

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



École Nationale Polytechnique
Département d'Automatique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme
MASTER en Automatique

Thème :

CONNEXION AU RESEAU ÉLECTRIQUE
D'UN BATIMENT À ÉNERGIE POSITIVE MULTISOURCES
COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT

Présenté par:

MOSBAH Charaf abd el karim
OURTEMACHE Hamza

Encadré par:

Pr F.BOUDJEMA
Pr D.BOUKHETALA

Promotion Juin 2013

Remerciements

Louange à Allah le tout puissant qui nous a accordé le savoir, le droit chemin ,l'opportunité de poursuivre nos études et la force pour réaliser ce modeste travail.

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciement pour nos encadreurs Monsieur **Farès Boudjema** et **Djamel Boukhetala**, Professeurs de l'**Ecole Nationale Polytechnique**, d'avoir mis leur confiance en nous, en nous confiant ce travail, et de nous avoir orienté vers ce thème d'actualité, qui présente un très grand intérêt, en nous permettant ainsi d'acquérir de nouvelles connaissances et compétences.*

*Nous tenant également à remercier Monsieur **Abdelouel**, enseignant de l'Ecole Nationale Polytechnique, de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

*Nous remercions aussi Monsieur **Bouamar**, enseignant de l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.*

Nous tenons à présenter notre gratitude à l'ensemble des enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique, à leurs tête les enseignants du département d'automatique, grâce à qui nous avons acquis les connaissances, les compétences, et le savoir nécessaire durant tout notre cursus, et spécialement pour la réalisation de ce travail.

Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Merci infiniment à tous.

Dédicace

A la mémoire de ma grand-mère

Je dédie ce travail à mes parents, spécialement à mon Père pour son soutien inconditionnel sans lequel je ne serais nullement arrivé à ce que je suis aujourd'hui.

A ma chère famille,

A mes très chers amis qui ont toujours étaient là pour moi.

A mon chère collègue Karim, sans lequel ce travail ne serait jamais accompli.

A mes enseignants, qui m'ont beaucoup appris

A tout le staff de l'Ecole Nationale Polytechnique

Au staff du programme DEVED de la GIZ

A mes camarades d'El Maarifa, du PLC et du WBD

A tous ceux que j'aime et je chéris

Hamza

Dédicace

*Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir
donné le courage, la volonté, la patience et la bonne santé durant
toutes ces années.*

*En signe d'amour, de gratitude et de respect, je dédie ce modeste travail :
Aux êtres les plus chers au monde qui n'ont pas cessé de me fournir leurs
soutiens et leurs encouragements : Mon père qui m'a éclairé mon chemin
et qui
m'a encouragé et soutenue dans les moments difficiles de ma carrière ; Ma
chère mère, la lumière de mes yeux,
J'espère qu'ils sont fiers de leur fils,
ils sont mes plus chers êtres, que
Dieu les protège.*

Je le dédie aussi, à :

*mes frères,
mes oncles, mes tantes
mes cousines et mes cousins et
toute ma famille, de loin ou de proche.*

*Mon très cher binôme Hamza, À tous mes amis de L'ENP et tous
mes amis de la cité universitaire « Bouraoui »
À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

.... Karim

Table des matières

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE

1 Connexion au réseau électrique4

1.1	Introduction.	4
1.2	Stratégie de commande :.	5
1.2.1	Contrôle à tension orientée :.	5
1.3	Boucle interne de régulation des courants alternatifs :.	7
1.3.1	Mise sous forme d'état :.	7
1.4	Boucle externe de régulation de la tension du bus continu :.	9
1.4.1	Commande par mode de glissement :.	10
1.5	Résultat de simulation :.	11

2 stockage de l'énergie électrique.14

2.0.1	Introduction.	14
2.1	Types de stockage :.	14
2.1.1	Les accumulateurs Nickel Cadmium (Ni-Cd) :.	15
2.1.2	Les accumulateurs Plomb-Acide (Pb-acide) :.	15
2.1.3	Les accumulateurs Nickel Métal Hydrures (NiMH) :.	16
2.1.4	Les accumulateurs Lithium Ion :.	16
2.1.5	Les accumulateurs Lithium Ion Polymère :.	16
2.2	Détermination de la technologie à choisir :.	16
2.3	Modélisation de la batterie :.	19
2.3.1	Modèle de la batterie de Shepherd :.	20
2.4	Régulateur de charge/ décharge de la batterie :.	21
2.4.1	Modélisation du hacheur buck-boost réversible en courant :.	22
2.4.2	Modèle en valeurs moyennes :.	22
2.4.3	Commande en courant du hacheur buck-boost réversible en courant :...24	
2.5	simulation de stockage :.	25

3 Gestion de système globale :.....28

CONCLUSION GENERALE

Table des figures

1.1	principe du contrôle de L'onduleur réseau	6
1.2	Onduleur réseau	6
1.3	schéma avec prise en compte du courant i_{hyb} produit par le système hybride	9
1.4	Transfert de puissances à travers le bus continu	10
1.5	Courants de phases du réseau	12
1.6	Tension de l'onduleur triphasé	12
1.7	Puissance active fournit au réseau	12
1.8	Puissance réactive fournit au réseau	12
1.9	tension et courant d'une phase de l'onduleur réseau	13
2.1	Batterie Ni-Cd[6]	15
2.2	Batterie Pb-acide[6]	15
2.3	Tensions de charge et de décharge aux bornes d'un élément d'un accumulateur Plomb-acide	17
2.4	Structure interne d'un accumulateur électrochimique [3]	18
2.5	Évolution de la tension de cellule d'une batterie à Plomb [3]	19
2.6	Modèle simple de la batterie [6]	20
2.7	Modèle complet de la batterie avec charge/décharge [3]	21
2.8	Chaine photovoltaïque munie d'une batterie	22
2.9	Hacheur buck-boost réversible en courant associé au batterie	23
2.10	étape 1 $t \in (0, dT)$	23
2.11	étape 2 $t \in (dT, T)$	23
2.12	Contrôle de l'hacheur associé aux batteries[7].	26
2.13	Puissance de la batterie $P_{bat}P_{bat,ref}$	26
2.14	Courant de batterie $i_{bat}, i_{bat,ref}$	26
2.15	Tension de batterie v_{bat}	27
2.16	soc-soc	27
2.17	rapport cyclique d	27
3.1	Organigramme de l'algorithme développé	29

ملخص:

تواجه أنظمة إنتاج الطاقة الكهربائية اللامركزية المعتمدة على المصادر المتجددة تحديين مهمين ألا وهما التخزين والربط بالشبكة الكهربائية.

يجب الاعتماد على مقاربات التحكم لضمان تزامن التيار والتواتر الكهربائيين. ان اعتماد أنظمة التخزين يعد ذو أهمية قصوى لضمان تغذية مستدامة بالطاقة الكهربائية.

ان التحكم الانزلاقي يعتبر تحكما قويا، ويمثل مقاربة مهمة للتحكم في المحولات الكهربائية.

كلمات مفتاحية: الربط بالشبكة الكهربائية، المناوبات، نظام انزلاقي، بطارية...

Résumé :

La production d'énergie électrique à base de sources renouvelables dans les systèmes décentralisés est confrontée à deux défis majeurs étant le stockage et la connexion au réseau électrique.

Des approches de commande doivent être adoptées pour assurer la synchronisation des courants et tensions, et annuler la puissance réactive. Les systèmes de stockage, sont toujours importants pour assurer l'alimentation continue en électricité.

La commande par mode de glissement est une commande robuste et représente une approche très intéressante pour la commande des convertisseurs d'électronique de puissance.

Mots clés : Connexion au réseau, onduleurs, mode glissant, batteries,

Abstract:

There are two great challenges that face the electrical energy production based on renewable resources in decentralized systems, being storage and electrical network connection.

Control approaches have to be adopted to ensure currents and voltages synchronization, and to reduce the reactive power to zero. Storage systems are always important to ensure permanent electrical supply.

Sliding mode control is a very interesting control approach for electrical converters.

Key words: network connection, inverters, sliding mode, batteries...

Abréviations

SEH	Système d'Énergie Hybride
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
AC	Courant Alternatif (Alternative Current)
DC	Courant Continu (Direct Current)
f.e.m	Force électromotrice
PI	Régulateur Proportionnel Intégral
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Pb-acide	Plomb-Acide

Symboles unité

C	capacité	F
C_{bp}	capacité électrochimique de la batterie	F
I	courant	A
I_{res}	courant de saturation inverse de la diode	A
I_{bat}	courant de la batterie	A
I_{pv}	courant de la cellule	A
P	puissance	W
P	puissance active	W
Q	puissance réactive	VAR
T_c	température de la jonction	K
T_s	période de commutation	s
K_I	constante d'intégralité	
K_P	constante de proportionnalité	
V	tension	V
V_{bat}	tension de la batterie	V
V_c	tension du condensateur	V
V_{dc}^c	tension du bus continue	V
V_{pv}	tension du générateur photovoltaïque	V
V_{res}^G	tension du réseau électrique	V

Introduction Générale

L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée, donc, en permanence la production doit s'adapter à la consommation.

De ce fait, l'ensemble production, acheminement, utilisation, constituent un système complexe appelé réseau électrique qui doit être stable. Un réseau électrique peut être de petite puissance ou très puissant (à l'échelle d'un pays). Dans tous les cas, ses caractéristiques s'expriment en termes de : grandeurs électriques, disposition spatiale et, données temporelles.

Dans notre pays, l'Algérie, la production de l'énergie électrique est basé essentiellement, pour ne pas dire que, sur les centrales de grandes puissances, qui injectent l'énergie dans le réseau HTB. Dans les dernières années, un débat a été mené pour développer les systèmes de production décentralisés, en adoptant les nouvelles technologies de production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables. Ce débat a été poussé par une volonté politique et un très grand intérêt économique et en vue d'assurer un accès permanent à l'énergie vue la hausse de la demande, il a conduit à enlever le monopole de production à la société nationale, qui maintenant ne s'assure que de la distribution, et permet ainsi au particulier de produire leur propre énergie.

L'excès de l'énergie ainsi produite doit être soit stocké soit injecté dans le réseau, chose qui n'est pas aussi faciles, vue les différentes contraintes, où par exemple les tensions et courants doivent être synchronisés avec le réseau électrique nationale, avec une énergie réactive nulle pour ne pas le polluer etc. . .

Dans ce contexte la, et en continuation à notre travail mené dans notre projet de fin d'étude [1], ce travail vient pour répondre à ces diverses contraintes, en adoptant une approche de commande basé sur les modes glissants.

Dans ce qui suit nous allons élaborer et développer dans un premier chapitre la stratégie de commande pour la connexion au réseau électrique, suivie d'un chapitre sur l'étude d'un système de stockage par batteries, concluant par un troisième chapitre sur un algorithme de gestion d'un système de production hybride connecté au réseau muni de batteries de stockage.

Chapitre 1

Connexion au réseau électrique

Les systèmes hybrides connectés au réseau gagnent de plus en plus de terrain puisque la demande de puissance dans le monde augmente. La disponibilité de ces sources d'énergie ainsi que leur respect pour l'environnement représentent des avantages majeurs par rapport aux sources d'énergie traditionnelles, par contre leur efficacité et leur contrôlabilité restent leur principal désavantage. De plus, les opérateurs du système de transfert d'énergie doivent respecter certaines normes lorsque le système est connecté au réseau.

Plusieurs critères doivent être satisfaits comme la stabilité du système et la qualité de l'énergie. Par conséquent, plusieurs travaux de recherche concernent la commande de ces systèmes afin d'optimiser et d'améliorer leur fonctionnement. Tous les systèmes hybrides sont connectés au réseau à travers un onduleur de tension . L'onduleur étant l'interface de connexion au réseau, sa commande nécessite une régulation en courant, une régulation du bus continu et une synchronisation.

1.1 Introduction

Les systèmes électriques connaissent une importante révolution depuis l'introduction de la production décentralisée et les sources d'énergie renouvelables au réseau électrique. L'intégration de différentes technologies conduit à une diversité croissante du réseau et engendre ainsi des normes plus restrictives [2].

Plusieurs critères doivent être remplis pour satisfaire les exigences du réseau comme la stabilité du système et la qualité de l'énergie [3].

La plupart de ces besoins peuvent être satisfaits avec une commande adéquate du convertisseur raccordé au réseau. Par conséquent, les sources d'énergie renouvelables utilisent des convertisseurs d'électronique de puissance pour adapter les paramètres de la puissance générée à ceux exigés par le réseau [2]. L'une des stratégies de commande les plus utilisées pour la production décentralisée de l'énergie est basée sur la commande par orientation de la tension en utilisant un régulateur pour le bus continu ainsi qu'un régulateur pour l'injection des courants dans le réseau. [3]

1.2 Stratégie de commande :

L'objectif de cette commande est de pouvoir contrôler les puissances active et réactive fournies au réseau par une régulation du courant [3]. La commande nécessite également la régulation de la tension du bus continu et une synchronisation des tensions de sortie de l'onduleur avec celles du réseau.

1.2.1 Contrôle à tension orientée :

Le contrôle à tension orientée VOC est une technique connue pour ces performances dynamiques et statiques. Elle utilise des boucles internes de régulation des courants, et elle a été continuellement améliorée. L'objectif du système de contrôle est de réguler la tension du bus continu v_{dc} pour suivre une référence $v_{dc,ref}$, et de réguler aussi la puissance réactive (pour un facteur de puissance unitaire), tout en maintenant la forme sinusoïdale des courants alternatifs de sortie. Cette méthode est inspirée de celle d'orientation du flux FOC de la commande des machines électriques [4].

Cette technique se base sur la transformation du système triphasé au système biphasé (transformé de Park).

Synchronisation avec le réseau :

Pour pouvoir connecter un système au réseau, la tension de sortie de l'onduleur doit avoir la même fréquence que celle du réseau pour chacune des trois phases. Ceci peut se faire en déterminant l'angle de phase de la tension à partir d'une mesure directe du réseau [3].

Cependant, les tensions réseau au point de raccordement peuvent comporter divers défauts et ils risquent de subsister dans le courant de sortie de l'onduleur. Il est donc important que le système de synchronisation puisse gérer ces distorsions.

L'onduleur triphasé est nécessaire dans le système d'énergie hybride, afin d'alimenter les charges AC, ou bien pour la connexion au réseau électrique ,le principe du contrôle de L'onduleur réseau est illustré dans la figure(1.2)

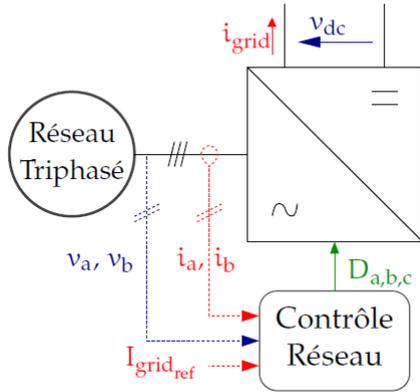


Figure 1.1 – principe du contrôle de L'onduleur réseau

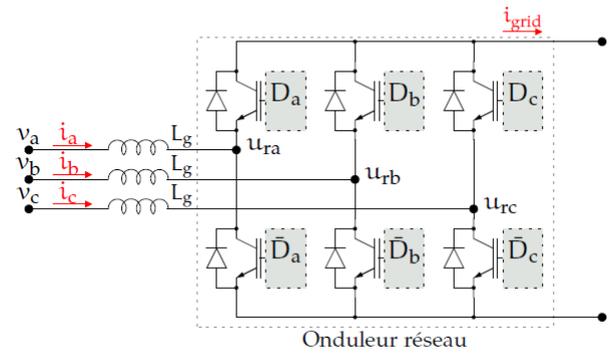


Figure 1.2 – Onduleur réseau

$$\begin{cases} v_a = l_g \frac{\dot{i}_a}{t} + u_{ra} \\ v_b = l_g \frac{\dot{i}_b}{t} + u_{rb} \\ v_c = l_g \frac{\dot{i}_c}{t} + u_{rc} \end{cases} \quad (1.1)$$

telle que :

v_a, v_b, v_c : Tension simples de réseau électrique .

i_a, i_b, i_c : Courants de phases du réseau .

u_{ra}, u_{rb}, u_{rc} : Tension de l'onduleur triphasé.

Dans le référentiel d-q ,les équations de l'onduleur deviennent celles données par (1.2) . On constate un couplage entre les axes d est q que nous cherchons à compenser .L'axe d est confondu avec le vecteur tension u_g , sa composante u_{gq} est donc nulle.

$$\begin{cases} v_{gd} = l_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_g l_g i_{gq} + u_{rd} \\ v_{gq} = l_g \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_g l_g i_{gd} + u_{rq} = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

1.3. BOUCLE INTERNE DE RÉGULATION DES COURANTS ALTERNATIFS :

telle que :

i_{gd}, i_{gq} : Courant directe et en quadrature du réseau (plan d-q).

v_{gd}, v_{gq} : Tensions directe et en quadrature du réseau (plan d-q)

u_{rd}, u_{rq} : Tensions directe et en quadrature du convertisseur (plan d-q)

ω_g : Pulsation du réseau électrique.

l_g : Inductance de ligne.

Les expressions des puissances, active et réactive, sont données par l'équation (1.3).

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} v_{gd} i_{gd} \\ Q_g = -\frac{3}{2} v_{gd} i_{gq} \end{cases} \quad (1.3)$$

Afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire, le courant i_{gq} doit être nul.

Pour ce faire nous avons choisie l'asservissement de courant i_{gq}, i_{gd} par la commande par mode de glissement .

La question qui se pose est : C'est clair que notre objectif est de rendre le courant $i_{gq} = 0$, donc l'asservissement de i_{gd} , mais pourquoi donc ?

Une question à laquelle on peut apporter la réponse suivante :

On va voir par la suite que le courant i_{gd} va rentrer dans la boucle de réglage de la tension du bus continue (il va représenter la commande stabilisante de la tension de bus continue donc cette commande est assurée par cette boucle de réglage).

1.3 Boucle interne de régulation des courants alternatifs :

1.3.1 Mise sous forme d'état :

D'après les équations (1.2), on déduit

$$\begin{cases} l_g \frac{di_{gd}}{dt} = u_{gd} + \omega_g l_g i_{gq} - u_{rd} \\ l_g \frac{di_{gq}}{dt} = -\omega_g l_g i_{gd} - u_{rq} \end{cases} \quad (1.4)$$

On choisit comme vecteur d'état :

1.3. BOUCLE INTERNE DE RÉGULATION DES COURANTS ALTERNATIFS :

$$\begin{aligned}x^T &= (x_1 x_2) = (i_{gd} i_{gq}) \\u^T &= (u_1 u_2) = (u_{rd} u_{rq}) \\y^T &= (y_1 y_2) = (x_1 x_2)\end{aligned}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_2 + a_{12}u_1 + \frac{V}{l_g} \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}u_2 \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\begin{cases} a_{11} = \omega_g \\ a_{12} = -\frac{1}{l_g} \\ a_{21} = -\omega_g \\ a_{22} = -\frac{1}{l_g} \end{cases} \quad (1.6)$$

commande par mode de glissement :

L'objectif de la commande étant de stabiliser le courant i_{gq} à 0 et d'assurer la poursuite de courant i_{gd} à un courant $i_{gd,ref}$ donc on définit les erreurs comme suit :

$$\begin{cases} e_1 = y_1 - y_{1ref} = x_1 - x_{1ref} \\ e_2 = y_2 - y_{2ref} = x_2 - x_{2ref} \end{cases} \quad (1.7)$$

comme nous avons vu dans le chapitre précédent on doit tout d'abord définir la surface de glissement (surface de J.J Slotine) :

Les degrés relatif sont :

$$\begin{aligned}r_1 &= 1 \\r_2 &= 1\end{aligned}$$

Donc les surfaces de glissement sont définies comme suit :

$$\begin{cases} S_1 = e_1 \\ S_2 = e_2 \end{cases} \quad (1.8)$$

1.4. BOUCLE EXTERNE DE RÉGULATION DE LA TENSION DU BUS CONTINU :

Maintenant on va établir la condition de convergence :

$$S\dot{S} < 0$$

alors :

$$\begin{cases} S_1\dot{S}_1 = e_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref}) \\ S_2\dot{S}_2 = e_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_{2ref}) \end{cases} \quad (1.9)$$

donc :

$$\begin{cases} S_1\dot{S}_1 = e_1(a_{11}x_2 + a_{12}u_1 + \frac{V}{l_g} - \dot{x}_{1ref}) \\ S_2\dot{S}_2 = e_2(a_{21}x_1 + a_{22}u_2 - \dot{x}_{2ref}) \end{cases} \quad (1.10)$$

donc la commande qui assure la convergence est :

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{a_{12}}(-a_{11}x_2 + \dot{x}_{1ref} - \frac{V}{l_g}) - \frac{1}{a_{12}}(k_1 \text{sign}(e_1)) \\ u_2 = \frac{1}{a_{22}}(-a_{21}x_1 + \dot{x}_{2ref}) - \frac{1}{a_{22}}(k_2 \text{sign}(e_2)) \end{cases} \quad (1.11)$$

1.4 Boucle externe de régulation de la tension du bus continu :

Cette boucle de régulation externe sert à maintenir la tension du bus continu à une valeur de référence $v_{dc,ref}$. Les parties du système hybride reliées au bus continu sont assimilées à une source de courant continu i_{hyb} , comme l'illustre la figure (1.3).

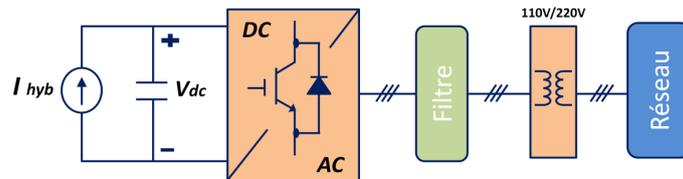


Figure 1.3 – schéma avec prise en compte du courant i_{hyb} produit par le système hybride

Le bus continu est modélisé comme un pur condensateur. L'énergie stockée dans le condensateur est exprimée comme suit :

1.4. BOUCLE EXTERNE DE RÉGULATION DE LA TENSION DU BUS CONTINU :

$$E_c = \frac{1}{2}C_{dc}v_{dc}^2 \quad (1.12)$$

La dérivée par rapport au temps de cette dernière équation donne la puissance instantanée consommée par le bus continu. Cette dernière est égale à la différence entre la puissance produite par le système hybride coté DC et la puissance délivrée au réseau figure (4.4). Ce dont résulte une équation non-linéaire par rapport à v_{dc} qui est donnée par :

$$\frac{1}{2}C_{dc} \frac{dv_{dc}^2}{dt} = P_{hyb} - P_{res} \quad (1.13)$$

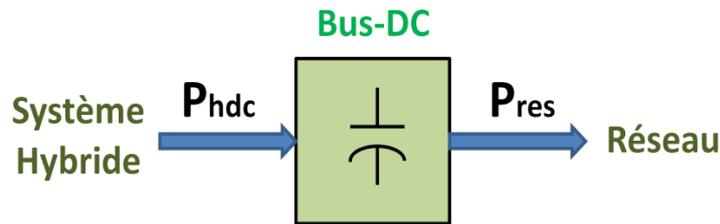


Figure 1.4 – Transfert de puissances à travers le bus continu

Telle que :

$$P_{hyb} = v_{dc}i_{hyb} \quad (1.14)$$

$$P_{res} = \frac{3}{2}U_m i_d \quad (1.15)$$

Pour transformer la fonction non-linéaire d'évolution de la tension du bus continu à un système linéaire équivalent, on choisit une nouvelle variable d'état $\omega = v_{dc}^2$. L'équation devient alors :

$$\frac{1}{2}C_{dc} \frac{d\omega}{dt} = P_{hyb} - P_{res} \quad (1.16)$$

En fin on aboutit à l'équation suivante :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2}{C_{dc}}(v_{dc}i_{hyb} - \frac{3}{2}U_m i_d) \quad (1.17)$$

1.4.1 Commande par mode de glissement :

L'objectif de la commande étant de stabiliser la tension du bus continue à une référence $v_{dc,ref}$, on définit l'erreur comme suit :

$$e = \omega - \omega_{ref}$$

le degré relatif $r = 1$ de la surface de J.J Slotine ; la surface de glissement est la suivante :

$$S = e = \omega - \omega_{ref} \quad (1.18)$$

maintenant on va établir la condition de convergence :

$$S\dot{S} < 0$$

alors :

$$S\dot{S} = e(\dot{\omega} - \dot{\omega}_{ref}) \quad (1.19)$$

donc :

$$S\dot{S} = e\left(\frac{2}{C_{dc}}(v_{dc}i_{hyb} - \frac{3}{2}U_m i_d) - \dot{\omega}_{ref}\right) \quad (1.20)$$

Donc la commande sera définie comme :

$$u = i_d = \frac{2}{3U_m}v_{dc}i_{hyb} - \frac{C_{dc}}{3U_m}(\dot{\omega}_{ref} - k_2 \text{sign}(e)) \quad (1.21)$$

1.5 Résultat de simulation :

Dans ce qui suit nous avons représenté les courants, tensions et puissances actives et réactives issues de la simulation des résultats après application de la commande par mode de glissement aux boucles de régulation.

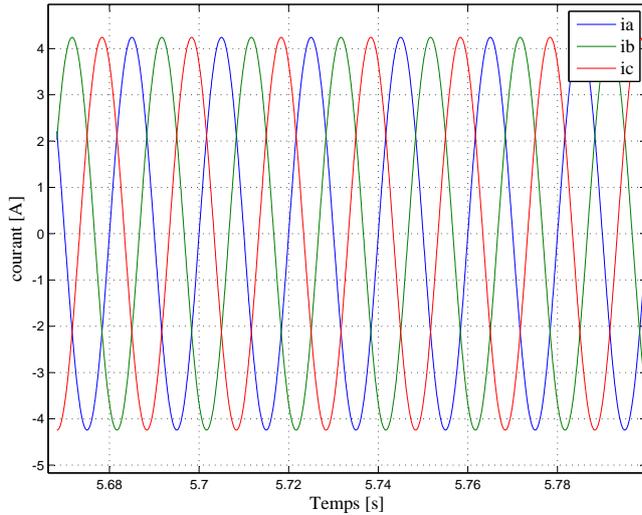


Figure 1.5 – Courants de phases du réseau

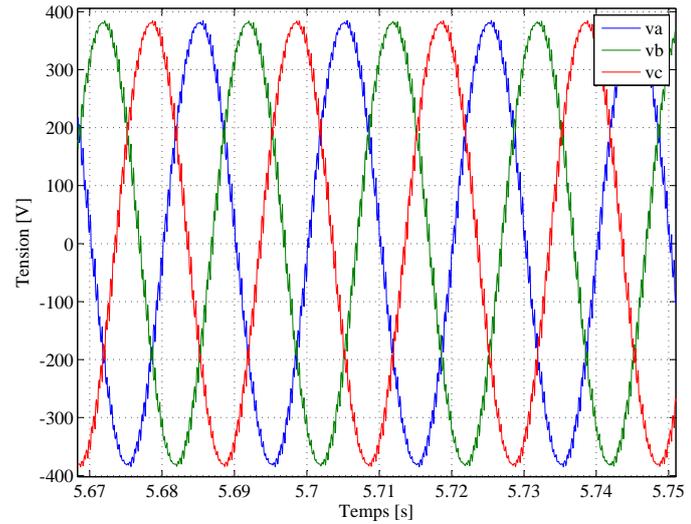


Figure 1.6 – Tension de l'onduleur triphasé

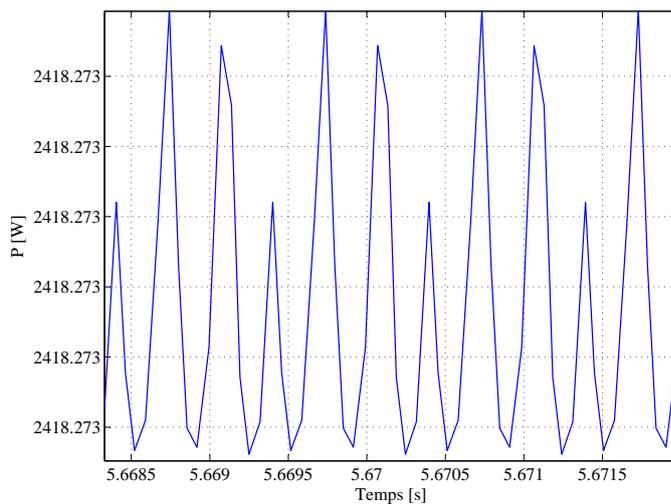


Figure 1.7 – Puissance active fournit au réseau

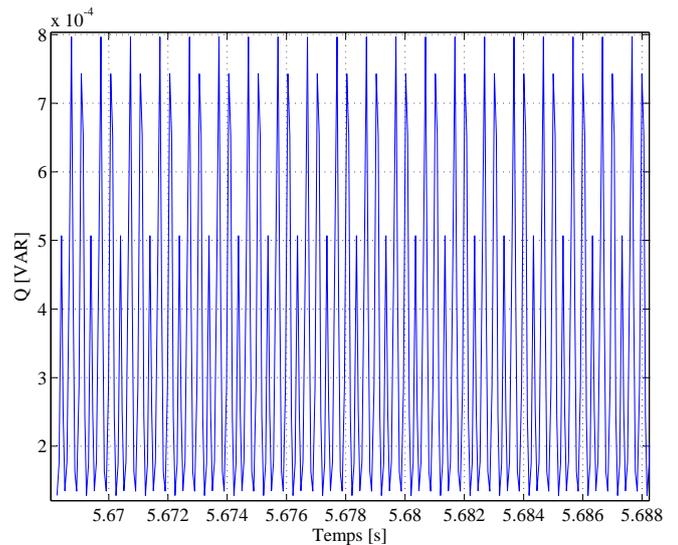


Figure 1.8 – Puissance réactive fournit au réseau

En contemplant les résultats de la simulation, on voit bien que nous avons obtenu des courant et tension de formes quasi sinusoïdales avec quelques perturbation minimales vues coté tension figures (1.5),(1.6).

Dans la figure (1.9) qui représente la tension et courant d'une phase de l'onduleur, on voit qu'ils sont bien synchronisés, ce qui nous permettra donc d'avoir une puissance réactive quasi nulle, dans l'ordre de 10^{-4} figures (1.8).

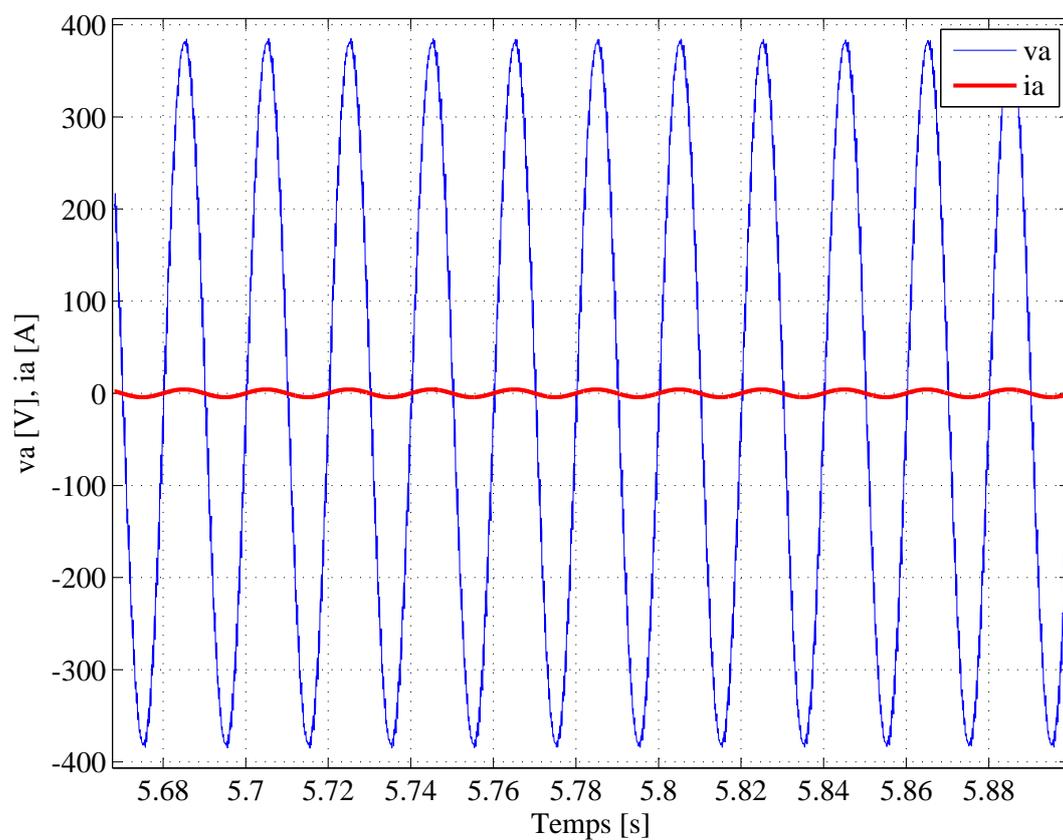


Figure 1.9 – tension et courant d'une phase de l'onduleur réseau

Chapitre 2

stockage de l'énergie électrique.

2.0.1 Introduction

L'un des plus grands challenges des systèmes à énergies renouvelables aujourd'hui est d'assurer une alimentation permanente afin de répondre à la demande dynamique en matière d'électricité. Les périodes de production et les périodes de consommation d'énergie sont très fréquemment décalées, et c'est peu probable qu'il existe une parfaite adéquation entre les deux. Dans ce cas un minimum de stockage s'avère indispensable.[3]

2.1 Types de stockage :

Il existe plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau d'hydrogène, super-condensateur, les accumulateurs à volants d'inertie, les systèmes à air comprimé en bouteilles, batteries électrochimiques (lithium, plomb), etc... Le stockage électrochimique est le moyen le plus utilisé dans les systèmes photovoltaïques car ces accumulateurs présentent une caractéristique naturellement bien adaptée au couplage direct, en raison de la relative constance de leur tension. De plus ils offrent le meilleur rapport coût/performance, une grande fiabilité et une bonne sécurité. On citera les accumulateurs chimiques les plus utilisés dans l'industrie, à savoir [3] :

2.1.1 Les accumulateurs Nickel Cadmium (Ni-Cd) :

Grâce à leur très bonne efficacité de charge à faible courant, leur tenue aux basses températures, et leur capacité de stockage inférieure à 2Ah, ils sont souvent jugés très intéressants pour le solaire. Mais le caractère toxique du cadmium les freine sur le marché.

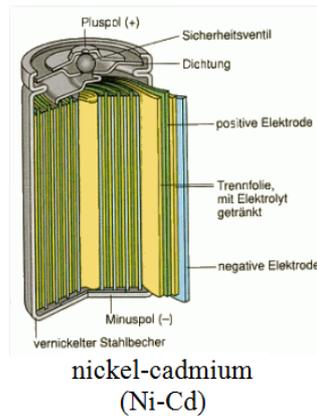
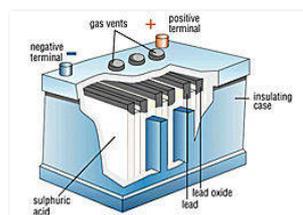


Figure 2.1 – Batterie Ni-Cd[6]

2.1.2 Les accumulateurs Plomb-Acide (Pb-acide) :

Ces accumulateurs ont une résistance interne très faible et une cyclabilité qui peut atteindre les 800 cycles. Malgré leurs faibles performances à basses températures, l'accumulateur au plomb reste un des moyens de stockage les plus répandus en milieu industriels.



plomb-acide
(Pb-acide)

Figure 2.2 – Batterie Pb-acide[6]

2.1.3 Les accumulateurs Nickel Métal Hydrures (NiMH) :

Développés afin de favoriser les charges rapides et d'augmenter la capacité, ces accumulateurs s'avèrent plus compactes que les accumulateurs précédents.

2.1.4 Les accumulateurs Lithium Ion :

Avec un métal plus léger comme le lithium, ces batteries offrent une autonomie plus grande pour des boîtiers moins lourds et donc des charges électriques plus importantes que les batteries au Nickel Cadmium.

2.1.5 Les accumulateurs Lithium Ion Polymère :

Dérivées des accumulateurs Lithium-Ion, et ayant des performances presque similaire ; à la différence de l'électrolyte utilisée, qui est dans ce cas un polymère gélifié qui permet de donner toutes les formes possibles à la batterie.

2.2 Détermination de la technologie à choisir :

En pratique l'énergie de fonctionnement est tirée de la batterie dès l'instant où le courant d'utilisation est supérieur au courant issu du système hybride.

Le choix de la technologie à adopter se fait selon les caractéristiques suivantes :

- W_{stoc} **la capacité énergétique en Wh** : Elle est définie sur la base d'une énergie totale stockée supérieure à l'énergie utile. L'énergie réellement exploitable est donc inférieure à l'énergie stockée est cela est dû au fait que les accumulateurs ne peuvent pas être complètement déchargés.
- η **le Rendement** : c'est le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie utile. Il doit être évalué en prenant en considération les pertes à vide (d'autodécharge), et la résistance interne.
- N_{cycl} **Bonne Aptitude au Cyclage (Cyclabilité)** : Elle représente le nombre de cycles de charges et de décharges. Elle est liée à l'amplitude des cycles et à l'état de charge moyen et elle représente la durée de vie de la batterie.

2.2. DÉTERMINATION DE LA TECHNOLOGIE À CHOISIR :

- **Tension aux bornes** : Elle est fonction de la charge ou de la décharge de l'élément et dépend de la technologie adoptée par le constructeur. Lors d'une décharge, la tension aux bornes de l'élément est fonction du courant et de la profondeur de décharge autorisée.

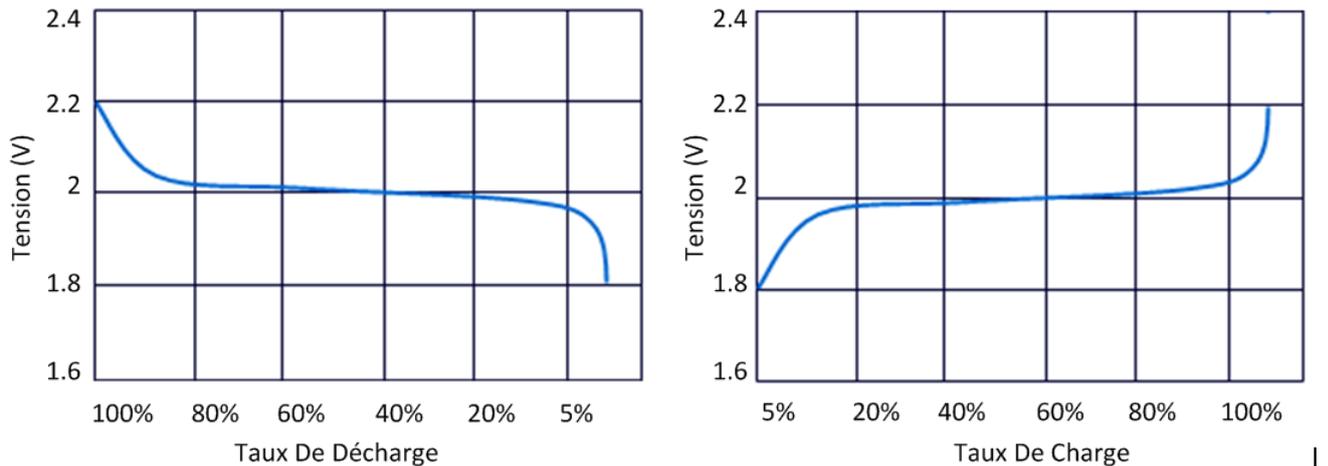


Figure 2.3 – Tensions de charge et de décharge aux bornes d'un élément d'un accumulateur Plomb-acide

- **Le taux de décharge** : Par définition, c'est le rapport de la capacité d'une batterie et du temps de décharge.

$$\text{Taux de décharge} = \frac{(\text{capacité estimée})}{(\text{temps de décharge})} \quad (2.1)$$

- **Taux de charge** : Comme le taux de décharge, il exprime le rapport du courant absorbé par la durée de temps nécessaire de charger pleinement l'élément de la batterie.

$$\text{Taux de charge} = \frac{(\text{capacité estimée})}{(\text{temps de charge})} \quad (2.2)$$

- **Profondeur de décharge** : Elle s'exprime en pourcents de la capacité de la batterie, et par définition : c'est le nombre d'Ah extraits d'un accumulateur pleinement chargé.
- **Autodécharge** : C'est une grandeur qui prend en considération le phénomène des réactions chimiques et électrochimiques qui au sein de l'accumulateur engendrent une

faible consommation énergétique prélevée sur l'énergie disponible.

- **Les coûts d'investissements et de fonctionnement :** Généralement évalués en DA/kWh et répartis entre l'énergie stockée exploitable W_{stoc} et la puissance maximale, ils comprennent le cout de l'investissement, de la maintenance, de l'énergie perdue lors des cycles et du vieillissement.

Fonctionnement et Performances de la batterie au plomb :

Un accumulateur électrochimique plomb-acide est un système qui restitue l'énergie électrique stockée sous forme d'énergie chimique. Il se compose de deux électrodes ayant une différence de potentiel de 2V : l'une positive en dioxyde de plomb (PbO_2), et l'autre négative en plomb. L'électrolyte quant à lui est une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4), et sert à la conduction du courant électrique. Les deux électrodes sont séparées à l'aide d'une paroi construite avec un matériau poreux permettant le passage des ions [3].

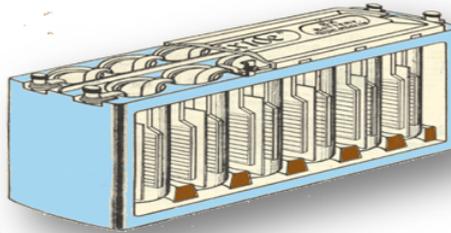
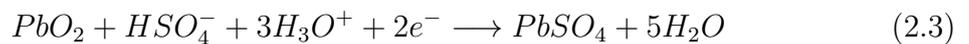


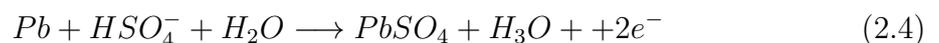
Figure 2.4 – Structure interne d'un accumulateur électrochimique [3]

Les équations suivantes décrivent la réaction d'oxydoréduction qui a lieu dans l'ensemble électrodes-électrolyte

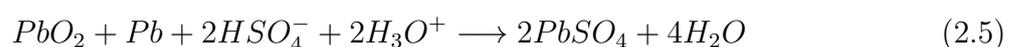
- Anode (électrode positive) :



- Cathode (électrode négative) :



Le résultat final :



En le condensant, on a :



Les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité. Trois causes possibles sont à l'origine de ce phénomène :

1. • Transformation irréversible d'une partie de la matière active de l'électrode positive (PbO₂) en cristaux de sulfate de plomb.
 2. • Gonflement progressif et perte de cohésion de la matière active de l'électrode positive.
 3. • Passivation électronique du collecteur de courant de l'électrode positive.
- Typiquement, la tension de cellule évolue de la manière suivante :

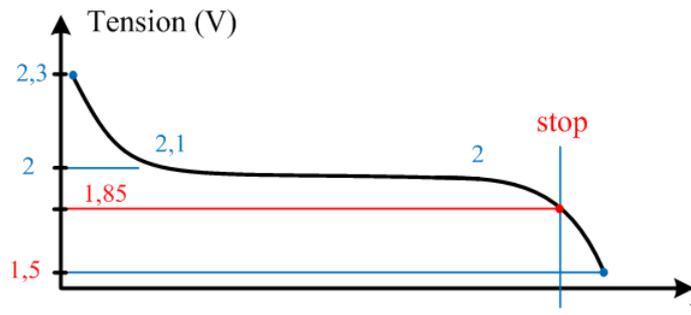


Figure 2.5 – Évolution de la tension de cellule d'une batterie à Plomb [3]

Si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre 2,4V, valeur de seuil à partir de laquelle on assiste à la décomposition de l'eau (électrolyse).

2.3 Modélisation de la batterie :

Il existe plusieurs modèles de batteries au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances.

A la base on a trois types de modèles de batteries rapportés dans la littérature, à savoir : le modèle expérimental, électrochimique et le modèle électrique. Les deux premiers ne représentent pas bien les propriétés dynamiques nécessaires pour l'estimation de l'état de charge des éléments de la batterie contrairement au modèle électrique qui représente très bien ces caractéristiques électriques [3].

2.3.1 Modèle de la batterie de Shepherd :

Le modèle électrique le plus simple comporte une source de tension idéale en série avec une résistance interne. Néanmoins il ne prend pas en compte l'état de charge de la batterie

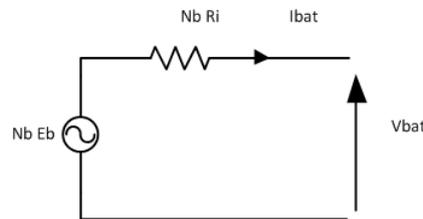


Figure 2.6 – Modèle simple de la batterie [6]

Shepherd a développé une équation qui décrit le comportement électrochimique de la batterie en termes de tension maximale, tension de circuit ouvert, résistance interne, courant de décharge et état de charge de la batterie. Ce modèle représente très bien la décharge autant que la charge et utilise seulement l'état de charge de la batterie comme variable d'état afin de représenter la variation de la tension. C'est ce modèle amélioré qu'on va considérer dans notre modélisation [5].

- Modèle de décharge ($i^* > 0$) :

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (2.7)$$

- Modèle de charge ($i^* < 0$) :

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{it + 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (2.8)$$

2.4. RÉGULATEUR DE CHARGE/ DÉCHARGE DE LA BATTERIE :

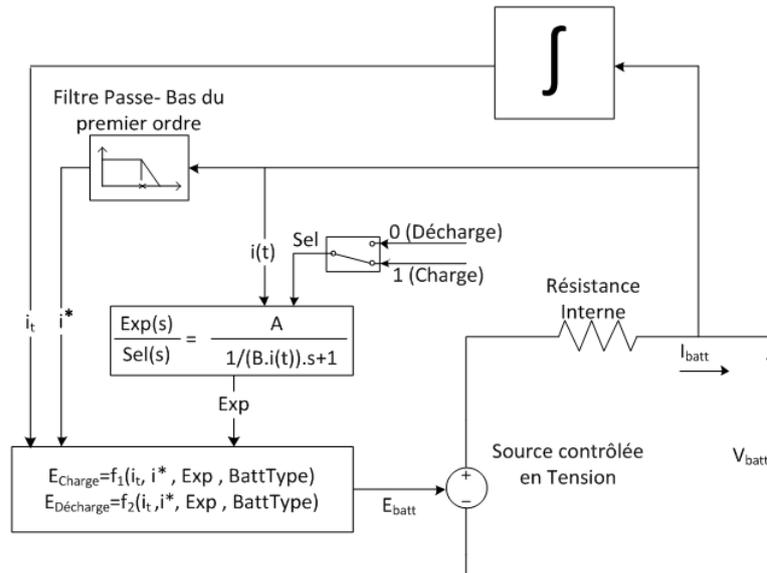


Figure 2.7 – Modèle complet de la batterie avec charge/décharge [3]

- E_{batt} : tension non linéaire de la batterie [V] ;
- E_0 : tension constante [V] ;
- $Exp(s)$: zone dynamique exponentielle [V] ;
- $Sel(s)$: représente le mode de la batterie, $Sel(s) = 0$ durant la décharge de la batterie, $Sel(s) = 1$ durant la charge de la batterie ;
- K : constante de polarisation [Ah^{-1}], ou résistance de polarisation [Ω] ;
- i^* : dynamique du courant à basse fréquence [A] ;
- i : courant de la batterie [A] ;
- it : capacité extraire [Ah] ;
- Q : capacité maximale de la batterie [Ah] ;
- A : tension exponentielle [V] ;
- B : capacité exponentielle [Ah].

2.4 Régulateur de charge/ décharge de la batterie :

Nous avons remarqué , que la charge consomme toute la puissance existante, mais réellement chaque charge (récepteur) a un point de fonctionnement nominal (P_n, V_n), donc nous pouvons rencontrer très souvent que la puissance fournie par le GPV soit supérieure ou inférieure à la puissance nominale de la charge.

Pour remédier à ce problème (excès ou insuffisance de la puissance générée), nous ajoutons à la chaine précédente une batterie :

- Une batterie , permet de récupérer l'excès de puissance ou fournir le manque de cette dernière à la charge.

2.4. RÉGULATEUR DE CHARGE/ DÉCHARGE DE LA BATTERIE :

- Un deuxième hacheur buck-boost réversible en courant, qui permet d'adapter la batterie avec le reste de la chaîne.

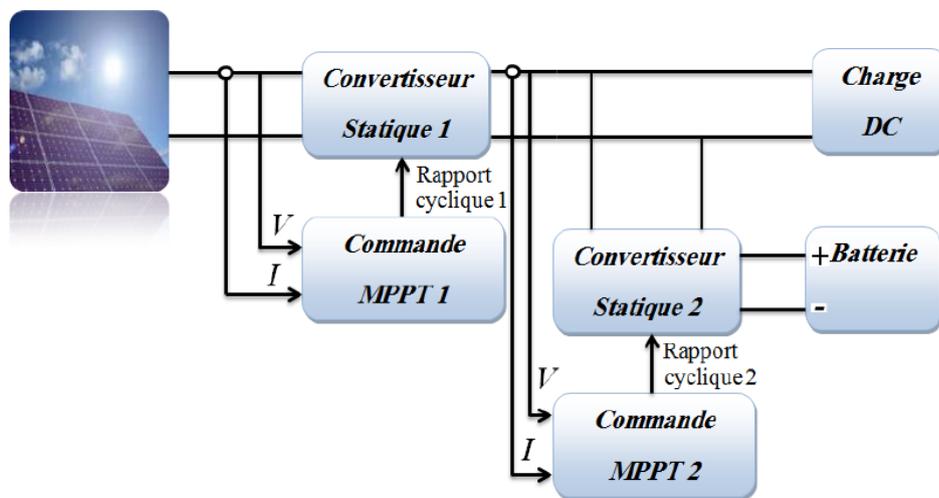


Figure 2.8 – Chaîne photovoltaïque munie d'une batterie

2.4.1 Modélisation du hacheur buck-boost réversible en courant :

L'hacheur buck-boost est utilisé pour le système de stockage par batteries. Il est considéré comme un étage d'adaptation, et il permet également de réaliser les opérations de charge et de décharge vue sa réversibilité en courant.

Ainsi, il est élévateur de tension pour la décharge, et abaisseur de tension pour la charge. La non linéarité de ce convertisseur, nous ramène à faire une linéarisation au tour d'un point de fonctionnement pour modéliser le système. Car la fréquence de découpage reste assez grande devant la dynamique des composants physiques du convertisseur.

2.4.2 Modèle en valeurs moyennes :

Dans cette partie, on prend l'hacheur associé au batterie comme illustration de la modélisation en valeurs moyennes figure (2.18), La commande des deux interrupteurs de puissance est complémentaire.

Deux étapes de fonctionnement sont distinguées pour ce type d'hacheur, chaque période d'échantillonnage T est divisée en deux parties. Le modèle moyenne consiste à déterminer la moyenne sur cette période des lois des mailles qui caractérisent chaque étape.

2.4. RÉGULATEUR DE CHARGE/ DÉCHARGE DE LA BATTERIE :

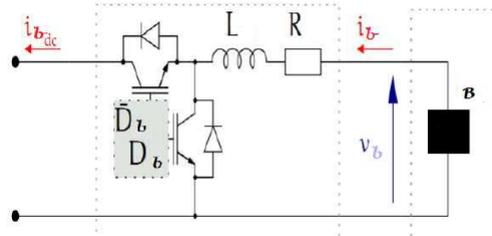


Figure 2.9 – Hacheur buck-boost réversible en courant associé au batterie

- $t \in (0, dT)$

En appliquant la loi des mailles nous avons :

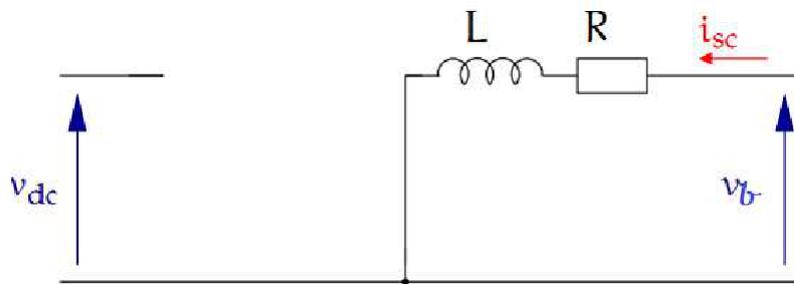


Figure 2.10 – étape 1 $t \in (0, dT)$

$$v_{bat} = L \frac{di_{bat}}{dt} + Ri_{bat} \quad (2.9)$$

- $t \in (dT, T)$

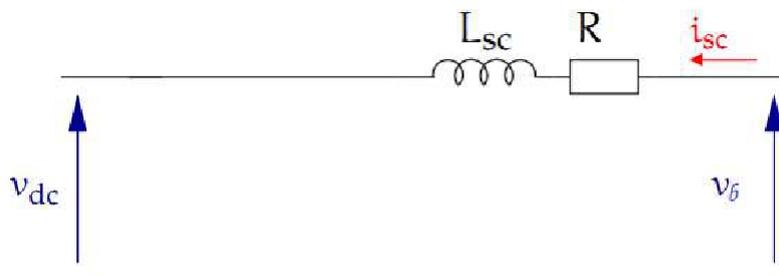


Figure 2.11 – étape 2 $t \in (dT, T)$

En appliquant la loi des mailles nous avons :

$$v_{bat} = L \frac{di_{bat}}{dt} + Ri_{bat} + v_{dc} \quad (2.10)$$

La moyenne de ces deux dernières équations sur une période de découpage, nous donne le modèle moyen décrit par :

$$L \frac{di_{bat}}{dt} = v_{bat} - (1 - d)v_{dc} - Ri_{bat} \quad (2.11)$$

2.4.3 Commande en courant du hacheur buck–boost réversible en courant :

Le transfert d'énergie entre le bus continu est la batterie est contrôlés par action sur les références des courants de stockage dans le système de commande de l'hacheur buck-boost. Cette commande utilise un régulateur PI qui a démontré des bonnes performances pour le contrôle en courant.

La détermination des paramètres du régulateur PI passe par le modèle à petits signaux du convertisseur associé aux batterie. Cela en considérant que le courant qui passe par l'inductance i_{bat} et que les tensions v_{bat} et v_{dc} s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} i_{bat} = I_{bat} + \hat{i}_{bat} \\ v_{bat} = V_{bat} + \hat{v}_{bat} \\ v_{dc} = V_{dc} + \hat{v}_{dc} \end{cases} \quad (2.12)$$

ou :

I_{bat} V_{bat} V_{dc} représentent respectivement les valeurs moyennes de i_{bat} v_{bat} v_{dc}

\hat{i}_{bat} \hat{v}_{bat} \hat{v}_{dc} :sont les perturbations autour du point de fonctionnement.

L'équation (2.32) devient donc :

$$L \frac{d(I_{bat} + \hat{i}_{bat})}{dt} = (V_{bat} + \hat{v}_{bat}) - (1 - d)(V_{dc} + \hat{v}_{dc}) - R(I_{bat} + \hat{i}_{bat}) \quad (2.13)$$

Sachant que la tension du bus v_{dc} continue est maintenue constante par une boucle de régulation du système, et que la variation de la tension de batterie v_{bat} est largement grande par rapport à la période d'échantillonnage, on peut supposer que les tensions v_{dc} et v_{bat} restent constantes ($\hat{v}_{bat} = 0$ et $\hat{v}_{dc} = 0$).

Ainsi, On obtient l'équation (2.35) qui caractérise le régime permanent, et l'équation (2.36) qui décrit les variations autour de ce point de fonctionnement.

$$0 = V_{bat} - (1 - \hat{d})V_{dc} - RI_{bat} \quad (2.14)$$

$$L \frac{d\hat{i}_{bat}}{dt} = \hat{d}V_{dc} - RI_{bat} \quad (2.15)$$

On peut déterminer la fonction de transfert du convertisseur comme suit :

$$\frac{\hat{i}_{bat}}{\hat{d}}(s) = \frac{\frac{V_{dc}}{R}}{1 + \frac{L}{R}s} \quad (2.16)$$

Le régulateur PI est écrit sous la forme suivante :

$$PI(s) = K_{p.bat} \left(1 + \frac{1}{\tau_{bat}s}\right) = \frac{K_{p.bat}(1 + \tau_{bat}s)}{\tau_{bat}s} \quad (2.17)$$

Avec, $K_{p.bat}$ est le gain proportionnel, τ_{bat} est la constante de temps de l'action intégrale qui est choisit pour éliminer la constante de temps du système. Ces paramètres du régulateur sont exprimés par :

$$K_{p.bat} = \frac{L}{V_{dc}T_0} \tau_{bat} = \frac{L}{R} \quad (2.18)$$

T_0 est une constante de temps qui caractérise le comportement du système en boucle fermée. Pour améliorer la vélocité, elle est choisie inférieure à celle en boucle ouverte $T_0=0.5$ ms .

Comme l'illustre la figure (2.22), la référence de la puissance de batterie $P_{bat,ref}$ est générée par le système de gestion d'énergie. A partir de cette dernier, Nous pouvons tirer le courant correspondant de batterie $i_{bat,ref}$. Dans le but de charger ou de décharger la batterie le régulateur PI asservit le courant i_{bat} afin de suivre la référence $i_{bat,ref}$.

2.5 simulation de stockage :

La figure suivante représente les résultats de simulation du stockage dans une batterie dans les deux cas ; charge et décharge.

On voit bien que dans les diverses figures on a obtenu un bon suivie des références dans les deux cas, soit positif dans les cas de la charge et négatif pour le cas de la décharge, pour la puissance ; figure (2.23), et le courant ; figure (2.24).

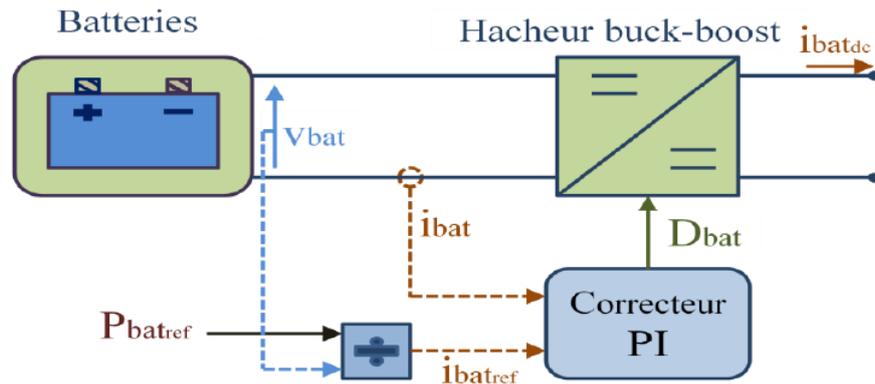


Figure 2.12 – Contrôle de l'hacheur associé aux batteries[7].

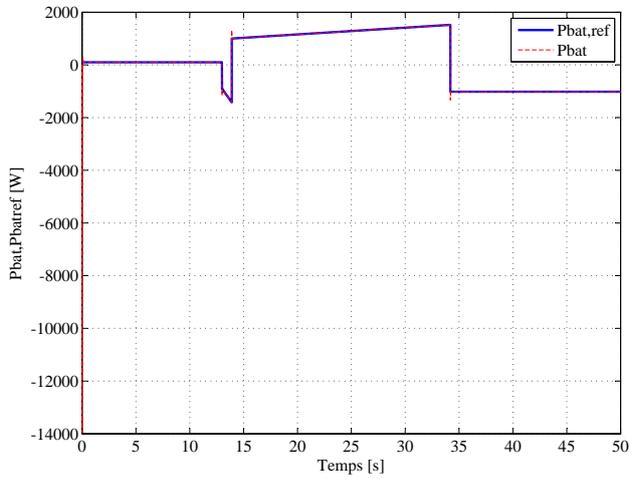


Figure 2.13 – Puissance de la batterie $P_{bat}, P_{bat,ref}$

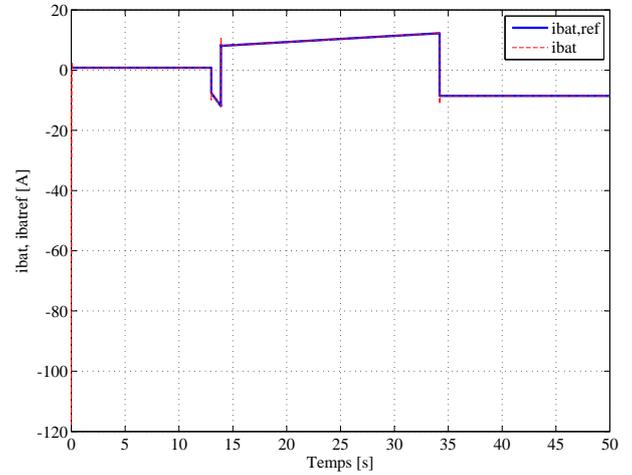


Figure 2.14 – Courant de batterie $i_{bat}, i_{bat,ref}$

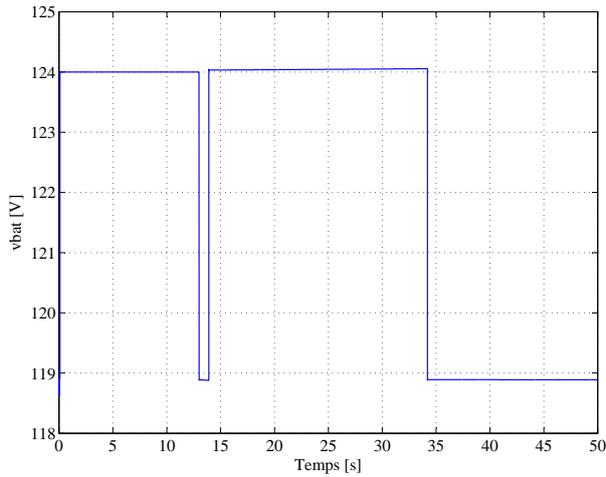


Figure 2.15 – Tension de batterie

v_{bat}

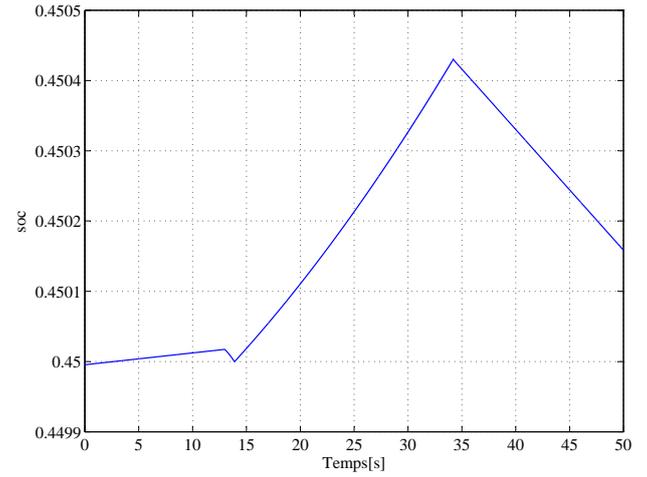


Figure 2.16 – soc-soc

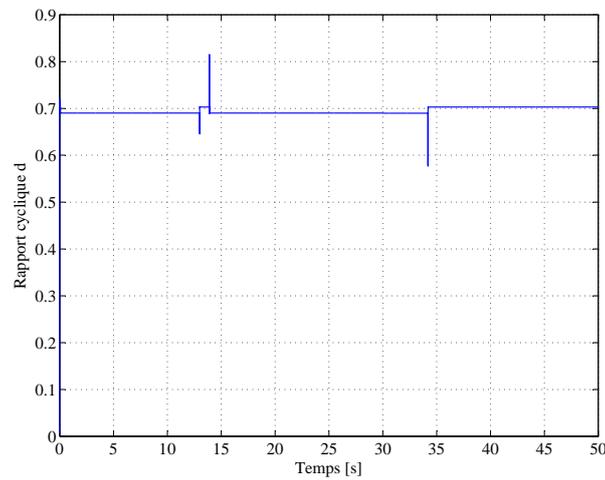


Figure 2.17 – rapport cyclique d

Conclusion : Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés au problème de stockage dans une batterie, pour assurer ainsi son fonctionnement dans les deux modes ; charge et décharge à travers un asservissement de puissance.

Chapitre 3

Gestion de système globale :

Vu les différentes situations qu'on peut les rencontrer durant le fonctionnement du système, et qui peuvent causer des pertes en énergie, dégradation des éléments constituant ce dernier, et diminution dans la durée de vie du système de stockage, font qu'un bon contrôle du système est nécessaire[6].

Afin d'éviter ces problèmes nous avons développé un algorithme qui permet de contrôler ce système.

Cet algorithme intervient dans les différentes situations qui apparaissent dans le système :

- Si la puissance demandée par le réseau est inférieure à celle produite par le générateur éolien ($P_{res} < P_{eol}$), le surplus de l'énergie éolienne produite ($P_{eol} - P_{res}$) et l'énergie produite par le générateur PV (P_{pv}) seront stockées via les convertisseurs AC/DC et DC/DC dans les batteries de stockage. Si la capacité maximale des batteries est atteinte ($C_{bat} = C_{max,bat}$), un surplus d'énergie se produit, dans ce cas le système de contrôle (régulateur de charge) intervient pour arrêter le processus de charge, et on change le coefficient de puissance de la turbine pour qu'elle ne produit que la puissance nécessaire pour le réseau.
- Si La puissance demandé par le réseau est supérieure à celle produite par le générateur éolien ($P_{res} > P_{eol}$). Dans ce cas, si la condition ($P_{pv} > (P_{res} - P_{eol})$) est satisfaite, le déficit en énergie ($P_{res} - P_{eol}$) sera couvert totalement par le générateur PV via

le convertisseur DC/DC, le reste de la puissance photovoltaïque sera stocké dans les batteries à condition que ($C_{bat} < C_{max,bat}$), dans le cas ou ($P_{pv} < (P_{res} - P_{eol})$) le déficit en énergie sera couvert par, en plus du générateur PV, par les batteries de stockage via le convertisseur DC/AC sous la condition ($C_{bat} > C_{min,bat}$). Si cette dernière condition n'est pas satisfaite, le système de contrôle déconnecte les batteries du reste du système.

- S'il y a une égalité entre la puissance totale produite par les deux générateurs PV et éolien et la puissance requise par le réseau, la capacité de stockage disponible dans les batteries reste constante (si le phénomène d'autodécharge est négligé).
- Lorsque l'énergie disponible produite par les deux générateurs et stockée dans les batteries est insuffisante pour satisfaire le réseau, on parle d'un déficit en énergie qui se produit.

Le schéma suivant résume les différents cas déjà discutés :

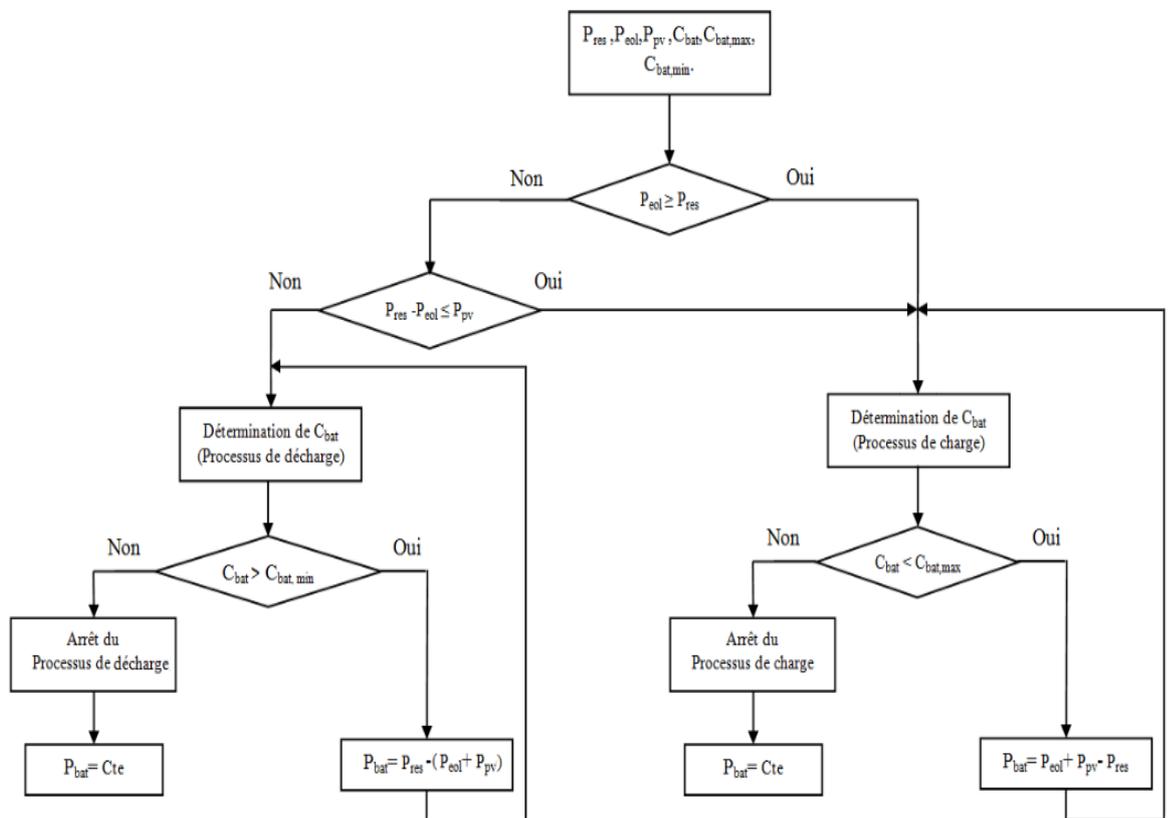


Figure 3.1 – Organigramme de l'algorithme développé

Conclusion : Le système de contrôle permet la gestion de l'énergie produite par les deux générateurs et stockée dans la batterie. Ainsi l'intervention de ce système dans le cas ou la capacité de la batterie atteint sa limite maximale ou minimale permet d'éviter sa dégradation, sa destruction et de prolonger sa durée de vie.

Conclusion générale

Ce travail représente une continuité à notre travail mené dans le cadre de notre projet de fin d'étude qui portait sur les bâtiments à énergie positive [1], est vient dans un contexte caractérisé par un grand mouvement pour l'adoption des systèmes de production décentralisé pour répondre aux besoins croissant en énergie électrique.

Dans ce travail, nous avons essayé de répondre aux diverses exigence quant au stockage d'énergie électrique, la connexion au réseau électrique des systèmes de production domestiques, ainsi qu'à la gestion de la production.

Dans un premier chapitre nous nous sommes étalés sur la problématique de connexion au réseau en développant une nouvelle stratégie de commande basée sur les modes glissants, conclus par une simulation pour vérifier les résultats de la commande quant aux objectifs fixés et qui ont été atteint comme montré à la fin du chapitre.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressé au problème de stockage d'énergie produite par le système hybride présenté dans notre travail de fin d'étude, en assurant ainsi, par le biais d'une commande le fonctionnement de la batterie dans les deux cas de fonctionnement charge et décharge.

Pour conclure ce travail, nous avons proposé un algorithme de gestion du système de production, de stockage tout en prenant en compte la connexion au réseau. Un algorithme qu'on propose de modifier et améliorer dans les prochains travaux qui seront mené.

Cela étant fait, on propose, plusieurs perspectives pour améliorer ce travail, et continuer dans cette voie prometteuse :

- Dans un premier lieu on propose d'intégrer d'autres technologies renouvelables, soit pour la production électrique, ou comme système de chauffage et de climatisation, en adoptant des commandes intelligentes.
- On propose aussi, d'intégrer un système de gestion intelligente pour la gestion non
- Développer d'autre approche de commande.
- Intégrer d'autres types de convertisseur d'électronique de puissance.
- Aller vers le développement des réseaux intelligents pour gérer la production et la consommation de toute une région.

Bibliographie

- [1]C.A.MOSBAH, H.OURTEMACHE , Commande par mode de glissement d'un bâtiment à energie positive multi-sources, projet de fin d'étude, ENP, juin 2013
- [2]F.BOUCHAFAA, « Etude et Commande de différentes Cascades à Onduleur à Neuf Niveaux à Structure NPC. Application à la conduite d'une MSAP », Mémoire de Magister, USTHAB, 22 février 2006
- [3]BISKER Asma, « Commande d'un système photovoltaïque en mode isolée et en mode connectée au réseau ,Projet de fin d'étude,ENP,juin 2012.
- [4]A. BOUHARCHOUCHE, « Etude et commande d'un système de production hybride Eolien-Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique,18 Février 2013
- [5]K.TOUAFEK, « Etude dun capteur solaire hybride photovoltaïque thermique », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [6]A.BAHLOUL, O.BELAOUDMOU, « Etude et Commande d'un Système Hybride éolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2012.
- [7]A. BOUHARCHOUCHE, « Etude et commande d'un système de production hybride Eolien-Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique,18 Février 2013
- [8]R. KEZERLI. « Alimentation et Commande d'une MADA Connectée au Réseau Local, en Utilisant les Convertisseurs Multiniveaux ». Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 2009.
- [9]VECHIU Lonel, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de Doctorat, Université du HAVRE, 2005.
- [10]H. G. Arantazamendi, "Etude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micro-réseaux", Doctorat, INP de Grenoble, 2006.
- [11]P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, et M. L. Crow, "Energy Storage Systems for Advanced Power Application", Proceedings Of The IEEE, VOL. 89, NO. 12, December 2001.
- [12]V. Courtecuisse, "Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique". Doctorat, CNAM, Paris, 2008.

[13]M. Amin, “Efficiency and Power Density Improvement of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems utilizing High Frequency-Based Power Converter”, Doctorat, Université Internationale de Florida, 2012.