallines : sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Elles ont un rendement de 11 à 16%. Leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.
- Cellules amorphes : ont un rendement de 6 à 10% et un coût de production faible.

Les cellules monocristallines et poly-cristallines sont les plus répandues et les plus fragiles. Elles sont placées entre deux plaques de verre afin de former un module qui est relativement lourd. Le matériau de base est le silicium qui est très abondant, cependant la qualité nécessaire pour réaliser les cellules doit être d'une très grande pureté et son coût intervient de façon important dans le coût total.

I.4.2. Constitution d'un générateur photovoltaïque

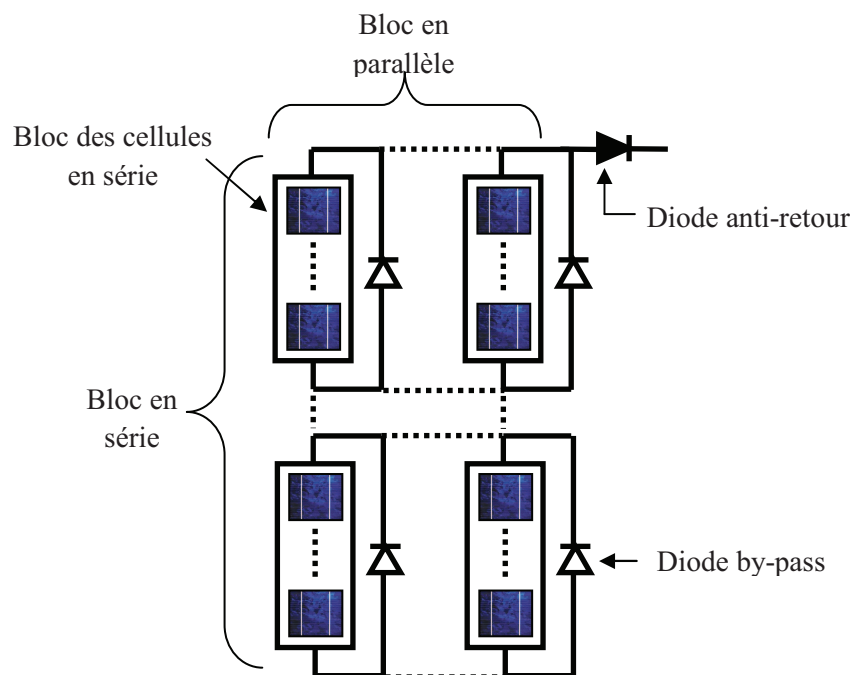


Figure I.21. La configuration d'un générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est obtenu à partir de la mise en parallèle et/ou en série de plusieurs cellules photovoltaïques. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Ce générateur est protégé par des diodes by-pass afin d'éviter le fonctionnement

inverse des cellules occultées, pouvant entraîner une surchauffe voire une destruction de celles-ci. La figure I.21 montre la configuration d'un générateur photovoltaïque.

I.4.3. Structure d'un système photovoltaïque

Les structures d'électronique de puissance dédiées au photovoltaïque sont nombreuses. Plusieurs critères permettent de les classer en différents groupes.

La première caractéristique est la présence ou non d'une isolation galvanique (transformateur) entre le générateur photovoltaïque et le réseau. Cette isolation peut se faire à haute fréquence ou à la fréquence du réseau. La deuxième caractéristique est la présence ou non d'un convertisseur CC/CC. La dernière caractéristique est le nombre de phases (mono ou triphasé).

La figure I.22 représente les différentes configurations possibles entre le générateur photovoltaïque et le réseau.

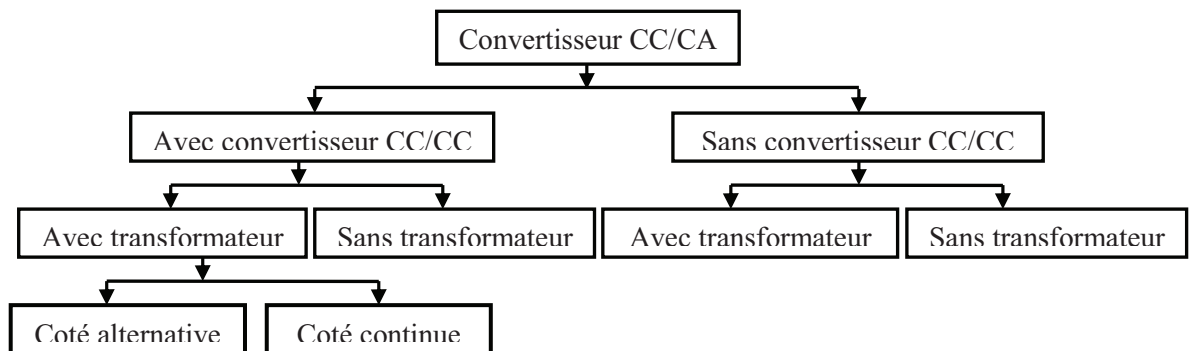


Figure I.22. Configurations des générateurs PV connectés au réseau

I.4.3.1. Structure avec convertisseur CC/CC, convertisseur CC/CA et transformateur

Cette structure se décompose en deux groupes, soit l'isolation galvanique est située au sein de l'étage de conversion CC/CC en haute fréquence (> 1 kHz) soit elle est située sur la sortie alternative en basse fréquence (fréquence du réseau : 50-60 Hz).

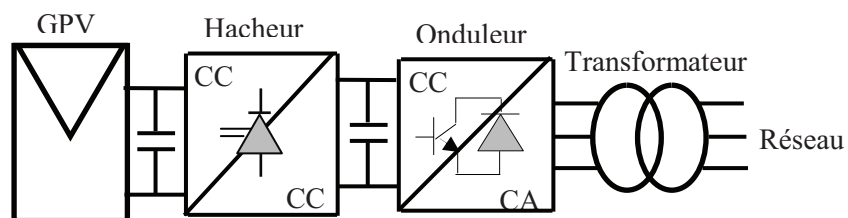


Figure I.23. Structure avec un transformateur en BF (réseau)

Une isolation en haute fréquence présente l'avantage de diminuer la taille et le poids du transformateur et des éléments de filtrage, en contrepartie, elle demande une meilleure maîtrise des pertes dans le convertisseur. Par contre l'isolation en basse fréquence est très

simple. En effet, le prix, le volume et la taille sont supérieurs à un transformateur à haute fréquence [35].

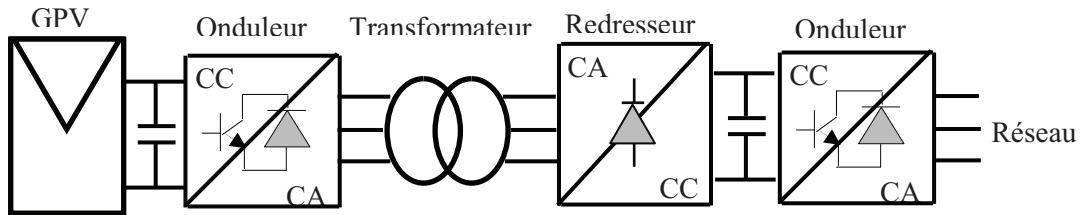


Figure I.24. Structure avec un transformateur en HF

I.4.3.2. Structure avec convertisseur CC/CC et convertisseur CC/CA

La configuration formée par un générateur PV connecté au réseau électrique à travers deux convertisseurs (hacheur et onduleur) sans transformateur est très utilisée [36]. Le but de l'utilisation du hacheur est d'avoir une tension élevée au niveau du bus continu afin que l'onduleur puisse garantir de sa part la tension convenable du côté réseau.

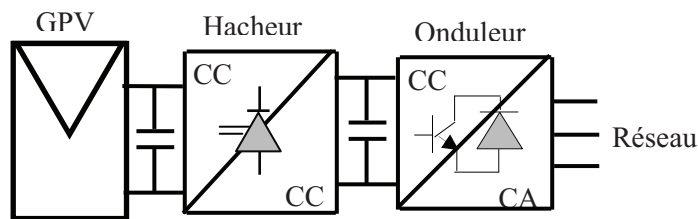


Figure I.25. Structure avec hacheur et onduleur.

Nous passons en revue trois configurations du système avec un bus continu intermédiaire. Elles se différencient par la structure du convertisseur continu-continu utilisé [37].

- **Structure avec hacheur de type forward**

Ce convertisseur peut augmenter la tension fournie par les modules photovoltaïques à la tension désirée. La conversion continue-alternative se fait de façon relativement simple, grâce à un onduleur centralisé. La capacité du bus continu et la tension continue sont relativement élevées, ce qui réduit par conséquent la sécurité du personnel d'entretien.

- **Structure avec hacheur de type fly-back**

Le convertisseur de type fly-back permet d'élever la tension fournie par le module photovoltaïque à la tension désirée. Les deux convertisseurs sont contrôlés de manière à avoir un transfert optimal d'énergie photovoltaïque et un facteur de puissance proche de l'unité. Les inconvénients majeurs, de cette structure, sont la perte de puissance et le coût d'installation qui est relativement élevé.

- **Structure avec hacheur élévateur**

Ce dernier permet d'élever la tension fournie par le GPV à la tension désirée au niveau du bus continu. En effet, l'élévation de cette tension ne dépasse pas 4 ou 5 fois la tension fournie par la source PV et ce en raison de la résistance de l'inductance de filtre qui est mis à la sortie du GPV.

Les avantages majeurs de cette configuration sont :

- Les batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome fiable.
- Le courant d'entrée est relativement lisse, raison pour laquelle la capacité peut être faible et par conséquent un investissement plus faible.

I.4.3.3. Structure sans convertisseur CC/CC avec transformateur

Cette structure est formée par un GPV et un onduleur centralisé associé à un circuit de commande. L'ensemble est directement connecté au réseau électrique à travers un transformateur de tension.

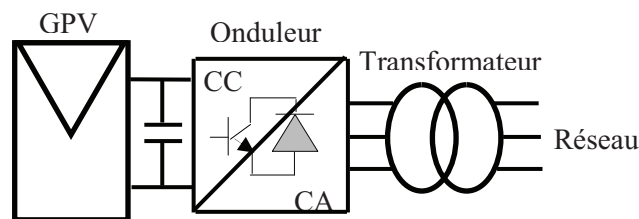


Figure I.26. Structure avec onduleur et transformateur.

Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus continu représente l'avantage majeur de ce montage, puisqu'il permet de garantir la sécurité du personnel de maintenance. Lors de l'installation, il faut bien réduire la distance entre le transformateur et les modules PV puisque le courant traversant les câbles est important, ce qui permet de générer par conséquent des pertes joules.

I.4.3.4. Structure sans convertisseur CC/CC sans transformateur

C'est une structure typique qui est largement utilisée puisqu'elle est simple, moins encombrante et par conséquent moins coûteuse. Le générateur PV est formé par un grand nombre de panneau permettant une tension convenable au point de connexion onduleur-réseau.

Les inconvénients majeurs de ce dispositif sont :

- Arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur.

- Le contrôle du point de puissance maximale est approximatif car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et de l'ensoleillement.

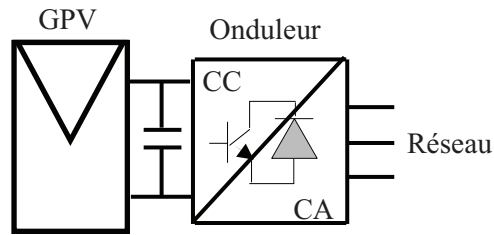


Figure I.27. Structure typique de connexion d'un GPV sur le réseau

I.4.4. Maximum de la production de l'énergie photovoltaïque

Le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque (pour une température et un ensoleillement donnés), peut être défini selon trois zones, comme illustre la figure I.28 [38] :

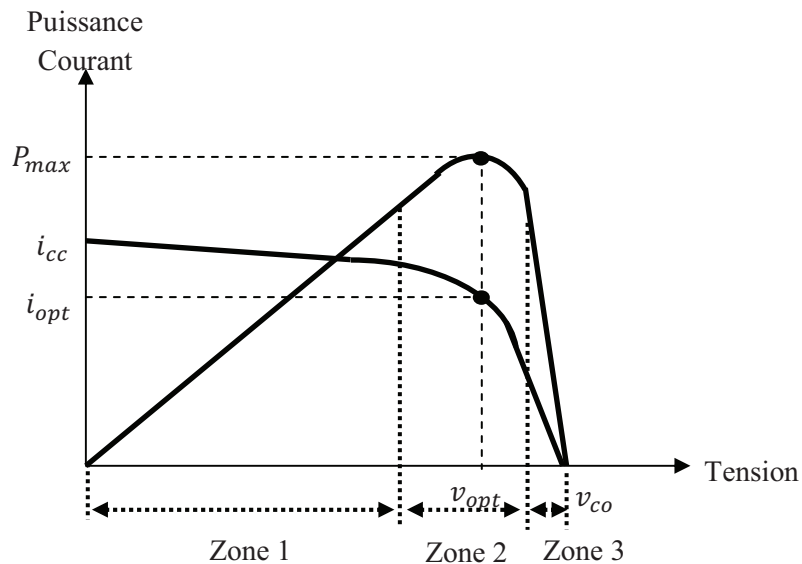


Figure I.28. Caractéristiques $i_{pv}(v_{pv})$ et $P_{pv}(v_{pv})$ d'un générateur photovoltaïque pour une température et un ensoleillement donnés.

La zone 1 : elle est assimilable à un générateur de courant de court-circuit i_{cc} proportionnel à l'irradiation. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.

La zone 2 : elle correspond au coude de cette caractéristique, le fonctionnement du générateur dans cette zone donne des puissances élevées à valeurs de courant et tension modérées. Un point optimal de puissance "MPP" (maximum power point) peut être identifié au point (i_{opt}, v_{opt}) .

La zone 3 : elle est assimilable à un générateur de tension à circuit ouvert v_{co} , le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées.

Les caractéristiques tension-courant et puissance-tension varient sensiblement avec la température et sous divers éclairiments. L'augmentation d'ensoleillement à température fixe, se traduit respectivement par une augmentation de courant court-circuit et de la puissance produite (l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert), figure I.29 (a) et (b). Par ailleurs, une augmentation de la température à éclairiment fixe, engendre une diminution de la tension de circuit ouvert et de la puissance produite avec une légère augmentation de courant de court-circuit, figure I.29 (c) et (d).

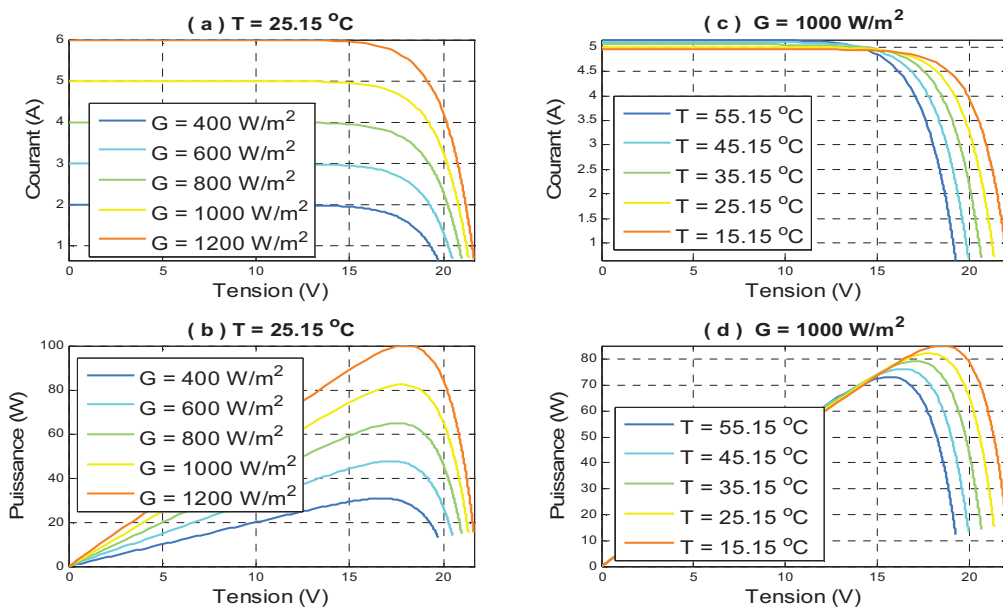


Figure I.29. Comportement des caractéristiques $i_{pv}(v_{pv})$ et $P_{pv}(v_{pv})$ sous l'influence de la température et de l'éclairiment.

Alors, quand ces conditions changent, on va fonctionner loin du point de puissance maximale. Pour surmonter ce problème, nous utilisons un convertisseur entre la source et la charge. Ce convertisseur peut être de type CC/CC ou CC/CA, selon la nature de la charge ou la nature de la commande.

En changeant le temps d'ouverture de l'interrupteur de ce convertisseur selon la variation des conditions atmosphériques, on change la tension de sortie du panneau, par conséquent la puissance produite par celui-ci.

Différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM ont été publiés, parmi les nombreuses publications, nous avons fait une classification en les regroupant selon leur principe de recherche. Ils peuvent être classés comme suit : méthode indirecte et méthode direct [26].

I.4.4.1. Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes sont basées sur la connaissance de la caractéristique non linéaire du générateur photovoltaïque, qui n'est pas disponible avec précision. Ces méthodes ont besoin aussi de mesurer l'ensoleillement et la température de générateur photovoltaïque, puis consulter la courbe de puissance pour avoir la tension (ou le courant) de fonctionnement optimale correspondante. Ensuite on compare la tension (ou le courant) mesurée de générateur aux valeurs optimales stockées dans le système de commande selon des conditions atmosphériques mesurées et puis effectuer la commande pour atteindre celles-ci.

Pourtant, cet algorithme nécessite une grande capacité de mémoire pour le stockage des données et il faut mettre à jour des données pour chaque générateur. En outre, il est difficile d'enregistrer et de stocker toutes les conditions possibles du système et la mesure des conditions atmosphériques n'est pas facile et n'est pas précise non plus [39].

Les courbes caractéristiques peuvent être obtenues par la modélisation hors ligne à l'aide des équations mathématiques ou approximations numériques. Cependant, leur résolutions sont impossibles à appliquer sur les commandes analogiques et très difficiles à appliquer sur les commandes numériques classiques [40] [41]. Par conséquent, leurs applications ne semblent pas appropriées pour l'obtention du PPM. Néanmoins, d'autres méthodes basées sur la modélisation de ces caractéristiques sont encore utilisées [42] [43].

I.4.4.2. Méthodes directes

Les méthodes directes n'ont pas besoin de connaître ni la courbe de puissance du générateur ni l'ensoleillement réel ou la température, et la détermination de leur point de fonctionnement est indépendant des conditions climatiques [44].

Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont :

- Hill Climbing [45] ;
- Perturb and Observe [46] ;
- Incrément de conductance [47] ;

Dans l'étude menée par [48], une étude comparative de ces trois méthodes a été faite sur un système photovoltaïque. Il sert de référence pour les utilisateurs afin de comprendre ces trois méthodes. Une description détaillée des différents systèmes de contrôle et des différents types de circuit sont montrés afin de répondre correctement aux attentes des industriels, tout en possédant une efficacité optimale pour les systèmes PV.

I.5. Intégration des énergies renouvelables au réseau électrique

Au début du développement, les unités de production à base d'énergie éolienne et photovoltaïque, ont été de petites tailles. Ces unités ont donc d'abord été raccordées aux réseaux de distribution d'où le terme production décentralisée. Au fur et à mesure que les technologies se développent, les unités de production deviennent plus grosses et par conséquent sont connectées au réseau de transport.

La problématique majeure liée à l'intégration de l'énergie éolienne et photovoltaïque dans les réseaux est de deux ordres [49]:

- La variabilité de la production du fait des variations de l'énergie primaire qui est non dispatchable.
- L'incertitude sur les prévisions météorologiques induisant une incertitude sur la production. Cette problématique est plus marquée pour la production éolienne car les prévisions de vitesse du vent sont moins fiables que celles de l'ensoleillement.

Ces problèmes ont poussé au changement de la structure du réseau (système multisource) et conduit à la définition des règles ou des conditions techniques de raccordement de la production sur les réseaux. En effet, c'est un challenge à la fois nouveau et important pour les gestionnaires de réseau.

I.5.1. Système d'énergie renouvelable multisource

Un système multisource à énergies renouvelables est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable.

L'hybridation des sources permet de [50]:

- Rationaliser l'utilisation de la source principale.
- Fournir un complément de puissance.
- Lisser la puissance.
- Augmenter la fiabilité.
- Améliorer les performances du système.
- Réduire la taille des sources.
- Réduire le coût de production.

Par contre les principaux inconvénients d'un tel système est [50]:

- La complexité.
- Le choix difficile de ses sous-systèmes.
- La difficulté à gérer le niveau de la puissance.

Les systèmes multisources peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes connectés au réseau, travaillant en parallèle avec le réseau

électrique. Et dans le deuxième groupe, des systèmes fonctionnant en régime isolé ou en mode autonome.

Les critères pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système sont [51] :

- La présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet, une centrale toute entière.
- La présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc...
- Type de sources d'énergie renouvelables utilisées. Le critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système.

Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

Au vue de ces nombreux critères, il est aisé d'imaginer la diversité des études sur les systèmes multisources disponibles. Dans notre étude on va s'intéresser seulement au système connecté au réseau. Dans ce cas les systèmes multisources peuvent être divisés en trois configurations, figure I.30.

Dans la première configuration, la puissance de sortie peut être fournie soit de la source d'énergie renouvelable, via le bus continu ou directement du réseau électrique en cas d'absence de la production d'énergies renouvelables et de l'épuisement de l'énergie stockée.

Dans la deuxième configuration l'énergie produite est utilisée localement, et le surplus d'énergie produite est revendu au service public. La dernière configuration c'est dans le cas d'une production décentralisé (connectée au réseau de distribution) ou centralisé (connectée au réseau de transport). C'est cette configuration qui est prise en considération dans notre thèse.

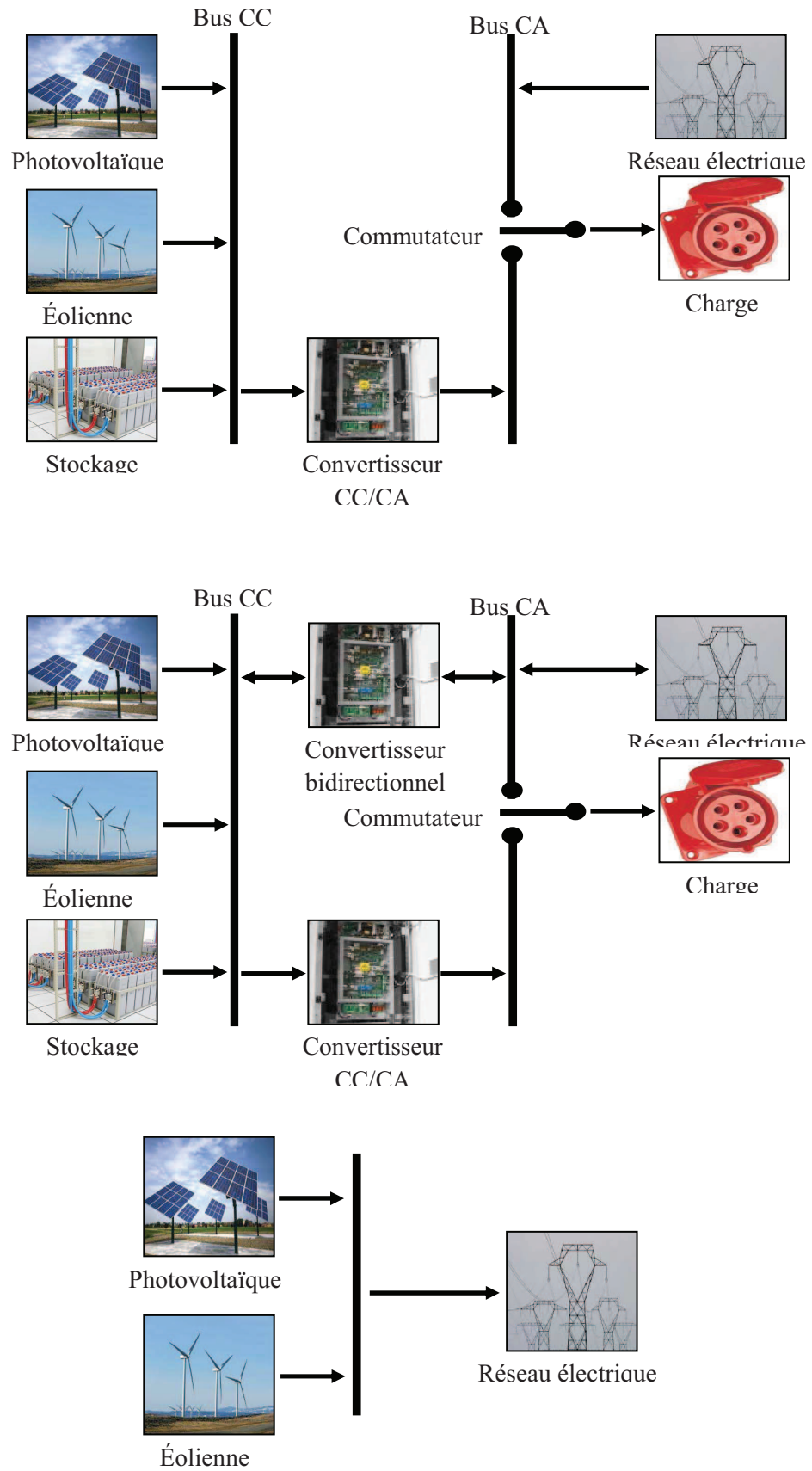


Figure I.30. Configurations des systèmes multisource connecté au réseau.

I.5.2. Réglementations techniques pour la connexion des énergies renouvelables au réseau électrique

L'électricité est très difficile à stocker, donc il est nécessaire à tout instant d'équilibrer le réseau en assurant que la production est égale à la consommation. Si l'écart entre ces deux derniers augmente trop, il y aura des écarts de fréquence et de tension du réseau. Ces écarts vont endommager les équipements du réseau et ceux des consommateurs. Les conséquences peuvent aller jusqu'à la déconnexion des branches du réseau (coupure du courant), voir l'incident généralisé (blackout).

Compte tenu de ce contexte, l'insertion massive de l'énergie éolienne et photovoltaïque dans les réseaux électriques va augmenter l'écart entre l'offre et la demande. Car la majorité de ces énergies sont contrôlées pour fournir leur maximum de puissance au réseau. En plus, ces énergies se déconnectent rapidement lorsqu'un défaut de court-circuit ou d'un creux de tension survient sur le réseau, puisque elles n'ont aucune capacité à régler leur production et de fournir des services pour le système électrique. Afin de faciliter leur intégration, il est indispensable de disposer des sources flexibles capables de réduire l'écart entre l'offre et la demande.

La problématique de la gestion de la puissance est l'une de ces thématiques de recherche et de développement qui peut se révéler déterminante pour favoriser techniquement et économiquement ces nouveaux modes de génération de puissance à ceux connectés au réseau électrique. Afin de surmonter ce problème et d'assurer la sécurité du réseau électrique, de nombreux pays ont récemment revu leurs réglementations « réseau ». C'est pour cela que des réglementations techniques pour le raccordement des installations de production au réseau électrique, sont bien prescrites dans des textes réglementaires. La référence [52] donne un aperçu sur ces réglementations.

De ce fait, les énergies éolienne et photovoltaïque sont appelées de plus en plus à se conformer aux exigences imposées par le gestionnaire du réseau. Parmi ces exigences on trouve les modes de contrôle de la puissance active (les réglages primaire et secondaire de la fréquence).

I.5.2.1. Contrôle absolu de la puissance active

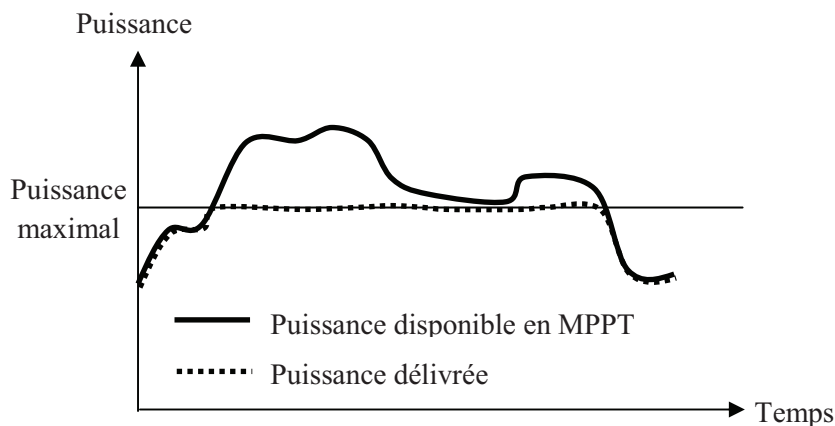


Figure I.31. Contrôle absolu de la puissance active.

Dans ce mode de contrôle, la puissance active produite ne doit pas dépasser un niveau maximum prédéfini par le gestionnaire de réseau, même en présence d'un surplus de puissance. Au dessous de ce maximum, la puissance est contrôlée pour fournir son maximum de puissance (en MPPT). La raison principale sollicitant ce mode de contrôle est d'éviter d'avoir un surplus de puissance lorsqu'il n'y a pas assez de consommation. Sinon, le gestionnaire doit exporter l'excès de puissance aux réseaux électriques voisins gratuitement [53] [54] [55].

I.5.2.2. Allocation d'une puissance de réserve

Ce type de contrôle limite la production électrique en dessous de la puissance disponible avec une puissance de réserve fixe (ΔP). Ce contrôle permet aux énergies éolienne et photovoltaïque de participer au réglage primaire de la fréquence. Si cette dernière diminue, la source sera capable d'augmenter sa production en gardant la fréquence dans des limites admissibles. Par ailleurs, ce contrôle peut aider à réduire les fluctuations de la puissance active [53] [54] [55].

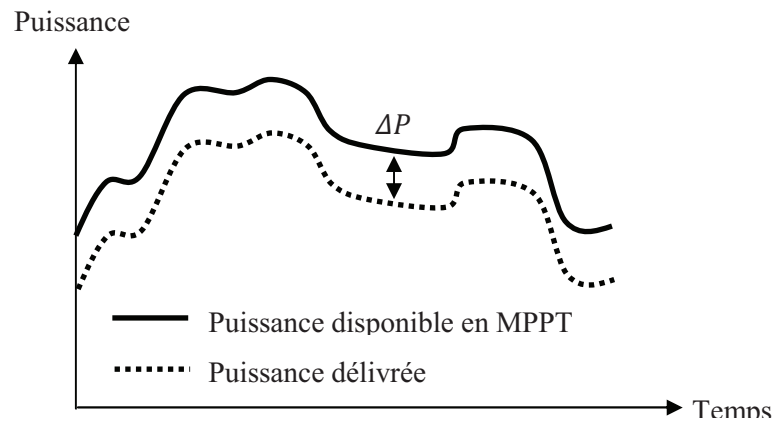


Figure I.32. Allocation d'une puissance de réserve.

I.5.2.3. Contrôle du gradient de puissance

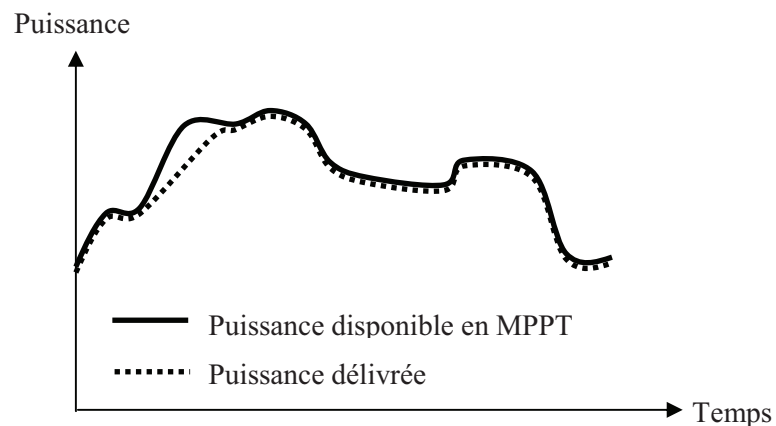


Figure I.33. Contrôle du gradient de puissance.

Lors de la perte d'une centrale électrique conventionnelle, la centrale électrique non-conventionnelle augmente sa production avec un gradient de puissance maximale pour

compenser la perte de génération d'électricité et garder ainsi l'équilibre de production de la puissance [53] [54] [55].

I.5.2.4. Contrôle de l'équilibre en puissance

Pendant ce mode de contrôle, la centrale électrique non-conventionnelle doit être capable d'augmenter ou de diminuer sa puissance fournie d'une manière très rapide afin de participer à l'équilibre de la production et de la consommation de la puissance active dans le réseau électrique. La centrale électrique renouvelable participe alors au réglage secondaire et doit être interfacée au poste de dispatching du gestionnaire de réseau [53] [54] [55].

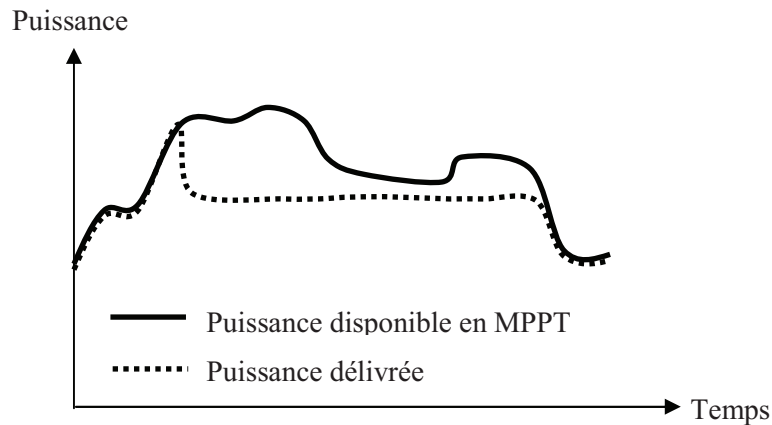


Figure I.34. Contrôle d'équilibre de la puissance active.

I.5.2.5. Contrôle de la puissance pour la protection du système

Ce type de contrôle est sollicité pour protéger le système électrique lorsqu'il y a une surcharge du réseau électrique. Dans ce cas, le gestionnaire de réseau exige la réduction de la production de la centrale électrique non-conventionnelle d'une manière rapide. La réduction de la puissance sera maintenue jusqu'à ce que le signal de l'activation de la protection disparaisse [53] [54] [55].

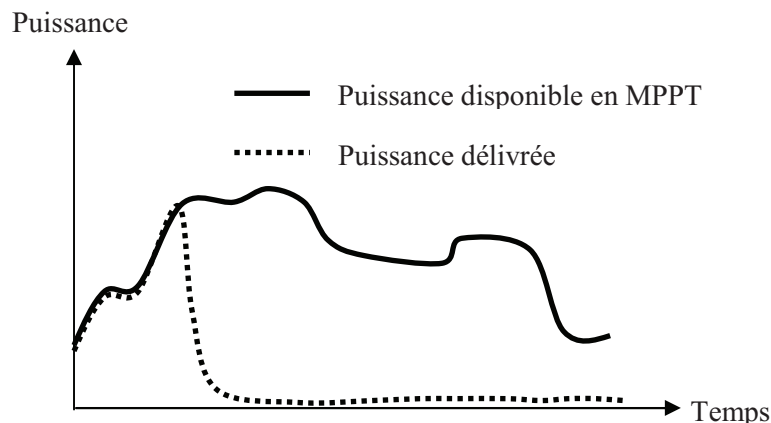


Figure I.35. Contrôle de la puissance pour la protection du système

I.5.3. Organisation de la supervision du système étudié

Afin de contrôler le réseau électrique, le gestionnaire de réseau doit gérer la centrale électrique non-conventionnelle comme une centrale électrique conventionnelle. Le schéma global d'un tel système est présenté sur la figure I.36.

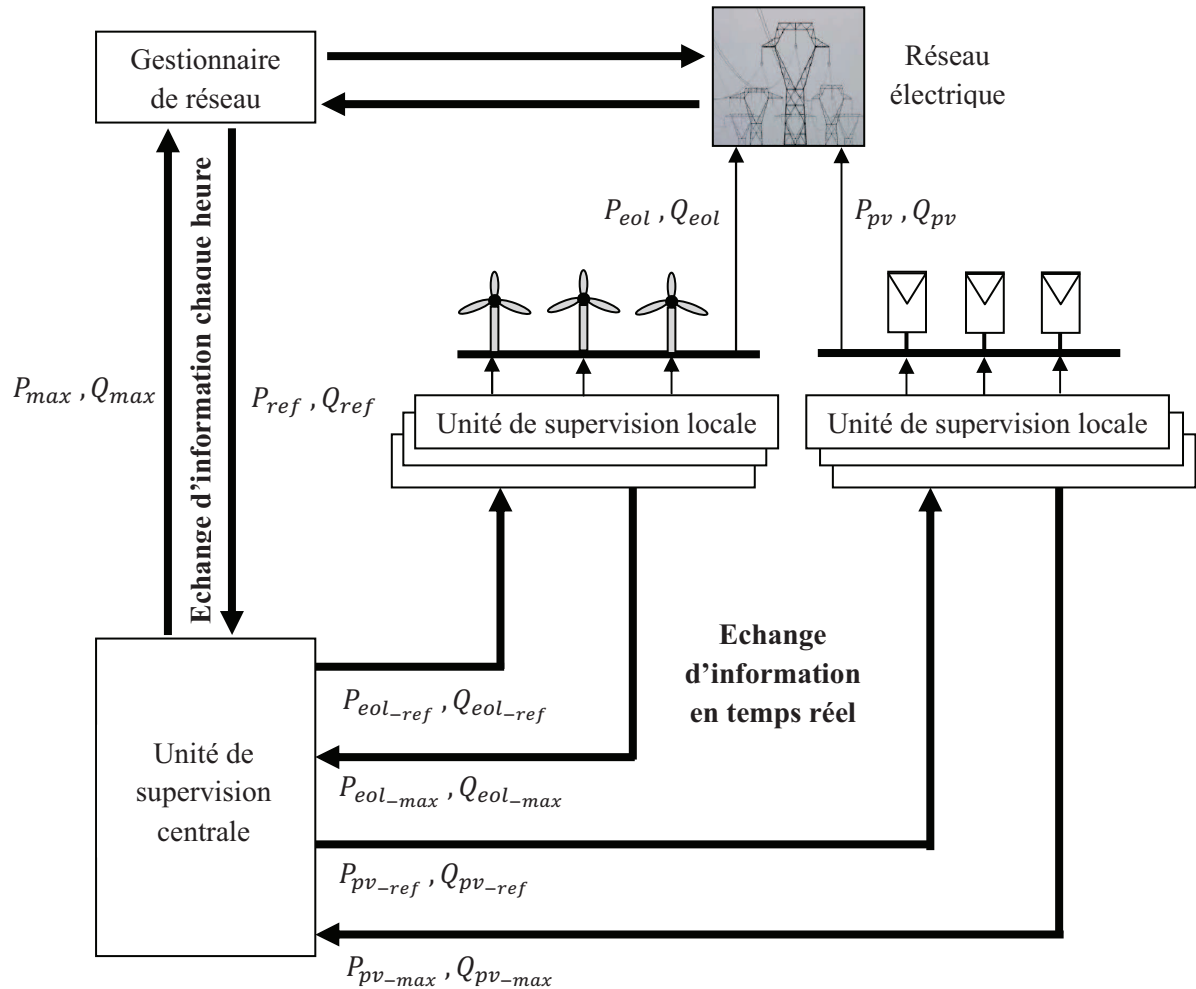


Figure I.36. Schéma synoptique du système étudié.

L'objectif principal de l'unité de supervision centrale est le contrôle des puissances active et réactive totales de la centrale électrique non-conventionnelle selon un plan de production demandé chaque heure par le gestionnaire de réseau. D'une part, cette unité reçoit une demande de puissance (P_{ref}, Q_{ref}) du gestionnaire de réseau. D'autre part, elle envoie à ce dernier les informations sur la capacité maximale de production de puissance (P_{max}, Q_{max}).

Entre autres, l'unité de supervision locale à l'intérieur de chaque éolienne et chaque système photovoltaïque doit donner les puissances actives et réactives de référence de chaque système, reçues de l'unité de supervision centrale. Par ailleurs, cette unité calcule en temps réel les puissances maximales que peut produire chaque éolienne et chaque système photovoltaïque afin de les envoyer à l'unité de supervision centrale.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement présenté les différentes sources d'énergie renouvelable pour produire de l'énergie électrique. Parmi ces sources renouvelables, l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne ont connu des progrès immenses et deviendront des sources renouvelables prometteuses dans l'avenir. De plus, les technologies actuelles sont connues, fiables et de maintenance relativement facile. C'est donc ces deux technologies que nous avons décidé d'étudier.

Dans cette thèse, on s'intéresse essentiellement aux éoliennes à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation à axe horizontal fonctionnant à vitesse variable. Ces éoliennes sont très adaptées pour la connexion au réseau électrique. Pour les systèmes de commande, nous avons opté pour des commandes du système électrique qui nécessite un très faible entretien et des coûts de mise en œuvre faibles. Concernant la commande MPPT, nous avons choisi celle qui est la plus utilisée dans la pratique, à savoir la PSF (Power Signal Feedback).

Quant à l'énergie photovoltaïque, on a choisi la configuration à bus continu intermédiaire entre l'hacheur et l'onduleur. Cette architecture assure le contrôle de la puissance photovoltaïque sans être perturbée par les défauts du réseau, et tient en compte les exigences techniques (commandes) et économiques (investissements). Concernant la commande MPPT, nous avons choisi la méthode indirecte qui est basée sur la connaissance de la caractéristique non linéaire du générateur photovoltaïque.

Nous avons présentés également l'intégration de ces énergies (éolienne et photovoltaïque) au réseau électrique, en montrant l'intérêt d'un système multisource et les réglementations techniques pour la connexion de ces énergies.

Ce chapitre nous a donc permis de fixer notre choix sur la structure du système à étudier "un système d'énergie multi source (éolienne et photovoltaïque) connecté au réseau".

Chapitre II

*Commande de la puissance
d'un système de conversion
d'énergie éolienne*

Chapitre II

Commande de la puissance d'un système de conversion d'énergie éolienne

II.1. Introduction

Ces dernières années, il y a eu une évolution de la production d'électricité basée sur l'énergie éolienne. Cette source d'énergie s'est développée compte tenu surtout de la diversité des zones exploitables et du coût relativement intéressant [56].

Actuellement la plupart des éoliennes sont équipées d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), ceci est due à plusieurs avantages [17] [57]:

- la génération à vitesse variable ($\pm 30\%$ autour de la vitesse du synchronisme),
- le contrôle découplé des puissances actives et réactives,
- la stabilité de l'angle rotorique,
- la réduction des contraintes mécaniques et le bruit acoustique,
- l'amélioration de la qualité de puissance et le faible coût.

Ce chapitre a pour objectifs de présenter la modélisation et la commande du système éolien à vitesse variable basé sur une GADA. Dans un premier temps, nous présenterons les modèles des différents éléments constituant la chaîne de conversion de l'éolienne. Dans un deuxième temps, nous détaillerons la loi de commande permettant un contrôle indépendant des puissances active et réactive. La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats obtenus, validant ainsi la commande établie.

II.2. Modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne

L'étude du comportement d'un système est une tâche difficile qui nécessite avant tout une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés. Nous devons disposer d'un modèle mathématique qui représente d'une manière satisfaisante le comportement réel de ce système. Afin d'étudier la dynamique de ce système de production électrique, un modèle précis de la conversion énergétique est nécessaire.

Le système de conversion d'énergie éolienne étudié dans cette thèse, est basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), qui fonctionne à des vitesses variables. La Figure II.1, présente la configuration étudiée.

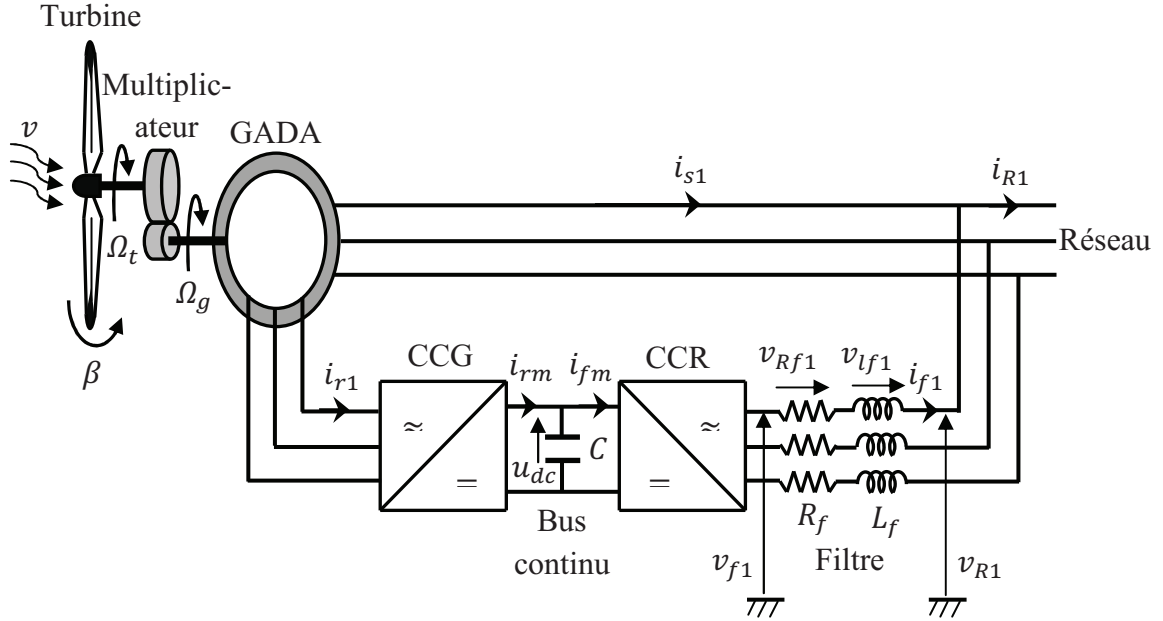


Figure II.1. Système de conversion d'énergie éolienne à base d'une GADA

II.2.1. Modélisation de la turbine

La turbine convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et la puissance mécanique disponible sur la turbine d'une éolienne est donnée par [58]:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot v^3 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- ρ [kg/m³]: la masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C) ;
- R [m]: le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale ;
- C_p : le coefficient de puissance (le rendement aérodynamique de la turbine) ;
- λ : le coefficient de la vitesse relative (le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent) ;
- β [degré]: l'angle des pales ou bien l'angle de calage ;
- v [m/s]: la vitesse du vent.

Où λ est défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- Ω_t [rad/s]: la vitesse de rotation de la turbine.

Et l'expression du coefficient de puissance pour cette étude, est donnée par [58]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2 - C_3 * \beta - C_4 * \beta^2 - C_5)e^{C_6(\lambda_i\beta)} \quad (\text{II.3})$$

Avec : $C_1 = 0.631$, $C_2 = 116/\lambda_i$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 0$, $C_5 = 5$, $C_6 = -18.3/\lambda_i$

$$\text{Et } \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008 * \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Connaissant la puissance mécanique de la turbine (équation II.1) et tirant l'expression de la vitesse de rotation de la turbine de l'équation II.2, le couple mécanique C_t [Nm] de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \cdot \rho \cdot R^3 \cdot v^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.4})$$

II.2.2. Modélisation du multiplicateur

Le couplage entre la turbine et la génératrice est faite par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. Ce dernier adapte la vitesse de rotation lente de l'arbre mécanique de la turbine à la vitesse de rotation rapide de l'arbre mécanique de la génératrice.

En considérant que le multiplicateur est idéal (les pertes mécaniques sont négligeables), il est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.5})$$

$$\Omega_g = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.6})$$

Et l'équation du système mécanique de l'ensemble turbine-génératrice est donné par :

$$C_g - C_{em} = \left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_t}{G^2} + f_g \right) \Omega_g \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- J_t [kg.m²]: le moment d'inertie de la turbine ;
- f_t [Nm.s/rad]: coefficient de frottement de la turbine ;
- G : le rapport du multiplicateur ;
- J_g [kg.m²]: le moment d'inertie de la génératrice ;
- f_g [Nm.s/rad]: coefficient de frottement de la génératrice ;
- C_g [Nm]: le couple mécanique de la génératrice ;
- C_{em} [Nm]: le couple électromagnétique de la génératrice ;
- Ω_g [rad/s]: la vitesse de rotation de la génératrice.

II.2.3. Modélisation de la GADA

La turbine via un multiplicateur entraîne la GADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également au travers d'une chaîne de convertisseurs d'électronique de puissance par le rotor. La GADA convertit l'énergie mécanique en énergie électrique pour l'injecter au réseau électrique. Et si les pertes sont négligées, cette conversion est exprimée par [13]:

$$P_t = (1 + g)P_s \quad (\text{II.8})$$

Ainsi le système d'équation suivant décrit la modélisation globale de la GADA dans le référentiel de Park [59].

Les équations des tensions statoriques et rotoriques sont définies par :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sq} \quad (\text{II.9})$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{sd} \quad (\text{II.10})$$

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{rq} \quad (\text{II.11})$$

$$v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{rd} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

- v_{sd}, v_{sq}, v_{rd} et v_{rq} [V]: les tensions statoriques et rotoriques dans le repère de Park ;
- i_{sd}, i_{sq}, i_{rd} et i_{rq} [A]: les courants statoriques et rotoriques dans le repère de Park ;
- $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$ et φ_{rq} [Wb]: les flux statoriques et rotoriques dans le repère de Park ;
- R_s et R_r [Ω]: les résistances des bobinages statoriques et rotoriques ;
- ω_s et ω_r [rad/s]: les pulsations statoriques et rotoriques de la GADA.

Les flux statoriques et rotoriques, s'expriment par :

$$\varphi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \quad (\text{II.13})$$

$$\varphi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \quad (\text{II.14})$$

$$\varphi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \quad (\text{II.15})$$

$$\varphi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

- L_s et L_r [H]: les inductances cycliques statoriques et rotoriques ;
- M [H]: l'inductance mutuelle.

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques, s'expriment par :

$$P_s = v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq} \quad (\text{II.17})$$

$$Q_s = v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq} \quad (\text{II.18})$$

$$P_r = v_{rd} \cdot i_{rd} + v_{rq} \cdot i_{rq} \quad (\text{II.19})$$

$$Q_r = v_{rq} \cdot i_{rd} - v_{rd} \cdot i_{rq} \quad (\text{II.20})$$

Le couple électromagnétique est exprimé par les équations équivalentes suivantes:

$$C_{em} = \frac{N_p \cdot M}{L_s \cdot L_r - M} (\varphi_{rd} \cdot \varphi_{sq} - \varphi_{rq} \cdot \varphi_{sd}) \quad (\text{II.21})$$

$$C_{em} = \frac{N_p \cdot M}{L_s} (i_{rd} \cdot \varphi_{sq} - i_{rq} \cdot \varphi_{sd}) \quad (\text{II.22})$$

$$C_{em} = N_p \cdot M (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.23})$$

$$C_{em} = \frac{N_p \cdot M}{L_r} (\varphi_{rd} \cdot i_{sq} - \varphi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.24})$$

$$C_{em} = N_p (\varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.25})$$

Avec :

- N_p : le nombre de paires de pôles.

II.2.4. Modélisation du convertisseur d'électronique de puissance

Afin que la GADA fonctionne à des vitesses variables (en mode hypo ou hypersynchrone) le convertisseur d'électronique de puissance doit être bidirectionnel [60].

La chaîne de conversion d'électronique de puissance est composée de deux convertisseurs statiques un coté génératrice (CCG) et l'autre coté réseau (CCR) couplés sur un bus continu commun.

Le convertisseur étudié est constitué de trois cellules de commutation. Chacune d'elles est composée de deux transistors IGBT qui sont connectés à deux diodes en anti-parallèle permettant la bidirectionnalité de courant (Figure III.2). Les semi conducteurs seront considérés comme idéaux (pas de pertes par commutations), ceci conduit à considérer le convertisseur équivalent à interrupteurs idéaux de la figure II.3 pour la suite de l'étude.

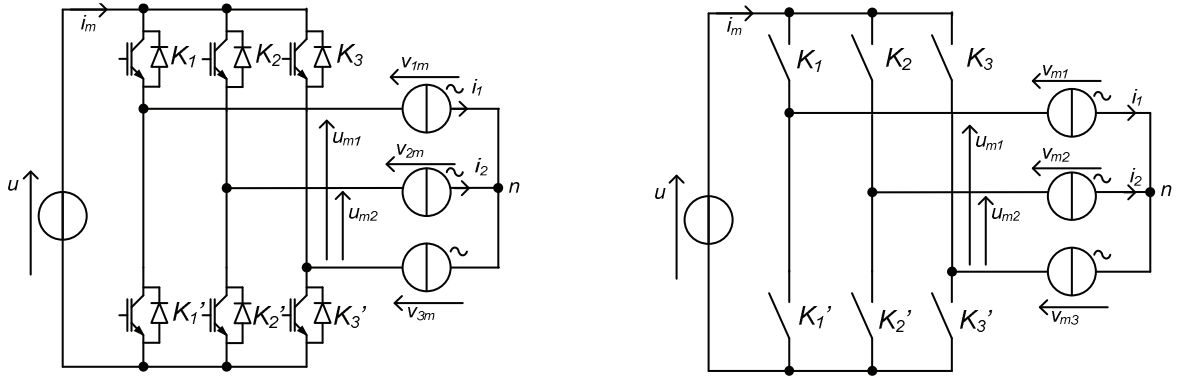


Figure II.2. Schéma électrique d'un onduleur **Figure II.3.** Onduleur à interrupteurs idéaux

Chaque ensemble transistor/diode synthétise un interrupteur idéal (K_n et K_n' avec $n \in \{1, 2, 3\}$). L'état de chaque interrupteur est quantifié par une fonction de connexion (s_{ij} et s_{ij}') qui prend une valeur 0 si l'interrupteur est ouvert et 1 si l'interrupteur est fermé.

$$s_{ij} \in \{0, 1\}, \text{ avec } \begin{cases} i \in \{1, 2, 3\} \\ j \in \{1, 2\} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Afin de ne pas court-circuiter la source de tension et de ne pas interrompre le courant, les deux interrupteurs de la même cellule doivent être à tout instant dans des états complémentaires :

$$s_{i1} + s_{i2} = 1 \quad \forall i \in \{1, 2, 3\} \quad (\text{II.27})$$

Les fonctions m_1 et m_2 sont appelées "fonctions de conversion". Pour un convertisseur ayant une structure matricielle, le vecteur des fonctions de conversion m dépend des fonctions de connexion selon :

$$m = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{11} \\ s_{12} \\ s_{13} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Alors les tensions et les courants modulés s'écrivent comme [61] :

$$\begin{cases} u_m = \begin{bmatrix} u_{m1} \\ u_{m2} \end{bmatrix} = m \cdot u \\ i_m = m^T \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = m^T \cdot i \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Avec les grandeurs i et u sont imposées par des sources considérées comme constantes sur la période Δt (fenêtre temporelle glissante).

Pour un système de tension équilibré, les tensions simples s'écrivent :

$$v_m = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} u_m \quad (\text{II.30})$$

Dans cette étude, on s'intéresse à l'utilisation des convertisseurs électroniques pour régler des grandeurs dans le système complet. Dès lors, un modèle moyen des convertisseurs est suffisant [62].

En généralisant les résultats établis précédemment, les modèles moyens des deux convertisseurs s'écrivent :

- Coté GADA :

$$m_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot s_r \quad (\text{II.31})$$

$$u_{rm} = m_r \cdot u_{dc} \quad (\text{II.32})$$

$$i_{rm} = m_r^T i_r \quad (\text{II.33})$$

$$v_{rm} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} u_{rm} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

- u_{rm} et v_{rm} [V]: les vecteurs des tensions composées et simples modulés;
- i_r et i_{rm} [A]: les courants rotoriques et les courants rotoriques modulés;
- m_r : la matrice de conversion.

- Coté réseau :

$$m_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot s_f \quad (\text{II.35})$$

$$u_{fm} = m_f \cdot u_{dc} \quad (\text{II.36})$$

$$i_{fm} = m_f^T i_f \quad (\text{II.37})$$

$$v_{fm} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} u_{fm} \quad (\text{II.38})$$

Avec :

- u_{fm} et v_{fm} [V]: les vecteurs des tensions composées et simples modulés;
- i_f et i_{fm} [A]: les courants du filtre et les courants du filtre modulés;
- m_f : la matrice de conversion ;

II.2.5. Modélisation du bus continu

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (\text{II.39})$$

Avec C [F] représente la capacité du bus continu.

Le courant dans le condensateur est issu d'un nœud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCG et CCR :

$$i_c = i_{rm} - i_{fm} \quad (\text{II.40})$$

II.2.6. Modélisation du filtre

Le CCR est relié au réseau à travers un filtre triphasé. Celui-ci a pour rôle d'atténuer les harmoniques de courant.

Le courant circulant entre le CCR et le réseau est donné par:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} v_{lf} \quad (\text{II.41})$$

Ainsi la tension à la borne du filtre s'écrit :

$$v_{lf} = v_R - v_f - v_{Rf} \quad (\text{II.42})$$

Où

$$v_{Rf} = R_f i_f \quad (\text{II.43})$$

Avec :

- v_R [V]: la tension du réseau ;
- L_f [H]: l'inductance du filtre ;
- R_f [Ω]: la résistance du filtre.

II.2.6. Modélisation de la connexion de la GADA avec le réseau

La connexion de la GADA au réseau est directe par le stator et par l'intermédiaire d'un CCG, CCR et filtre par le rotor. Ainsi la connexion peut s'exprimer comme :

$$i_R = i_s + i_f \quad (\text{II.44})$$

$$v_R = v_s \quad (\text{II.45})$$

II.3. Stratégie de commande d'un système de conversion d'énergie éolienne

D'après la Figure II.1, deux commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- Commande du CCG en contrôlant les puissances active et réactive statorique de la GADA.
- Commande du CCR en contrôlant la tension du bus continu et les puissances active et réactive échangées avec le réseau.

II.3.1. Commande du convertisseur coté GADA (CCG)

II.3.1.1. Commande vectorielle de la GADA

De nombreuses techniques de commande de la GADA ont été traitées [63] [64] [65] [66], parmi elles on trouve la commande vectorielle à orientation de flux statorique. Cette technique offre certains avantages tels que : la protection de la GADA contre les courants à haute intensité, fonctionnement de la GADA comme un filtre actif, et la réalisation pratique [59].

Pour pouvoir commander facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser une commande indépendante des puissances active et réactive, en établissant les équations qui lient les puissances active et réactive statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la GADA [59] [67]. Et pour y arriver on suit les étapes suivantes :

A. Choix du référentiel

Le champ statorique tourne en régime permanent, à la vitesse de synchronisme. Il est symbolisé par le vecteur flux statorique qui donne une idée visuelle de la phase et de l'amplitude du flux.

En choisissant un référentiel diphasé $d - q$ lié au champ tournant statorique [17] et en alignant le vecteur flux statorique φ_s avec l'axe d , nous pouvons écrire d'après la figure II.4:

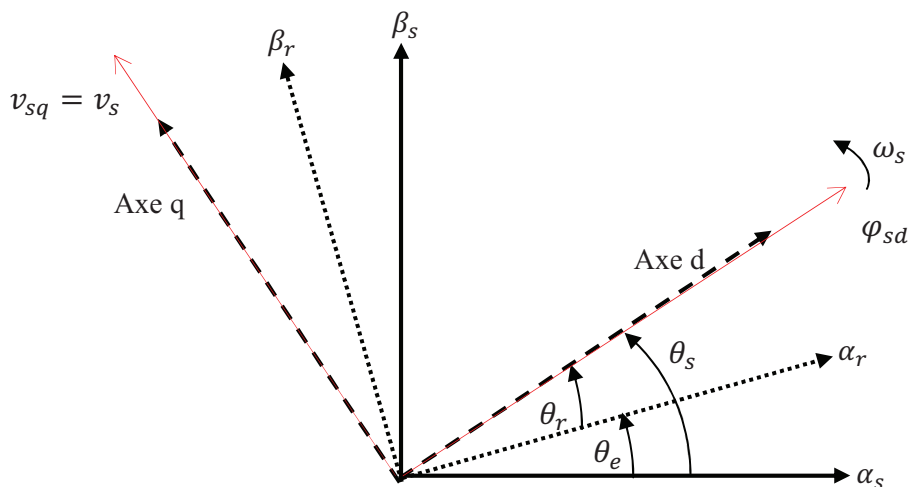


Figure II.4. Référentiel diphasé $d - q$ lié au champ tournant statorique.

$$\begin{cases} \dot{\theta}_s = \omega_s \\ \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{\theta}_e = \omega_e = \omega_s - \omega_r = N_p \Omega_g \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Avec :

- θ_s et θ_r [rad]: les angles de Park statoriques et rotoriques.
- θ_e [rad]: l'angle électrique entre les bobinages statorique et rotorique.
- ω_e [rad/s]: la pulsation électrique entre les bobinages statorique et rotorique.

Et :

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{sq} = 0 \quad (\text{II.47})$$

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

$$v_{sn} = R_s I_{sn} + \frac{d\varphi_{sn}}{dt} \quad (\text{II.48})$$

Si on néglige la résistance statorique R_s (hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne [60]) l'équation (II.47) devient:

$$v_{sn} \cong \frac{d\varphi_{sn}}{dt} \quad (\text{II.49})$$

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

Dans l'hypothèse où le flux φ_{sd} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator [17]), on peut écrire :

$$v_{sd} = 0 \text{ et } v_{sq} = v_s \quad (\text{II.50})$$

En s'alignant sur le repère choisi et en utilisant les simplifications ci-dessus inhérentes à ce repère, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$v_{sd} = 0 \quad (\text{II.51})$$

$$v_{sq} = v_s = \omega_s \cdot \varphi_{sd} \quad (\text{II.52})$$

$$\varphi_s = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \quad (\text{II.53})$$

$$0 = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \quad (\text{II.54})$$

A partir des équations (II.53) et (II.54), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$i_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot i_{rd} \quad (\text{II.55})$$

$$i_{sq} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{rq} \quad (\text{II.56})$$

B. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

L'adaptation des équations (II.17) et (II.18) des puissances active et réactive au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas donnent :

$$P_s = v_s \cdot i_{sq} \quad (\text{II.57})$$

$$Q_s = v_s \cdot i_{sd} \quad (\text{II.58})$$

En remplaçant i_{sd} et i_{sq} par leurs expressions (équations (II.55) et (II.56)), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$P_s = -v_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{rq} \quad (\text{II.59})$$

$$Q_s = \frac{v_s \cdot \varphi_s}{L_s} - \frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{rd} \quad (\text{II.60})$$

En approximant φ_s par v_s/ω_s , l'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q_s = \frac{v_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{rd} \quad (\text{II.61})$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante $v_s^2/\omega_s \cdot L_s$ près imposée par le réseau.

C. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les équations (II.15) et (II.16) en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans les équations (II.55) et (II.56) :

$$\varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{rd} + \frac{M \cdot v_s}{\omega_s \cdot L_s} \quad (\text{II.62})$$

$$\varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{rq} \quad (\text{II.63})$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées des équations (II.11) et (II.12). Nous obtenons alors :

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{rd}}{dt} - g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{rq} \quad (\text{II.64})$$

$$v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{rq}}{dt} + g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot v_s}{\omega_s \cdot L_s} \quad (\text{II.65})$$

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

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} - g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{rq} \quad (\text{II.66})$$

$$v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot v_s}{\omega_s \cdot L_s} \quad (\text{II.67})$$

D. Relation entre puissance statorique et tension rotorique

Les équations (II.59), (II.61), (II.66) et (II.67) permettent d'établir les relations suivantes :

$$P_s = [v_{rq} - e_{Fe} - e_d] \cdot \left[\frac{1}{R_r + p \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \cdot \left(-\frac{M v_s}{L_s} \right) \right] \quad (\text{II.68})$$

$$Q_s = [v_{rd} - e_q] \cdot \left[\frac{1}{R_r + p \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \cdot \left(-\frac{M v_s}{L_s} \right) \right] \quad (\text{II.69})$$

Avec e_d et e_q sont les termes de couplage entre les deux axes d et q , et e_{Fe} représente la force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Ainsi ces termes sont définies par :

$$e_d = g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{rd} \quad (\text{II.70})$$

$$e_q = g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{rq} \quad (\text{II.71})$$

$$e_{Fe} = \left(g \cdot \omega_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \varphi_{sd} \right) \quad (\text{II.72})$$

Les équations (II.68) et (II.69) font apparaitre des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Ils montrent également l'influence du couplage et l'erreur de trainage

provoquée par la force électromotrice. Afin d'effectuer la commande en puissance de la GADA, on opte pour la commande vectorielle indirecte. Cette commande consiste à reproduire en sens inverse les équations (II.68) et (II.69) en imposant à la GADA des tensions rotoriques (v_{rq} , v_{rd}) pour obtenir les puissances voulues [17] [59] [68].

Seulement, il faut que la commande prend en considération les influences de l'effet de couplage et l'erreur de trainage. Pour cela il faut que chaque axe soit commandé indépendamment avec chacun ses propres régulateurs (régulateurs des puissances et régulateurs des courants rotorique).

La Figure II.5 représente le schéma bloc de la commande du CCG.

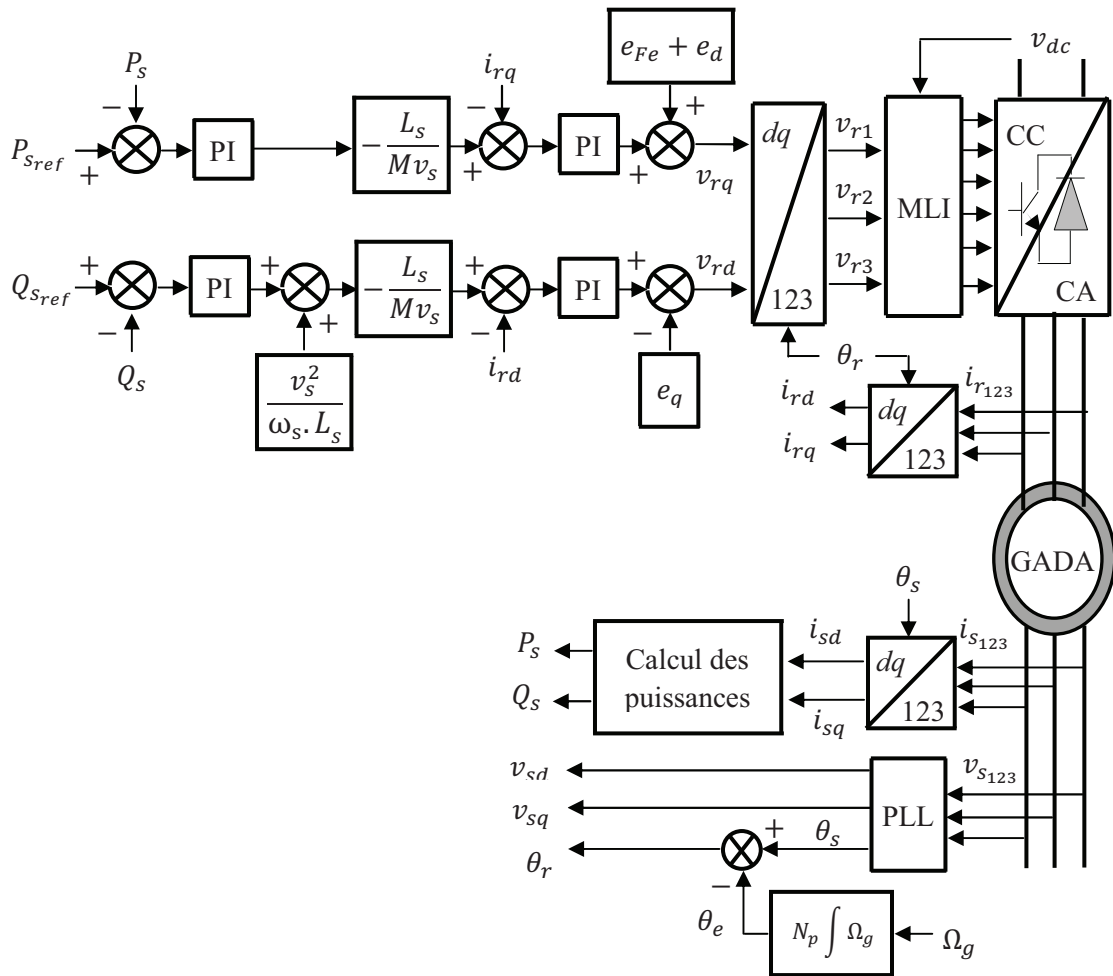


Figure II.5. Commande du CCG.

II.3.1.2. Synthèse des régulateurs PI

Dans la commande du CCG on a utilisé quatre régulateurs, deux pour la régulation des puissances et les deux autres régulateurs pour les courants rotoriques. Et afin d'établir les boucles de régulation, nous supposons que le CCG est idéal. De plus, nous négligeons les termes de couplage et de la force électromotrice. Nous remarquons ainsi que les fonctions

de transfert des deux axes d et q sont identiques. Ceci justifie l'utilisation des régulateurs de mêmes paramètres pour les deux axes.

Le schéma bloc de la régulation dans l'axe q en boucle fermée du CCG est représenté par la figure suivante :

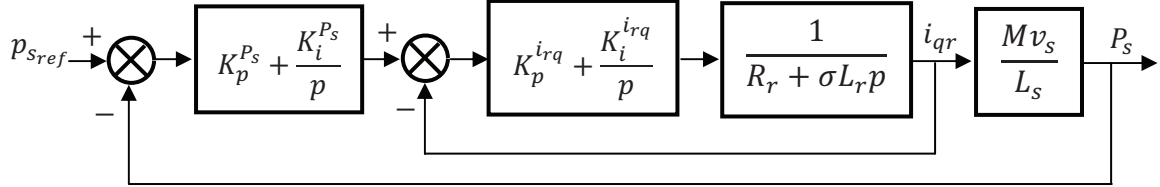


Figure II.6. Schéma bloc de régulation dans l'axe q du CCG.

D'après la figure II.5, on remarque qu'il y a deux boucles de régulation ; une externe (régulation de la puissance) et l'autre interne (régulation du courant). Pour le calcul des paramètres du régulateur de la boucle interne, on utilise la régulation idéale. Et pour la boucle externe, on utilise la régulation parfaite.

On appelle régulation idéale si la fonction de transfert en boucle fermée est de 1^{er} ordre. En conséquence, la fonction de transfert en boucle ouverte de la régulation de courant est donnée par :

$$\left(K_p^{i_{rq}} + \frac{K_i^{i_{rq}}}{p} \right) \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} = \frac{1}{T p} \quad (\text{II.73})$$

Après calcul et par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur :

$$\begin{cases} K_p^{i_{rq}} = \frac{3\sigma L_r}{t_s^{i_{rq}}} \\ K_i^{i_{rq}} = \frac{3R_r}{t_s^{i_{rq}}} \end{cases} \quad (\text{II.74})$$

Avec :

- $t_s^{i_{rq}}$ [s]: le temps de réponse de la boucle fermée du courant.

Et on appelle régulation parfaite si la fonction de transfert en boucle fermée est de 2^{ème} ordre.

La fonction de transfert en boucle fermée de la régulation de puissance est donnée comme suit :

$$FTBF_{P_s} = \frac{\left(K_p^{P_s} + \frac{K_i^{P_s}}{p}\right) \frac{M v_s}{L_s + T L_s p}}{1 + \left(K_p^{P_s} + \frac{K_i^{P_s}}{p}\right) \frac{M v_s}{L_s + T L_s p}} \quad (\text{II.75})$$

Après simplification, il en résulte :

$$FTBF_{P_s} = \frac{\frac{(K_p^{P_s} p + K_i^{P_s}) M v_s}{T L_s}}{p^2 + \frac{L_s + K_p^{P_s} M v_s}{T L_s} p + \frac{K_i^{P_s} M v_s}{T L_s}} \quad (\text{II.76})$$

Le dimensionnement du régulateur est fait à l'aide du principe de placement des pôles. Comme le polynôme caractéristique est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles complexes à partie réelle négative pour assurer la stabilité en boucle fermée. Afin d'avoir une réponse avec amortissement relatif optimale, les pôles sont choisis complexes conjugués à partie réelle égale à la partie imaginaire [69].

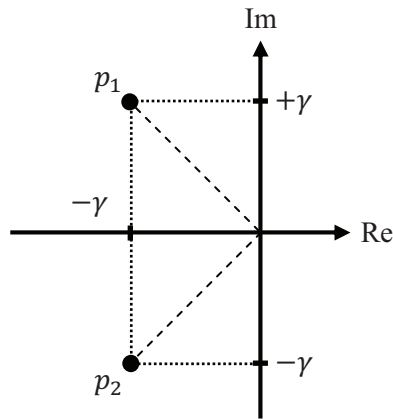


Figure II.7. Position des pôles dans le plan de phase.

En imposant les pôles $p_{1,2} = -\gamma \pm j\gamma$ le polynôme caractéristique s'écrit comme suit :

$$p^2 + 2\gamma p + 2\gamma^2 \quad (\text{II.77})$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{cases} K_p^{P_s} = \frac{2\gamma T L_s - L_s}{M v_s} \\ K_i^{P_s} = \frac{2\gamma^2 T L_s}{M v_s} \end{cases} \quad (\text{II.78})$$

II.3.2. Commande du convertisseur coté réseau (CCR)

L'objectif de ce convertisseur est de garder la tension du bus continu constante quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance rotorique de la GADA. Et d'assurer un contrôle indépendant des puissances active et réactive entre le bus continu et le réseau avec un facteur de puissance unitaire.

II.3.2.1. Contrôle indépendant des puissances active et réactive

D'après les équations (II.41), (II.42) et (II.43) nous pouvons écrire dans le repère triphasé les expressions suivantes :

$$v_{f1} = -R_f i_{f1} - L_f \frac{di_{f1}}{dt} + v_{s1} \quad (\text{II.79})$$

$$v_{f2} = -R_f i_{f2} - L_f \frac{di_{f2}}{dt} + v_{s2} \quad (\text{II.80})$$

$$v_{f3} = -R_f i_{f3} - L_f \frac{di_{f3}}{dt} + v_{s3} \quad (\text{II.81})$$

En appliquant la transformation de Park aux trois équations précédentes, nous obtenons :

$$v_{fd} = -R_f i_{fd} - L_f \frac{di_{fd}}{dt} + \omega_s L_f i_{fq} + v_{sd} \quad (\text{II.82})$$

$$v_{fq} = -R_f i_{fq} - L_f \frac{di_{fq}}{dt} + \omega_s L_f i_{fd} + v_{sq} \quad (\text{II.83})$$

Les puissances active et réactive générées par le CCR sont définies par :

$$P_f = v_{fd} \cdot i_{fd} + v_{fq} \cdot i_{fq} \quad (\text{II.84})$$

$$Q_f = v_{fq} \cdot i_{fd} - v_{fd} \cdot i_{fq} \quad (\text{II.85})$$

En considérant le repère $d - q$ lié au champ tournant statorique ($v_{Rd} = 0$), les équations (II.82) et (II.83) deviennent :

$$v_{fd} = -R_f i_{fd} - L_f \frac{di_{fd}}{dt} + e_{fd} \quad (\text{II.86})$$

$$v_{fq} = -R_f i_{fq} - L_f \frac{di_{fq}}{dt} + v_{sq} + e_{fq} \quad (\text{II.87})$$

Où les termes de couplage entre les deux axes d et q s'écrivent :

$$e_{fd} = \omega_s L_f i_{fq} \quad (\text{II.88})$$

$$e_{fq} = \omega_s L_f i_{fd} \quad (\text{II.89})$$

En négligeant les pertes dans la résistance R_f du filtre RL et en tenant compte de l'orientation du repère $d - q$ lié au champ tournant statorique, les équations (II.84) et (II.85) deviennent :

$$P_f = v_{fq} \cdot i_{fq} \quad (\text{II.90})$$

$$Q_f = v_{fq} \cdot i_{fd} \quad (\text{II.91})$$

Ainsi, les puissances active et réactive sont respectivement contrôlées par i_{fq} et i_{fd} .

Le modèle de la liaison du CCR au réseau dans le repère $d - q$ suivant le champ tournant statorique (équations (II.86) et (87)) nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants circulant dans le filtre RL étant donné, qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront les courants dans le filtre RL d'axes $d - q$.

II.3.2.2. Contrôle de la tension du bus continu

En négligeant, les harmoniques dues aux commutations et l'ensemble des pertes Joule (pertes dans le convertisseur et le filtre RL), on peut alors écrire les puissances mises en jeu sur le bus continu par:

$$P_f = v_{dc} i_f \quad (\text{II.92})$$

$$P_r = v_{dc} i_r \quad (\text{II.93})$$

$$P_c = v_{dc} i_c \quad (\text{II.94})$$

Ces puissances sont liées par la relation :

$$P_f = P_r - P_c \quad (\text{II.95})$$

En contrôlant la puissance P_f , il est alors possible de contrôler la puissance P_c dans le condensateur et donc contrôler la tension du bus continu. Pour ce faire, les puissances P_r et P_c doivent être connues afin de déterminer $P_{f_{ref}}$.

La référence de puissance pour le condensateur est liée au courant de référence circulant dans le condensateur :

$$P_{c_{ref}} = v_{dc} i_{c_{ref}} \quad (\text{II.96})$$

La régulation de la tension du bus continu s'effectue alors par une boucle externe (par rapport à la boucle interne de régulation des courants), permettant de maintenir une tension constante sur le bus continu, avec un correcteur générant le courant de référence $i_{c_{ref}}$ dans le condensateur.

La Figure II.8 représente le schéma bloc de la commande du CCR.

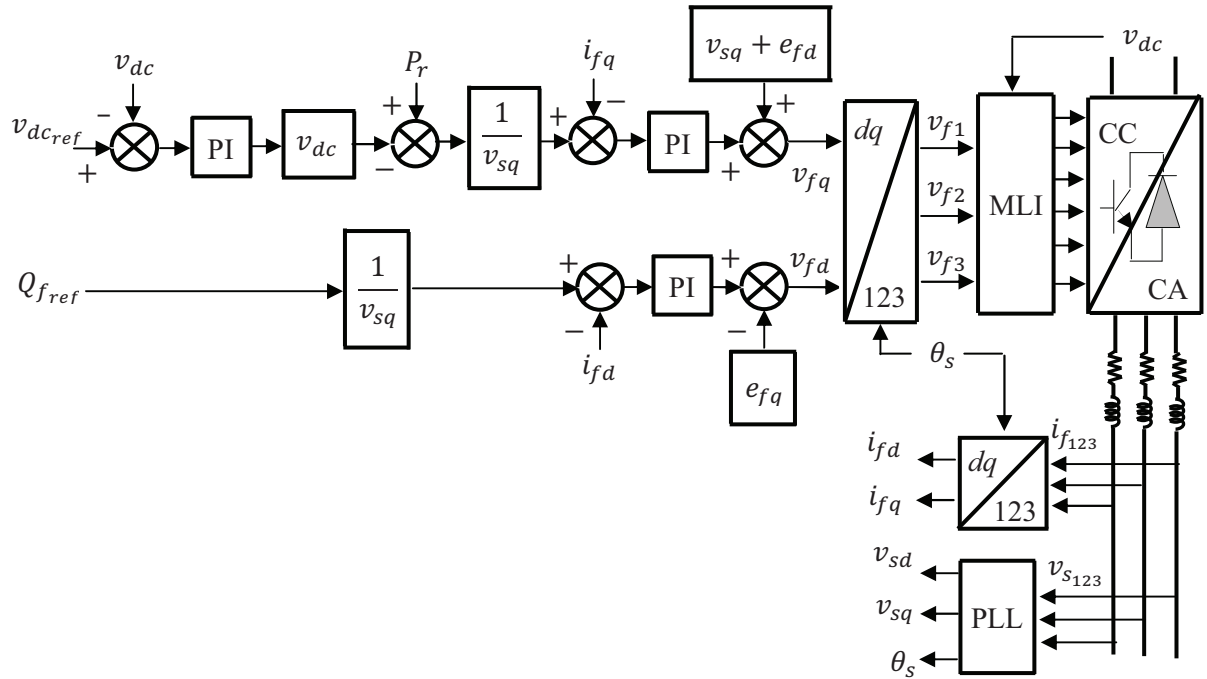


Figure II.8. Commande du CCR.

II.3.2.3. Synthèse des régulateurs PI

Dans la commande du CCR on a utilisé trois régulateurs, deux pour la régulation des courants du filtre et un régulateur pour la tension de bus continu. Et comme la commande de CCM, nous supposons que le CCR est idéal, et nous négligeons les termes de couplage. Nous remarquons aussi que les fonctions de transfert des deux courants sont identiques. Ceci justifie l'utilisation des régulateurs de mêmes paramètres pour les deux courants.

Le schéma bloc de la régulation du courant i_{fq} en boucle fermée est représenté par la figure II.9.

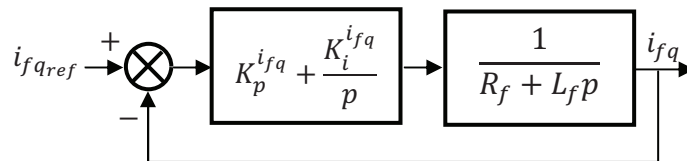


Figure II.9. Schéma bloc de régulation du courant i_{fq} .

En utilisant la régulation idéale, nous trouvons les paramètres de régulateur PI comme suit :

$$\begin{cases} K_p^{i_{fq}} = \frac{3L_f}{t_s} \\ K_i^{i_{fq}} = \frac{3R_f}{t_s} \end{cases} \quad (\text{II.97})$$

Et le schéma bloc de la régulation de la tension du bus continu en boucle fermée est représenté par la figure II.10.

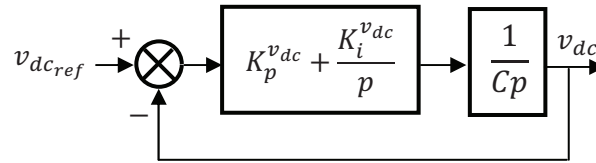


Figure II.10. Schéma bloc de régulation de la tension du bus continu.

Et en utilisant la régulation parfaite, nous trouvons les paramètres de régulateur PI comme suit :

$$\begin{cases} K_p^{v_{dc}} = 2\xi C \omega_0 \\ K_i^{v_{dc}} = C \omega_0^2 \end{cases} \quad (\text{II.98})$$

II.4. Résultats obtenus

Afin de valider la commande étudiée dans ce chapitre et de montrer ses performances, nous avons fait une série de tests.

Le premier test consiste à imposer un profil de vent lisse (échelon) et faire varier la puissance active et réactive. Conditions du test:

- à $t = 20$ s, la vitesse de vent passe de 8 à 11 m/s ;
- à $t = 40$ s, la puissance réactive statorique passe de 0 à -5000 VAR ;
- à $t = 60$ s, la puissance active passe du mode MPPT au mode Delta ($\Delta P = 2000$ W).

Le deuxième test consiste à imposer un profil de vent aléatoire (proche de la réalité) et de garder la deuxième et la troisième condition du premier test.

Le troisième test consiste à faire varier les paramètres du modèle de la GADA utilisé (test de robustesse) et de refaire le premier et le deuxième test. La résistance augmente de 50%, et les inductances diminuent de 50%.

Dans les trois tests, la tension de référence du bus continu, est fixée à 700 V, et la puissance réactive de référence Q_{fref} est fixée à 0 VAR.

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab de la société MathWorks ainsi qu'avec les bibliothèques associées à Matlab : SymPower Systems et Simulink.

II.4.1. Résultat du premier test (profil du vent lisse)

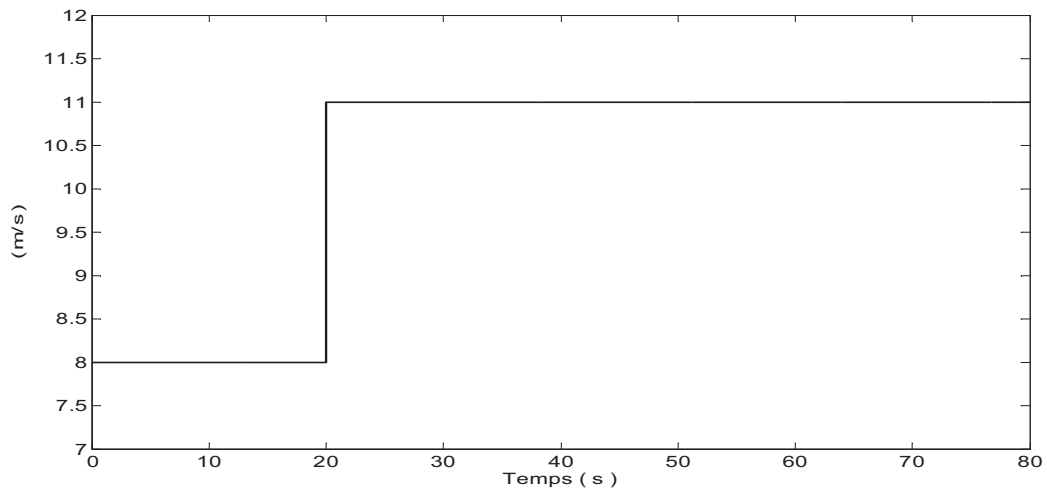


Figure II.11. Profil du vent.

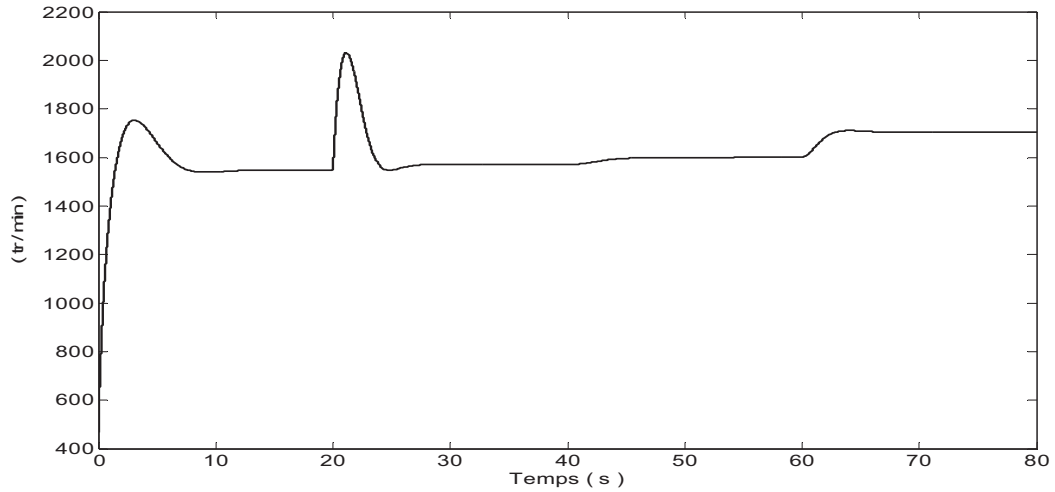


Figure II.12. Réponse de la vitesse mécanique de la GADA.

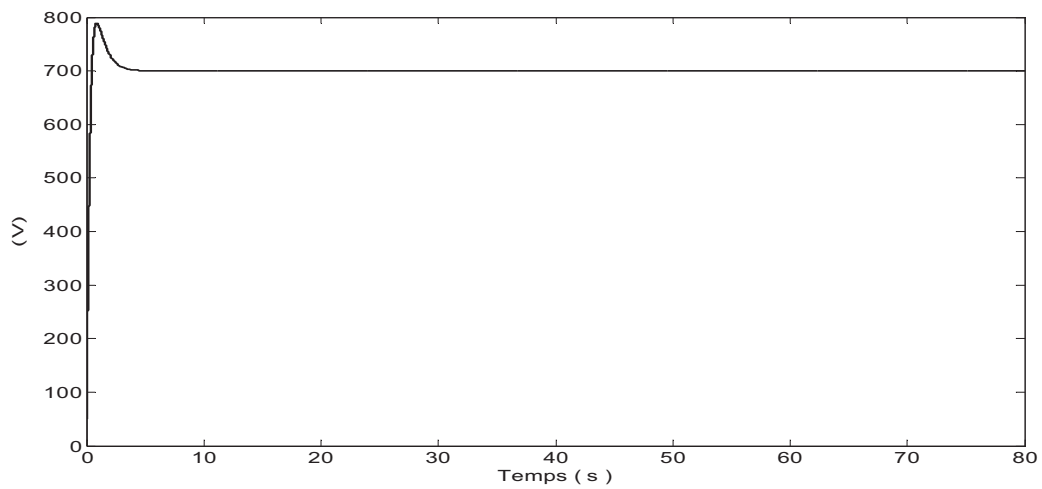


Figure II.13. Réponse de la tension du bus continu.

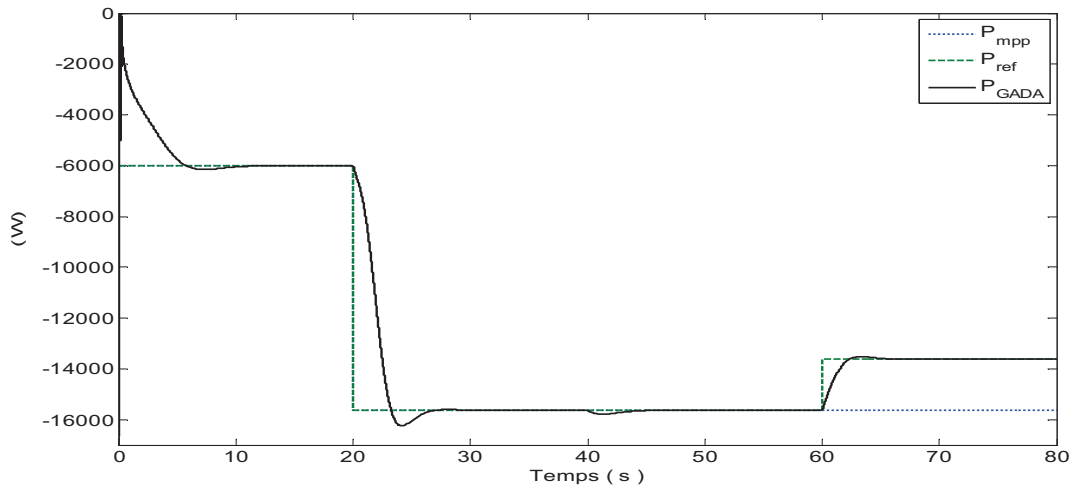


Figure II.14. Réponse de la puissance active de la GADA.

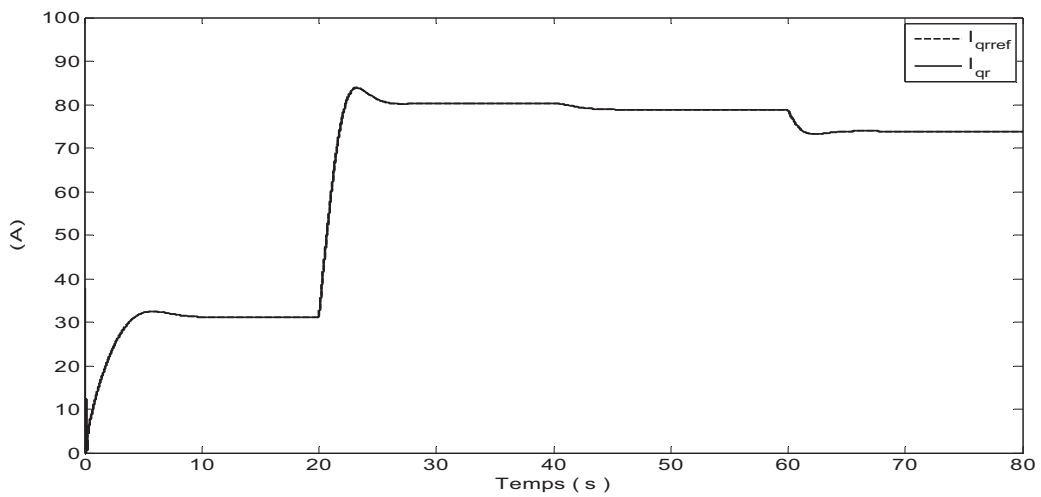


Figure II.15. Réponse de la composante en quadrature du courant rotorique.

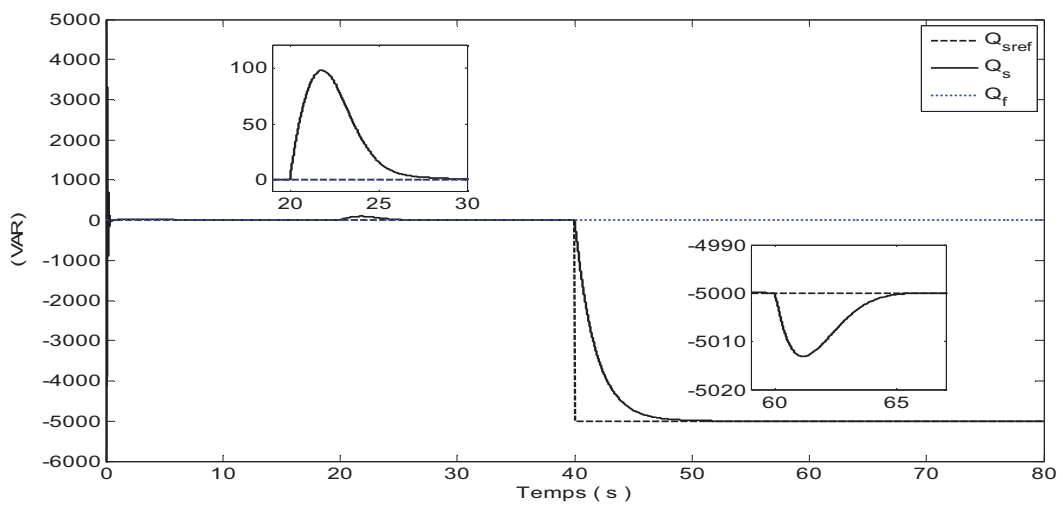


Figure II.16. Réponse des puissances réactives.

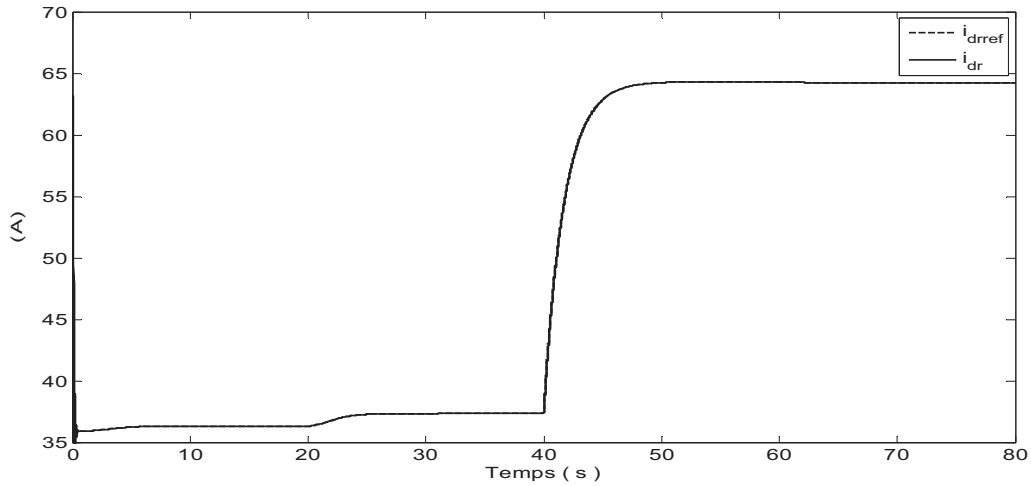


Figure II.17. Réponse de la composante directe du courant rotorique.

II.4.2. Résultat du deuxième test (profil du vent aléatoire)

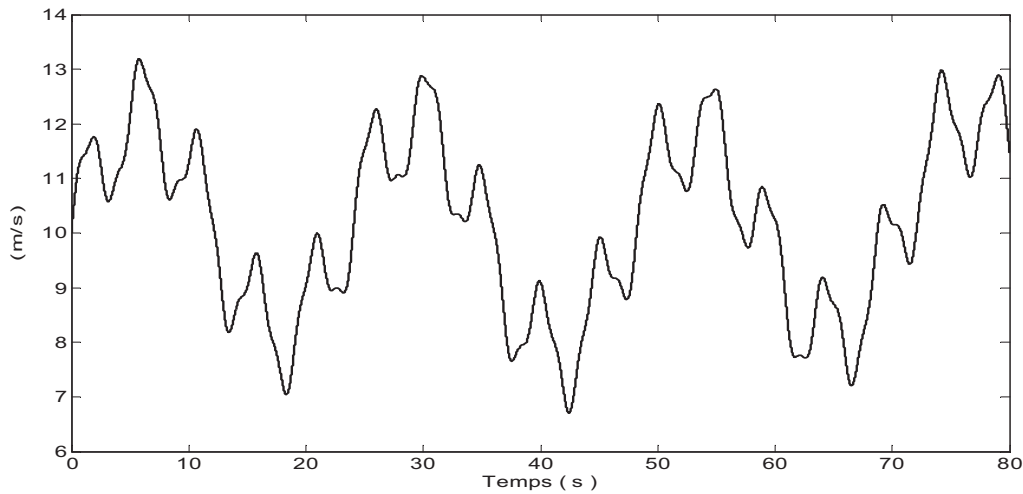


Figure II.18. Profil du vent.

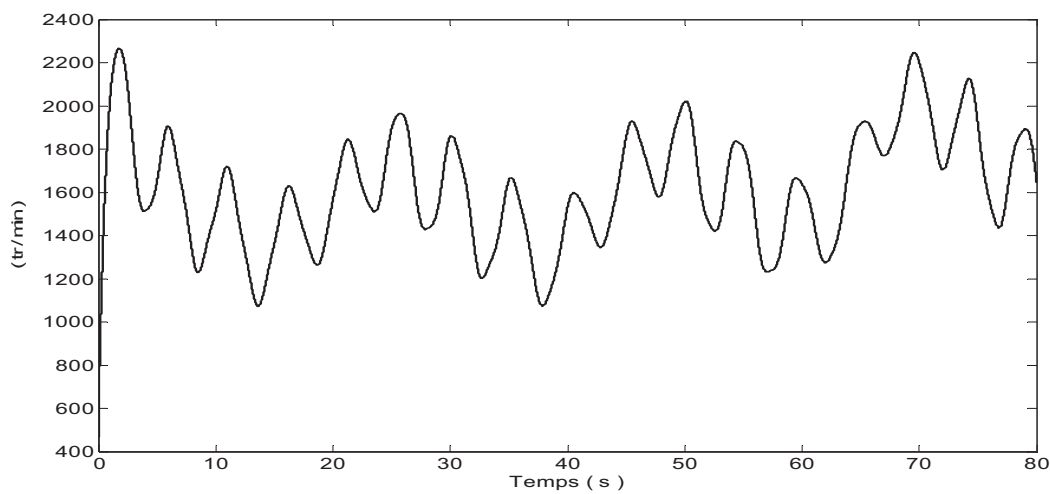


Figure II.19. Réponse de la vitesse mécanique de la GADA.

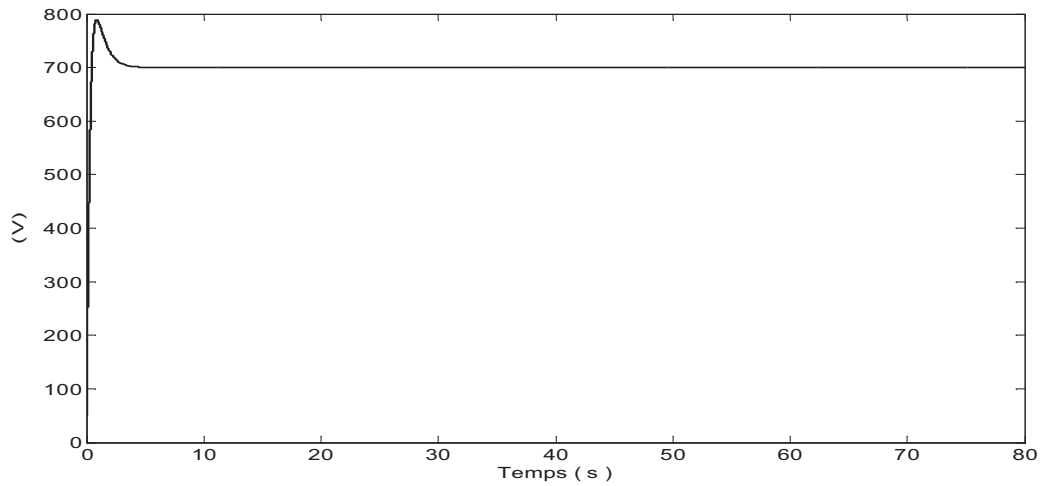


Figure II.20. Réponse de la tension du bus continu.

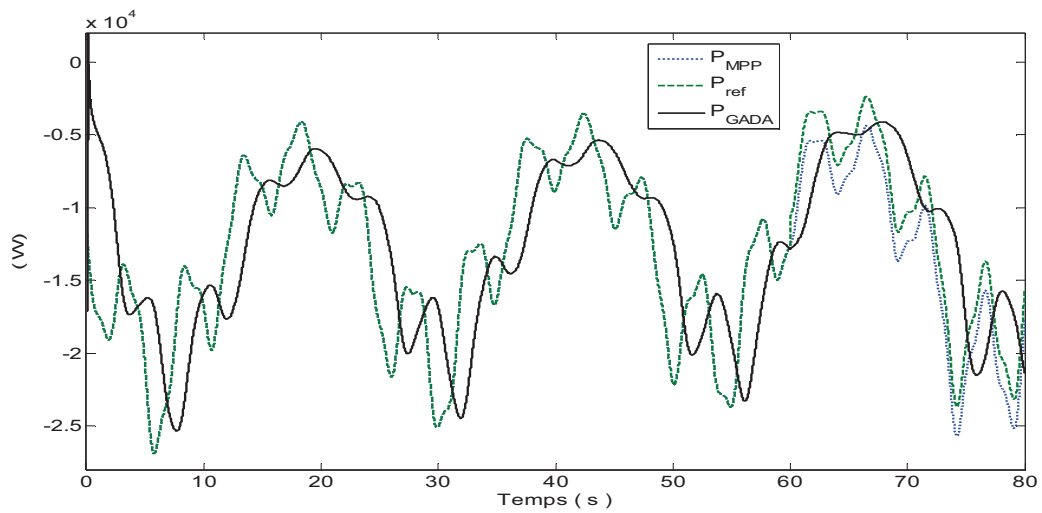


Figure II.21. Réponse de la puissance active de la GADA.

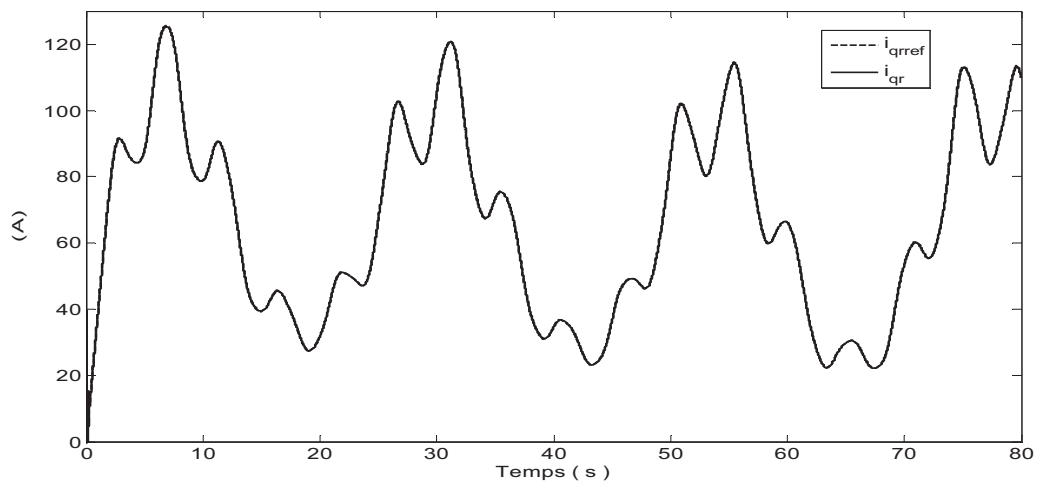


Figure II.22. Réponse de la composante en quadrature du courant rotorique.

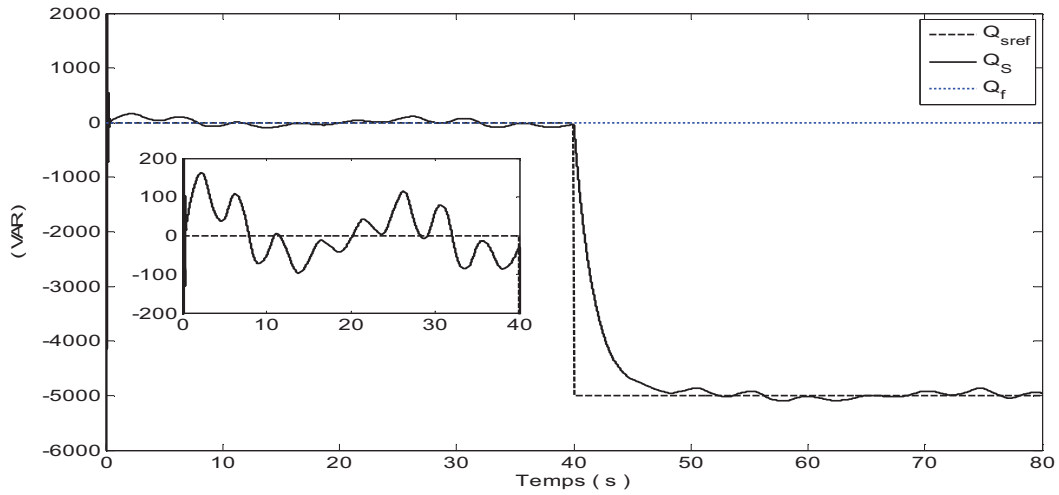


Figure II.23. Réponse des puissances réactives.

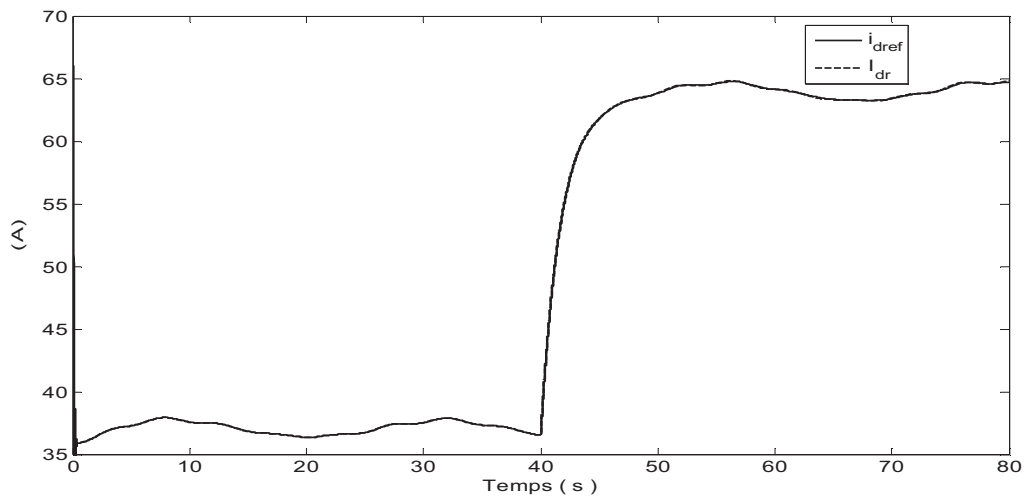


Figure II.24. Réponse de la composante directe du courant rotorique.

II.4.3. Résultat du troisième test (test de robustesse)

II.4.3.1. Profil du vent lisse

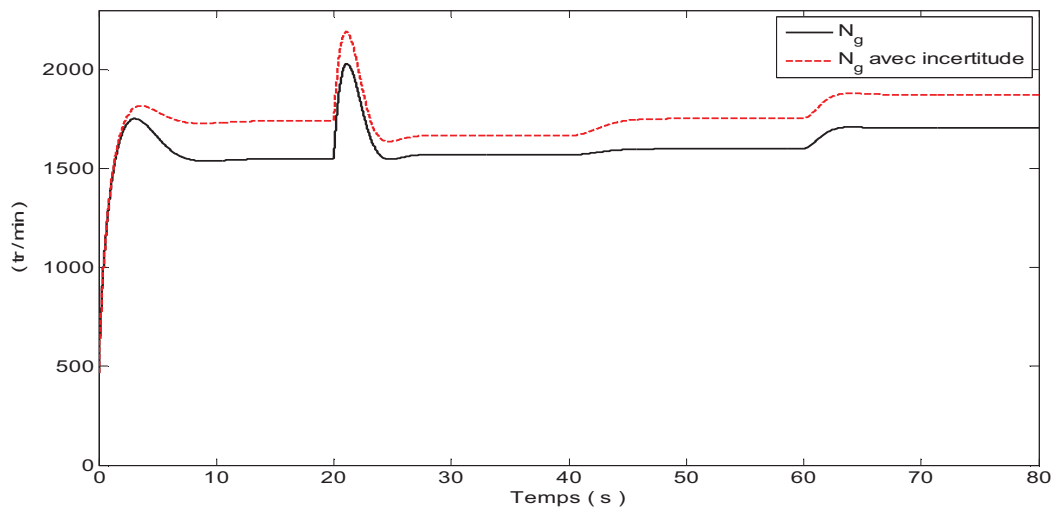


Figure II.25. Réponse de la vitesse mécanique de la GADA.

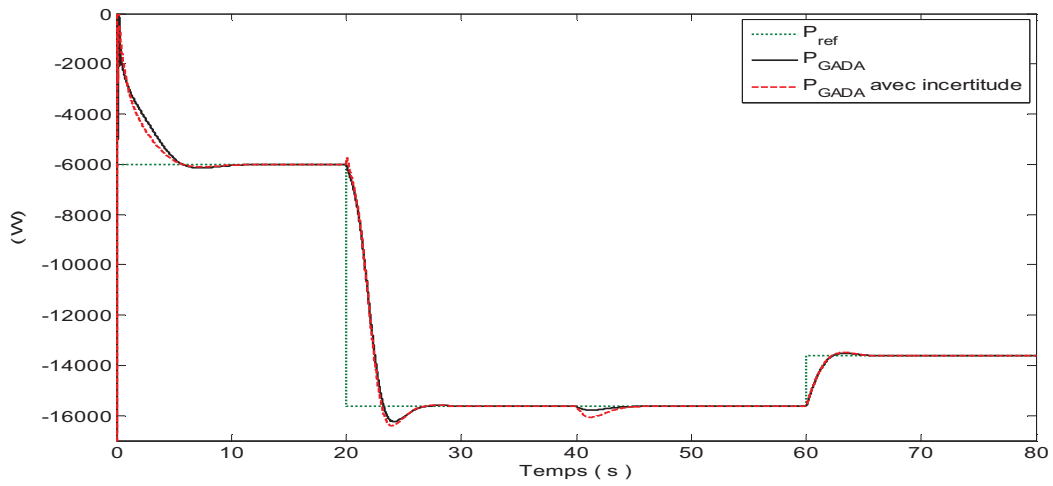


Figure II.26. Réponse de la puissance active de la GADA.

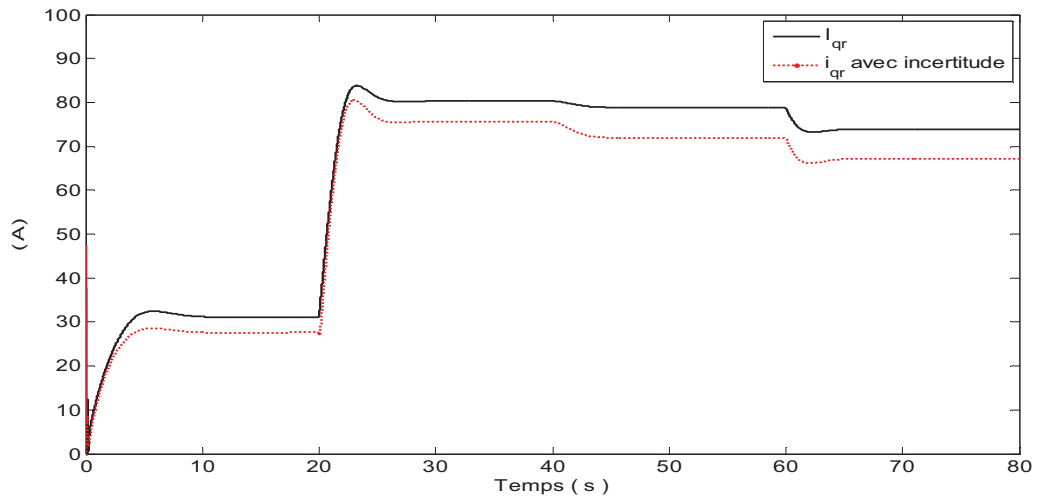


Figure II.27. Réponse de la composante en quadrature du courant rotorique.

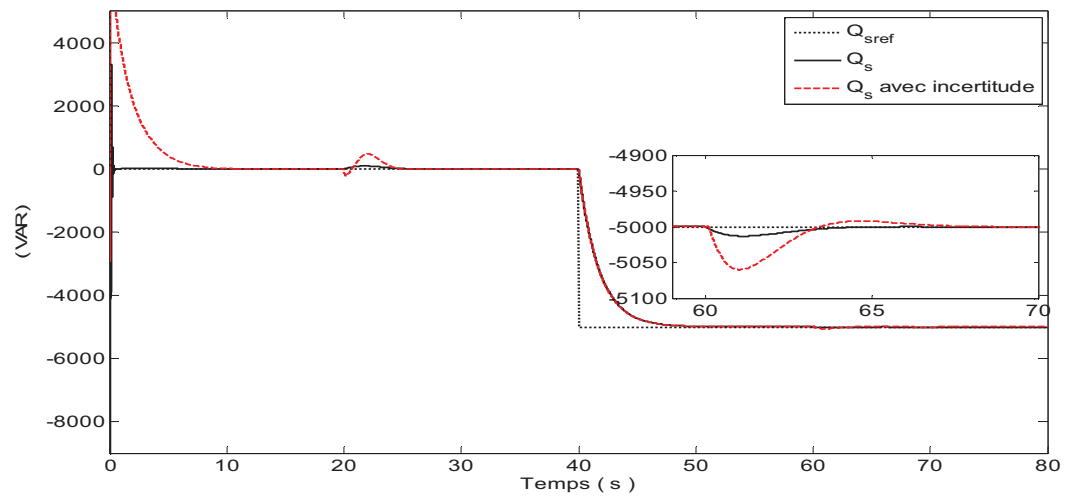
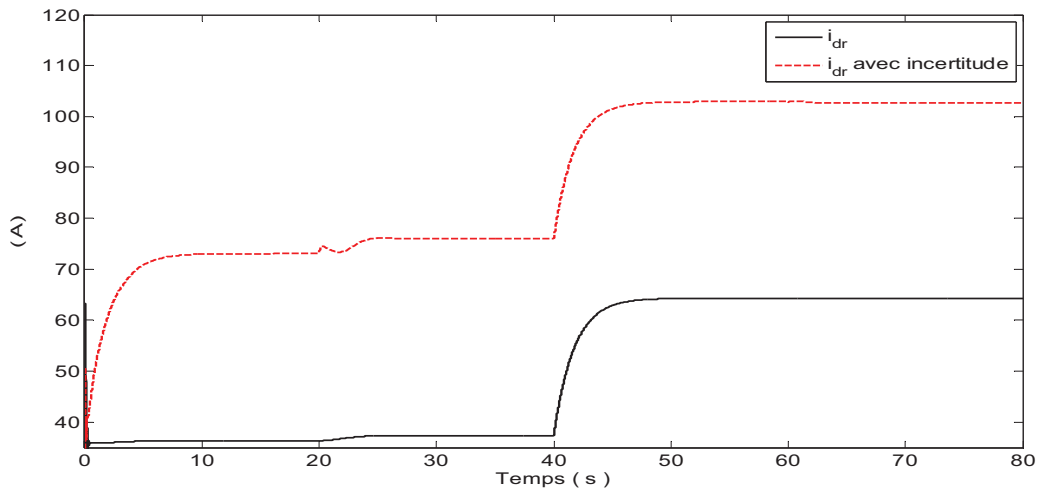
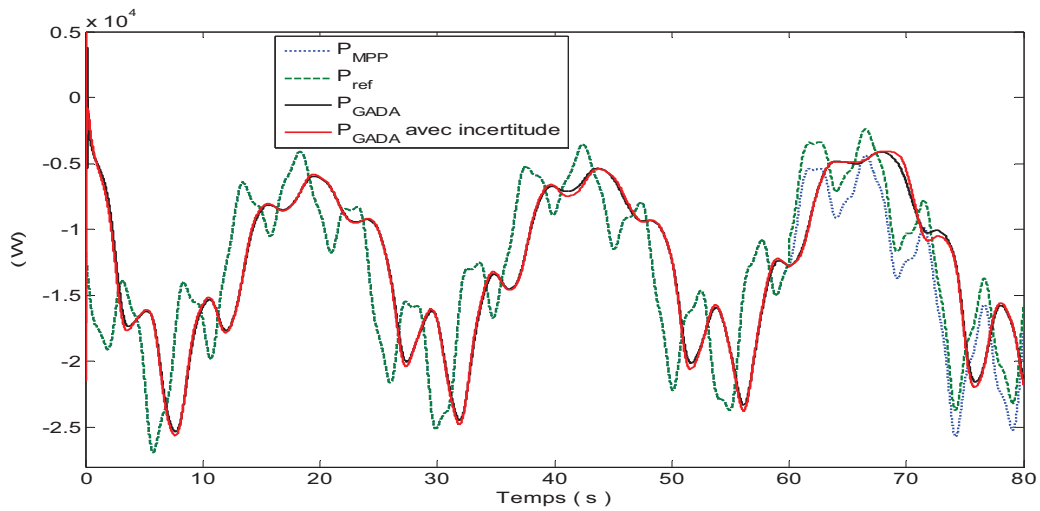
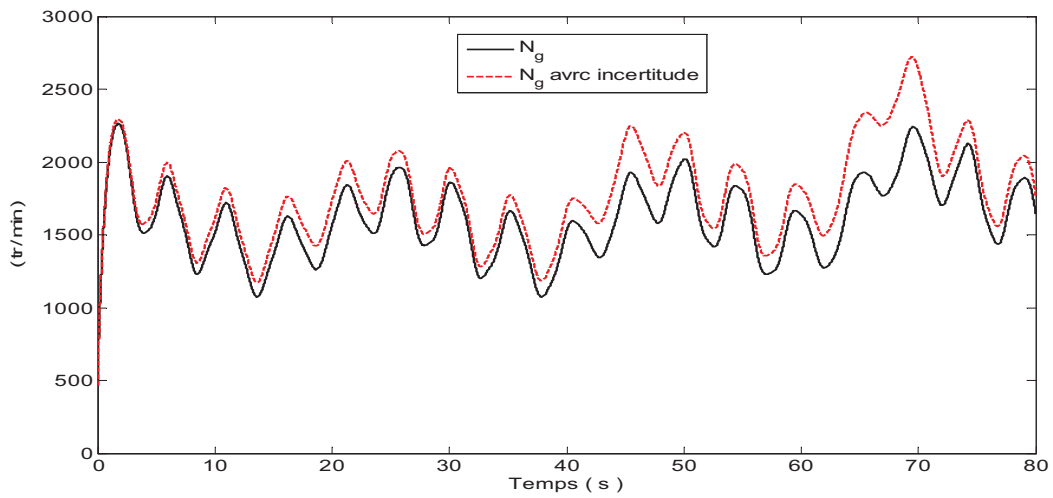


Figure II.28. Réponse de la puissance réactive statorique.



II.4.3.1. Profil du vent aléatoire



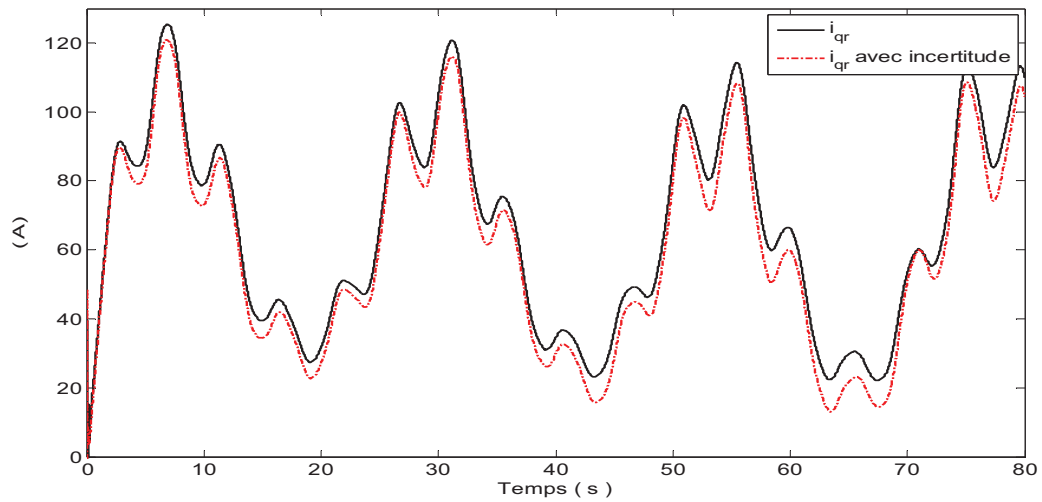


Figure II.32. Réponse de la composante en quadrature du courant rotorique.

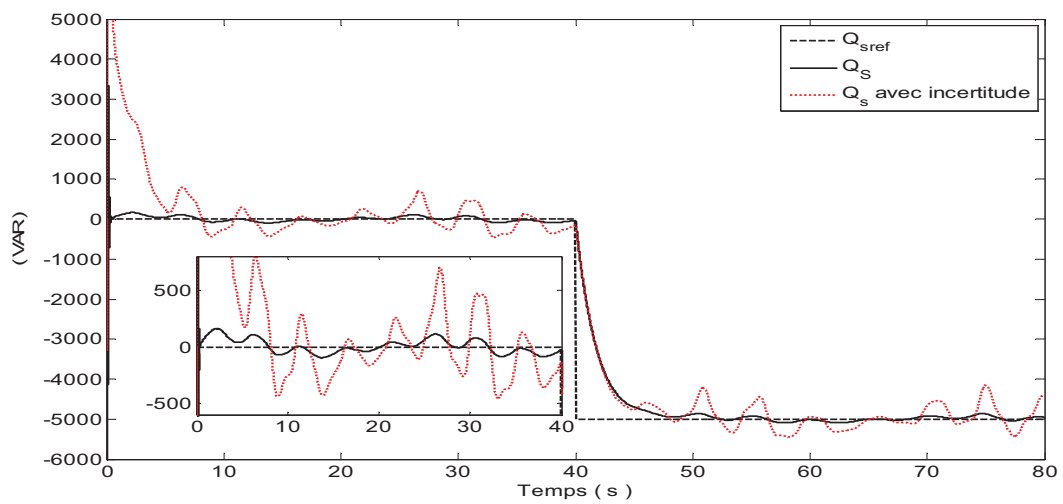


Figure II.33. Réponse de la puissance réactive statorique.

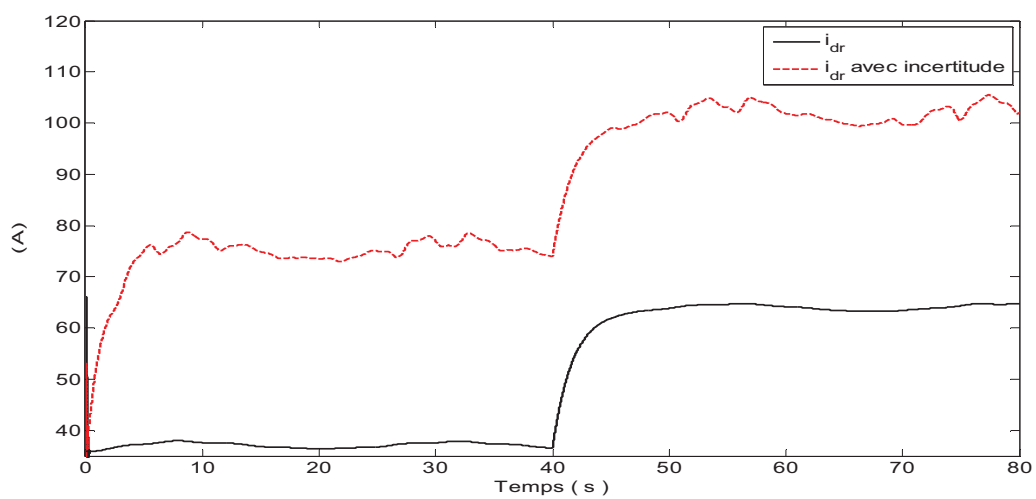


Figure II.34. Réponse de la composante directe du courant rotorique.

II.4.4. Interprétation des résultats

II.4.4.1. Profil du vent lisse

✓ Démarrage

Lors du démarrage, nous observons que :

- la réponse de la vitesse mécanique de la GADA est apériodique avec un temps de réponse de $t_{sN_g} = 10s$ et un dépassement de $d_{N_g} = 13.25\%$.
- la réponse de la tension de bus continu est apériodique avec un temps de réponse de $t_{sv_{dc}} = 4s$ et un dépassement de $d_{v_{dc}} = 14.14\%$
- la puissance active suit sa référence avec un temps de réponse de $t_{sP_{GADA}} = 10s$ et un dépassement de $d_{P_{GADA}} = 2\%$.
- le courant i_{qr} marque un pic d'un dépassement de $d_{i_{qr}} = 5\%$ et un temps de réponse de $t_{si_{qr}} = 10s$.
- les puissances réactives suivent parfaitement leurs références.
- les courants i_{qr} et i_{dr} sont bien réguliers.

Ces résultats montrent que le découplage entre la puissance active et réactive est très satisfaisant, mais le suivi de consigne de la puissance active n'est pas performant.

✓ Variation de la vitesse du vent

En variant la vitesse du vent, nous constatons que :

- la vitesse mécanique de la GADA marque un pic de dépassement de $d_{N_g} = 31.13\%$ et un temps d'établissement de $t_{sN_g} = 8s$, pour atteindre sa nouvelle vitesse optimale.
- aucune influence sur la tension du bus continu.
- la puissance active marque un pic de dépassement de $d_{P_{GADA}} = 14\%$ et un temps d'établissement de $t_{sP_{GADA}} = 7s$, pour suivre sa référence.
- le courant i_{qr} marque un pic d'un dépassement de $d_{i_{qr}} = 4\%$ et un temps de réponse de $t_{si_{qr}} = 6s$.
- une perturbation au niveau de la puissance réactive de dépassement de $d_{Q_s} = 100 VAR$ et un temps d'établissement de $t_{sQ_s} = 5.3 s$.
- les courants i_{qr} et i_{dr} sont bien réguliers.

D'après ces résultats, on note que le régulateur PI règle la perturbation due à la variation de la vitesse du vent, qui affecte la réponse de la puissance réactive. En conséquence, la régulation par PI n'est pas performante au niveau du suivi de consigne de la puissance active.

✓ **Variation de la puissance réactive**

Lors de la variation de la puissance réactive, nous observons que :

- une accélération de la vitesse mécanique de la GADA, pour atteindre sa nouvelle vitesse optimale durant 7s.
- aucune influence sur la tension du bus continu.
- une perturbation au niveau de la puissance active de dépassement de $d_{P_{GADA}} = 4\%$ et un temps d'établissement de $t_{sP_{GADA}} = 6s$
- la puissance réactive suit sa référence avec un temps de réponse de $t_{sQ_s} = 7s$
- les courants i_{qr} et i_{dr} sont bien réguliers.

D'après ces résultats, on note que le régulateur PI règle la perturbation due à la variation de la puissance réactive, qui affecte la réponse de la puissance active. En conséquence, la régulation par PI n'est pas performante au niveau du suivi de consigne de la puissance réactive.

✓ **Variation de la puissance active**

Lors de la variation de la puissance active, nous observons que :

- une accélération de la vitesse mécanique de la GADA, pour atteindre sa nouvelle vitesse optimale en marquant un dépassement de $d_{N_g} = 0.3\%$ et un temps de d'établissement de $t_{sN_g} = 7s$.
- aucune influence sur la tension du bus continu.
- la puissance active suit sa référence avec un temps de réponse de $t_{sP_{Gada}} = 6s$ et un dépassement de $d_{P_{GADA}} = 1\%$
- une perturbation au niveau de la puissance réactive de dépassement de $d_{Q_s} = 0.3\%$ et un temps d'établissement de $t_{sQ_s} = 3.5s$
- les courants i_{qr} et i_{dr} sont bien réguliers.

D'après ces résultats, on note que le régulateur PI règle la perturbation due à la variation de la puissance active, qui affecte la réponse de la puissance réactive. En conséquence, la régulation par PI n'est pas performante au niveau du suivi de consigne de la puissance active.

II.4.4.2. Profil du vent aléatoire

Lors de l'application d'un profil du vent aléatoire, nous observons que :

- la vitesse mécanique de la GADA est très perturbée.
- aucune influence sur la tension du bus continu.
- la puissance active suit sa référence avec un retard de 3s et une erreur statique de 1565 W.
- la puissance réactive est perturbée.

- les courants i_{qr} et i_{dr} sont bien réguliers.

D'après ces résultats, on note que le régulateur PI n'est pas robuste vis à vis de la variation de la vitesse du vent.

II.4.4.3. Test de robustesse

Lors de la variation des paramètres du modèle de la GADA, nous observons que :

- la vitesse mécanique de la GADA est augmentée (pour les deux cas : vitesse du vent lisse et du vent aléatoire).
- les temps de réponse et les dépassements de la puissance active sont augmentés (pour le cas d'une vitesse de profile du vent lisse). Et le temps de retard et l'erreur statique sont aussi augmentés (pour le cas d'une vitesse de profil du vent aléatoire).
- les perturbations au niveau de la puissance réactive sont plus grandes par rapport aux cas sans incertitudes.
- les courants i_{qr} et i_{dr} suivent leurs références, mais leurs valeurs sont changés.

D'après ces résultats, on note que le régulateur PI n'a pas pu rejeter les perturbations des variations paramétriques.

II.5. Conclusion

Ce deuxième chapitre a traité la modélisation et la commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une GADA. Dans un premier temps, nous avons expliqué pourquoi ce système éolien est le plus utilisé actuellement.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents constituants du système éolien. En effet, les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés. Puis, dans le but d'établir les différentes commandes des deux convertisseurs, nous avons développés les modèles de la GADA et de la liaison du CCR au réseau via le filtre RL. Les différentes commandes du CCG et du CCR ont été détaillées pour assurer un contrôle indépendant des puissances active et réactive.

Enfin, et afin de valider la modélisation et la commande globale du système éolien, nous avons effectué des tests de simulation. Les résultats obtenus montrent clairement qu'en utilisant la régulation par le PI classique, on observe l'effet du couplage entre les deux puissances car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit une perturbation des puissances par rapport à la valeur de référence et un temps de retour à l'état initial. Ainsi, la variation de la vitesse du vent influe sur les deux puissances en observant des retards, des dépassements, des erreurs statiques et des perturbations. De plus, lors des variations paramétriques, le régulateur PI n'a pas pu rejeter ces perturbations.

Chapitre III

*Commande de la puissance
d'un système de conversion
d'énergie photovoltaïque*

Chapitre III

Commande de la puissance d'un système de conversion d'énergie photovoltaïque

III.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque (PV) constitue l'une des solutions la plus convenable aux besoins énergétiques dans le futur sur le plan environnemental mais aussi sur le plan pratique.

L'architecture optimale qui tient compte des exigences techniques (commandes) et économiques (investissements), c'est la configuration à bus continu intermédiaire entre l'hacheur et l'onduleur. Cette configuration assure le contrôle de la puissance photovoltaïque sans être perturbée par les défauts du réseau [37]. Le système de contrôle peut être subdivisé sur les deux convertisseurs ce qui facilite par conséquent la synthèse des lois de commande et diminue la sollicitation de ces convertisseurs.

Ce chapitre a pour objectifs de présenter la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque basé sur deux convertisseurs. Dans un premier temps, nous présenterons les modèles des différents éléments constituant la chaîne de conversion. Dans un deuxième temps, nous détaillerons la loi de commande permettant le contrôle de la puissance issue du système photovoltaïque, ensuite la loi de commande permettant le contrôle indépendant des puissances active et réactive. La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats obtenus, validant ainsi la commande établie.

III.2. Modélisation d'un système de conversion d'énergie photovoltaïque

Le système de conversion d'énergie photovoltaïque étudié dans cette thèse, est basé sur deux convertisseurs l'un continue-continu et l'autre continue-alternatif et l'ensemble est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur. La Figure III.1, présente la configuration étudiée.

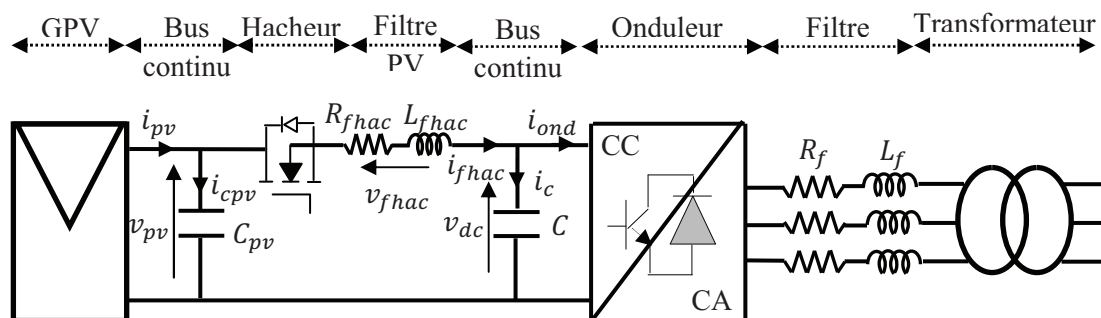


Figure III.1. Système de conversion d'énergie photovoltaïque

III.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque

Le comportement d'une cellule photovoltaïque peut se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN (due aux pertes à la connectique). Ainsi, le comportement d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être schématisé par la figure III.2 et décrit par l'équation suivante [70] :

$$i_{cell} = i_{cc} - i_{sat} \left[\exp \left(\frac{v_{cell} + i_{cell} R_s}{n v_t} \right) - 1 \right] - \frac{v_{cell} + i_{cell} R_s}{R_p} \quad (III.1)$$

Où $v_t = \frac{KT}{e}$

Avec :

- i_{cell} [A] : le courant fourni par la cellule ;
- i_{cc} [A] : le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température ;
- i_{sat} [A] : le courant de saturation ;
- v_{cell} [V] : la tension aux bornes de la cellule ;
- v_t [V] : le potentiel thermodynamique ;
- K [J/K] : la constante de Boltzmann ;
- T [K] : la température effective de la cellule ;
- e [C] : la charge de l'électron ;
- n : un facteur de non idéalité de la jonction ;
- R_p [Ω] : la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction ;
- R_s [Ω] : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

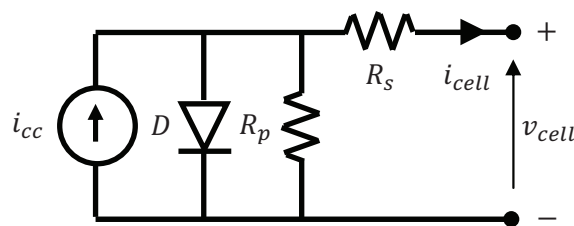


Figure III.2. Modèle équivalent électrique de la cellule photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est obtenu à partir de la mise en parallèle et/ou en série de plusieurs cellules photovoltaïques. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. En supposant que l'ensoleillement, la température et les paramètres des cellules sont identiques, l'équation du courant d'un générateur photovoltaïque est donnée par :

$$i_{pv} = N_p i_{cc} - N_p i_{sat} \left[\exp \left(\frac{1}{n v_t} \left(\frac{v_{pv}}{N_s} + \frac{i_{pv} R_s}{N_p} \right) \right) - 1 \right] - \frac{N_p}{R_p} \left(\frac{v_{pv}}{N_s} + \frac{i_{pv} R_s}{N_p} \right) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- i_{pv} [A] : le courant du générateur photovoltaïque ;
- v_{pv} [V] : la tension aux bornes du générateur photovoltaïque.
- N_p : le nombre de cellule monté en parallèle.
- N_s : le nombre de cellule monté en série.

III.2.2. Modélisation du bus continu photovoltaïque

Le bus continu photovoltaïque a pour objectif de fournir une tension aux bornes des panneaux qui sera réglée par le hacheur sur une grande plage de variation afin d'obtenir la puissance voulue.

L'évolution de la tension du bus continu photovoltaïque est donnée par l'équation suivante:

$$v_{pv} = \frac{1}{C_{pv}} \int i_{cpv} dt \quad (\text{III.3})$$

Le courant dans le bus continu photovoltaïque est issu d'un nœud à partir duquel circulent deux courants :

$$i_{cpv} = i_{pv} - i_{hac} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

- i_{cpv} [A] : le courant du bus continu photovoltaïque ;
- i_{hac} [A] : le courant de l'hacheur ;
- C_{pv} [F] : la capacité du bus continu photovoltaïque.

III.2.3. Modélisation de l'hacheur

L'hacheur permet d'assurer un transfert énergétique contrôlé entre le bus continu photovoltaïque et le bus continu réseau. Dans cette étude, nous allons utiliser un hacheur abaisseur bidirectionnel en courant. Ce hacheur est classiquement composé d'une MOSFET qui est connecté à une diode en anti-parallèle. Les semi conducteurs seront considérés comme idéaux (pas de pertes par commutations), c'est la raison pour laquelle, on considère un convertisseur équivalent à interrupteur idéal.

L'état de l'interrupteur est quantifié par une fonction de connexion s_{hac} , qui prend une valeur 0 si l'interrupteur est ouvert et 1 si l'interrupteur est fermé. Pour ce hacheur, la fonction de connexion est égale à la fonction de conversion $m_{hac} = s_{hac}$ [71].

Les grandeurs électriques hachées par l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur idéal équivalent sont déduites par les équations suivantes :

$$i_{hac} = m_{hac} i_{fhac} \quad (III.5)$$

$$v_{hac} = m_{hac} v_{pv} \quad (III.6)$$

Avec :

- i_{hac} [A] : le courant de l'hacheur ;
- i_{fhac} [A] : le courant du filtre de l'hacheur ;
- v_{hac} [V] : la tension de l'hacheur.

III.2.4. Modélisation du filtre de l'hacheur

Pour filtrer les harmoniques générés par l'hacheur et pour respecter l'alternance des sources, une bobine est utilisée. L'évolution de la tension du filtre de l'hacheur est donnée par l'équation suivante:

$$v_{fhac} = R_{fhac} i_{fhac} + L_{fhac} \frac{di_{fhac}}{dt} \quad (III.7)$$

Avec :

- R_{fhac} [Ω] : la résistance du filtre de l'hacheur ;
- L_{fhac} [H] : l'inductance du filtre de l'hacheur.

III.2.5. Modélisation du bus continu réseau, de l'onduleur et du filtre réseau

Le modèle du bus continu réseau, de l'onduleur et le modèle du filtre réseau ont déjà été présentés dans le chapitre II, section 2. Ils doivent être adaptés aux notations utilisées pour ce système.

III.2.6. Modélisation du transformateur

L'utilisation des transformateurs de tension dans les installations photovoltaïques connectées au réseau est trop exigée par certains pays tels que les Etats-Unis et le Japon [72]. Le transformateur permet l'isolation galvanique entre les deux sources d'énergie d'une part et l'élévation de la tension fournie par l'onduleur à la valeur désirée d'autre part. Le modèle donnant une image correcte du comportement des transformateurs dépend du problème posé. Dans cette étude, nous nous occupons essentiellement de leurs fonctionnements en régime triphasé sinusoïdal. Ce transformateur triphasé ΔY (couplage triangle du primaire et couplage étoile du secondaire), est utilisé pour passer de 48 V à 380 V.

III.3. Stratégie de commande d'un système de conversion d'énergie photovoltaïque

D'après la Figure III.1, deux commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement du système:

- Commande de l'hacheur en contrôlant la puissance produite par le générateur photovoltaïque (GPV).
- Commande de l'onduleur en contrôlant la tension du bus continu réseau et les puissances actives et réactives échangées avec le réseau.

III.3.1. Commande de l'hacheur

Pour contrôler la puissance produite par le GPV, il faut que la tension aux bornes du GPV doit être ajustée (v_{pv}) en fonction de la puissance désirée (référence). Cet ajustement est rendu possible par action de la variable de commande de l'hacheur (rapport cyclique α) et par asservissement du courant du filtre de l'hacheur (i_{fhac}).

Dans cette étude, l'interrupteur du convertisseur est attaqué par un signal MLI (Modulation Large Impulsion), avec une fréquence F_s fixe et un rapport cyclique α variable. La figure III.2 donne la tension MLI pour la commande de l'interrupteur.

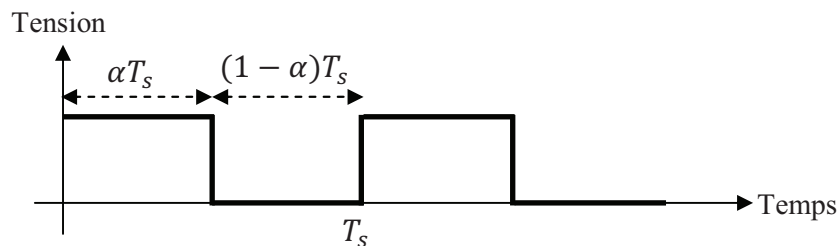


Figure III.2. Tension MLI pour la commande de l'interrupteur.

Le transistor MOSFET travaille en régime de commutation avec une période T_s . Dans le premier laps de temps αT_s le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance L_{fhac} se charge d'énergie avec augmentation du courant i_{fhac} . Dans le deuxième laps de temps $(1 - \alpha) T_s$ l'inductance L_{fhac} libère cette énergie avec une diminution de courant i_{fhac} . Alors le circuit est décomposé en deux circuits linéaires qui correspondent à chaque état du transistor.

Nous allons à présent établir les équations relatives à l'hacheur et de son filtre, afin d'en extraire la loi de commande qui nous permet de contrôler la puissance produite du générateur photovoltaïque.

Pour extraire ces équations, il faut faire l'étude dans les deux phases de fonctionnement (s_{hac} fermé, et s_{hac} ouvert), ensuite donner le modèle approximé, qui englobe les différentes grandeurs moyennes d'entrée et de sortie de l'hacheur.

Lorsque s_{hac} est fermé ($0 < t < \alpha T_s$) :

$$v_{pv} = R_{fhac} i_{fhac} + L_{fhac} \frac{di_{fhac}}{dt} + v_{dc} \quad (III.8)$$

$$\frac{di_{fhac}}{dt} = \frac{1}{L_{fhac}} (v_{pv} - v_{dc} - R_{fhac} i_{fhac}) \quad (III.9)$$

Lorsque s_{hac} est ouvert ($\alpha T_s < t < T_s$) :

$$0 = R_{fhac} i_{fhac} + L_{fhac} \frac{di_{fhac}}{dt} + v_{dc} \quad (III.10)$$

$$\frac{di_{fhac}}{dt} = -\frac{1}{L_{fhac}} (v_{dc} + R_{fhac} i_{fhac}) \quad (III.11)$$

Les équations (III.9) et (III.11) représentent les équations relatives à l'hacheur et de son filtre pour une période αT_s et $(1 - \alpha) T_s$ respectivement. Ainsi nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps.

Pour cela nous considérons que la variation de la variable dynamique (i_{fhac}) est de forme linéaire, ainsi la dérivée de cette variable sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique sur les deux laps de temps αT_s et $(1 - \alpha) T_s$:

$$\frac{di_{fhac}}{dt} \cdot T_s = \frac{di_{fhac}}{dt_{(\alpha T_s)}} \cdot \alpha T_s + \frac{di_{fhac}}{dt_{((1-\alpha)T_s)}} \cdot (1 - \alpha) T_s \quad (III.12)$$

En remplaçant les équations (III.9) et (III.11) par leur valeur dans la relation (III.12) on obtient l'équation qui régit le système sur une période entière :

$$\frac{di_{fhac}}{dt} = \frac{1}{L_{fhac}} (\alpha v_{pv} - v_{dc} - R_{fhac} i_{fhac}) \quad (III.13)$$

On extrait donc la loi de commande :

$$\alpha = \frac{v_{fhac} + v_{dc}}{v_{pv}} \quad (III.14)$$

L'objectif de la commande est de trouver pour chaque valeur de puissance une valeur du rapport cyclique α . Puisque la tension v_{dc} est fixée, donc la variation du rapport cyclique va varier la tension v_{pv} (la variation de v_{pv} c'est elle qui influe sur la puissance produite du GPV). Et pour arriver à varier le rapport cyclique on va varier la tension du filtre v_{fhac} (équation III.14), cette tension est influencée par le courant qui traverse le filtre (i_{fhac}). Donc à partir de la puissance de référence on peut calculer le courant de référence $i_{fhac_{ref}}$, et pour assurer la poursuite du courant lors de la variation de puissance, on va ajouter un régulateur de type PI.

La Figure III.3 représente le schéma bloc de la commande du hacheur.

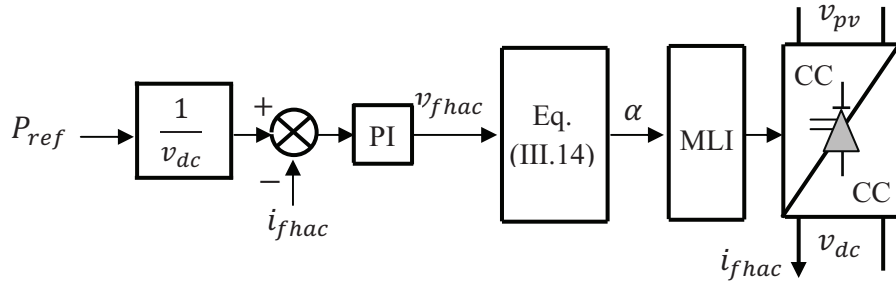


Figure III.3. Commande de l'hacheur.

III.3.1.1. Synthèse du régulateur PI

Le schéma bloc de la régulation du courant i_{fhac} en boucle fermée est représenté par la figure III.4.

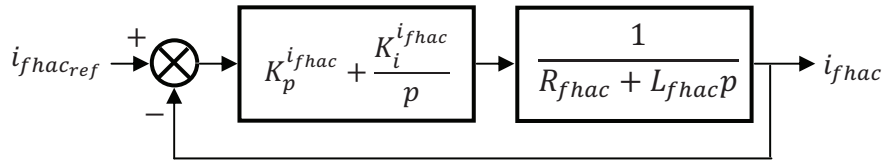


Figure III.4. Schéma bloc de régulation du courant i_{fhac} .

En utilisant la régulation idéale, nous trouvons les paramètres de régulateur PI comme suit :

$$\begin{cases} K_p^{i_{fhac}} = \frac{3L_{fhac}}{t_s^{i_{fhac}}} \\ K_i^{i_{fhac}} = \frac{3R_{fhac}}{t_s^{i_{fhac}}} \end{cases} \quad (III.15)$$

III.3.2. Commande de l'onduleur

La technique de commande utilisée pour l'onduleur est la même que celle utilisée pour le CCR dans le chapitre II, section 3.

III.4. Résultats obtenus

Pour mettre en exergue l'approche de commande décrite dans ce chapitre, et de montrer ses performances, nous avons fait une série de tests.

Le premier test consiste à imposer un profil d'ensoleillement variable et faire varier la puissance produite. Conditions du test:

- à $t = 10$ s, la puissance passe du mode MPPT au mode Delta ($\Delta P = 200$ W).
- à $t = 15$ s, la puissance passe du mode Delta au mode de défaut ($P = 0$ W).

Le deuxième test consiste à faire varier les paramètres du filtre de l'hacheur (test de robustesse) et de refaire le premier test. La résistance augmente de 50%, et les inductances diminuent de 50%.

Dans ces tests, la tension de référence du bus continu, est fixée à 180 V, et la puissance réactive de référence Q_{ref} est fixée à 0 VAR. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab de la société MathWorks ainsi qu'avec les bibliothèques associées à Matlab : SymPower Systems et Simulink.

III.4.1. Résultat du premier test

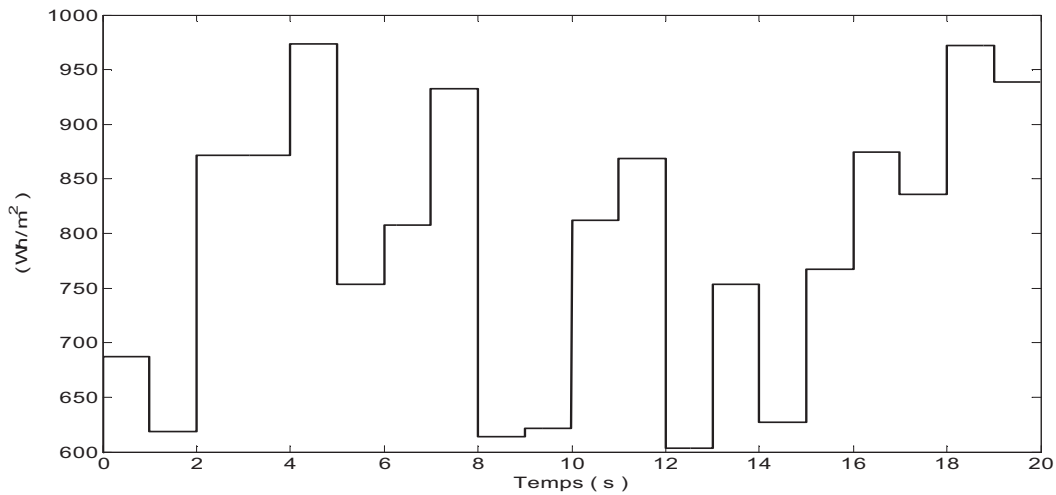


Figure II.5. Profil de l'ensoleillement.

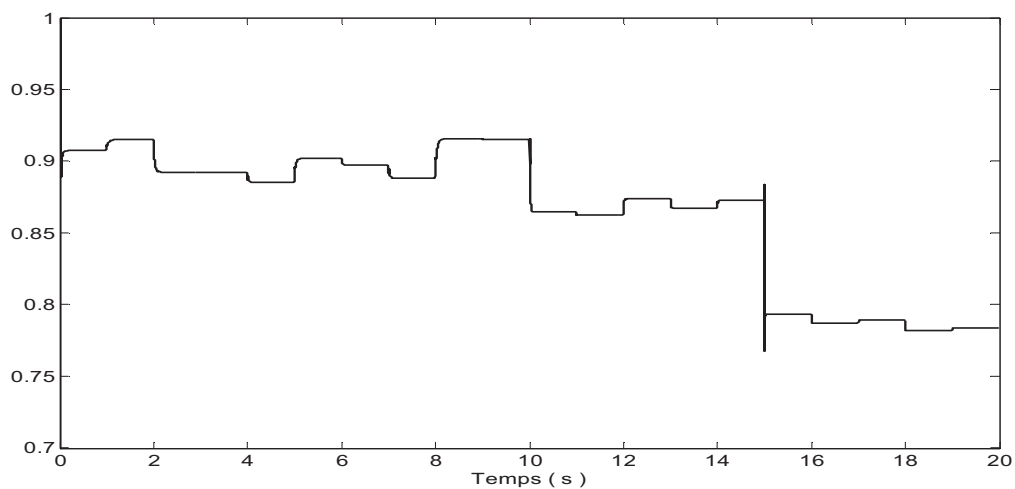


Figure II.6. Réponse du Rapport cyclique α .

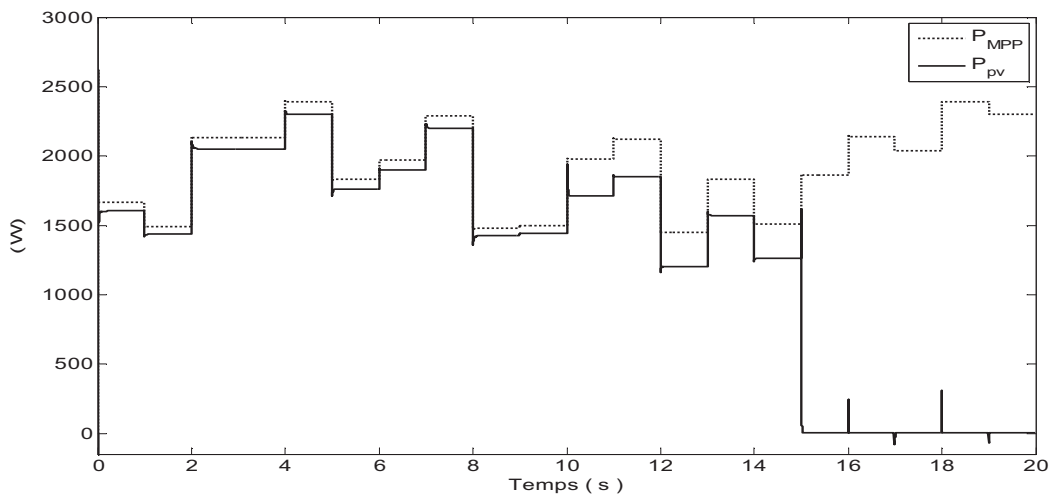


Figure II.7. Réponse de la puissance du GPV.

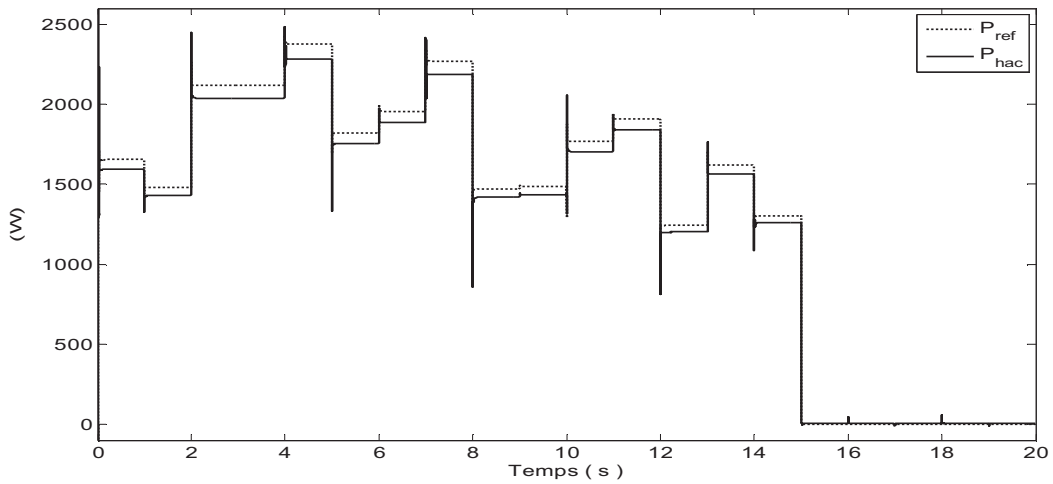


Figure II.8. Réponse de la puissance de l'hacheur.

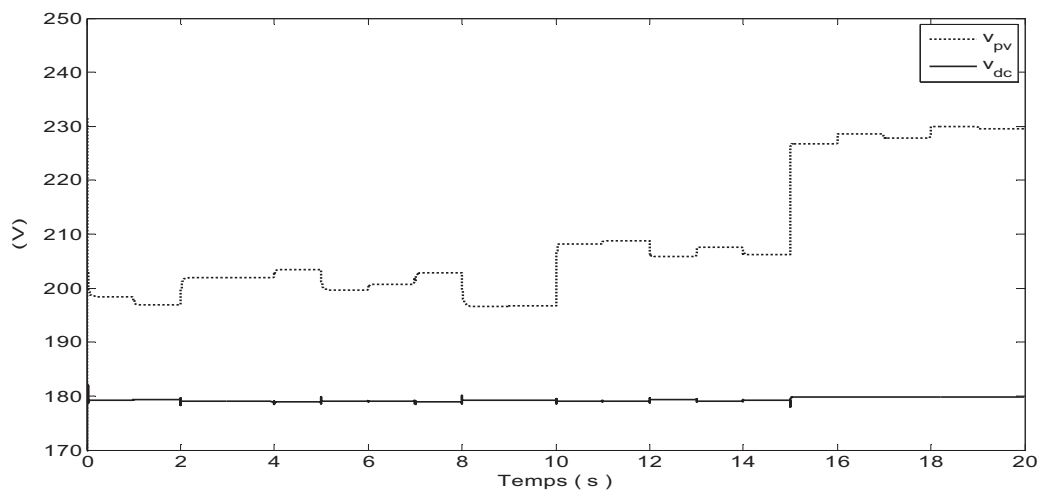


Figure II.9. Réponse des tensions.

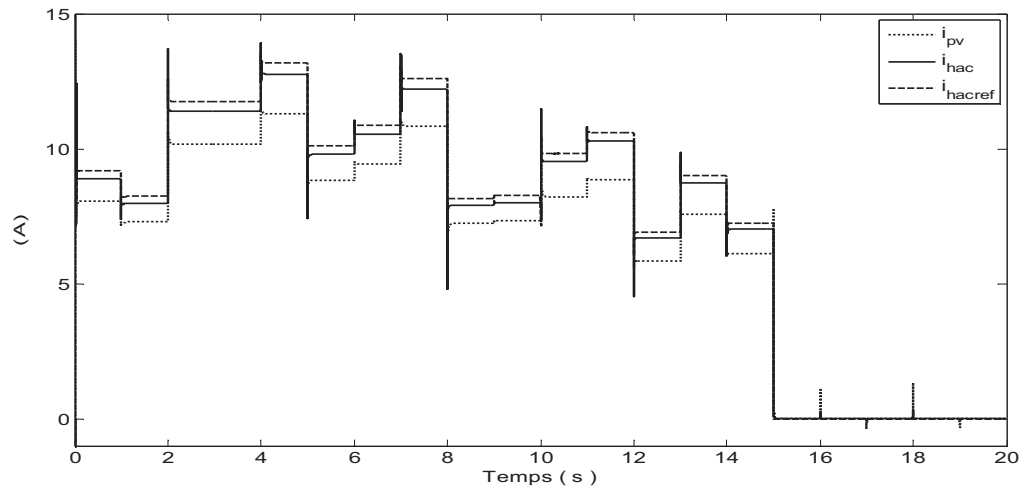


Figure II.10. Réponse des courants.

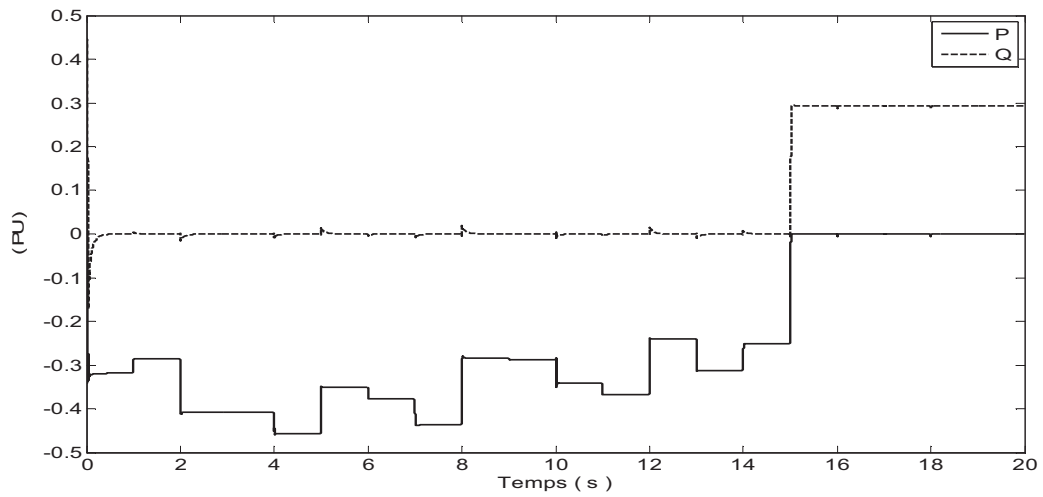


Figure II.11. Réponse des puissances active et réactive injectées au réseau.

III.4.2. Résultat du deuxième test (test de robustesse)

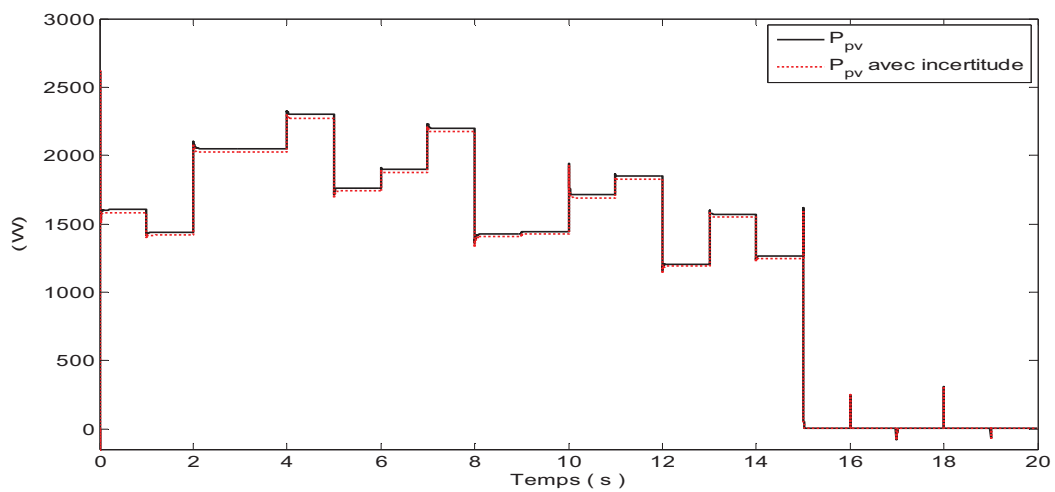


Figure II.12. Réponse de la puissance du GPV.

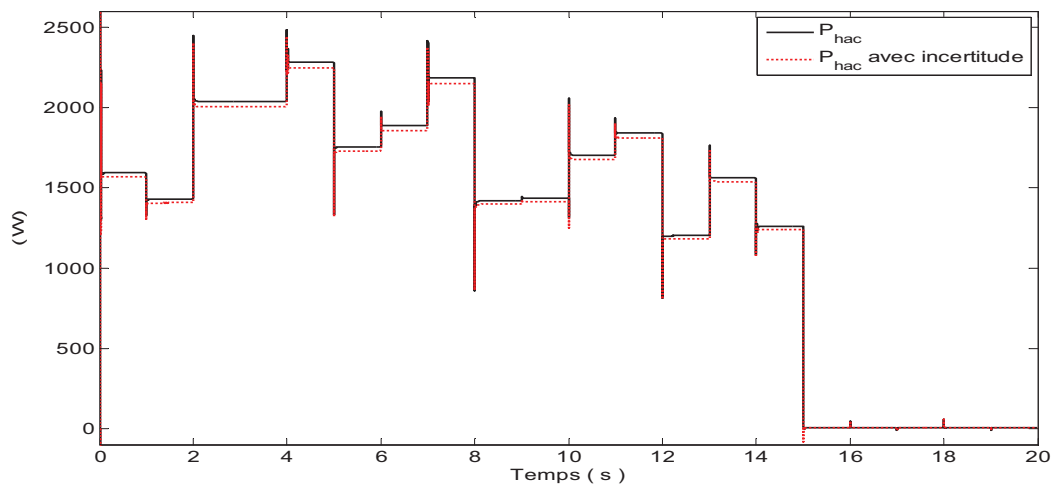


Figure II.13. Réponse de la puissance du l'hacheur.

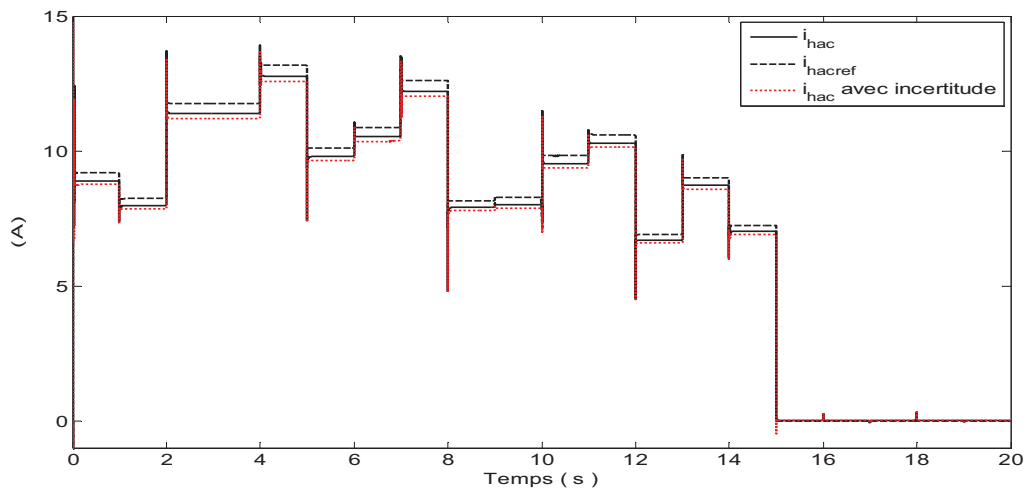


Figure II.14. Réponse de courant de l'hacheur.

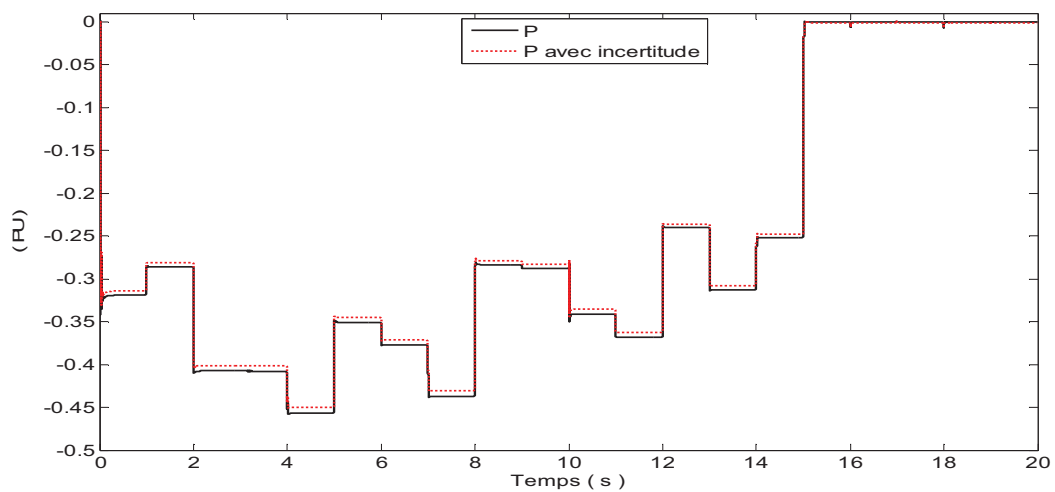


Figure II.15. Réponse de la puissance active injectée au réseau.

III.4.1. Interprétation des résultats

III.4.4.1. Premier test

Les résultats obtenus montrent clairement que :

- pendant la simulation, la valeur de rapport cyclique α est toujours comprise entre 0 et 1. Cela confirme le bon fonctionnement de la commande, car dans le cas d'un hacheur abaisseur le rapport cyclique est toujours dans cet intervalle.
- la puissance produite par le GPV n'est pas optimale par ce qu'il y a présence d'une erreur statique qui peut aller jusqu'à 90 W au mode MPPT et à 75 W au mode Delta (cette valeur de l'erreur change selon l'intensité de l'ensoleillement ; plus l'intensité est forte plus l'erreur est grande). Concernant le mode défaut, l'erreur est minimale (4W), mais nous observons des pics lors de la variation de l'ensoleillement, ces pics peuvent avoir un dépassement de 300W, mais avec un temps d'établissement très court de 0.02s. (Voir figure II.7).
- la puissance du hacheur suit sa référence avec une erreur statique qui peut aller à 90 W, selon l'intensité du l'ensoleillement. Et des pics pour chaque variation de l'ensoleillement. Ces pics peuvent avoir un dépassement de 36%, mais avec un temps d'établissement très court de 0.02s. (Voir figure II.8).
- la tension du GPV (v_{pv}) est variable. Cette variation est due à la variation du rapport cyclique α (extraction de la puissance voulue). En plus cette tension est toujours supérieure à la tension v_{dc} , car dans notre étude nous utilisons un hacheur abaisseur, cela nous confirme le bon fonctionnement de la commande. (Voir figure II.9).
- la tension v_{dc} suit bien sa référence mais avec quelques fluctuations légères lors de la variation de l'ensoleillement (voir figure II.9). Ces fluctuations peuvent être réduites en augmentant la valeur de la capacité du bus continu.
- la réponse des courants i_{pv} et i_{hac} est semblable à la réponse des puissances P_{pv} et P_{hac} respectivement, mais il y a une erreur statique entre i_{hac} et $i_{hac_{ref}}$, cela explique l'erreur statique de la puissance. En plus, nous remarquons que le courant i_{hac} est toujours supérieur au courant i_{pv} , cela nous confirme aussi le bon fonctionnement de la commande. (Voir figure II.10).
- la puissance active est bien injectée au réseau (Voir figure II.11).
- la puissance réactive suit sa référence avec des fluctuations lors de la variation de la puissance active (effet de couplage). Et dans le mode de défaut, notre système de conversion consomme de la puissance réactive, car l'imposition de la tension de circuit ouvert v_{co} conduit à l'inversion du sens du courant. (Voir figure II.11).

D'après ces résultats, on note que le régulateur PI règle les perturbations due à la variation de l'ensoleillement, qui affecte la réponse de la puissance dans le mode défaut. En conséquence, la régulation par PI n'est pas performante au niveau du suivi de consigne (présence d'une erreur statique).

III.4.4.2. Deuxième test

Les résultats obtenus montrent clairement que la puissance produite par le GPV est inférieure par rapport à celle qui est produite sans incertitudes. Il y a une baisse d'environ 22W (voir figure II.12). Cela implique une baisse de la puissance du hacheur et de la puissance injectée au réseau (voir figure II.13 et figure II.15). Cette baisse de puissance est due à l'augmentation de l'erreur statique entre i_{hac} et i_{hacref} (voir figure II.14).

D'après ces résultats, on note que le régulateur PI n'a pas pu rejeter les perturbations des variations paramétriques.

III.5. Conclusion

Ce troisième chapitre a traité la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque basé sur deux convertisseurs. Dans un premier temps, nous avons expliqué pourquoi ce système est le plus utilisé actuellement.

Ensuite, nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents constituants du système. En effet, le modèle du générateur photovoltaïque a été développé. Puis, dans le but d'établir les différentes commandes des deux convertisseurs, nous avons développés leurs modèles et leur liaison.

Enfin, et afin de valider la modélisation et la commande globale du système, nous avons effectué des simulations. Les résultats obtenus montrent clairement qu'en utilisant la régulation par le PI classique a notre commande, la puissance produite n'est pas performante (erreur statique), et ne rejette pas les perturbations des variations paramétriques.

Chapitre IV

*Commande par mode
glissant flou*

Chapitre IV

Commande par mode glissant flou

IV.1. Introduction

La plupart des méthodes de synthèse des lois de commande se basent sur un modèle mathématique du système à commander. Et même lorsque l'on a un très bon modèle à disposition, il arrive fréquemment qu'il soit trop complexe, et doit être simplifié pour pouvoir synthétiser une commande.

Il faut noter aussi que la synthèse des lois de commande est basée sur des paramètres supposés fixes. Toutefois, dans un système réel, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances...). Ajoutons à cela que l'identification de ces paramètres est soumise à des imprécisions dues à la méthode employée et aux appareils de mesure.

Un remède consiste à calculer la loi de commande pour une famille de modèles à laquelle le système réel est censé appartenir. Cet ensemble est généralement constitué d'un système nominal et de variations limitées de paramètres de ce modèle, appelées incertitudes. Une telle famille est appelée modèle incertain. Si la loi de commande est synthétisée de manière à répondre aux exigences du cahier des charges pour tous les modèles de cette famille, elle est dite robuste.

Un type de lois de commande robuste simple à calculer et à mettre en œuvre, même pour des systèmes non linéaires, est la commande par modes glissants. Cette commande a deux principaux avantages. Premièrement, le comportement dynamique du système une fois atteint le voisinage de la surface de glissement est essentiellement conditionné par cette dernière. On dit que le système est en régime glissant. Deuxièmement, ce comportement est non seulement robuste, mais même insensible à la classe d'incertitudes pour laquelle la commande a été réglée.

Cependant, la discontinuité de la commande engendre des oscillations de fréquence élevée une fois atteint le régime glissant, phénomène connu sous le nom de chattering. Ce phénomène est le plus grand défaut des commandes par modes glissants, car il peut causer une perte de précision, et surtout une usure prématurée des actionneurs ou du système, en plus de générer un bruit sur des systèmes mécaniques. De nombreuses études ont été effectuées dans le but de réduire ou d'éliminer ce problème, par exemple : les solutions par limitation de la condition de glissement, les solutions par observateur, etc. Mais ces méthodes ont un prix : elles réduisent la robustesse. Et afin de garder la robustesse du mode glissant et d'éliminer le phénomène de chattering, sans pour autant détériorer les performances du système nous nous sommes référés à l'utilisation de la logique floue.

Ce chapitre est entièrement consacré au concept de la commande par mode glissant flou. Nous présentons d'abord les principes fondamentaux de ce type de commande puis nous l'appliquons au contrôle de la puissance issue du système éolien et photovoltaïque.

IV.2. Généralités sur la commande par mode de glissement

Les premiers travaux concernant la commande par mode glissant a été proposée et élaborée au début des années 50 par Emelyanov, puis par d'autres chercheurs comme Utkin à partir des résultats des études du mathématicien Filipov.

Par la suite, ces travaux ont été repris ailleurs, soit pour compléter l'étude théorique, soit pour étudier quelques applications. Aux Etats-Unis, cette théorie est introduite par Slotine et au Japon par Young, Harasma et Hashimoto. Il a fallu attendre les années 80, pour que le concept de cette théorie trouve ses applications dans plusieurs domaines notamment dans les systèmes de commande et serait parmi les techniques de contrôle non linéaire les plus efficaces et les plus robustes.

Cette technique fut d'abord développée pour un système linéaire du 2^{ème} ordre, et depuis le spectre de son utilisation fut élargi à une plus grande classe de système comprenant les systèmes linéaires, non linéaires, discrets et multivariables.

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode de glissement, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes [73] :

- *Structure par commutation au niveau de l'organe de commande* : Cette structure de commande est la plus classique et la plus usitée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse.
- *Structure par commutation au niveau d'une contre-réaction d'état* : c'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique où le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains, donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.
- *Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la "commande équivalente"*.

Cette dernière structure est retenue pour la suite dans notre étude.

IV.2.1. Présentation de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente

Une telle structure dont le principe est montré sur la figure IV.1 présente un réel avantage. Elle permet de prépositionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent.

L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente [73].

Nous avons choisi de baser notre étude sur ce type de configuration de la commande, pour plusieurs raisons [73]:

- une telle structure, de par sa constitution, est très simple et nous permet de ne pas trop solliciter la commande. Il nous semble en effet naturel d'ajouter la commande équivalente pour pré-positionner le système dans un état désiré permanent et stable, et de jouer ensuite sur le terme de commutation pour assurer la convergence vers cet état et pour y rester ensuite.
- cette méthode de commande a déjà été abordée dans des travaux de recherches [74] [75]. Les auteurs mentionnent des résultats très satisfaisants pour des applications robotiques ainsi que pour des applications utilisant des machines à induction.
- nous avons voulu placer notre étude dans un cas original en utilisant une structure peu connue et peu usitée.

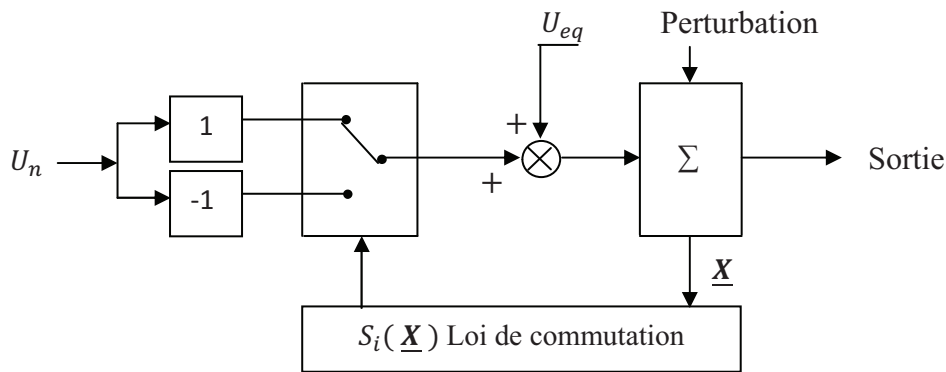


Figure. IV.1. Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

IV.3. Principe de la commande par mode glissant

La commande par mode glissant est le prolongement de l'étude des systèmes à structure variable. L'idée de base de la commande par mode glissant est premièrement d'attirer les états du système dans une région convenablement sélectionnée, puis de concevoir une loi de commande qui maintiendra toujours le système dans cette région [76].

IV.3.1. Définition des systèmes à structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Ce terme apparaît à cause de la commutation (variation discontinue) du système et de son contrôleur (ou observateur) entre deux ou plusieurs structures. Cela est principalement dû aux propriétés de stabilité que peut avoir le système global indépendamment de celles de chacun des sous systèmes pris seuls.

Le comportement des systèmes possédant des discontinuités peut être décrit formellement par l'équation :

$$\dot{\underline{X}} = f(\underline{X}, t, \underline{U}) \quad (\text{IV. 1})$$

Où :

- \underline{X} : est le vecteur d'état ;
- t : le temps ;
- f : est la fonction décrivant l'évolution du système au cours du temps ;
- \underline{U} : représente à la fois la discontinuité et le contrôle.

Historiquement, les premiers régulateurs bâtis sur ce modèle ont été de simples relais, faciles à mettre en œuvre. Ils ont représenté les prémices du contrôle par structure variable. Ils ont ainsi amené les automaticiens à développer une théorie qui puisse décrire un tel fonctionnement. Les bases d'une telle théorie ont été posées : il suffit de dire que le comportement du système est décrit par deux équations différentielles distinctes, suivant que l'équation d'évolution du système soit supérieure ou inférieure à une surface dénommée hypersurface de commutation où $\underline{S}(\underline{X}, t) = (S_1 \underline{X} \dots S_m \underline{X})$ [73]. On a alors :

$$\underline{U}(\underline{X}) = \begin{cases} \underline{U}^+(\underline{X}) & \text{si } \underline{S}(\underline{X}) > 0 \\ \underline{U}^-(\underline{X}) & \text{si } \underline{S}(\underline{X}) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV. 2})$$

En se plaçant dans un espace à 2 dimensions, le principe de discontinuité de la commande (Eq. IV.2) peuvent être illustrés par la figure IV.2.

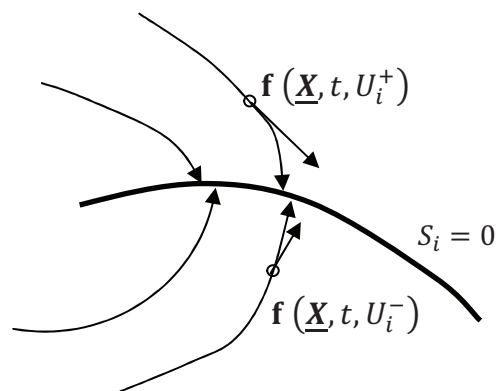


Figure IV.2. Convergence de la trajectoire vers la surface de commutation grâce à la discontinuité de la commande.

La relation $S(X) = 0$ forme un hyperplan d'ordre (n-1) dans l'espace d'état. Lorsque la trajectoire perse l'hyperplan la grandeur de commande change de u_i^+ à u_i^- ou vice versa. Par conséquent cet hyperplan est aussi un hyperplan de commutation.

Pour un système à régler de deuxième ordre, le plan de commutation se réduit à une droite de commutation.

IV.3.2. Formulation des expressions générales de la commande par mode de glissement

Le mode glissant est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. Il est considéré comme un des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis. La caractéristique principale de la commande par mode glissant est que la loi de commande se modifie d'une manière discontinue. Les commutations de la commande s'effectuent en fonction des variables d'état, utilisées pour créer une hypersurface dite de glissement dont le but est de forcer la dynamique du système pour correspondre avec celle définie par l'équation de l'hypersurface. Quand l'état du système est maintenu sur cette hypersurface, le système est dit en régime glissant.

Ainsi, le problème de l'existence du régime glissant se résume à analyser la trajectoire du système, qui ne doit pas s'éloigner de l'hypersurface \underline{S} . Nous cherchons à vérifier que la distance et la dérivée de la distance (autrement dit, la vitesse d'approche), entre la trajectoire et la surface de commutation soient opposées en signe [73], cela peut-être exprimé par l'équation suivante :

$$\lim_{a \rightarrow 0^-} \underline{\dot{S}} > 0 \quad \text{et} \quad \lim_{a \rightarrow 0^+} \underline{\dot{S}} < 0 \quad (\text{IV. 3})$$

Il s'agit du principe d'attractivité. Des justifications mathématiques complémentaires, pourront être trouvées dans les ouvrages traitant des systèmes non linéaires [77] [78] [79].

Considérons maintenant une classe particulière de système, *i.e.* les systèmes linéaires vis à vis de la commande. Leur évolution est décrite par l'équation différentielle suivante :

$$\underline{\dot{X}} = f(\underline{X}, t) + B(\underline{X}, t)\underline{U} \quad (\text{IV. 4})$$

Où :

- $f \in R^n$: est un champ de vecteur ou fonction vectorielle ;
- $\underline{X} \in R^n$: est le vecteur dont les composantes sont les variables d'état ;
- $B(\underline{X}, t)$: est la matrice de commande de dimension $n * m$, car $\underline{U}(U_1, \dots, U_m)^T \in R^m$

\underline{U} est le vecteur de commande tel que chacune de ces composantes U_i , subit une discontinuité sur une hypersurface (variété) de dimension $(n - 1)$. Cela peut-être vu comme une réduction de la dimension du problème sur l'hypersurface $S_i(\underline{X}) = 0$. Dans ce cas nous obtenons :

$$U_i(\underline{X}) = \begin{cases} U_i^+(\underline{X}) & \text{si } S_i(\underline{X}) > 0 \\ U_i^-(\underline{X}) & \text{si } S_i(\underline{X}) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV. 5})$$

Le régime glissant s'effectue alors sur une variété $\underline{S}(\underline{X}) = 0$ de dimension $(n - m)$ qui résulte de l'intersection de toutes les m "hypersurfaces" $S_i = 0$. On peut écrire cette variété sous la forme : $\underline{S}(\underline{X}) = (S_1, S_2, \dots, S_m)^T = 0$ avec $i = 1, 2, 3, \dots, m$. Si S_i, U_i^+, U_i^- sont des

fonctions continues. Dans ce cas là et si $S_i(\underline{X}) \neq 0$ les fonctions $f(\underline{X}, t)$ et $B(\underline{X}, t)$ sont telles qu'il existe une unique solution au problème formulé par l'équation (IV.4), alors nous sommes en présence d'un système à structure variable.

La fonction de commutation \underline{S} sépare l'espace d'état en deux régions représentant des structures différentes. C'est une fonction vectorielle dont les composantes sont des fonctions scalaires représentatives d'une relation algébrique entre deux grandeurs. Elle est définie par l'utilisateur afin d'obtenir les performances dynamiques désirées.

Lorsque nous sommes dans le "mode" de glissement, la trajectoire restera sur la surface de commutation. Cela peut être exprimé par :

$$\underline{S}(\underline{X}, t) = 0 \text{ et } \dot{\underline{S}}(\underline{X}, t) = 0 \quad (\text{IV.6})$$

Nous pouvons donc introduire par dérivation partielle, le gradient de \underline{S} , qui est un vecteur pointant de la région où $\underline{S} < 0$ vers la région où $\underline{S} > 0$. Dans le cas du régime de glissement (Eq. IV.6), nous obtenons :

$$\dot{\underline{S}}(\underline{X}, t) = \frac{d\underline{S}}{dt} = \frac{\partial \underline{S}}{\partial \underline{X}} * \frac{\partial \underline{X}}{\partial t} = \frac{\partial \underline{S}}{\partial \underline{X}} * \dot{\underline{X}} = \text{grad}(\underline{S})\dot{\underline{X}} = G * (f(\underline{X}, t) + B(\underline{X}, t)U) = 0 \quad (\text{IV.7})$$

Cela traduit le fait qu'en régime de glissement, la trajectoire restera sur la surface de commutation, autrement dit, sa dérivée "fonctionnelle" sera nulle [33]. Dans le plan de phase cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes :

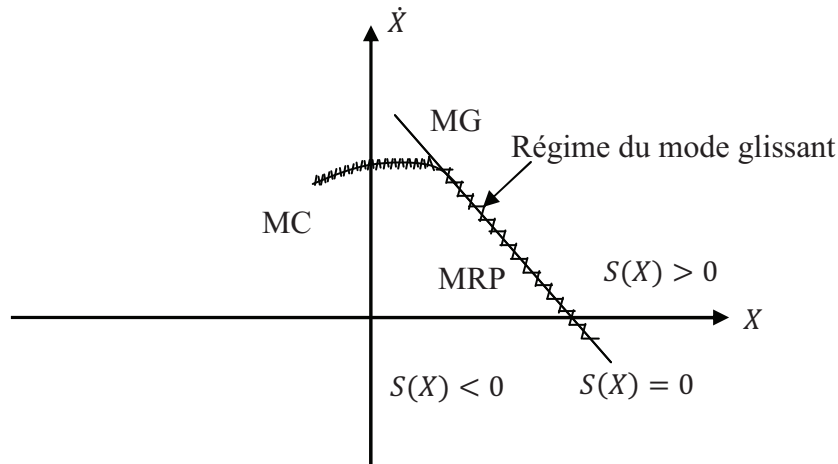


Figure IV.3. Les différents modes de trajectoire dans le plan de phase.

- **Le mode de convergence (MC)** : durant lequel la variable à réguler se déplace à partir de n'importe quel point du plan de phase vers la surface de commutation $S(X) = 0$ et l'atteint dans un temps fini. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence [80].
- **Le mode de glissement (MG)** : durant lequel la variable d'état a atteint la surface glissante et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement ($S(X) = 0$) [80].

- **Le mode de régime permanent (MRP)** : il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre. Il caractérise la qualité et la performance de la commande. Il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non linéaires [80].

Lorsque la surface de commutation est atteinte (Eq. IV.6) nous pouvons écrire $\underline{U} = \underline{U}_{eq}$. L'équation (IV.6) permet d'introduire un terme appelé **Commande équivalente** qui peut-être exprimée comme suit [73]:

$$\underline{U}_{eq} = -(GB)^{-1}G f(\underline{X}, t) \quad (IV.8)$$

Où la matrice G peut-être présentée comme une matrice à m lignes et n colonnes :

$$G = \frac{\partial G}{\partial \underline{X}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial S_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial S_1}{\partial X_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial S_m}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial S_m}{\partial X_n} \end{pmatrix} \quad (IV.9)$$

Les composantes du vecteur commande équivalente sont alors définies comme les valeurs moyennes des composantes du vecteur de commande \underline{U} qui maintiennent l'état du système sur la surface de commutation \mathcal{S} . Ce sont des termes continus de commande [73].

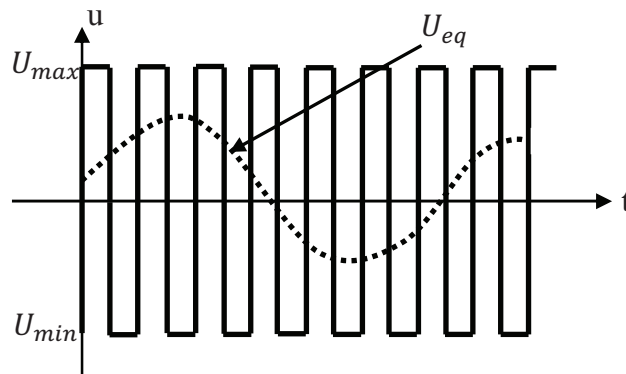


Figure IV.4. Commande équivalente U_{eq} .

Les conditions d'existence d'un régime de fonctionnement dit "mode glissant" sont données par deux hypothèses :

- ✓ le produit de matrice (GB) doit être inversible, c'est à dire que son déterminant doit être non nul.
- ✓ les conditions d'atteinte et de maintien en régime glissant respectent :

$$\underline{U}_{min} < \underline{U} < \underline{U}_{max} \quad (IV.10.a)$$

$$\underline{S} \dot{\underline{S}} < 0 \quad (IV.10.b)$$

Nous verrons que la deuxième condition servira à obtenir les gains utilisés pour la régulation [73].

Si maintenant, nous introduisons le terme de commande équivalente dans l'équation générale (IV.4), l'équation qui régit l'évolution du système en régime glissant est obtenue, soit:

$$\dot{\underline{X}} = [I - B(GB)^{-1}G]f(\underline{X}, t) \quad (IV.11)$$

- I : est la matrice identité.

Remarquons que dans l'équation (IV.11), le terme de commande \underline{U} n'intervient pas. Seul, les paramètres du système et le gradient de la fonction de commutation sont susceptibles de faire varier l'état du système [73].

En dehors de la surface de commutation, lorsque le système est en "mode d'approche", (Reaching Mode), nous pouvons écrire l'équation traduisant l'évolution temporelle des variables de notre système. Dans ce mode particulier, où $\underline{U} = \underline{U}_{eq} + \underline{U}_n$ l'équation d'état conduit au résultat suivant [73]:

$$\dot{\underline{X}} = [I - B(GB)^{-1}G]f(\underline{X}, t) + B \underline{U}_n(\underline{X}, t) \quad (IV.12)$$

Ce qui peut-être réduit à :

$$\dot{\underline{X}} = B \underline{U}_n(\underline{X}, t) \quad (IV.13)$$

Effectivement, cette relation est valable dans le cas le plus général mais aussi en particulier lorsque $G = I$.

Dans ce mode particulier de fonctionnement, la réponse du système est exclusivement assurée par la fonction \underline{U} [73]. Si nous généralisons, nous exprimons de façon pratique la condition d'atteinte du régime glissant :

$$S_i(\sum_{j \in [1, m]} G_{ij} U_j) < 0 \quad \text{pour tout } i \in (1, n) \quad (IV.14)$$

Le vecteur de commande \underline{U} permet donc de régler les dynamiques des deux modes de fonctionnement [73] :

- \underline{U} permet d'influer sur le mode d'approche,
- \underline{U}_{eq} sur le mode de glissement.

IV.3.3. Conception de la commande par mode glissant

La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche [81]. En général, pour réaliser ce type de commande deux étapes doivent être effectuées:

- ✓ Choix de la surface de glissement ;
- ✓ Synthèse des lois de commande du mode glissant.

IV.3.3.1. Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et de l'objectif visé. Généralement, le nombre des surfaces de glissement est choisi égal à la dimension du vecteur de commande [81]. Le procédé le plus judicieux et le plus simple consiste à choisir une surface de commutation égale au vecteur d'erreur [73], du vecteur d'état :

$$\underline{S} = \underline{\Delta X} = \underline{X}_{ref} - \underline{X} \quad (IV. 15)$$

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Plusieurs formes de la surface de glissement ont été proposées dans la littérature, chacune présente des meilleures performances pour une application donnée [78].

La surface la plus utilisée pour obtenir le régime de glissement qui garantit la convergence de l'état vers sa référence (donné par SOLTINE) [78], est définie par:

$$S(X) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} (X_{ref} - X) \quad (IV. 16)$$

Où :

- n : est le degré relatif au nombre qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande;
- λ : est une constante positive.

L'objectif de cette commande est de garder la surface qui tend à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $S(X) = 0$, pour un choix convenable du paramètre λ . Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire, ce qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart, tout en respectant la condition de convergence [81].

IV.3.3.2. Conditions de convergence et d'existence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation [81]. Pour cela nous retenons deux conditions :

A. Fonction directe de commutation

C'est l'approche la plus ancienne et directe, elle a été proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Elle est globale mais ne garantit pas, en revanche un temps d'accès fini [81]. Elle est exprimée par :

$$S(X) \dot{S}(X) < 0 \quad (IV.17)$$

Dans cette condition, il faut introduire pour $S(X)$ et sa dérivée, les valeurs justes à gauche et à droite de commutation [82].

B. Fonction de LYAPUNOV

L'approche de Lyapunov est une condition globale d'accès au mode glissant [48]. Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(X) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction (i.e. $\dot{V}(X) < 0$). Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires [82].

En définissant la fonction de LYAPUNOV par :

$$V(X) = \frac{1}{2} S^2(X) \quad (IV.18)$$

L'idée est de choisir cette fonction pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, et de concevoir une commande U telle que le carré de la surface correspond à une fonction de LYAPUNOV [81]. La dérivée de la fonction $V(X)$ donne :

$$\dot{V}(X) = S(X) \dot{S}(X) \quad (IV.19)$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître et converger vers zéro (pour garantir l'existence du mode de glissant) [81], il suffit d'assurer que:

$$S(X) \dot{S}(X) < 0 \quad (IV.20)$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesurée par $S^2(X)$, diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux cotés [82].

IV.3.3.3. Synthèse des lois de commande du mode glissant

Nous avons détaillé comment obtenir les composantes du terme de commande "continue", du vecteur de commande. Cela découle en partie de la modélisation choisie pour le système, (Eq. 4.8). Nous avons par contre le choix du terme "discontinu" du vecteur de commande \underline{U} . Le vecteur commande à appliquer est obtenu par ajout de deux termes de commande tels que :

$$\underline{U} = \underline{U}_{eq} + \underline{U}_n \quad (IV.21)$$

Dans cette expression, une majorité d'auteurs s'accordent à dire que \underline{U}_{eq} représente un terme "Basse Fréquence" alors que \underline{U}_n représente un terme de "Haute Fréquence". Nous ajoutons donc un terme représentant la valeur désirée en régime permanent, (de type continu), à un terme commutant, permettant d'atteindre ce régime final, (de type discontinu) [73].

\underline{U}_n peut être choisi de manière tout à fait différente selon les utilisateurs. La plus simple consiste à exprimer la commande discontinue $U_n = [U_1, U_2, \dots, U_n]$ avec la fonction signe par rapport à $S = [S_1, S_2, \dots, S_m]$:

$$\text{sign}(S(X)) = \begin{cases} +1 & \text{si } S(X) > 0 \\ -1 & \text{si } S(X) < 0 \end{cases} \quad (IV.22)$$

U_n s'exprime donc comme :

$$U_n = K \text{sign}(S(X)) \quad (IV.23)$$

Où K est un gain positif.

Ce premier choix de la fonction discontinue est représenté sur la figure (IV.5). Le gain K est choisi positif pour satisfaire la condition (IV.20). Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long, et s'il est choisi très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de chattering), ou même détériorer l'organe de commande [82].

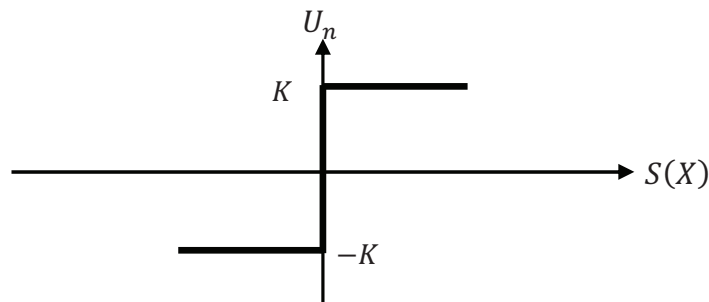


Figure IV.5. Définition de la fonction SIGN.

IV.3.4. Le phénomène de réticence ou 'chattering'

La technique de commande décrite dans la partie précédente assure un comportement non désiré du système en boucle fermée. Cependant, elle a besoin (dans le cas idéal) d'une commutation infinie au niveau des actionneurs. Cette oscillation au voisinage de la surface est appelée réticence ou broutement. La Figure (IV.6) montre l'effet de la réticence dans la convergence du système. La réticence n'est pas désirable, car elle induit des dynamiques de haute fréquence du système, augmentant la consommation énergétique qui peut endommager les actionneurs [76].

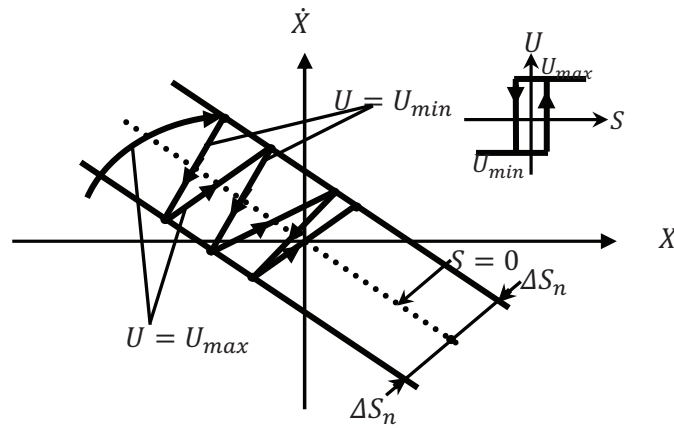


Figure IV.6. Démonstration du phénomène de réticence.

La réticence est le principal désavantage des modes glissants. De nombreuses études ont été effectuées dans le but de réduire ou d'éliminer ce problème, par exemple : les solutions par limitation de la condition de glissement, les solutions par observateur, etc. Dans cette section nous allons décrire les techniques de limitation de la condition de glissement, car elles sont les plus utilisées pour les applications en temps réel. Ces techniques sont basées sur la définition d'une zone autour de la surface S , à l'intérieur de laquelle une condition de glissement moins stricte que la condition signe est appliquée. Ainsi, le terme $sign(S)$ dans la partie du glissement de la commande est souvent remplacé par un terme à variation plus douce [76], par exemple:

IV.3.4.1. Commande avec un seuil

Cette commande est caractérisée par un seuil ε (figure IV.7). Dans la bande qui entoure la surface de glissement $S(X)$, seule la composante continue \underline{U}_{eq} de la de tension de commande agit. La partie discontinue U_n étant égale à zéro, les oscillations sur les réponses fortement atténuées. Cependant lorsque ε augmente, il apparaît un écart statique sur la réponse en régulation [82]. La commande discontinue a l'expression suivante :

$$U_n = \begin{cases} K \operatorname{sign}(S(X)) & \text{si } |S(X)| \geq \varepsilon \\ 0 & \text{si } |S(X)| < \varepsilon \end{cases} \quad (\text{IV. 24})$$

Ce choix de la fonction discontinue est représenté sur la figure IV.7 :

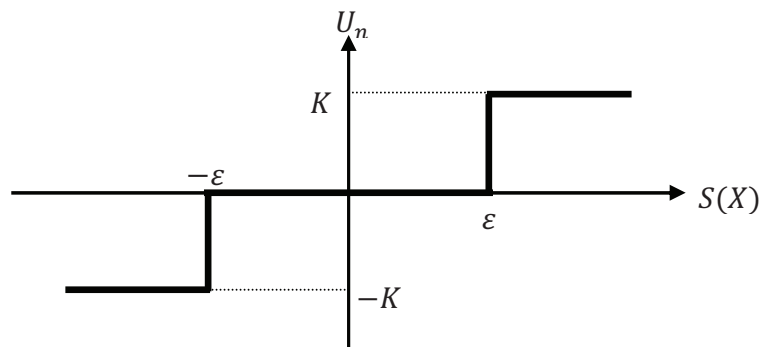


Figure IV.7. Définition de la fonction SIGN avec un seuil.

Ce type de commande n'est pas très utilisé car, outre le problème d'erreur statique, en présence d'une perturbation, U_n intervient avec toute sa valeur et des oscillations peuvent persister en régime permanent. Un adoucissement de la commande u_n est donc nécessaire.

IV.3.4.2. Commande adoucie

Cette commande est caractérisée par un seuil ε_1 ou deux seuils ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) pour diminuer progressivement la valeur de la commande U_n . Dans cette configuration présentée par la figure (IV.8) [82], on peut distinguer trois zones qui dépendent de la distance du point à la surface de glissement :

- que la distance est supérieure au seuil ε_1 et alors la fonction signe est effective.
- que la distance est inférieure au seuil ε_1 et alors U_n est nulle (zone morte)
- que le point est dans la bande ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) et alors U_n est une fonction linéaire de la distance (droite de pente $\frac{K}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}$).

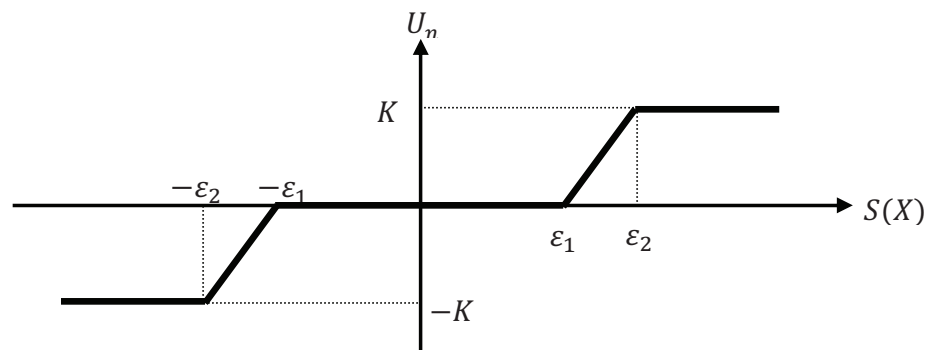


Figure IV.8. Définition de la fonction SIGN de la commande adoucie.

Dans cette méthode d'adoucissement utilisée pour limiter les oscillations, plus le seuil est grand, moins il y a des commutations. Néanmoins s'il est trop important, il y a problème de précision. En effet le système va évoluer dans la bande et risque donc de ne jamais atteindre le point désirer (origine du plan de phase).

En conclusion, nous pouvons résumer qu'en commande adoucie :

- il y a limitation, élimination des oscillations de glissement.
- le système ayant deux points d'équilibre et par conséquent, en régime permanent, un écart statique apparaît et dépend du seuil utilisé.
- de point de vue théorique, le mode de glissement n'existe plus parce que la trajectoire d'état n'est pas forcée de rester sur $S(X)=0$.

IV.3.4.3. Commande intégrale

Les oscillations de haute fréquence qui apparaissent sur les réponses en régime glissant peuvent être évités en rendant continue la commande discontinue U_n , en remplaçant la fonction signe par la fonction continue voisine:

$$U_n = \frac{S(X)}{|S(X) + \lambda|} \quad (IV. 25)$$

Où λ est un paramètre définissant le degré d'atténuation des oscillations. Lorsque λ tend vers zéro, on tend vers la même commande discontinue défini par (IV.23). La fonction U_n continue est illustrée sur la figure (IV.9).

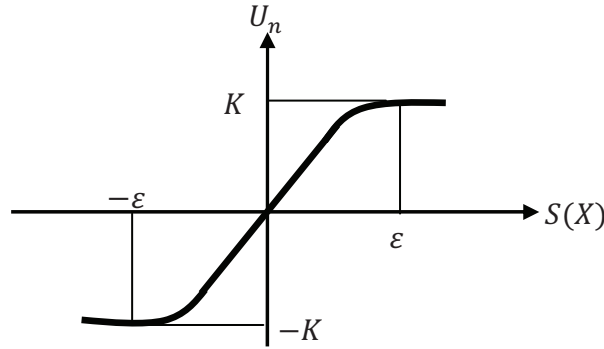


Figure IV.9: Définition de la fonction intégrale

Pour augmenter la précision de la réponse du système, on peut utiliser une commande continue incluant une composante intégrale qui devient active lorsque le point est proche de la surface. En général, le compensateur intégral diminue l'erreur en régime permanent, mais il est souvent indésirable pour les régimes transitoires brusques, car il provoque des oscillations supplémentaires sur la réponse. La commande U_n dans ce cas devient :

$$U_n = \frac{S(X)}{|S(X) + \lambda|} + \eta \quad (IV.26)$$

$$\text{Avec : } \lambda = \lambda_0 + |\gamma|$$

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_0 \int S(X) dt & \text{si } |S(X)| < \epsilon \\ 0 & \text{si } |S(X)| > \epsilon \end{cases} \quad (IV.27)$$

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 \int S(X) dt & \text{si } |S(X)| < \epsilon \\ 0 & \text{si } |S(X)| > \epsilon \end{cases} \quad (IV.28)$$

Où λ, γ, η et ϵ sont des constantes ou paramètres adaptatifs en fonction des références.

Ce type de commande est difficile à mettre en œuvre car il y a un grand nombre de paramètres à déterminer [82].

IV.3.4.4. Commande SAT

Cette fonction est représentée dans la figure (IV.10), est défini comme suit :

$$\text{Sat}(S(X)) = \begin{cases} K & \text{si } S(X) > \mu \\ -K & \text{si } S(X) < \mu \\ \frac{K S(X)}{\mu} & \text{si } |S(X)| < \mu \end{cases} \quad (IV.29)$$

U_n s'exprime donc comme :

$$U_n = K \text{ sat}(S(X)) \quad (\text{IV. 30})$$

C'est cette fonction qui a été utilisée pour notre recherche.

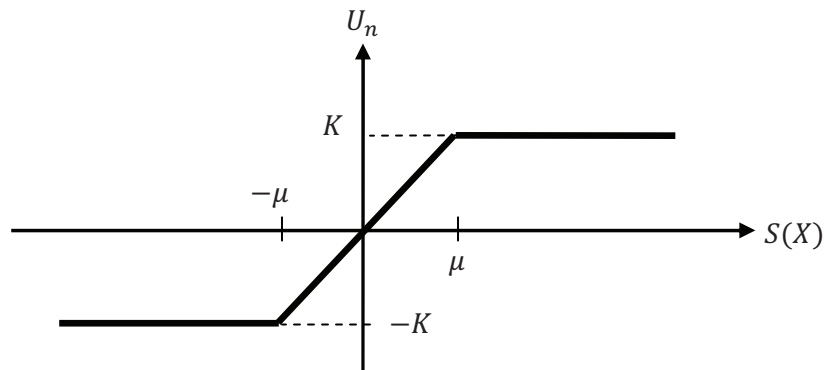


Figure IV.10. Définition de la fonction SAT.

Toutefois, pour que ces approches soient efficaces, il est nécessaire d'avoir convenablement modélisé les dynamiques négligées des actionneurs. Dans le cas contraire, les propriétés de robustesse, de temps de réponse et les performances du système s'en trouvent souvent dépréciées [76].

IV.3.4.5. Commande par logique floue

Avec la logique floue, l'intelligence artificielle accomplit une avancée spectaculaire dans les applications techniques. Cette technique permet de faire le lien entre la modélisation numérique et la représentation symbolique. Afin de remédier au problème engendré par la composante discontinue, nous allons la remplacer par une structure floue [83].

$$\underline{U} = \underline{U}_{eq} + \underline{U}_{flou} \quad (\text{IV. 31})$$

Pour les variables d'entrée (la surface de glissement) et les variable de sortie, nous avons défini les ensembles floue comme suit : négative grand (NG), négative moyen (NM), zéro (ZE), positive moyen (PM), positive grand (PG). Voir la figure IV.11 et la figure IV.12.

Les règles floues peuvent être écrites comme indiqué dans le tableau 1. A cet effet, il est utilisé un système par logique floue de type Mamdani. La fonction d'appartenance de l'agrégation résulte de l'utilisation de l'opérateur max. La défuzzification de la sortie de contrôle est accompli en utilisant la méthode du centre de gravité.

Entrée flou	NG	NM	EZ	PM	PG
Sortie flou	NG	NM	EZ	PM	PG

Table VI.1. Base des règles de la commande floue.

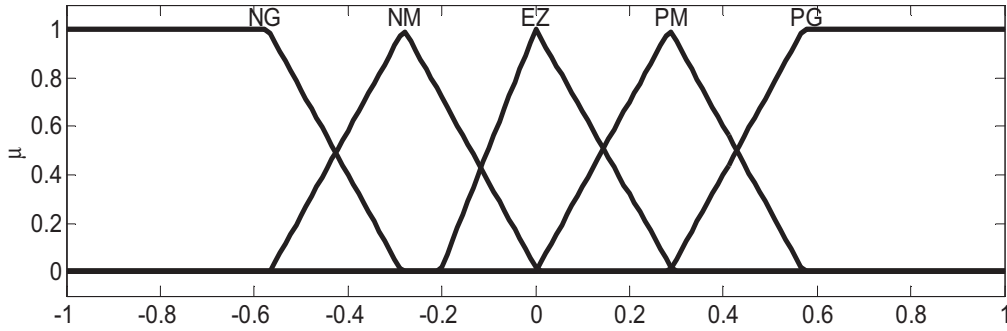


Figure IV.11. Fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée.

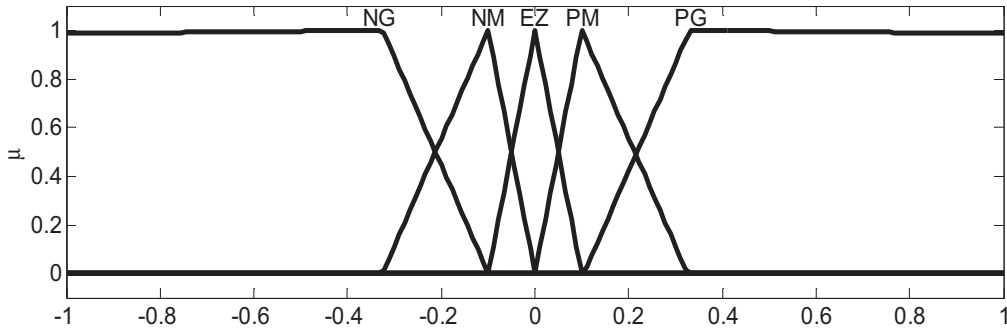


Figure IV.12. Fonctions d'appartenance pour les variables de sortie.

IV.4. Application de la commande par mode glissant flou au CCG

Nous avons utilisé la commande par mode glissant flou pour contrôler la puissance active et la puissance réactive ainsi que les courants rotoriques de la GADA dont le modèle est fortement couplé. Et pour appliquer cette technique, les surfaces sont choisies en fonction de l'erreur entre les signaux d'entrées de référence et les signaux de mesure [84].

Si on considère que e_1 , e_2 , e_3 et e_4 sont les erreurs de la puissance active, la puissance réactive, la composante en quadrature du courant rotorique et la composante direct du courant rotorique, respectivement :

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{sref} - P_s \\ Q_{sref} - Q_s \\ i_{rq}^{lim} - i_{rq} \\ i_{rd}^{lim} - i_{rd} \end{bmatrix} \quad (IV. 31)$$

Si on prend donc $n=1$, l'expression des surfaces de contrôle ont pour forme :

$$\begin{bmatrix} S(P) \\ S(Q) \\ S(i_{rq}) \\ S(i_{rd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{sref} - P_s \\ Q_{sref} - Q_s \\ i_{rq}^{lim} - i_{rq} \\ i_{rd}^{lim} - i_{rd} \end{bmatrix} \quad (IV. 32)$$

En dérivant les surfaces avec le remplacement des expressions de la puissance active P_s (équation II.58) et de la puissance réactive Q_s (équation II.60), on obtient :

$$\begin{bmatrix} \dot{S}(P) \\ \dot{S}(Q) \\ \dot{S}(i_{rq}) \\ \dot{S}(i_{rd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{sref} \cdot + v_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{rq} \\ Q_{sref} \cdot + \frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{rd} - \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} \\ i_{rq}^{lim} - i_{rq} \\ i_{rd}^{lim} - i_{rd} \end{bmatrix} \quad (IV.33)$$

On tire les expressions des courants i_{rq} et i_{rd} des équations des tensions v_{rq} et v_{rd} respectivement (équations II.65 et II.64).

$$\begin{bmatrix} i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A i_{rq} - g \omega_s i_{rd} + \frac{1}{\sigma L_r} v_{rq} - \frac{M g v_s}{L_s L_r \sigma} \\ -\frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} + g \omega_s i_{rq} + \frac{1}{\sigma L_r} v_{rd} \end{bmatrix} \quad (IV.34)$$

Avec :

$$A = \frac{1}{\sigma T_r}; T_r = \frac{L_r}{R_r}; \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

On remplace i_{rq} et i_{rd} calculé dans l'équation IV.33.

$$\begin{bmatrix} \dot{S}(P) \\ \dot{S}(Q) \\ \dot{S}(i_{rq}) \\ \dot{S}(i_{rd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{sref} \cdot + v_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \left(-A i_{rq} - g \omega_s i_{rd} + \frac{1}{\sigma L_r} v_{rq} - \frac{M g v_s}{L_s L_r \sigma} \right) \\ Q_{sref} \cdot + \frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot \left(-\frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} + g \omega_s i_{rq} + \frac{1}{\sigma L_r} v_{rd} \right) - \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} \\ i_{rq}^{lim} + A i_{rq} + g \omega_s i_{rd} - \frac{1}{\sigma L_r} v_{rq} + \frac{M g v_s}{L_s L_r \sigma} \\ i_{rd}^{lim} + \frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} - g \omega_s i_{rq} - \frac{1}{\sigma L_r} v_{rd} \end{bmatrix} \quad (IV.35)$$

Où i_{rq} , i_{rd} , v_{rq} et v_{rd} sont les vecteurs de contrôle, pour forcer les trajectoires du système à converger vers les surfaces.

$$\begin{bmatrix} i_{rq} \\ i_{rd} \\ v_{rq} \\ v_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{rq}^{eq} + i_{rq}^{flou} \\ i_{rd}^{eq} + i_{rd}^{flou} \\ v_{rq}^{eq} + v_{rq}^{flou} \\ v_{rd}^{eq} + v_{rd}^{flou} \end{bmatrix} \quad (IV.36)$$

En remplaçant les expressions des vecteurs de contrôle par leur valeur dans l'équation IV.35, la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{S}(P) \\ \dot{S}(Q) \\ \dot{S}(i_{rq}) \\ \dot{S}(i_{rd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{sref} \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \left(-A(i_{rq}^{eq} + i_{rq}^{flou}) - g\omega_s i_{rd} + \frac{1}{\sigma L_r} v_{rq} - \frac{Mg v_s}{L_s L_r \sigma} \right) \\ Q_{sref} \cdot \frac{v_s M}{L_s} \cdot \left(-\frac{1}{\sigma T_r} (i_{rd}^{eq} + i_{rd}^{flou}) + g\omega_s i_{rq} + \frac{1}{\sigma L_r} v_{rd} \right) - \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} \\ i_{rq}^{lim} + A i_{rq} + g\omega_s i_{rd} - \frac{1}{\sigma L_r} (v_{rq}^{eq} + v_{rq}^{flou}) + \frac{Mg v_s}{L_s L_r \sigma} \\ i_{rd}^{lim} + \frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} - g\omega_s i_{rq} - \frac{1}{\sigma L_r} (v_{rd}^{eq} + v_{rd}^{flou}) \end{bmatrix} \quad (IV. 37)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, les valeurs de la surface, de sa dérivée et la commande floue sont nuls.

On tire de l'équation précédente les grandeurs des commandes équivalentes qui sont écrit comme suit:

$$\begin{bmatrix} i_{rq}^{eq} \\ i_{rd}^{eq} \\ v_{rq}^{eq} \\ v_{rd}^{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_s}{A v_s M} P_{sref} - \frac{g\omega_s}{A} i_{rd} + \frac{1}{A \sigma L_r} v_{rq} - \frac{Mg v_s}{L_s L_r \sigma} \\ \frac{\sigma T_r L_s}{v_s M} Q_{sref} + g\omega_s \sigma T_r i_{rq} + \frac{T_r}{L_r} v_{rd} - \frac{\sigma T_r v_s}{M \omega_s} \\ \sigma L_r \left(i_{rq}^{lim} + A i_{rq} + g\omega_s i_{rd} \right) + \frac{Mg v_s}{L_s} \\ \sigma L_r \left(i_{rd}^{lim} + \frac{1}{\sigma T_r} i_{rd} - g\omega_s i_{rq} \right) \end{bmatrix} \quad (IV. 38)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition $S(X)\dot{S}(X) < 0$ soit vérifiée, on pose:

$$\begin{bmatrix} \dot{S}(P) \\ \dot{S}(Q) \\ \dot{S}(i_{rq}) \\ \dot{S}(i_{rd}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{AM v_s}{L_s} i_{rq}^{flou} \\ -\frac{M v_s}{\sigma T_r L_s} i_{rd}^{flou} \\ -\frac{1}{\sigma L_r} v_{rq}^{flou} \\ -\frac{1}{\sigma L_r} v_{rd}^{flou} \end{bmatrix} \quad (IV. 39)$$

Afin d'atténuer tout dépassement possible des courants i_{rq} et i_{rd} , il est souvent utile de rajouter un limiteur de courant qui s'exprime par :

$$\begin{bmatrix} i_{rq}^{lim} \\ i_{rd}^{lim} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{rq}^{max} sat(i_{rq}) \\ i_{rd}^{max} sat(i_{rd}) \end{bmatrix} \quad (IV. 40)$$

IV.4.1. Résultats obtenus

Afin de montrer les performances de la commande par mode glissant flou, nous allons appliquer les mêmes conditions que celles utilisées dans le chapitre 2. On garde le même

schéma de principe adopté pour la commande sauf qu'on remplace les régulateurs PI par nos régulateurs à mode glissant flou.

IV.4.1. 1. Résultat pour un profil du vent lisse

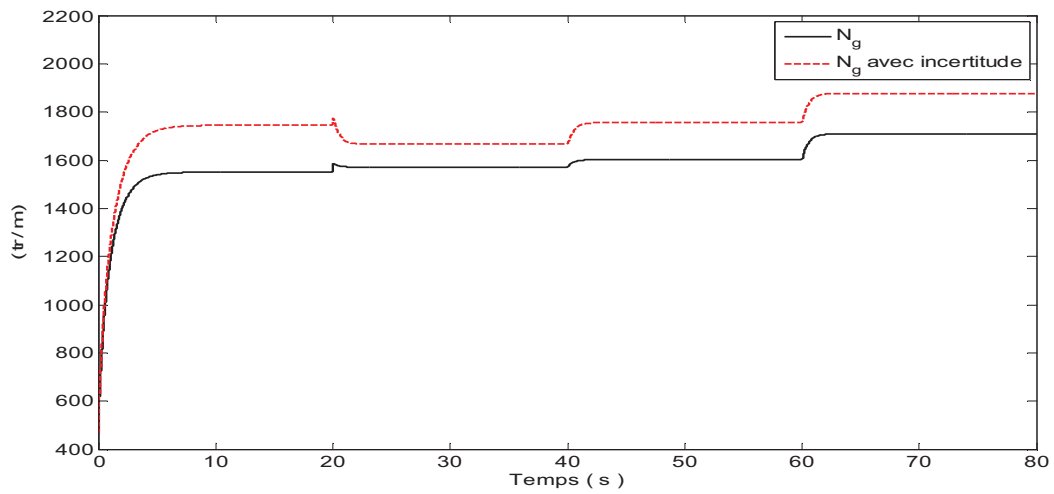


Figure IV.13. Réponse de la vitesse mécanique de la GADA.

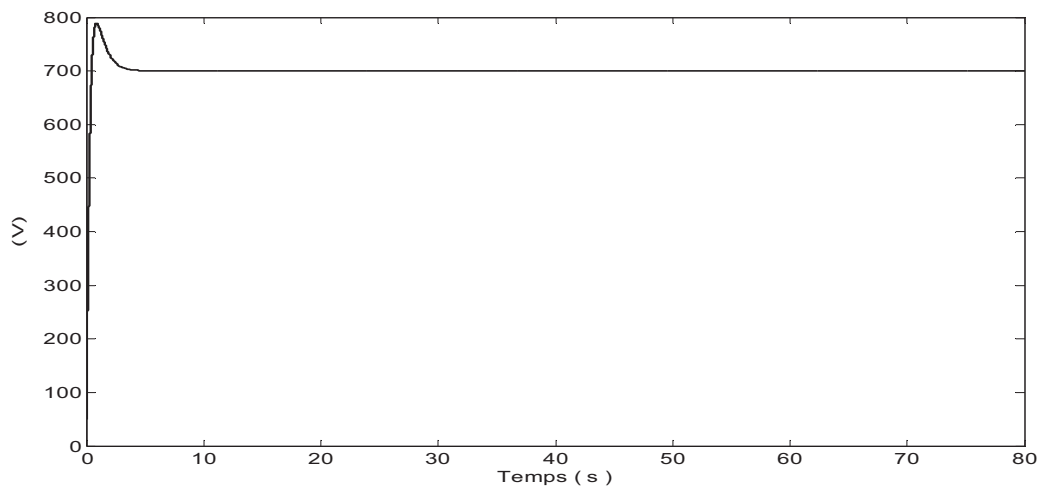


Figure IV.14. Réponse de la tension du bus continu.

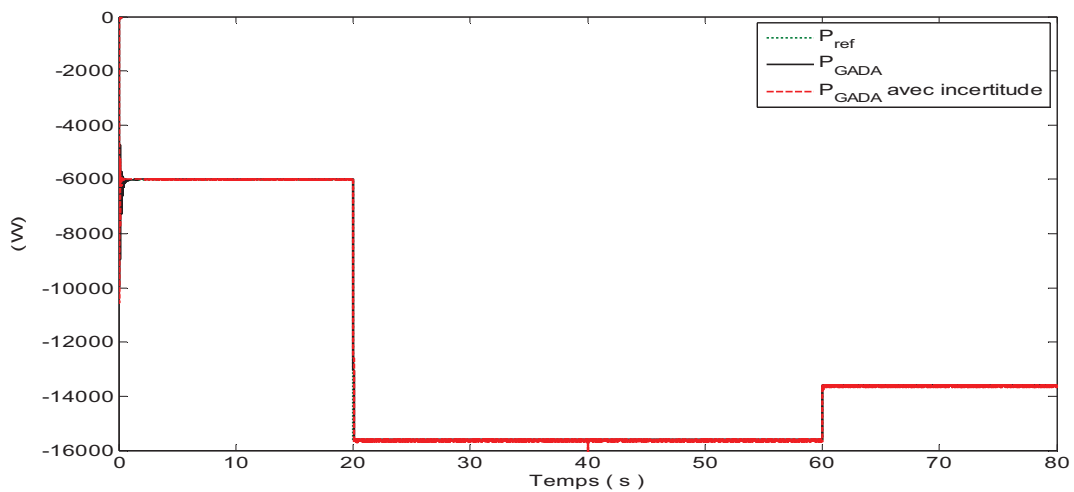


Figure IV.15. Réponse de la puissance active de la GADA.

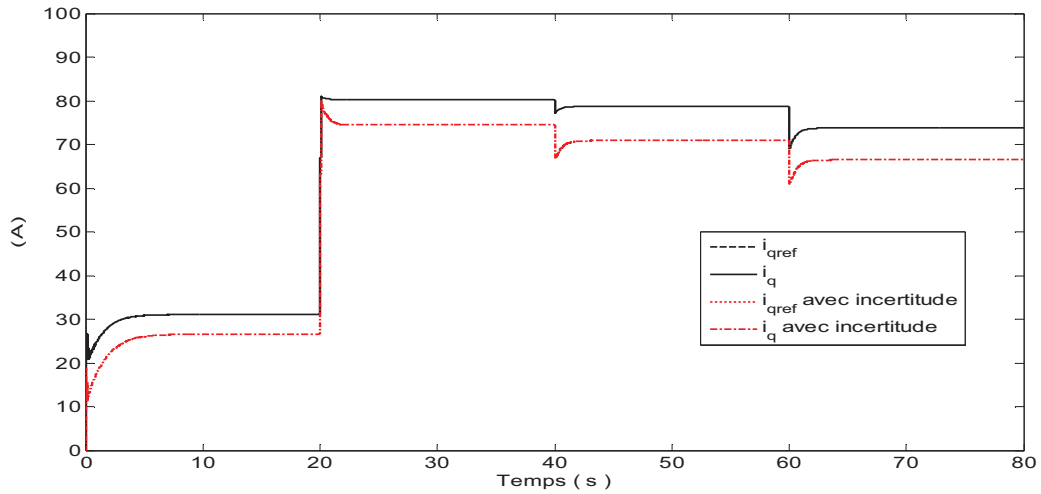


Figure IV.16. Réponse de la composante en quadrature du courant rotorique.

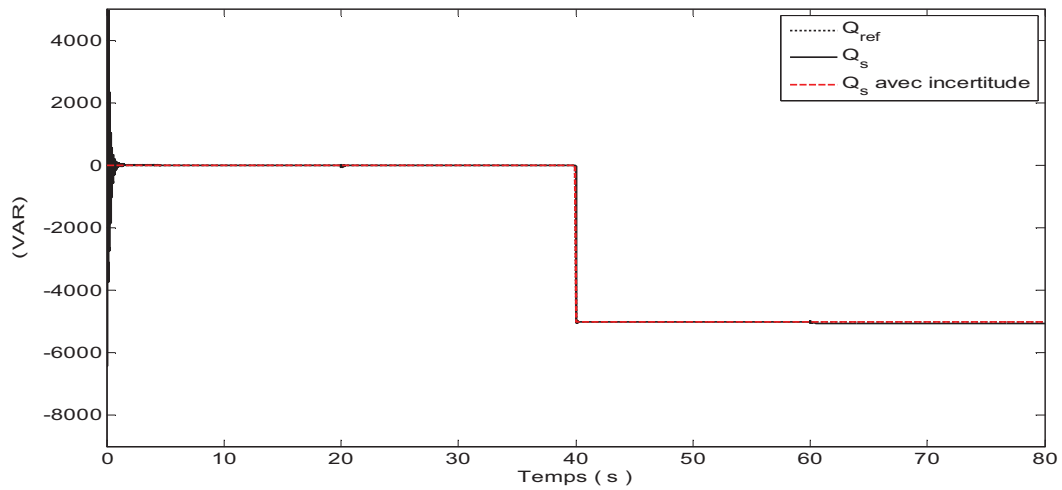


Figure IV.17. Réponse des puissances réactives statoriques.

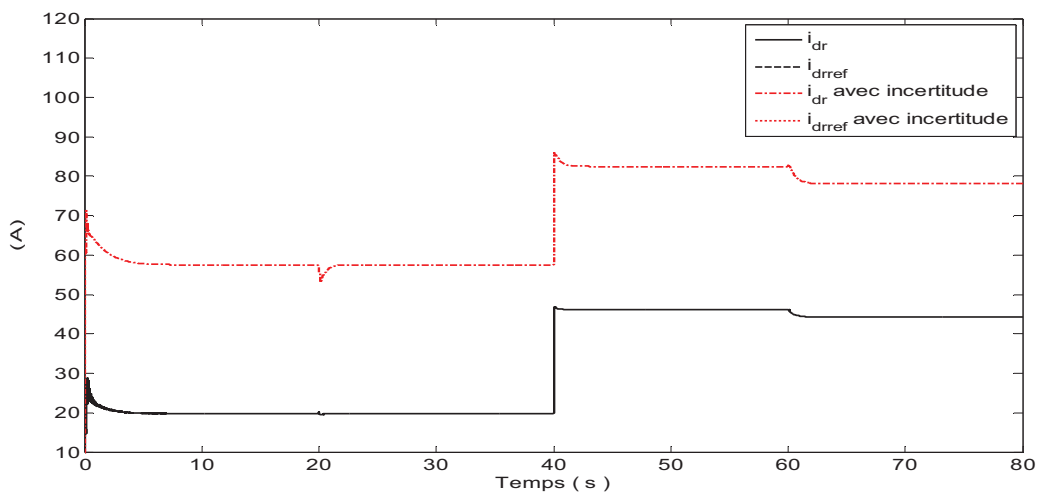


Figure IV.18. Réponse de la composante directe du courant rotorique.

IV.4.1. 2. Résultat pour un profil du vent aléatoire

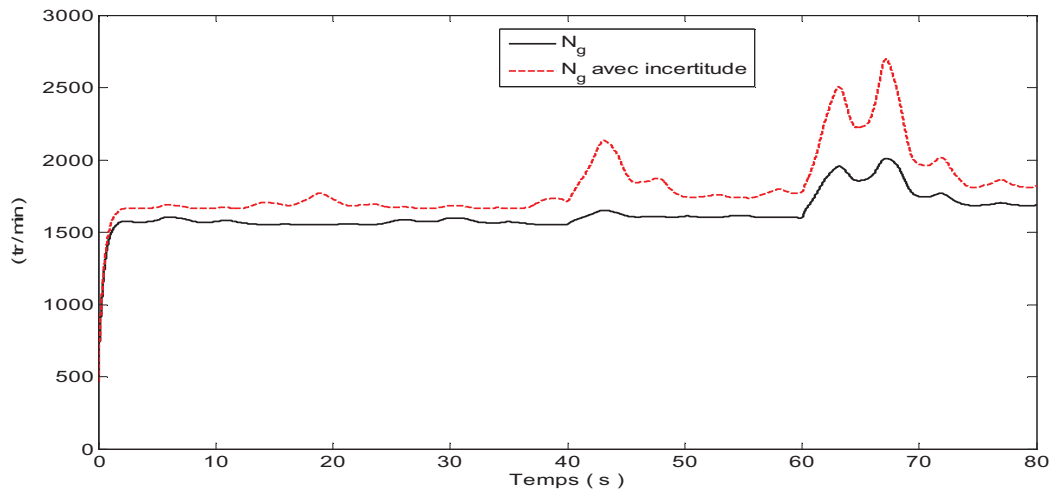


Figure IV.19. Réponse de la vitesse mécanique de la GADA.

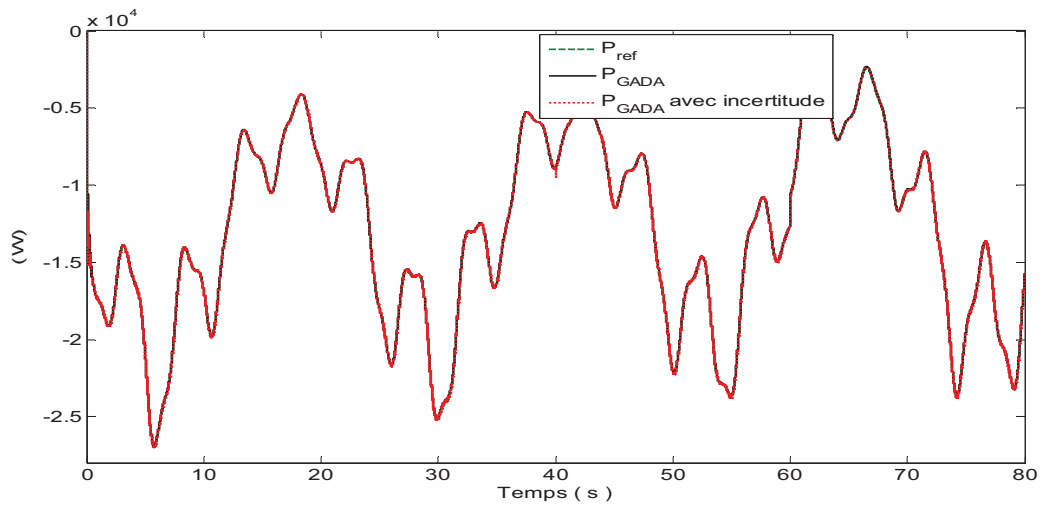


Figure IV.20. Réponse de la puissance active de la GADA.

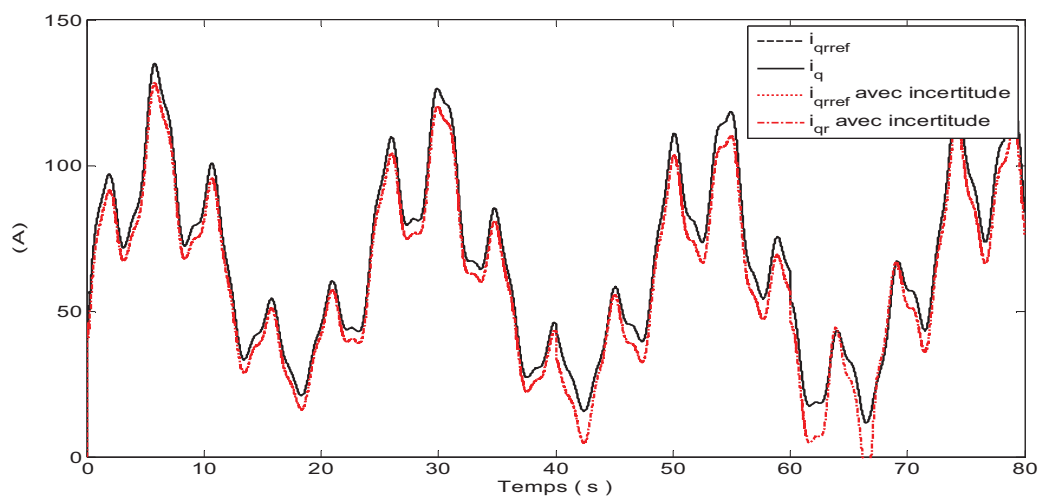


Figure IV.21. Réponse de la composante en quadrature du courant rotorique.

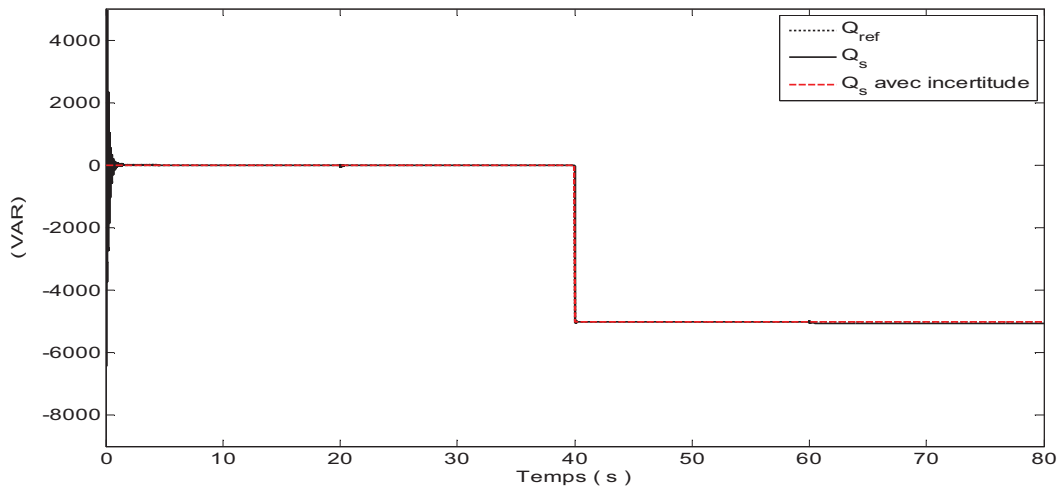


Figure IV.22. Réponse des puissances réactives statoriques.

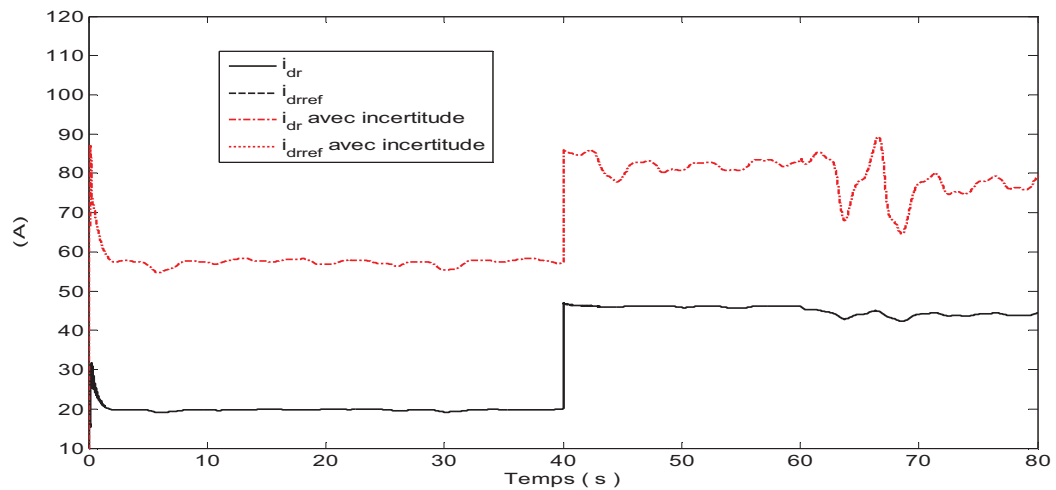


Figure II.23. Réponse de la composante directe du courant rotorique.

IV.4.4. Interprétation des résultats

IV.4.4.1. Profil du vent lisse

- Lors du démarrage, la réponse de la vitesse mécanique de la GADA est apériodique avec un temps de réponse de $t_{sNg} = 5s$ et sans dépassement. Et lors de la variation de vitesse du vent, de la puissance réactive et de la puissance active, la vitesse mécanique de la GADA atteint une nouvelle valeur rapidement ($t_{sNg} = 2s$) et sans dépassement. Et dans le cas des incertitudes paramétriques, la valeur de la vitesse mécanique augmente en gardant les mêmes performances que celles sans incertitudes paramétriques.
- La puissance active suit parfaitement sa référence (rapide et précise), et il y a aucune influence lors de la variation de la puissance réactive, et de la variation des paramètres de la machine.

- Le courant i_{qr} est bien régulier. Lors du démarrage son temps de réponse est de $t_{si_{qr}} = 5s$. Et lors de la variation des consignes (vent, puissances active et réactive), il marque des pics de dépassement de $d_{i_{qr}} = 2\%$ et de temps de réponse de $t_{si_{qr}} = 1s$. Et lors de la variation des paramètres de la GADA, sa valeur change en gardant presque les mêmes performances.
- La puissance réactive suit parfaitement sa référence ; aucune influence lors de la variation de la vitesse du vent, de la puissance active et des paramètres de la machine.
- Le courant i_{dr} est bien régulier.

IV.4.4.2. Profil du vent aléatoire

- La vitesse de la GADA est bien adaptée sauf lors du dernier cas de figure où il y a variation des paramètres et variation des puissances active et réactive. La valeur de la vitesse de la GADA est trop augmentée (il faut prendre en considération les limites de fonctionnement pour imposer les puissances active et réactive).
- Les puissances active et réactive et les courants suivent bien leurs références.

D'après ces résultats, on note que la commande par mode glissant flou rejette parfaitement les perturbations dues à la variation de la vitesse du vent, l'effet de couplage et les incertitudes paramétriques.

IV.5. Application de la commande par mode glissant flou à l'hacheur du GPV

Pour appliquer la commande par mode de glissement flou à la puissance du GPV, il faut suivre les mêmes étapes de la conception de la commande par mode glissant flou (§ IV.4). Le réglage de la puissance se fait en contrôlant le courant du filtre de l'hacheur i_{fhac} .

Si on considère que e est l'erreur du courant du filtre de l'hacheur :

$$e = i_{fhac_{ref}} - i_{fhac} \quad (IV.41)$$

Si on prend donc $n=1$, l'expression de la surface de contrôle du courant du filtre a pour forme :

$$S(i_{fhac}) = i_{fhac_{ref}} - i_{fhac} \quad (IV.42)$$

En dérivant la surface avec le remplacement de l'expression du courant du filtre (équation III.7), on obtient :

$$\dot{S}(i_{fhac}) = i_{fhac_{ref}} - \frac{1}{L_{fhac}}(v_{fhac} - R_{fhac}i_{fhac}) \quad (IV.43)$$

Où v_{fhac} est le vecteur de contrôle, pour forcer la trajectoire du système à converger vers la surface,

$$v_{fhac} = v_{fhac}^{eq} + v_{fhac}^{flou} \quad (IV.44)$$

En remplaçant l'expression de v_{fhac} par sa valeur dans l'équation (IV.43), la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(i_{fhac}) = i_{fhac} \dot{c}_{ref} - \frac{1}{L_{fhac}} \left((v_{fhac}^{eq} + v_{fhac}^{flou}) - R_{fhac} i_{fhac} \right) \quad (IV.45)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(i_{fhac}) = 0; \dot{S}(i_{fhac}) = 0; v_{fhac}^{flou} = 0 \quad (IV.46)$$

Alors, on tire de l'équation IV.45 la grandeur de commande équivalente v_{fhac}^{eq} qui s'écrit :

$$v_{fhac}^{eq} = L_{fhac} \cdot i_{fhac} \dot{c}_{ref} + R_{fhac} i_{fhac} \quad (IV.47)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition $S(i_{fhac})\dot{S}(i_{fhac}) \leq 0$ soit vérifiée, on pose:

$$\dot{S}(i_{fhac}) = -\frac{1}{L_{fhac}} v_{fhac}^{flou} \quad (IV.48)$$

IV.5.1. Résultats obtenus

Afin de montrer les performances de la commande par mode glissant flou, nous allons appliquer les mêmes conditions que celles utilisées dans le chapitre 3. On garde le même schéma de principe adopté pour la commande sauf qu'on remplace le régulateurs PI par notre régulateur à mode glissant flou.

IV.5.1.1. Résultat du premier test

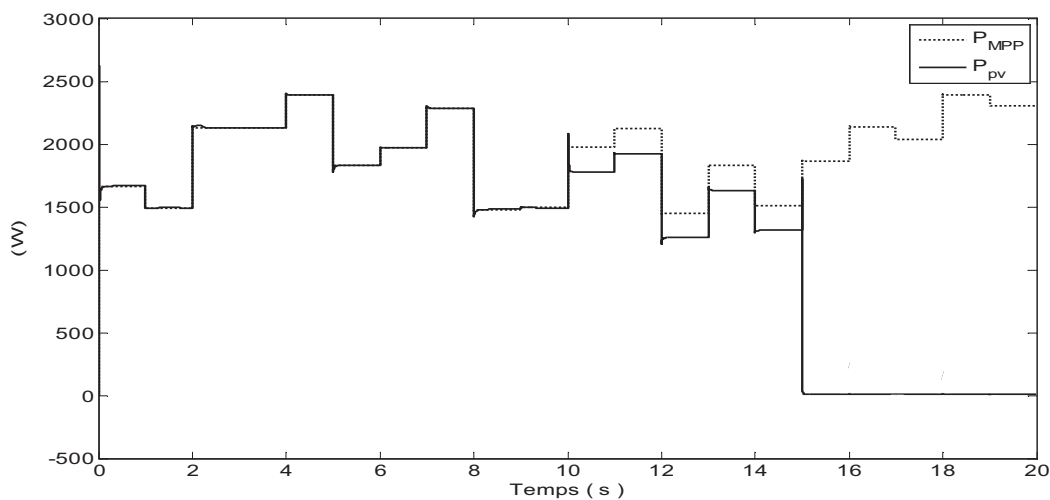


Figure IV.20. Réponse de la puissance du GPV.

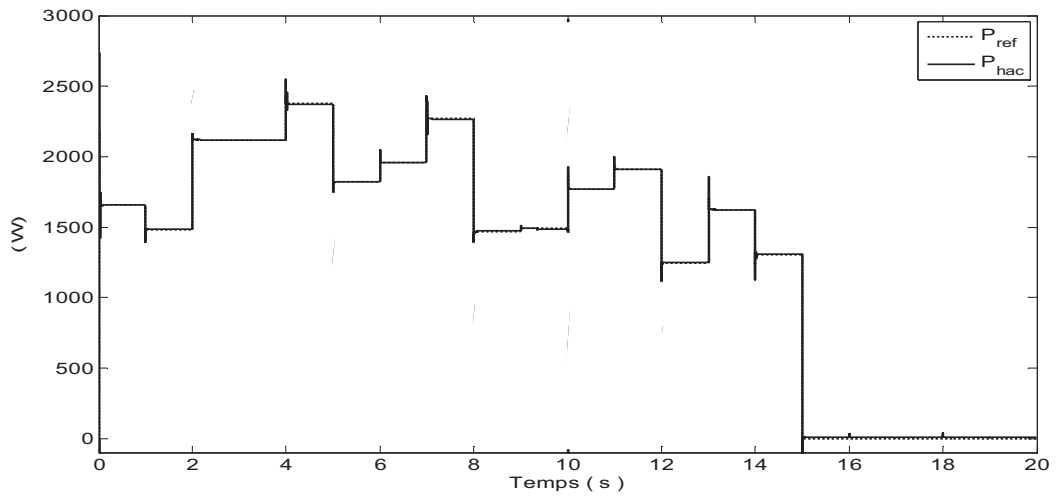


Figure IV.21. Réponse de la puissance de l'hacheur.

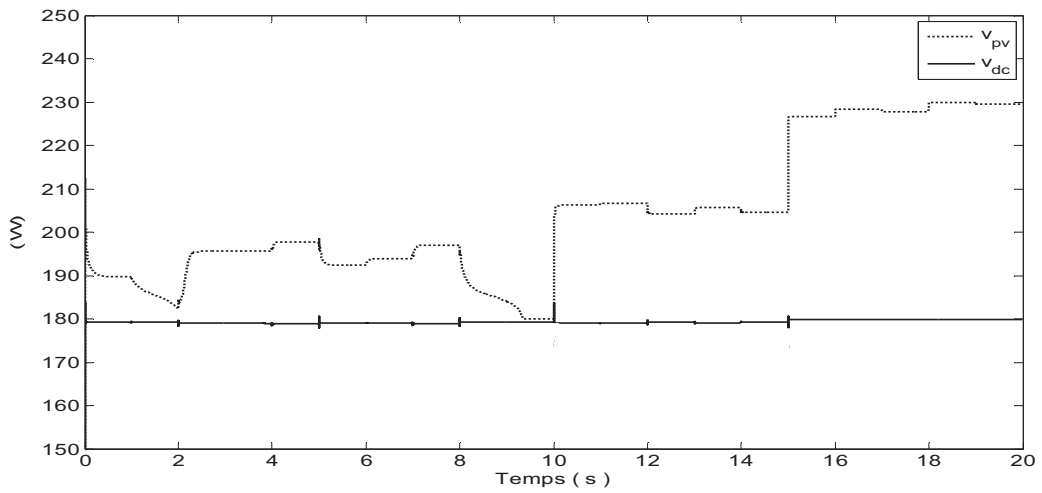


Figure IV.22. Réponse des tensions.

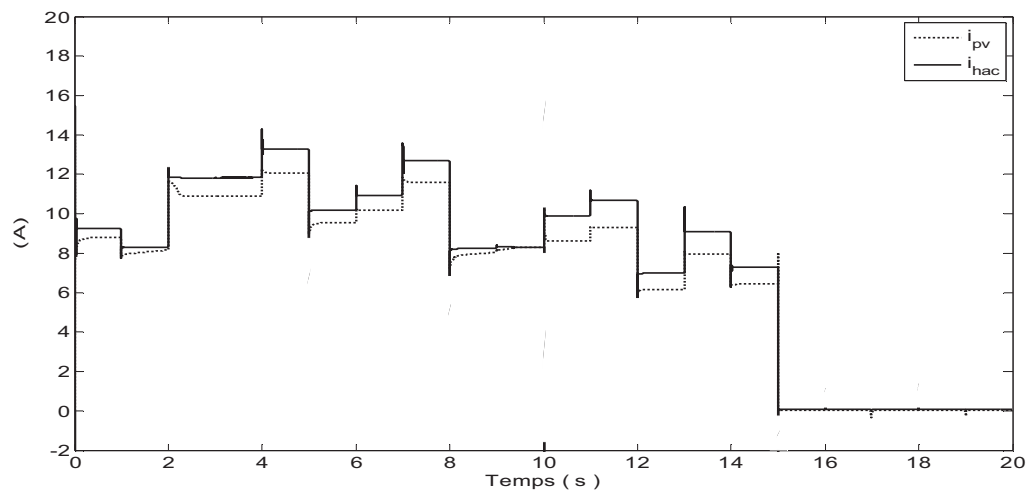


Figure IV.23. Réponse des courants.

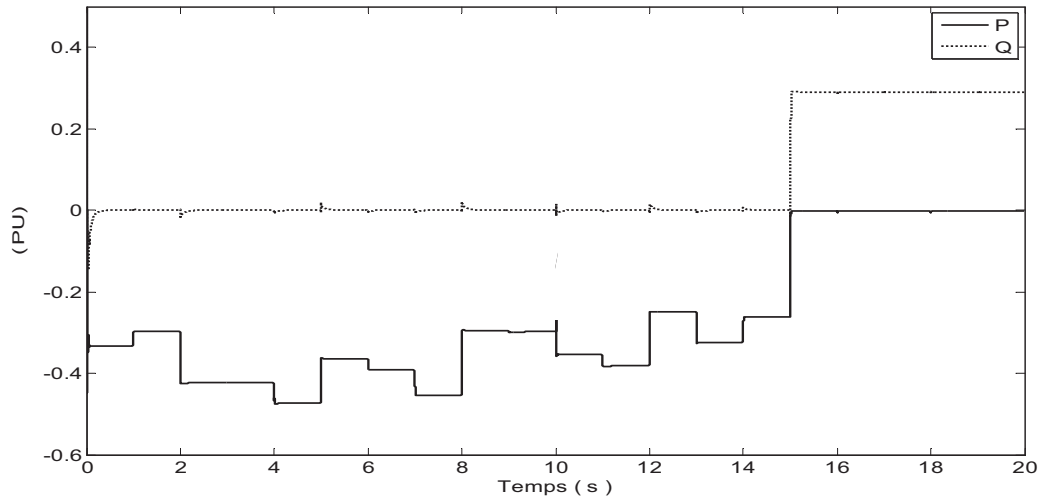


Figure IV.24. Réponse des puissances active et réactive injectées au réseau.

IV.5.1.2. Résultat du deuxième test (test de robustesse)

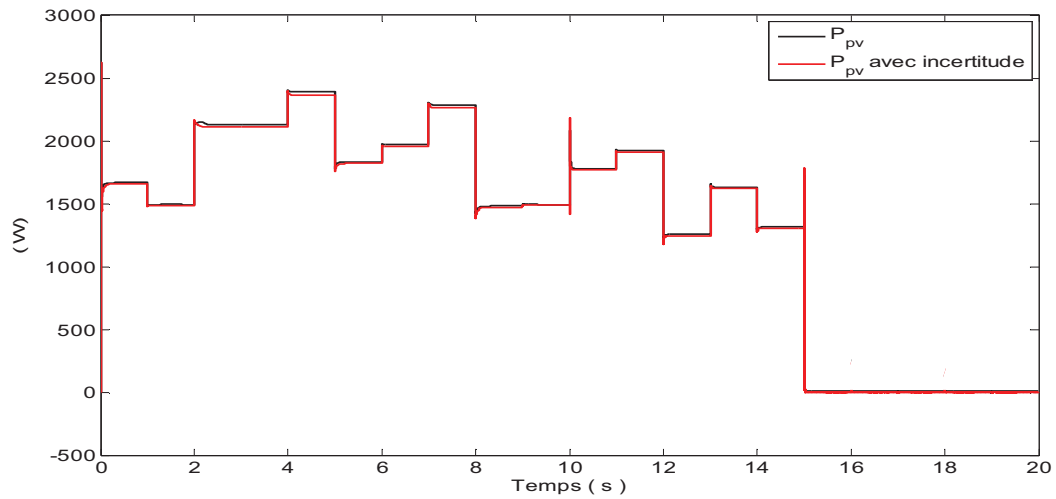


Figure IV.25. Réponse de la puissance du GPV.

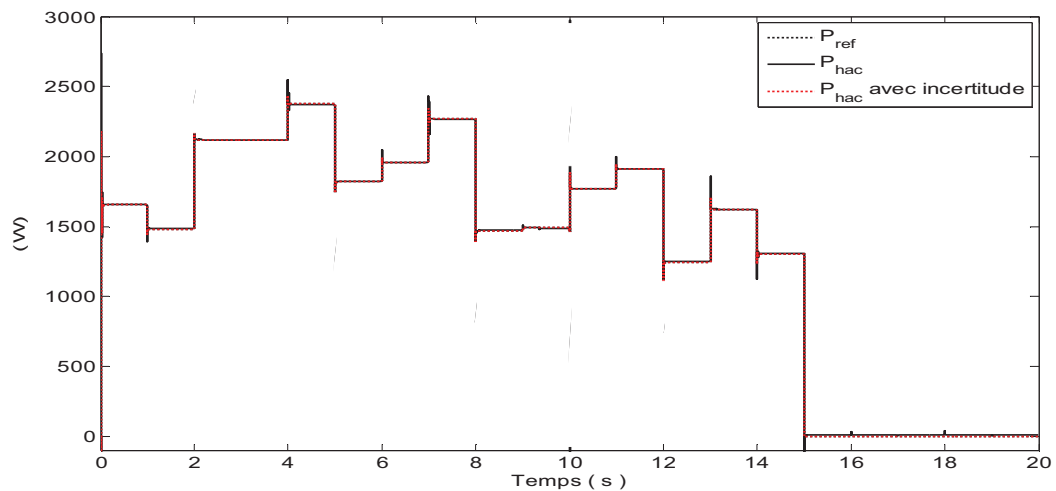


Figure IV.26. Réponse de la puissance de l'hacheur.

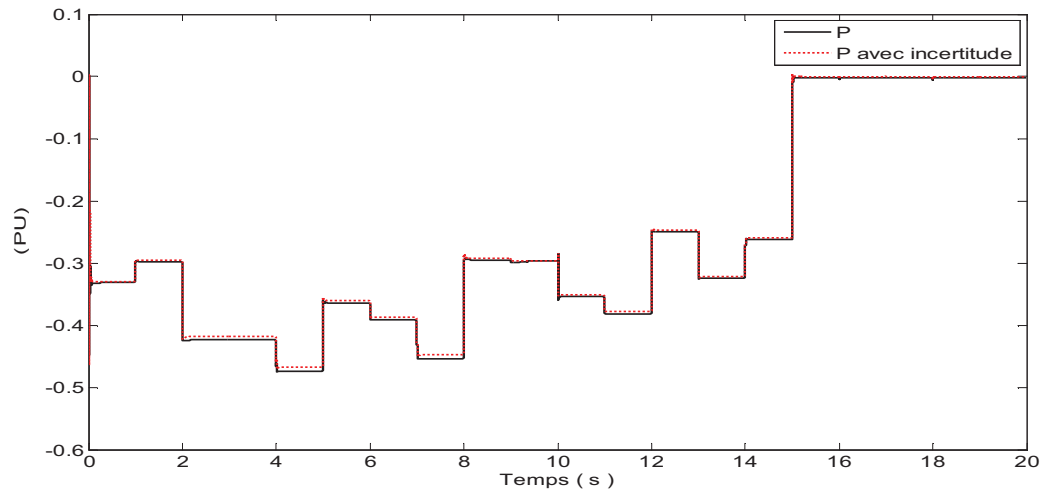


Figure IV.27. Réponse de la puissance active injectée au réseau.

IV.5.2. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent clairement que la puissance produite suit parfaitement la puissance de référence (aucune erreur statique et aucun pic lors du cas de défaut), soit avec ou sans incertitude paramétrique. Et il ya une réduction de dépassement par rapport à la régulation PI.

D'après ces résultats, on note que la commande par mode glissant flou élimine l'erreur statique, réduit les dépassements, rejette les perturbations dues à la variation de l'ensoleillement et rejette l'effet des incertitudes paramétriques.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'application de la commande par mode glissant flou à un système éolien et photovoltaïque dont l'objectif principal étant la régulation de la puissance. Dans ce contexte nous avons présenté tout d'abord un rappel théorique sur la commande par mode glissant. Ensuite nous avons abordé la conception de la commande avec ses différentes étapes. Puis on a appliqué cette dernière aux systèmes étudiés. Et dans le but de réduire le phénomène de chattering, nous avons utilisé la logique floue à la commande. Enfin, des résultats ont été présentés.

Les résultats obtenus montrent clairement que la régulation par mode glissant flou, quelles que soient les plages de fonctionnement étudiées, les réponses sont performantes et robustes vis-à-vis des perturbations internes et externes.

On conclue aussi que le réglage de la puissance générée de l'éolienne et du photovoltaïque par mode glissant flou, apporte de meilleures performances et de robustesse par rapport au régulateur classique PI.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons étudié dans cette thèse l'application de la commande par mode glissant flou, pour un système d'énergie renouvelable multisources (éolienne, photovoltaïque), afin de mieux contrôler la puissance générée, et pour une bonne intégration au réseau électrique.

Après avoir rappelé les généralités sur les différentes sources d'énergies renouvelables pour la production de l'électricité, nous avons détaillé l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque, et leur intégration au réseau (chapitre I). Nous avons ensuite développé dans les chapitres II et III une stratégie de commande permettant de contrôler la puissance générée pour les deux systèmes de production (éolienne, photovoltaïque). La stratégie proposée repose sur la régulation classique PI.

Puis on a exposé les bases théoriques et les fondements du mode glissant, ainsi que la structure d'une commande basée sur cette approche. On a effectué la synthèse des régulateurs à mode glissant flou dont l'objectif est de l'intégrer dans la structure de la commande précédemment conçue (chapitre IV). Grâce aux résultats qui nous ont permis de montrer la supériorité du régulateur glissant flou, aussi bien dans son comportement en poursuite et en régulation. Nous avons également observé sa robustesse surtout vis-à-vis des perturbations internes et externes.

A partir de cette étude et des résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes qu'on a jugées d'un intérêt de premier plan :

- Grâce au développement dans la commande électrique et l'apparition de diverses structures des convertisseurs de l'électronique de puissance permettant à présent de disposer de sources d'alimentation à tension et fréquence variable, la puissance générée par l'éolienne et photovoltaïque peut être gérée et présente une solution idéale pour la connexion au réseau.
- La technique de la commande avec le régulateur PI peut maîtriser la difficulté de réglage. Mais il peut perdre sa robustesse vis-à-vis de la perturbation interne et externe.
- Le mode glissant flou, caractérisé par sa robustesse, a été exploité pour construire des régulateurs de puissance. L'approche de la commande glissant floue proposée a été justifiée par les résultats et les performances obtenus. Ce qui rend le régulateur glissant flou un choix acceptable pour les systèmes nécessitant des réglages rapides, précis et moins sensibles aux perturbations.

Le travail, présenté dans cette thèse amène à soulever les perspectives de recherche suivantes:

- ✓ Les conditions de déroulement de notre thèse nous ont obligés à limiter notre travail à une étude théorique et à des résultats de simulation. Il serait donc souhaitable de tester sur un banc expérimental la validité des algorithmes proposés dans ce travail.
- ✓ Etudier la commande proposée dans le régime dégradé.
- ✓ Utiliser d'autres types de convertisseurs tels que les cycloconvertisseurs et les convertisseurs matriciels adaptés aux grandes puissances.
- ✓ Utiliser des techniques adaptatives pour augmenter les performances de la commande.
- ✓ Etudier d'autres stratégies de commande.

Annexe

Annexe

Paramètres de simulation et cahier de charge

1. Paramètres de simulation

1.1. Paramètres de simulation de l'éolienne

Les paramètres d'une éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation, sont illustrés dans le tableau suivant :

P	20 kW
v_s	380 V
N_p	2
R_s	0.455 Ω
R_r	0.19 Ω
L_s	0.07 H
L_r	0.0213 H
M	0.034 H
J	0.53 kg.m ²
f	0.0024 Nm.s/Rad
ω_s	2 π 50 Hz
R	3.5m
G	7.2
L_f	0.004 H
R_f	0.25 Ω
C	0.2 F

Tableau 1. Valeurs des paramètres de simulation.

1.1. Paramètres de simulation du GPV

Les paramètres d'un GPV, sont illustrés dans le tableau suivant :

P	3 kW
v_s	380 V
i_{cc}	7 A
$v_{cell o}$	0.64 V
n	1.5
R_s	1 e-3 Ω
R_p	1000 Ω
K	1.3806e-23 J/K
e	1.602e-19 C
T	25 + 273 K
N_p	2
N_s	360
C_{pv}	1200 μ F
L_{fhac}	402 μ H
R_{fhac}	0.1 Ω
C	3.6 F
L_f	2.5e-3 H
R_f	1 Ω

Tableau 2. Valeurs des paramètres de simulation.

2. Cahier de charge

- Bonne précision statique et dynamique de façon à obtenir une production optimale d'énergie.
- Bon rejet des perturbations qui peuvent être nombreuses sur un tel système.
- Robustesse face aux éventuelles variations paramétriques du dispositif.

*Références
bibliographiques*

Références Bibliographiques

- [1] <http://portail.cder.dz/spip.php?article4446>
- [2] Observer La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde, Observatoire des Énergies Renouvelables, Rapport technique, 2011, <http://www.energiesrenouvelables.org/observer/html/inventaire/Fr/preface.asp>.
- [3] K. Hristiyan, "Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain", Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Ecole Central de Lille, France, 2014.
- [4] http://www.climatetechwiki.org/technology/hydro_large
- [5] Salhi, I., Doubabi, S., Essounbouli, N., and Hamzaoui, A. "Application of multi-model control with fuzzy switching to a micro hydro-electrical power plant", *Renewable Energy*, 35(9) :2071-2079, 2010.
- [6] CH. DARRAS, "Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)", Thèse de Doctorat en Energétique et Génie des Procédés, L'UNIVERSITE DE CORSE, France, 2011.
- [7] L. Freris et D. Infield, " Les énergie renouvelable pour la production d'électricité ", DUNOD, Paris 2009.
- [8] <http://tpebiomasse.weebly.com/pour-leacutelectreacuteciteacute-et-le-chauffage.html>
- [9] EDF, Direction Participations & Activités Nouvelles, « La biomasse : production d'électricité », 2006.
- [10] <http://www.clg-verne-rueil.ac-versailles.fr/spip.php?article33>
- [11] Rapport du BRGM, " Usine géothermique de Bouillante ", 2006
- [12] O Rourke, F., Boyle, F., and Reynolds, A. " Tidal energy update 2009 ", *Applied Energy*, 87(2) :398-409, 2010.
- [13] Wu B, Lang Y, Zargari N, Kouro S, "*Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. Hoboken*", NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [14] A.Mirecki, "Etude Comparative de chaînes de Conversion d'Énergie Dédiées à une Éolienne de Petite Puissance", Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [15] S. Heier, "*Grid integration of wind energy conversion systems*", John Wiley & Sons, England, 1998.
- [16] Dossier REE N° 5, " l'énergie éolienne", 2005.
- [17] F. Poitier, " étude et commande de générateur asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne ", Thèse de doctorat, université de Nantes, 2003.
- [18] L. H. Hansen et al. "Conceptual survey of generator and power electronic for wind turbine", Riso national laboratory, Denmark, 2001.
- [19] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L Rogers, "*Wind energy explained theory, design and application*", John Wiley & Sons, England, 2002.

- [20] E. Hau, "*Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*", Springer, Germany, 2006.
- [21] D. Schreiber, "State of the art of variable speed wind turbine ", *11th International Symposium on Power Electronics*, Novi Sad, 2001.
- [22] S. Mathew, "*Wind energy : fundamentals, resource analysis and economics*", Springer Verlag, 2006.
- [23] Hong, M. and Lee, H. "Adaptive maximum power point tracking algorithm for variable speed wind power systems", *Life System Modeling and Intelligent Computing*, pages 380-388, 2010.
- [24] Koutroulis, E. and Kalaitzakis, K., "Design of a maximum power tracking system for wind energy conversion applications", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53(2) :486-494, 2006.
- [25] Mittal, R., Sandu, K., and Jain, D., "Isolated operation of variable speed driven pmsg for wind energy conversion system", *International Journal of Engineering and Technology*, 1:269-273, 2009.
- [26] M. H. Quang, "Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé", Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2013.
- [27] D. Aguglia, "Conception Globale des Générateurs Asynchrones à Double Alimentation pour Eoliennes", Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada, 2010.
- [28] Huynh, Q., Nollet, F., Essounbouli, N., and Hamzaoui, A." Fuzzy control of variable speed wind turbine using permanent magnet synchronous machine for stand-alone system", *In Sustainability in Energy and Buildings : Proceedings of the 3rd International Conference in Sustainability in Energy and Buildings*, volume 12, page 31. Springer Verlag, 2012.
- [29] Lopez, M. and Vannier, J., "Stand-alone wind energy conversion system with maximum power transfer control", *Ingeniare. Revista chilena de ingenieria*, 17(3) :329-336, 2009.
- [30] Beltran, B., "Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant d'Ordre Supérieur", Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest, 2010.
- [31] Raza, K., Goto, H., Guo, H., and Ichinokura, O., "A novel speed-sensorless adaptive hill climbing algorithm for fast and efficient maximum power point tracking of wind energy conversion systems", *In Sustainable Energy Technologies, ICSET 2008. IEEE International Conference on*, 628- 633, 2008.
- [32] Bharanikumar, R., Yazhini, A., and Kumar, A., "Modeling and simulation of wind turbine driven permanent magnet generator with new mppt algorithm", *Asian Power Electronics Journal*, 4(2), 2010.
- [33] L. Protin, S. Astier, " Convertisseurs photovoltaïques ", *Technique de l'Ingénieur*, Ref : D 3360, 1997.
- [34] C. Cabal, " Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ", Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 2008.

- [35] S. Vighetti, " Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion", Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.
- [36] IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) system, IEEE Std.929-2000.
- [37] Y. Pankow, " Etude de l'Intégration de la Production Décentralisée dans le Réseau Basse Tension. Application au Générateur Photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, 2004.
- [38] A. Houari, " Contribution A L'étude De Micro-Réseaux Autonomes Alimentés Par Des Sources Photovoltaïques ", Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [39] Ibrahim, H., Houssiny, F., El-Din, H., and El-Shibini, M., "Microcomputer controlled buck regulator for maximum power point tracker for dc pumping system operates from photovoltaic system", *In Fuzzy Systems Conference Proceedings*, volume 1, pages 406-411, 1999.
- [40] Nishioka, K., Sakitani, N., Kurobe, K., Yamamoto, Y., Ishikawa, Y., Uraoka, Y., and Fuyuki, T., "Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline si solar cells using modified equivalent circuit model", *Japanese journal of applied physics*, 42 :7175, 2003.
- [41] Phang, J., Chan, D., and Phillips, J., "Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters", *Electronics Letters*, 20(10): 406-408, 1984.
- [42] Takashima, T., Tanaka, T., Amano, M., and Ando, Y. "Maximum output control of photovoltaic (pv) array", *In Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit*, volume 1, pages 380-383, IEEE, 2000.
- [43] Adel Hamdy, M., "A new model for the current-voltage output characteristics of photovoltaic modules". *Journal of power sources*, 50(1-2) :11-20, 1994.
- [44] Huynh, Q., Nollet, F., Essounbouli, N., and Hamzaoui, A. "Power management of a variable speed wind turbine for stand-alone system using fuzzy logic", *In Fuzzy Systems (FUZZ), 2011 IEEE International Conference on*, 1404-1410, 2011.
- [45] A. Ahmed, L. Ran and J. Bumby, "Perturbation Parameters Design for Hill Climbing MPPT Techniques" *Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium*, Pages(s): 1819 – 1824, 2012.
- [46] F. A. O. Aashoor, F.V.P. Robinson, "A Variable Step Size Perturb and Observe Algorithm for Photovoltaic Maximum Power Point Tracking", *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 47th International*, Pages(s): 1-6, 2012.
- [47] Xin-chen Cai, Bo Fu, Ying-wei Huang, Xin Xing, Lu Yu, and Nan Yi, "A Research of MPPT Implementation Strategy Based on the Improved Conductance Increment Method", *Image Analysis and Signal Processing (IASP), International Conference*, Pages(s) : 529-532, 2011.
- [48] B. Subudhi, Senior Member, IEEE, and R. Pradhan, " A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems", *Sustainable Energy, IEEE Transactions on* (Volume:4 , Issue: 1), Page(s): 89-98, 2012.

- [49] H. Bayem, "Apport Des Methodes Probabilistes Aux Etudes D'insertion Des Energies Renouvelables Dans Les Systemes Electriques", Thèse de Doctorat, Université Pris Sud11, 2009.
- [50] L. Chalal, " Coordination de systèmes multisources pour favoriser la production d'énergie électrique renouvelable", Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, 2013.
- [51] L. Stoyanov, " Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", Thèse de Doctorat en cotutelle, Université Technique De Sofia, 2011.
- [52] A. Etxegarai, P. Eguia, E. Torres, A. Iturregi, V. Valverde, "Review of grid connection requirements for generation assets in weak power grids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1501-1514, 2015.
- [53] T. Ghennam, " Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation", Thèse de Doctorat en cotutelle, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [54] I. Martinez, J. Andueza, J.L. Martina, P. Villateb, H. Camblong, "Connection requirements for wind farms: A survey on technical requirements and regulation", *Renewable and Sustainable Energy reviews*, vol. 11, no. 08, pp. 1858-1872, 2007.
- [55] M. Tsili S. Papathanassiou, "A review of grid code technical requirements for wind Farms", *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 03, pp. 308–332, 2009.
- [56] Olimpo, A-L. Nick, J. Janaka, E. Phill, C. and Mike, H. " *Wind energy generation modeling and control*", John Wiley & Sons, 2009 .
- [57] Wu, B. Lang, Y. Zargari, N. Kouro, S., "Power Conversion and Control of Wind Energy Systems", John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [58] S. Heier, "*Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*", Publications John Wiley & Sons, 1998.
- [59] A. Boyette, " Contrôle-Commande d'une GADA avec Système de Stockage pour la Production Eolienne", Thèse de Doctorat, Université, Henry Poincaré, Nancy, 2006.
- [60] S. Muller, M. Deicke, R. W. De Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 26-33, May-June 2002.
- [61] Francois B, Cambronner J, Hautier J. P. A, "new approach for synthesizing logic connection controllers in power converters", *EPE'95*, 1995.
- [62] Guillaud X, Francois B. A, "causal method for the modelling of static converter and the control design : Application to a Voltage Source Converter", *EPE'03*, 2003.
- [63] Pena R, Clare J, Asher G. "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 13(3):231-241, 1996.
- [64] Muller S, Deicke M, Doncker R. "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", *IEEE Industry Applications Magazine*, 8(3):26-33, 2002.
- [65] Petersson A, Harnefors L, Thiringer T. "Comparison between stator-flux and grid-flux-oriented rotor current control of doubly-fed induction generators". *PESC 04*, , 1: 482-486, 2004.

- [66] Chondrogiannis S, Barnes M. "Stability of doubly-fed induction generator under stator voltage orientated vector control", *IET Renewable Power Generation*, 2(3):170-180, 2008.
- [67] H-S.Ko, G-G.Yoon, N-H.Kyung, W-P.Hong, "Modeling and control of dfig-based variable-speed wind-turbine", *Electric Power Systems Research*, pp. 1841–1849, 2008.
- [68] Poitiers F, Bouaouiche T, Machmoum M. "Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion", *Electr Pow Syst Res*; 79: 1085-1096, 2009.
- [69] H. Bühler, "*Conception des systèmes automatiques*". Presses Polytechniques Romandes, 1988.
- [70] F. Lasnier, T. G. Ang, "*Photovoltaic Engineering Handbook*", IOP Publishing Ltd. 1980.
- [71] S. M. Ait-cheikh, "Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [72] H. Nejib, "Modélisation et Commande des Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau Electrique Basse Tension", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale D'ingénieurs De Tunis, 2009.
- [73] P-E. Vidal, "Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation ", Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [74] K. Jezernik, "Robust chattering free sliding mode control of servo drives ", *IJE International Journal of Electronics* 80, no. 2, p. 169-179, 1996.
- [75] A. Sabanovic, F. Bilalovic, O. Music & F. Mehmedovic, " Squirrel cage induction motor control system in the sliding mode", *IFAC Control Science and Technology, 8th Triennial World Congress* (Kyoto,Japan), p. 2047-2052, 1981.
- [76] T. S. Jimenez, " Contribution a la commande d'un robot sous-marin autonome de type torpille ", Thèse de doctorat en Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal, Université Montpellier II, France, 2004.
- [77] V. I. Utkin "*Sliding modes in control optimization*", Springer-Verlag, 1992.
- [78] J. J. Slotine & W. Li "*Applied non linear control*", Prentice-Hall International Editions, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [79] C. Mira, "*Systèmes non-linéaires*", Hermes, 1987.
- [80] A. Gayed, " Contribution à la commande par mode de glissement d'une machine synchrone à aimants permanents ", Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1996.
- [81] P. Lopez et A. S. Nouri, " Théorie Élémentaire Et Pratique De La Commande Par Les Régimes Glissants ", Springer, 2006.
- [82] M. Abid, " Adaptation de la commande optimisée au contrôle vectoriel de la machine asynchrone alimentée par onduleur à MLI ", Thèse de doctorat sciences en Electrotechnique, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2006.
- [83] Wong LK, Leung FHF, Tam PKS." A fuzzy sliding controller for nonlinear systems", *IEEE T Ind Electron*; 48: 32-37, 2001.
- [84] Utkin VI. "Sliding mode control design principles and applications to electric drives". *IEEE T Ind Electron*; 40: 23-36, 1993.
- [85] S-A. E-M. Ardjoun, M. Abid, "Fuzzy sliding mode control applied to a doubly fed induction generator for wind turbines", *Turkish Journal Of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23: 1673-1686, 2015.
- [86] S-A. E-M. Ardjoun, M. Abid, A-G. Aissaoui, A. Naceri, "Commande par Mode Glissant d'un Système Éolien à Base d'une Génératrice Asynchrone à Double

Alimentation”, *Second International Conference on Renewable Energy*, Bejaia, Algérie, Avril 2012.

- [87] **S-A. E-M. Ardjoun**, M. Abid, “Commande par Mode Glissant Flou d’un Système Éolien à Base d’une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation”, *2èmes Journées Internationales sur les Energies Renouvelables et le Développement Durable*, Laghouat, Algérie, Juin 2012.

ملخص

تقدم هذه الدراسة استراتيجيات التحكم الخطي وغير الخطي لنظام متعدد مصادر الطاقة المتجددة (طاقة الرياح، والطاقة الكهروضوئية)، لتحسين التحكم في القوة الفاعلة والمتفاعلة المولدة و لتكامل الجيد مع الشبكة الكهربائية والمشاركة في خدمة النظام. أولاً، نقدم ونصمم مختلف الهياكل الأنظمة المدروسة (نظام توربينات الرياح متغيرة السرعة تستند على مولد لا متزامن مزدوج التغذية و نظام الضوئية يستند على محولين). ثم نضع استراتيجيات التحكم التي تعتمد على التعديل الكلاسيكي. ثم أجريت الدراسة من خلال إدخال تقنيات التحكم المتين. وينصب التركيز على تصميم وحدات التحكم الغير الخطية بناء على تهجين اثنين من تقنيات التحكم الغير الخطية وهي النمط المنزلق والمنطق الغامض، لتحسين أداء نظام توليد الطاقة. نتائج اختبارات الأداء ومثانة لأستراتيجية التحكم المقترحة مرضية.

كلمات مفتاحية

التحكم بالنمط المنزلق الغامض، نظام متعدد مصادر الطاقة، طاقة الرياح، طاقة الكهروضوئية، الشبكة الكهربائية.

Résumé

Cette étude présente des stratégies linéaires et non-linéaires de contrôle appliquées à la commande d'un système d'énergie renouvelable multisources (éolienne, photovoltaïque), afin de mieux contrôler les puissances actives et réactives générées, pour une bonne intégration au réseau électrique et de participer au service système.

Tout d'abord, nous présentons et nous modélisons les différentes structures des systèmes étudiés (système éolien à vitesse variable basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation et un système photovoltaïque basé sur deux convertisseurs). Puis nous développons une stratégie de commande qui se repose sur la régulation classique PI.

Ensuite l'étude a été menée en introduisant des techniques de commande robuste. L'accent est mis sur la conception de contrôleurs non linéaires basés sur l'hybridation des deux techniques non linéaires de contrôle ; à savoir le mode glissant et la logique floue, afin d'améliorer les performances du système de production d'énergie.

Les résultats des tests de performance et de robustesse des commandes proposées sont satisfaisants.

Mots clés

Commande par mode glissant flou, système multisource, éolienne, photovoltaïque, réseau électrique.

Abstract

This study presents linear and nonlinear control strategies applied to the control of a multi-source renewable energy system (wind turbine, photovoltaic), in order to better control the active and reactive generated power, for a good integration in the grid and participate in the service system.

First, we present and we model the different structures of the studied systems (variable speed wind system based on a double-fed induction generator and a photovoltaic system based on two converters). Then we develop a control strategy that is based on the classic PI control.

Next the study was conducted by introducing techniques of robust control. The focus is on the design of nonlinear controllers based on the hybridization of two nonlinear control techniques; namely the sliding mode and fuzzy logic, in order to improve the performance of the power generation system.

The results of the performance and the robustness tests of the proposed controls are satisfactory.

Keywords

Fuzzy sliding mode control, multi-source system, wind turbine, photovoltaic, electrical network.