

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : électrotechnique

Option : réseau électrique

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :**

MASTER

Thème

**Gestion de l'énergie d'une source
hybride pour une application Micro
smart grid**

Présenté par :

Houhou Abdelhakim

Soutenu le : 31mai 2015

Devant le jury composé de :

Mr BAHRI Mebarek

Professeur

Président

Mr ABOUBOU Abdennacer

Professeur

Encadreur

Mr BENMEDDOUR Mostefa

Maitre de conférences A

Examineur

Année universitaire : 2014 / 2015

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : électrotechnique
Option : réseau électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Gestion de l'énergie d'une source hybride pour
une application Micro smart grid**

Présenté par :

Houhou Abdelhakim

Avis favorable de l'encadreur :

Aboubou abdennacer

signature

Avis favorable du Président du Jury

Bahri Mebarek

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : électrotechnique
Option : réseau électrique

Thème :

Gestion de l'énergie d'une source hybride pour une application Micro smart grid

Proposé par : Aboubou abdennacer

Dirigé par : Aboubou abdennacer

RESUMES

Dans ce travaille on a proposé l'utilisation d'un système photovoltaïque alimentant une charge domestique en utilisant un système de stockage à base des suprecondensateur ; ce que forme un système hybride commandé par platitude. Une modélisation de la source, convertisseurs associés, commande utilisée ainsi que le dimensionnement du système vont être étudié dans ce mémoire. Des scénarios réalistes et compliqués vont être analysés et des résultats et solutions seront extraits ouvrant une démarche importante pour ce type des systèmes hybrides.

في هذا العمل سنقترح استخدام نظام الخلايا الضوئية لتغذية حمولة محلية على أساس استخدام نظام التخزين بواسطة المكثفات الفائقة على شكل نظام هجين متحكم برتابة. سيتم عرض نموذج لمصدر الطاقة، المحولات المرتبطة، التحكم المستخدم وأبعاد النظام وستتم دراستها في هذه الأطروحة. وسيتم تحليل سيناريوهات واقعية ومعقدة وسيتم استخراج النتائج والحلول باستعمال نهج رئيسي لهذا النوع من الأنظمة الهجينة.

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents Houhou Raidh et Bechera , que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A ma grand-mère Torkia

A mes frères Djebber et Ahmed

A mes sœurs roukia et Aeffaf

A mes oncles nour dine et mohamed

A ma grande famille Houhou

A mes chers amis surtout

*Elyes Djo, Bel Oo Yc. Hamodi, mon cousin Badri, Salama, Imed ,
Morad Bousail, Sapha, Djihed, Amine, Mahedi*

Amira

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

Et collègues du travail au Groupe Sonatrach

Abdel Hakim Houhou

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail

Je tiens à remercier mon encadreur Mr ABOUBOU Abdennacer d'avoir posé un sujet très intéressant et pour leur conseils, leur disponibilité et pour avoir fait profiter de leurs connaissances et de leur qualités tant professionnelles qu'humaines.

Respectueux remerciement à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté sur mon travail.

Je tiens à remercier Mr. TIGANI Ilyes pour ces services et tout personne qui nous aidé à atteindre ce point-là.

Je remercie également tous les enseignants de département d'électrotechnique de l'université Moahed Khider de Biskra qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle universitaire.

Liste des symboles

I	Courant d'une cellule photovoltaïque (A)
I_{cc}	Courant de court-circuit (A)
I_0	Courant de saturation de la diode inverse (A)
V	Tension d'une cellule photovoltaïque (A)
V_{oc}	Tension de circuit ouvert (V)
I_{op}	Courant optimum (A)
V_{op}	Tension optimale (V)
V_{th}	Tension thermique (V)
N_s	Nombre de modules en série
N_p	Nombre de branches en parallèle
α	Coefficient de variation du courant en fonction de la température
β	Coefficient de variation de la tension en fonction de la température
T	Température effective des cellules [C°]
T_{ref}	Température de référence [C°]
SOC_{sc}	L'état de charge de supercondensateur
V_{sc}	Tension de supercondensateur (V)
i_{sc}	Courant de supercondensateur (A)
n	Nombre de cellule
C_1	La capacitance (F)
Q	La charge électrique (c)
V_1	La tension appliquée (V)
ε	Constante diélectrique du matériau isolant
V_{Csc}	La tension au borne de la capacité C_{sc} (V)
R_{sc}	La résistance interne du supercondensateur (Ω)
C_{sc}	La capacité du supercondensateur (F)
ω	L'énergie électrostatique stockée (J)
V_s	Tension de sortie (V)
L_{pv}	Inductance de l'hacheur du GPV (H)
R	Résistance de la charge (Ω)
i_{pvdc}	Courant du GPV en sortie de l'hacheur (A)
i_{pv}	Courant du GPV (A)

Liste des symboles

i_{pv}	Courant du GPV (A)
I_{pvref}	Courant du générateur photovoltaïque de référence (A)
i_{scdc}	Courant du supercapa en sortie de l'hacheur (A)
I_{scref}	Courant du suprecapa de référence (A)
α_{sc}	Rapport cyclique de l'hacheur du supercondensateur
i_{dcref}	Courant de bus continu de référence (A)
V_{dc}	Tension de bus continu (V)
C	Capacité du bus continu (F)
V_{dc}	Tension de bus continu (V)
SEH	Système d'Energie Hybride
PPM	Point de Puissance Maximale
GPV	Générateur photovoltaïque
PV	Photovoltaïque
SC	Supercondensateur
p_{SCLim}	la puissance maximale limitée par le convertisseur S_C .
p_{PVLim}	la puissance maximale limitée par le convertisseur PV.
p_{PVREF}	puissance du générateur photovoltaïque de référence (w)
p_{SCREF}	Courant du suprecapa de référence (w)
E_{bus}	Énergie de bus DC
E_{SC}	Énergie de supercondensateur
T_T	Énergie totale
P_{PV0}	Puissance du GPV en sortie de l'hacheur (w)
P_{SC0}	Puissance de supercondensateur en sortie de l'hacheur (w)
P_{ch}	Puissance de charge
rs	paramètre de générateur PV

Chapitre 1	Pages
Figure (1.1) : dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si).....	7
Figure (1.2) : les différentes technologies.....	8
Figure (1.3) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	9
Figure (1.4) : Cellule en silicium polycristallin.....	10
Figure (1.4) : Cellule en silicium monocristallin.....	10
Figure (1.5) : Cellule silicium amorphe.....	11
Figure : a) Constitution d'un supercondensateur	12
b) Schéma d'un supercondensateur.....	12
Figure (1.6) : Condensateur plan.....	15
Figure (1.7) : Principe de la charge/décharge d'un supercondensateur électrostatique. Interprétation.....	14
Figure (1.8) : Diagrammes de Ragone des systèmes électrochimiques de stockage d'énergie électrique.....	16
Figure (1.9) : Symbole d'un convertisseur.....	18
 Chapitre 2	
Figure (2.1) : schéma synoptique de l'installation hybride.....	20
Figure (2.2) : schéma équivalent d'une cellule solaire.....	21
Figure (2.3) : Caractéristiques I-V du module photovoltaïque.....	22
Figure (2.4) : influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C.....	23
Figure (2.5) : influence de la température sur la caractéristique I(V)et P(V) à 1000 W/m ² ...24	24
Figure (2.6) : Module d'un supercondensateur.....	25
Figure (2.7) : Tension, courant et l'état de charge des supercondensateurs en cas de décharge.....	26
Figure (2.8) : Le schéma de principe d'un hacheur survolteurs.....	27
Figure (2.9) : schéma de principe de la première séquence de conduction.....	28
Figure (2.10) : le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction.....	29
Figure (2.11) : convertisseur associe aux supercondensateurs.....	30
Figure (2.12) : le schéma de principe de la première séquence de conduction.....	31
Figure (2.13) : le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction.....	31

Chapitre 3

Figure (3.1) : configuration du système hybride à bus continu.....	33
Figure (3.2) : Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur.....	35
DC-DC commandé par la MPPT	
Figure (3.3) : SC réponse actuelle à un 0-50 A l'étape (déchargement).....	35
Figure (3.4) : Projet de schéma de circuit du système de production distribuée fournie par un PV et SC.....	36
Figure (3.5) : Photovoltaïque boucle de commande de puissance.....	37
Figure (3.6) : Principe des compteurs électriques évolués (Commission de régulation de l'énergie).....	40
Figure (3.17) : Exemple d'un système autonome.....	42
Figure (3.7) : SC boucle de commande de puissance.....	43
Figure (3.8) : Commande multi variable d'une centrale électrique hybride PV / SC basée sur une approche de planéité différentiel... ..	44
Figure (3.9) : tension de la source photovoltaïque.....	46
Figure (3.10) : tension de supercapa.....	46
Figure (3.11) : tension de bus continue.....	47
Figure (3.12) : puissance de supercapa et la charge et le photovoltaïque.....	47
Figure (3.13) : état de charge.....	48
Figure (3.14) : Energie référence de bus continue.....	48
Figure (3.15) : énergie de bus continue.....	49
Figure (3.16) : courant de supercapa.....	49
Liste de tableau	
Tableau (3.1) : Paramètre de la source photovoltaïque.....	41
Tableau (3.2) : Paramètre de stockage des supercondensateur.....	41

	Pages
Introduction générale.....	1
Chapitre 1	<i>Généralités sur les systèmes hybrides</i>
1.1 Introduction	3
1.2 Généralité du système hybride	3
1.2.1 Définition du système hybride	3
1.3 Etat de l'art des systèmes hybrides	3
1.4 Intégration des supercondensateurs dans les systèmes de conversion de l'énergie solaire..	5
1.5 Générateur photovoltaïque (PV)	6
1.5.1 Semi-conducteur :	6
1.5.2 La jonction N-P	7
1.5.3 Principe de fonctionnement	8
1.5.4 Les différents types des cellules photovoltaïques	9
a) Silicium monocristallin :	9
b) Silicium poly (ou multi-) cristallin :	10
c) Silicium amorphe :	10
1.6 Supercondensateur	11
1.6.1 Principe :	12
1.6.2 Supercondensateurs électrostatiques	13
1.6.3 Supercondensateurs électrochimiques	15
1.7 Les Hacheurs :	17
1.7.1 Exigences de l'utilisateur :	18
1.7.2 Type des hacheurs :	19
1.8 Conclusion	19
Chapitre 2	<i>Modélisation du système</i>
2.1 Introduction	20
2.2 Modélisation du système	20
2.2.1 Modèle du générateur photovoltaïque	20
2.2.1.1 Caractéristique I-V	22
2.2.1.2 Influence de l'éclairement et la température	23
2.2.2 Module de la supercondensateur	24
2.2.2.1 Equation électrique de charge et décharge	25

2.2.2.2 Equation de l'état de charge	26
2.2.3 Modèles des convertisseurs statiques	27
2.2.3.1 Modèle moyen du convertisseur survolteur du GPV	27
2.2.3.2 Modèle moyen du convertisseur back bost de la suprecondansateur	30
2.3 Conclusion	32
chaputre 3	<i>Commande de système et résultat de simulation</i>
3.1 Introduction	33
3.2 Topologie de système étudié	33
3.2.1 Architecture à bus continu	33
3.2.2 Commande MPPT :	34
3.2.2.1 Les méthodes de poursuite de MPP :	34
3.2.2.2 Méthodes a contre réaction de tension :	34
3.2.3 Méthodes a contre réaction de courant :	34
3.2.3 Méthodes a contre réaction de puissance :	34
3.2.4 CENTRALE SOLAIRE	35
3.2.4.1 Structure des Convertisseurs électriques étudiées	35
3.2.4.2 La réglmentation des Boucles de la Power Plant proposée	36
3.2.4.3 Modèle Mathématique de la centrale	37
3.3 Cahier de charge	38
3.3.1 Définition et catégories.....	38
3.3.2 Fonctionnement	39
3.3.3 En jeux par rapport à l'énergie	40
3.3.4 Des avantages économiques et environnementaux	40
3.3.5 Les limites dans la mise en oeuvre	41
3.3.6 Système autonome	42
3.4. Contrôle d'une centrale	42
3.4.1 Bilan énergétique	42
3.4.2 Différentiel planéité de la propriété	42
3.4.3 Loi sur le contrôle et la stabilité	43
3.5 Simulation et résultats	45
3.5.1 Interprétation	49
3.6 Conclusion	50
Conclusion générale.....	51

Introduction générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction de la pollution. Parmi les moyens de production prometteurs (éolien, hydraulique...), le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat. Ajoutons à cela la libéralisation du marché de l'électricité qui introduit des changements majeurs dans le domaine de l'énergie. La multiplication des producteurs indépendants et des productions décentralisées [38].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains. Le développement rapide de l'énergie solaire est apparu progressivement sous forme d'installations de petites puissances raccordées au réseau à Basse Tension (BT) et de fermes solaires connectées directement au réseau à Moyenne Tension (HTA).

Cependant, le raccordement des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir quelques impacts sur les réseaux électriques : impacts sur le changement des flux de puissance (bidirectionnel), sur le plan de tension, sur le plan de protection, sur la qualité de l'énergie ou sur la planification du réseau... D'un autre côté, les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement des systèmes PV.

Le but de ce travail est la modélisation de la source, convertisseurs associés, commande utilisée ainsi que le dimensionnement du système. La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres :

Au premier chapitre, on fait une description générale sur les gisements solaires et la production de l'énergie par le photovoltaïque.

La modélisation et la caractérisation des différents éléments constituant le SEH sont détaillées dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre présente une conception d'une énergie renouvelable (une source photovoltaïque) pour une centrale hybride avec le dispositif de stockage du supracondensateur (Sc). La rangée de pico-volte est employée comme générateur principal,

et les fonctions de (Sc) comme source auxiliaire pour fournir l'énergie.

Pour l'application d'une haute puissance, convertisseurs parallèles triphasés de poussée et

des convertisseurs bidirectionnels parallèles sont mis en application comme Convertisseur de pico-volte est un dispositif de stockage, respectivement. Le modèle mathématique des convertisseurs de picovolte et de Sc est décrit pour le contrôle de la centrale et la commande MPPT de photovoltaïque [54], et qui est présenté la charge en a fait utiliser micro smart grid (charge autonome).

Chapitre 1 : généralités sur les systèmes hybrides

1.1 Introduction

Le système de génération hybride, peut être combiné à différents types d'énergies renouvelables associées avec des unités disponibles de stockage pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur [39].

Dans ce chapitre on va définir le system hybride, son état de l'art et ses principaux composants.

1.2 Généralité du système hybride

1.2.1 Définition du système hybride

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise deux ou plus de technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables [16]. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybride sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [25].

1.3 Etat de l'art des systèmes hybrides

Le travail effectué dans [40] concerne l'association de sources d'énergie électrique de natures différentes pour l'alimentation de charge micro smart grid. Ce principe a été l'objet d'une étude de dimensionnement poursuivie par des essais expérimentaux. Et ce par la combinaison des suprecondensateur. Grâce à la gestion en temps réel de l'état de charge des suprecondensateur, le volume de ces derniers a pu être réduit. De manière générale. L'hybridation suprecondensateur permet d'améliorer les caractéristiques en masse volume et cout des systèmes de stockage d'énergie.

Pour le dimensionnement du système hybride l'auteur a constaté que le bon choix de la tension d'alimentation optimise les performances. Par ailleurs, l'utilisation de supercapa ultra Haute Puissance pour l'hybridation des supercapa a offert des résultats encourageants.

Dans [21]. L'auteur mène une étude comparative entre les méthodes classiques perturbation et observation (P&O), conductance incrémentale) et intelligentes (logique floue) pour le suivi de la puissance maximale du GPV. Les résultats de simulation ont démontré une supériorité notable de la dernière méthode lors des variations de l'éclairement et de la température, avec

une oscillation minimale autour du point optimum. Dans le même contexte, [41] présente l'application des trois méthodes MPPT conventionnelles (Perturbation et observation, Incrémentation de Conductance et Hill Climbing) pour l'alimentation d'une charge continue, et ce dans des conditions quasiment similaires pour pouvoir faire des comparaisons de performances des étages d'adaptation. L'auteur a déduit que la deuxième technique est plus rapide et plus stable.

Travail présenté dans [54] est consacré à l'étude d'un design pour une énergie renouvelable centrale électrique hybride qui est alimentée par une source photovoltaïque (PV) avec un supercondensateur (SC) dispositif de stockage et est adapté pour distribuer applications de production. Le photovoltaïque est utilisé comme générateur principal, et les fonctions de la SC comme une source auxiliaire pour alimenter le (Transitoire et l'état d'équilibre) manque en puissance du générateur photovoltaïque. Pour applications de forte puissance, convertisseurs élévateurs parallèles à quatre phases et convertisseurs bidirectionnels parallèles à quatre phases sont mis en œuvre en tant que Convertisseur de PV et un dispositif de stockage, respectivement. Un ordre réduit modèle mathématique des convertisseurs photovoltaïques et SC est décrit par le contrôle de la centrale électrique. En utilisant une approche non linéaire en fonction de la propriété de platitude,

Dans [18], [19], [20], la commande par platitude est appliquée pour assurer le contrôle et la gestion de l'énergie entre les différentes sources utilisées du système hybride, ou [19] utilise la photovoltaïque et le supercondensateur pour alimenter une charge de type smart grid et le système étudié dans [54] est constitué d'une batterie, d'une photovoltaïque à basse température et de supercondensateurs. Le problème du contrôle de la tension du bus continu est résolu en utilisant les contrôleurs linéaires simples basés sur l'approche d'IDA-PBC. Un grand avantage des différents dispositifs de commande est la mesure seulement de deux variables (tension de la photovoltaïque et le courant du SC). Pour contrôler le système global. De nombreux avantages peuvent être attendus de la structure proposée, parmi lesquels la possibilité de fournir et d'absorber les pics de puissance à l'aide du SC ce qui permet également de récupérer l'énergie

L'étude de [42], propose un algorithme de supervision d'énergie pour un mini réseau hybride autonome, utilisant un panneau photovoltaïque. Permettant de calibrer l'exploitation de ces sources. Pour adapter la production des sources renouvelables au besoin de la charge, une supercapacité de stockage est intégrée. Toutefois, en vue de sécuriser la supercapacité d'une part et assurer une alimentation continue de l'installation d'autre part, l'intervention d'une source

complémentaire d'énergie, tel qu'un groupe électrogène, s'avère nécessaire. L'algorithme de gestion est développé pour couvrir les besoins énergétiques de l'installation en cas de manque ou d'absence d'énergie. Basé sur un système de commutation douce s'impose.

Le principal objectif de [27] était de proposer une stratégie de contrôle d'un bus continu alimenté par une source hybride constituée d'une supercapa comme sources auxiliaires et d'une photovoltaïque comme source principale. La variable de contrôle considérée était la régulation de la tension du bus continu. Les différents résultats expérimentaux présentés ont été obtenus sur un banc d'essais représentant une maquette à helle réduite d'un système de type application automobile. Les tests présentés ont souligné la lenteur de la réponse de la photovoltaïque à des transitoires de courant, démontrée lors du démarrage et de freinage d'un moteur à courant continu connecté au bus continu, ainsi que pendant des échelons de charge.

Par ailleurs J. W. Dixon [43]. a présenté un véhicule hybride super condensateurs (20 F, 300 V, 200 A) d'une puissance de 32 kw. Ces travaux ont permis de gérer l'énergie entre un module de super condensateurs et des batteries. Les super condensateurs étaient utilisés pour les grandes accélérations et les grands ralentissements du véhicule avec des pertes minimales d'énergie, et évitaient la dégradation des supercapa principales.

1.4 Intégration des supercondensateurs dans les systèmes de conversion de l'énergie solaire

Les principaux atouts du supercondensateur par rapport aux autres solutions de stockage d'énergie sont sa puissance massique élevée, qui autorise des cycles de charge et décharge à courant fort (centaine d'ampères), une durée de vie très élevée (centaine de milliers de cycles) et une relative stabilité de ses caractéristiques en température par rapport aux batteries. Ils peuvent s'associer avec les batteries de manière intéressante pour moins les solliciter lorsqu'il y a des appels de puissance. Les supercondensateurs, ayant une dynamique plus rapide, seraient utiles pour réguler l'énergie électrique fournie en aval d'une chaîne de conversion d'énergie solaire.

Une source hybride photovoltaïque-supercondensateurs a été étudiée théoriquement et validée expérimentalement par Andreotti et al.. Les supercondensateurs ont été considérés car ils sont plus robustes que les batteries, même si leur coût reste encore élevé [13]. Cette source hybride permet d'alimenter une charge qui requiert des « pulses ». Une étude de dimensionnement et de coût est proposée avec une modélisation sous forme d'un circuit électrique RC pour les supercondensateurs.

Enfin, dans les installations autonomes alimentées par énergies renouvelables, les sources intermittentes telles que les sources éoliennes ou photovoltaïques, en particulier si elles sont isolées du réseau général, font appel à des systèmes d'accumulation pour stocker l'énergie produite au gré des éléments naturels, vent et ensoleillement en l'occurrence, et la restituer en fonction du besoin. La gestion de l'énergie de stations de puissance photovoltaïque autonome sur des sites isolés, avec des batteries ou des piles à combustible associées à des supercondensateurs a été modélisé : Lu et al. ont modélisé cette gestion par un réseau de Pétri [14] alors que Uzunoglu et al. ont utilisé les schémas blocks contenant des fonctions de transfert du logiciel Matlab/Simulink pour simuler la régulation en puissance d'une installation autonome [15]. Dans cette étude, l'intermittence du gisement solaire est prise en compte.

1.5 Générateur photovoltaïque (PV)

1.5.1 Semi-conducteur :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

A la température de **0 K (-273°C)** chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal, les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou.

Par exemple, à la température de **300 K (27°C)**, il y a **$1.45 * 10^{10}$** paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur [3].

1.5.2 La jonction N-P

La jonction **N-P** est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée **N** et l'autre dopée **P**, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.

Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région **N** au pôle négatif d'un générateur et la région **P** au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région **N**, ainsi que les trous libres de la région **P**, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation.

Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région **P** et les trous dans la région **N**. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse.

Les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction **N-P** joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région **P** ; ces électrons ont tendance à se recombiner avec les trous présents en grand nombre dans cette région **P** ; ils le font au bout d'un temps t appelé durée de vie des porteurs minoritaires [4].

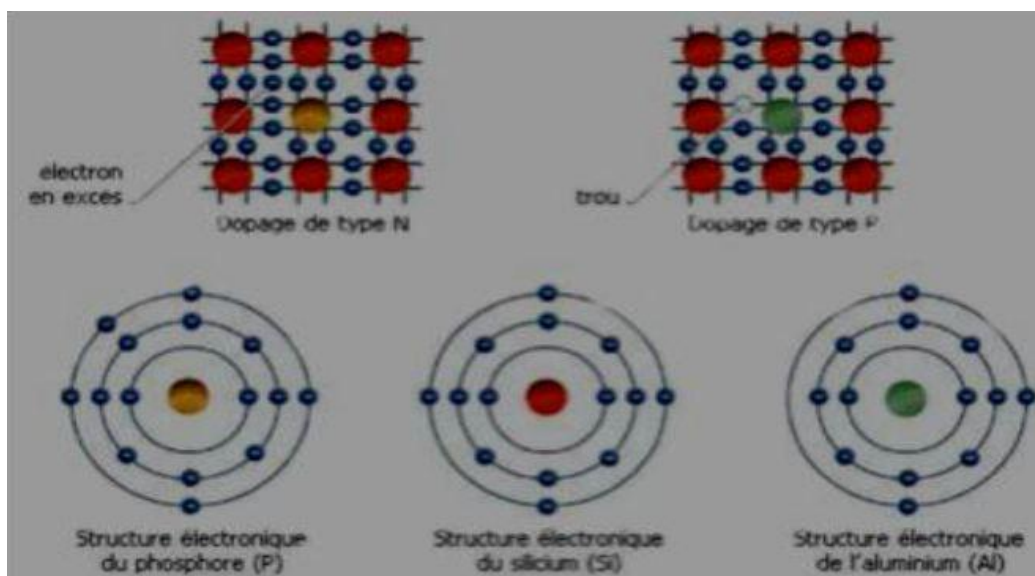


Figure (1.1) : dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si)

- Les matériaux les plus connus sont :

- le silicium (Si)
- le sulfure de cadmium (Cds)

- l'arséniure de gallium (As Ga)
- le tellure de cadmium (Cd Te)
- le germanium (Ge)
- le phosphore d'indium (InP)

La figure (1-2) suivante représente les différentes technologies des cellules PV :

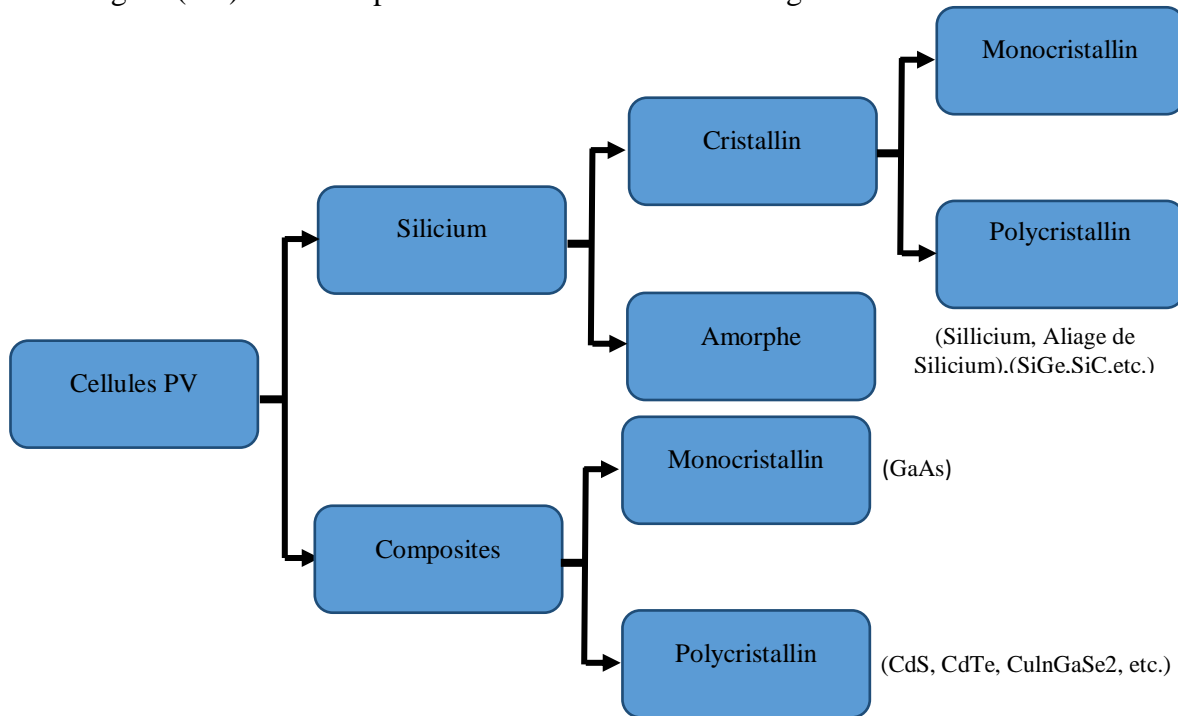


Figure (1 -2) : les différentes technologies des cellules PV

1.5.3 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque (PV), aussi appelée photopile, est la juxtaposition de deux semi-conducteurs, l'un dopé P et l'autre dopé N. À la jonction des deux couches se forme un champ électrique (résultant du phénomène décrit précédemment). Ce champ électrique existe même si la cellule est dans l'obscurité. Sous un ensoleillement plus ou moins important, les photons ou grains de lumière, venant avec une énergie suffisante entrent en collision avec les atomes du crystal (figure 1.2). Ils parviennent à faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur, créant ainsi des paires d'électrons-trous. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N [5][6].

Ainsi, une différence de potentiel entre les deux faces de la cellule est créée. Les grilles métalliques à l'avant et à l'arrière de la cellule PV collectent les électrons et les trous qui vont donc fournir à un circuit extérieur le courant électrique produit [6]. Si le photon est très

énergétique, il ne peut tout de même extraire qu'un seul électron. L'énergie excédentaire est perdue en chaleur.

La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du millimètre

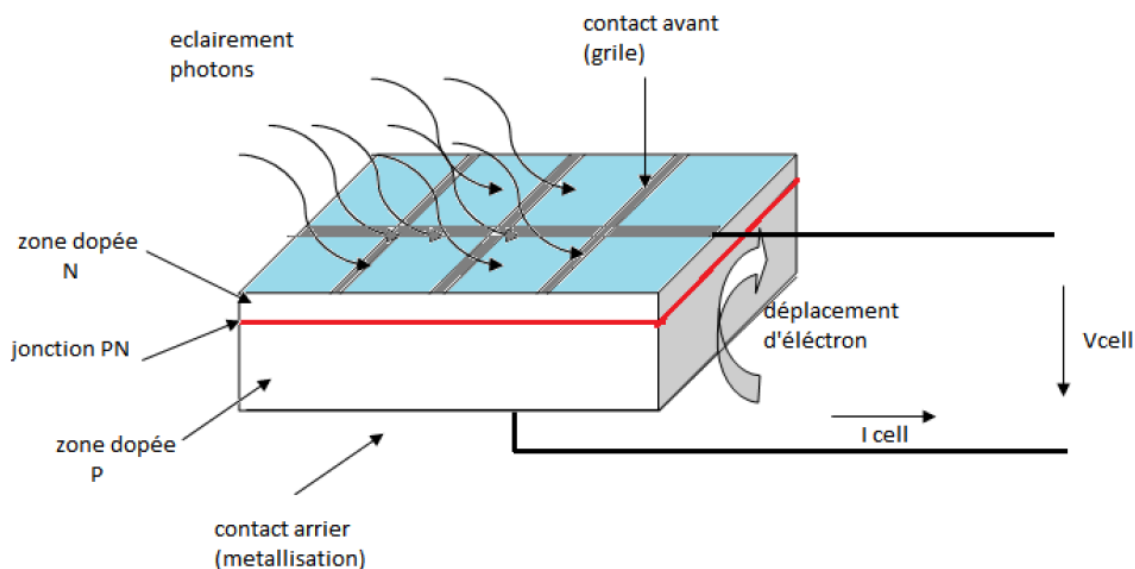


Figure (1.3) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

1.5.4 Les différents types des cellules photovoltaïques

Il existe trois types principaux des cellules :

a) Silicium monocristallin :

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairage, il est à la base des panneaux «terrestres» les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

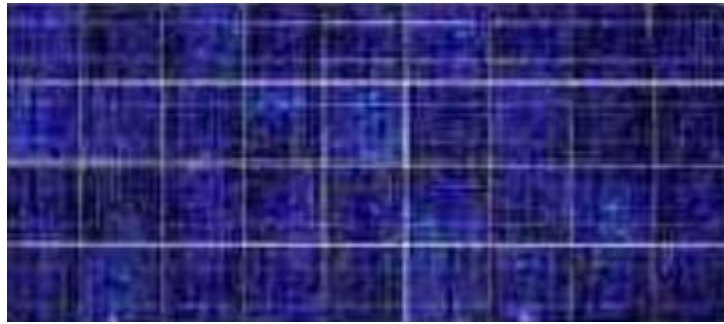


Figure (1.4) : Cellule en silicium monocristallin

Rendement électrique des panneaux : 15 % STC, et Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc, gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m².

b) Silicium poly (ou multi-) cristallin :

Cousin germain du précédent (composés de multicristaux), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux.



Figure (1.4) : Cellule en silicium polycristallin

Rendement électrique des panneaux : 12-14 % STC, et puissance des panneaux : 5 à 150 Wc, gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m².

c) Silicium amorphe :

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

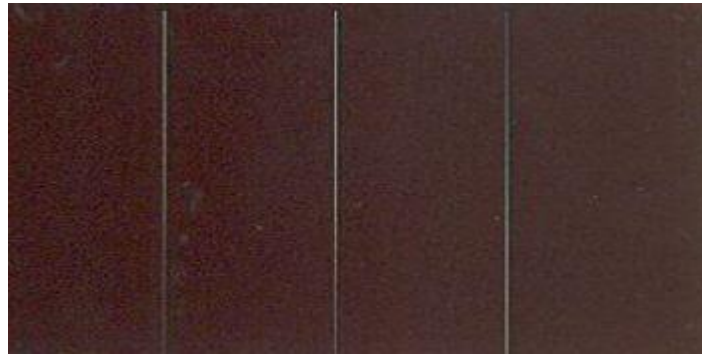


Figure (1.5) : Cellule silicium amorphe

Rendement électrique des panneaux : 5-7 % STC (jusqu'à 9 % pour les «multi jonctions »),
Et puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 Wc, puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60Wc, et gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (en extérieur).

1.6 Supercondensateur

L'évolution rapide des technologies, ces dernières décennies, a conduit à envisager de nouvelles solutions pour la mise en œuvre des sources d'énergie. Les moyens classiques de stockage d'énergie électrique sont d'une part les piles ou accumulateurs, qui permettent une autonomie relativement élevée, mais sont de puissances spécifiques modérées, et d'autre part les condensateurs réputés pour leur forte puissance spécifique mais n'autorisant pas des autonomies de fonctionnement suffisantes pour développer des applications nécessitant un peu d'énergie. Il existe donc un manque, en termes de moyen de stockage d'énergie de forte puissance, qui est situé entre les batteries et les condensateurs. Dans ce contexte, les années 70, pour des applications de l'électronique du signal. L'idée fut ensuite reprise aux Etats Unis et en Europe à partir du milieu des années 80, pour des applications de l'électronique de puissance, dans le cadre de recherches militaires, et l'on assiste depuis quelques années à une orientation marquée vers les applications civiles [1]

Sous l'impulsion des besoins du marché des véhicules électriques, il a été développé dans les années 1990 un nouveau type de condensateur à très haute énergie volumique : les condensateurs double couche ou supercondensateurs qui se caractérisent par une faible tension de service (environ 2,5 V) et une très forte capacité (plusieurs farads à quelques milliers de farads). Ils sont capables de fournir des courants élevés sur de petites durées (millisecondes, secondes, ou éventuellement minutes) [7].

Un supercondensateur est formé de deux collecteurs métalliques (généralement en aluminium), de deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique (pouvant atteindre plusieurs centaines ou milliers de m² par gramme de matière) plongeant dans un électrolyte (conducteur purement ionique, isolant électronique) et d'une membrane de séparation poreuse (figure). Quand les électrodes sont chargées, les ions de l'électrolyte se déplacent sous l'influence du champ électrique en direction de l'électrode de signe opposé. Lorsque le condensateur est chargé, une fraction des anions et des cations est localisée tout contre l'électrode de façon à équilibrer la charge en excès dans le carbone actif. Ainsi, on obtient à l'interface entre le carbone et l'électrolyte deux couches de charges en excès de polarité opposée appelées double couche électrochimique [8].

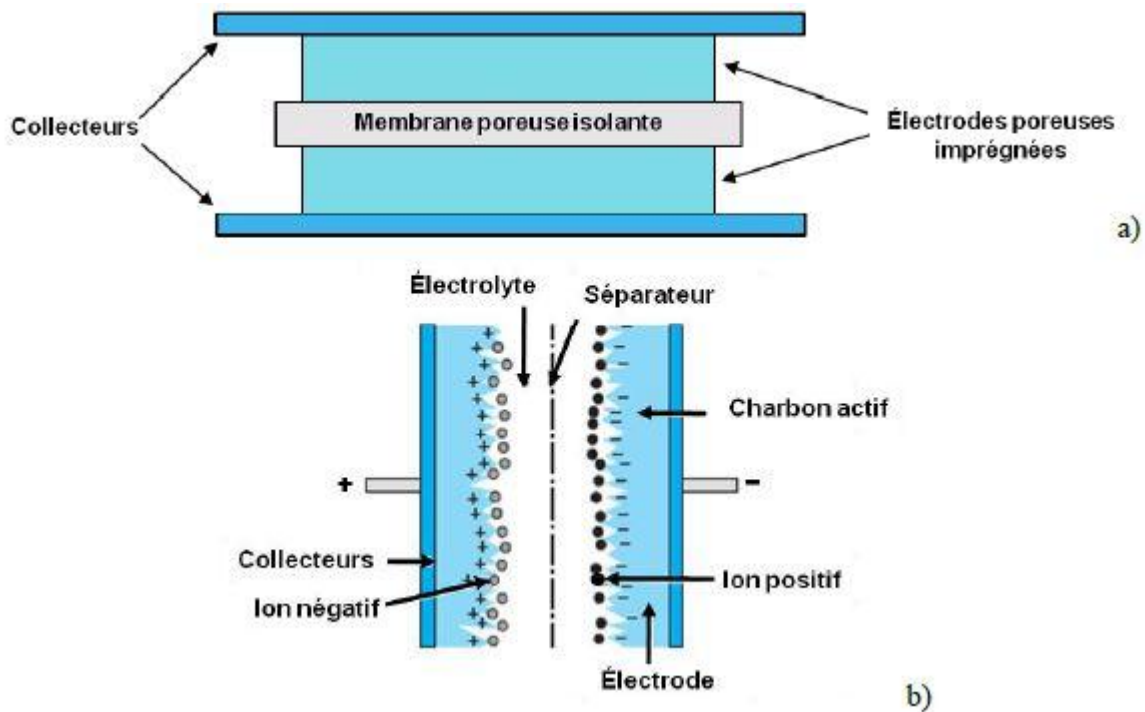


Figure – a) Constitution d'un supercondensateur **b)** Schéma d'un supercondensateur.

1.6.1 Principe :

La nature du matériau utilisé pour les électrodes permet de classer les supercondensateurs en deux familles : les supercondensateurs électrostatiques et les supercondensateurs électrochimiques. Il existe aussi des dispositifs hybrides particuliers que nous ne détaillerons pas. Ils sont inclassables dans les deux rubriques précédentes par le fait qu'une des électrodes fonctionne comme celle d'un accumulateur ou d'un condensateur électrolytique alors que l'autre fonctionne comme celle d'un supercondensateur [9].

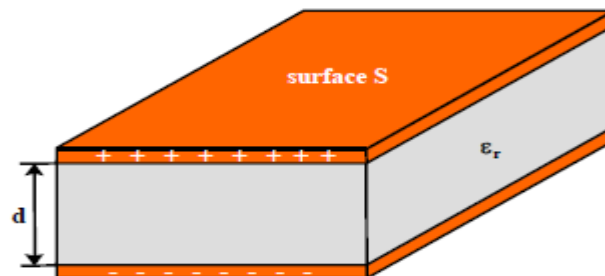


Figure (1.6) : Condensateur plan

L'expression de la capacité C d'un condensateur dont les armatures en regard sont planes (figure 1.6) est classiquement donnée par :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (1.1)$$

Avec ε_0 la permittivité du vide, ε_r la permittivité relative du diélectrique, S la surface de chaque électrode et d l'épaisseur du diélectrique.

L'énergie emmagasinée, proportionnelle au carré de la différence de potentiel V entre les électrodes, s'exprime par :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1.2)$$

La capacité C étant constante. Les relations (1.1) et (1.2) montrent qu'il existe deux approches permettant d'accroître la capacité d'un tel dispositif, et par là-même la quantité d'énergie stockée :

- La première porte sur l'utilisation de diélectriques possédant une permittivité relative élevée et une tension de service importante,
- La seconde, à l'origine du développement des supercondensateurs, est basée sur

1.6.2 Supercondensateurs électrostatiques

Le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques. L'énergie est donc stockée dans la double couche électrique. Les électrodes sont à base de carbone activé et l'électrolyte doit être un conducteur ionique, organique ou aqueux par exemple l'acide sulfurique. Elles sont séparées par une membrane poreuse et inerte. Ces supercondensateurs stockent les charges électriques grâce à d'une part la double couche électrochimique à l'interface entre le conducteur électronique (électrode) et le conducteur ionique (électrolyte) et d'autre part, à l'aptitude de certains matériaux à conduction électronique, tel que le carbone activé, à développer des surfaces spécifiques extrêmement élevées (jusqu'à 2000 à 3000 m².g⁻¹). Les mouvements des charges de natures électronique et ionique permettent d'expliquer le cycle de charge/décharge du supercondensateur (fig 1.7).

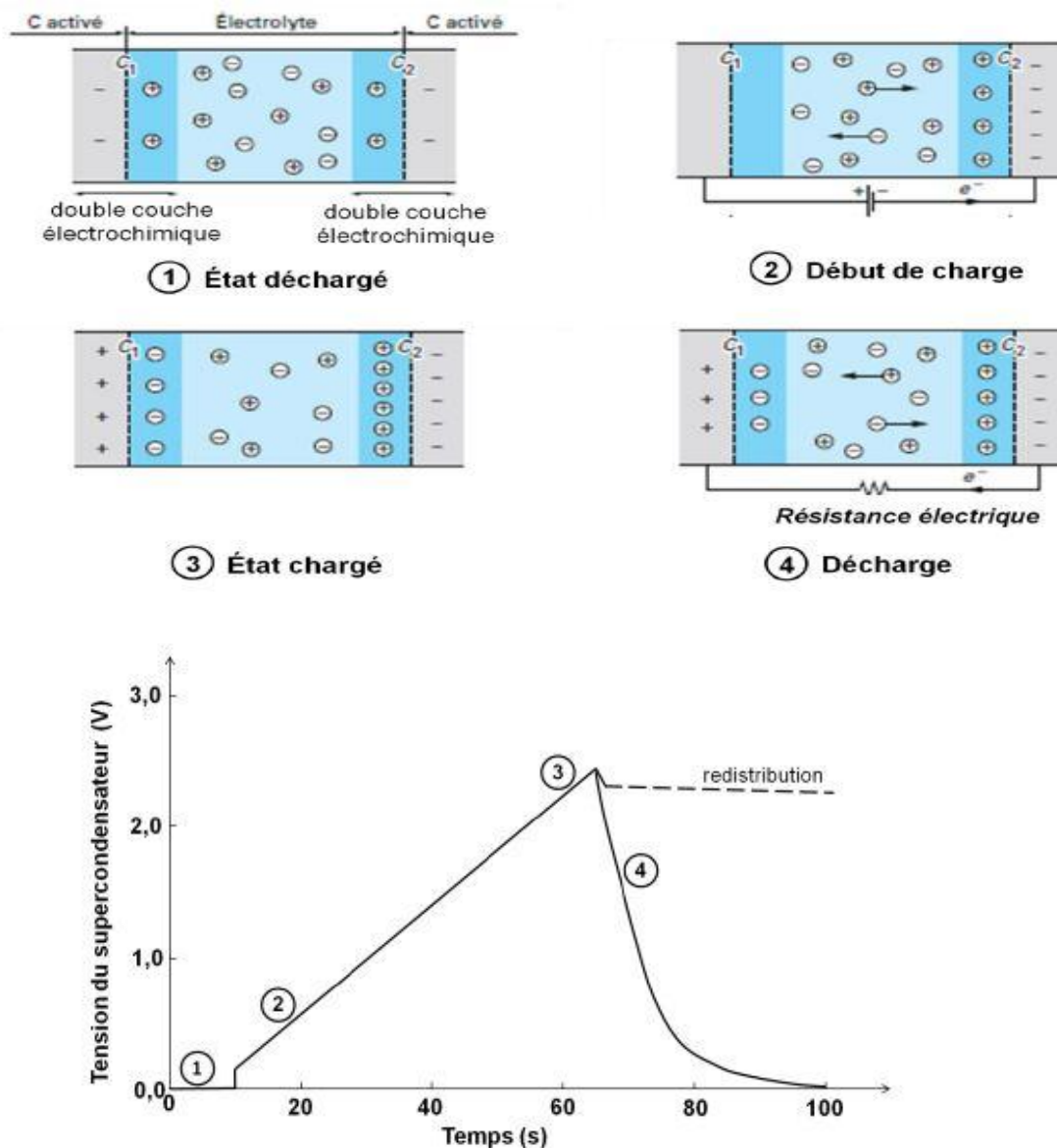


Figure (1.7) : Principe de la charge/décharge d'un supercondensateur électrostatique.

Interprétation

- **1-** A l'état décharge il apparaît une accumulation des charges en excès à l'interface carbone-électrolyte aussi bien du côté de l'électrode que de celui de l'électrolyte. La formation de cette double couche électrochimique, dont l'épaisseur n'est que de quelques dixièmes de nanomètre à quelques nanomètres, résulte du fait que les deux matériaux en présence contiennent des porteurs de charge mobiles de nature très différente et que ces porteurs subissent des forces anisotropes à l'interface alors même qu'ils sont condamnés à rester confinés dans leur milieu d'origine, sans possibilité de passage dans le milieu adjacent, l'électrode étant bloquante.
- **2-** En appliquant une différence de potentiel aux bornes du dispositif, les charges électroniques vont s'accumuler au niveau de l'électrode 2 à droite. Les cations et anions de l'électrolyte vont migrer dans des directions opposées comme indiqué par les flèches. La distribution des charges aux deux interfaces va être modifiée, celle à gauche étant dépourvue de charge a un potentiel nul tandis que l'autre à droite où les charges s'accumulent voit son potentiel s'élever.
- **3-** La charge du dispositif est poursuivie jusqu'à la valeur maximale, la tension de charge.
- **4-** Lors de la décharge, les ions et les électrons suivent le chemin inverse et un courant électrique est utilisable dans le circuit extérieur.

1.6.3 Supercondensateurs électrochimiques

Le principe de fonctionnement des supercondensateurs électrochimiques combine celui des supercondensateurs électrostatiques et celui des accumulateurs. Leurs électrodes sont en effet susceptibles de subir des réactions redox réversibles et donc de mettre en œuvre, en plus des processus électrostatiques, des processus faradiques. On estime que les supercondensateurs électrostatiques eux-mêmes doivent 1 à 5 % de leur capacité à des réactions faradiques mettant par exemple en jeu des groupes fonctionnels à la surface du carbone. À l'inverse, 5 à 10 % de la capacité d'un accumulateur peuvent provenir des doubles couches électrochimiques aux interfaces. Les supercondensateurs électrochimiques se situent entre ces deux cas extrêmes.

Aujourd'hui, les supercondensateurs sont disponibles en module ayant des capacités allant jusqu'à quelques dizaines de milliers de farads avec des densités de puissance allant jusqu'à 5000 W.kg⁻¹. Les supercondensateurs sont particulièrement adaptés pour des applications nécessitant de fortes densité de puissance et une demande en énergie faible. En effet, les supercondensateurs sont caractérisés par une densité d'énergie plus importante que les condensateurs diélectriques, et leur densité de puissance est plus élevée que celle des batteries (> 2 kW/kg). Pour un même volume, ils peuvent stocker 10 à 100 fois plus d'énergie électrique que les condensateurs traditionnels, mais 10 à 20 fois moins que les batteries d'accumulateurs (figure). L'avantage prépondérant des supercondensateurs sur les accumulateurs concerne leur aptitude à délivrer des densités de courant importantes sur des intervalles de temps faibles,

donc de fortes valeurs de puissances instantanées dans un faible volume. Typiquement, ils sont utilisés comme source pour les demandes de fortes puissances pendant quelques secondes jusqu'à quelques dizaines de secondes.

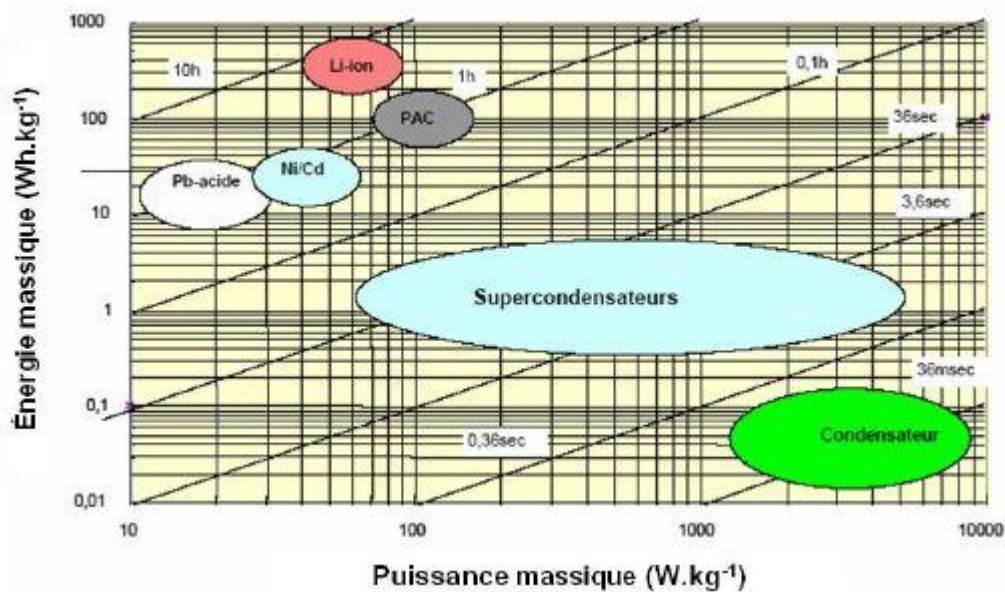


Figure (1.8) : Diagrammes de Ragone des systèmes électrochimiques de stockage d'énergie électrique.

Alors que les condensateurs électrolytiques conviennent pour des durées de décharge inférieures à quelques centaines de millisecondes, les supercondensateurs permettent des décharges d'une durée comprise entre 1 et 10 secondes (figure (1.8)) pour des temps de charge de quelques dizaines de secondes. De leurs côté, les batteries offrent des décharges supérieures à la dizaine de minutes, mais nécessitent en compensation des temps de charge relativement longs, compris entre 1 et 5 heures. Mais l'énergie massique des batteries est dix fois supérieure à celle des supercondensateurs.

Ainsi, suivant la puissance et l'autonomie exigées par les applications, les supercondensateurs peuvent être utilisés seuls, comme éléments de stockage de l'énergie électrique, ou en association avec les batteries d'accumulateurs électrochimiques afin de réduire la masse de ces dernières [10].

De plus, les supercondensateurs restituent la charge accumulée avec une excellente efficacité et pendant un très grand nombre de cycles. Ils peuvent supporter un nombre de cycles de charge/décharge environ 1 000 fois plus élevé que les batteries. La durée de vie espérée d'un supercondensateur est de 10 ans, soit trois fois celle des batteries électrochimiques actuelles avec un nombre de cycles élevé (> 10 000) [11].

De plus, ils peuvent fournir ou absorber un courant très élevé (dizaines à quelques centaines d'ampère), ce qui est très important pour la récupération de l'énergie lors du freinage

par exemple. Les supercondensateurs supportent des courants de charge et/ou de décharge élevés (> 100 A) [11].

En outre, l'expérience montre que les supercondensateurs ont une meilleure tenue en température que les batteries, mais leurs performances tendent à se dégrader entre -20 et -40 °C avec une augmentation de la résistance série [11].

Enfin, les supercondensateurs sont fabriqués avec des matériaux moins polluants que les batteries, hormis pour l'électrolyte, et ne nécessitent pas de maintenance particulière tel le nettoyage des électrodes des batteries.

Tous ces avantages font que les supercondensateurs sont utilisés dans de nombreuses applications aujourd'hui et permettent d'augmenter le rendement des systèmes dans lesquels ils sont intégrés. Mais attention, le stockage par supercondensateurs ne se substitue pas aux stockages précédemment décrits. Il les complète et peut s'associer à eux de façon hybride.

Applications

1- L'application principale est le stockage d'énergie rapide sur les véhicules électriques pendant les phases d'accélération et de freinage, les batteries ne pouvant qu'effectuer des échanges d'énergie longs (dizaine de secondes ou quelques minutes) [12]

2- Application pour le stockage des énergies renouvelables : les sources d'énergies renouvelables comme l'éolien, le solaire, l'eau nécessitent un besoin d'importants dispositifs de stockage d'énergie. En raison de leur haute fiabilité, efficacité et de durée de vie, les supercondensateurs sont particulièrement idéals pour des applications liées aux énergies renouvelables. Souvent, les sources d'énergie renouvelables sont situées dans des régions éloignées. Les considérations de conception sont basées sur la fiabilité et l'absence des opérations de la maintenance. Les supercondensateurs sont fondamentalement considérés comme des dispositifs sans entretien qui ne nécessitent pas de tests coûteux et onéreux comme des batteries, qui nécessitent un suivi d'évaluation de leur état de "santé" (SOH, State Of Health) et de charge (SOC, State Of Charge).

1.7 Les Hacheurs :

Un hacheur permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et, dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation. Il est utilisé dans les alimentations et pour le pilotage des moteurs. [32].

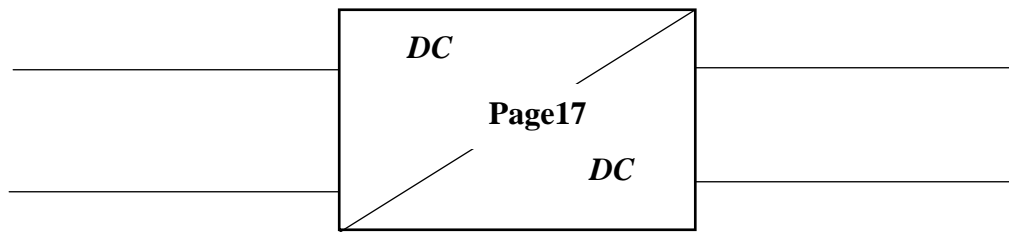


Figure (1.9) : Symbole d'un convertisseur DC/DC

1.7.1 Exigences de l'utilisateur :

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double : d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe : fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit. Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet [33] :

- délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé ;
- posséder un rendement élevé ;
- présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau ;
- posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc) ;
- ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique) ;
- être la plus petite et la plus légère possible ;
- et bien entendu être de préférence peu coûteuse...

1.7.2 Type des hacheurs :

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [34] :

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.

- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou buck),
- hacheur élévateur (ou boost),
- hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

1.8 Conclusion

Pour continuer cet effort d'intégration, la mise en oeuvre des supercondensateurs comme moyen de stockage d'électricité photovoltaïque pour des applications sur site isolé est traitée dans le présent travail de mémoire. En effet, cette mise en oeuvre des supercondensateurs comme moyen de stockage avec une source d'énergie intermittente comme le gisement solaire nécessite d'être bien connue afin de pouvoir juger de la pertinence de leurs intégrations ou non dans une installation de conversion de l'énergie solaire donnée.

Ainsi, l'objectif de la mémoire est d'établir un modèle de connaissance du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs, suffisamment précis et accessible, permettant l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de conversion de l'énergie solaire incidente au capteur photovoltaïque, ce modèle permettant de juger de la pertinence de l'intégration ou de dimensionner la chaîne de conversion d'énergie solaire (gestion des dispositifs de stockage d'électricité, consommation de puissance, durée de vie de l'installation, coût...).

Chapitre 2 : modélisation du système

Introduction

Ce chapitre présente la modélisation des sous-systèmes de l'architecture de la figure (2.1). Cette dernière inclut un générateur PV, un système de stockage supercondensateur, et pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge micro smart grid (zone isolée) avec le générateur photovoltaïque et supercapa. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT).

Pour alimenter les dispositifs on utilise l'énergie alternative d'un générateur photovoltaïque par l'utilisation d'un convertisseur DC-AC, il y a plusieurs commandes et son but est d'avoir un signal sinusoïdale.

Dans ce chapitre on va étudier quelque type des convertisseurs DC-DC et DC-AC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC.

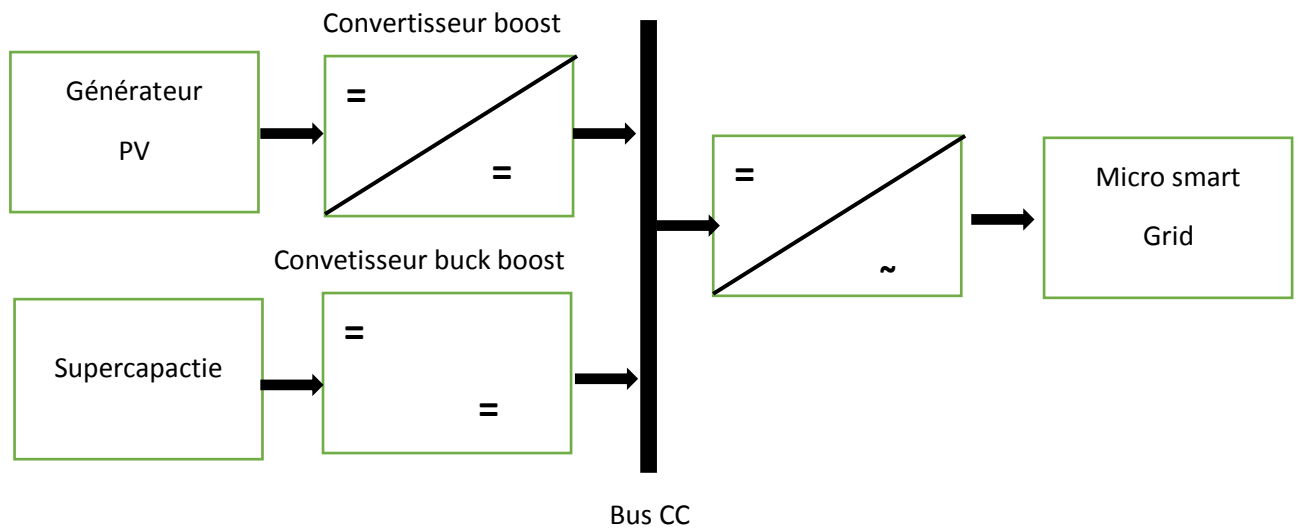


Figure (2.1) : schéma synoptique de l'installation hybride

2.2 Modélisation du système

2.2.1 Modèle du générateur photovoltaïque

L'assemblage de plusieurs modules solaires est appelé : générateur photovoltaïque, ou chaque module se compose de plusieurs cellules, la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant [22] :

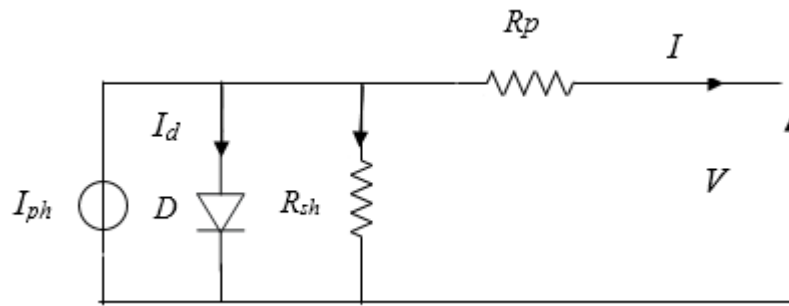


Figure (2.2) : schéma équivalent d'une cellule solaire

Ce dernier est considéré comme le plus classique dans la littérature, ou il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt) (figure (2.2)). Généralement pour les cellules cristallines, la résistance shunt est grande, et le modèle se réduit alors à quatre paramètres (I_{cc} , I_0 , R_p , V_{th}).

La caractéristique (I-V) est modélisée par une équation non linéaire de forme implicite :

$$I = I_{cc} - I_0 \left[\exp \left(V + \frac{R_p I}{V_{th}} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

Pour tracer la caractéristique (I-V), il faut tenir compte trois points de mesure, fournis par le constructeur :

- Le point de court-circuit (I_{cc} , 0).
- Le point à circuit ouvert (0, V_{oc}).
- Le point optimum (I_{op} , V_{op}), où le module délivre sa puissance maximale.

La tension thermique V_{th} et le courant d'obscurité I_0 s'identifient par :

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_p I_{op} - V_{oc}}{\log \left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}} \right)} \quad (2.2)$$

$$I_0 = (I_{cc} - I_{op}) \exp \left[- \frac{V_{op} + R_p I_{op}}{V_{th}} \right] \quad (2.3)$$

Les paramètres du générateur sont liés à ceux du module par les relations suivantes :

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc}(\text{module})$$

$$V_{th} = N_s \cdot V_{th}(\text{module})$$

$$r_s = (N_s / N_p) \cdot R_p(\text{module})$$

$$I_0 = N_p \cdot I_0(\text{module})$$

$$V_{0c} = N_s \cdot V_{0c} (\text{module})$$

$$V_{0p} = N_s \cdot V_{0p} (\text{module})$$

Pour d'autres niveaux d'éclairement et de températures, on fait recours aux lois suivantes :

$$\Delta T = T - T_{\text{ref}} \quad (2.4)$$

$$\Delta T = \alpha \left(\frac{E}{E_{\text{ref}}} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{\text{ref}}} - 1 \right) I_{\text{ccref}}$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - r_s \Delta I \quad (2.6)$$

Donc les nouvelles valeurs des courants et de tensions sous la forme :

$$V = V_{\text{ref}} + \Delta I$$

$$I = I_{\text{ref}} + \Delta I$$

2.2.1.1 Caractéristique I-V

La figure (2.3) suivante représente la caractéristique (courant, tension) tracée pour un éclairement $E=1000\text{W/m}^2$ et une température ambiante $T=25^\circ\text{C}$. On constate que la caractéristique I-V se comporte comme une source de courant constant dans la partie horizontale et comme un générateur de tension dans la partie verticale. On note aussi qu'il existe toujours un point de puissance maximale, située sur le coude de la caractéristique, nous avons choisi le modèle photovoltaïque BP SX 150 de BP Solaire. La série SX de BP Solaire fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 72 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 150 W [31].

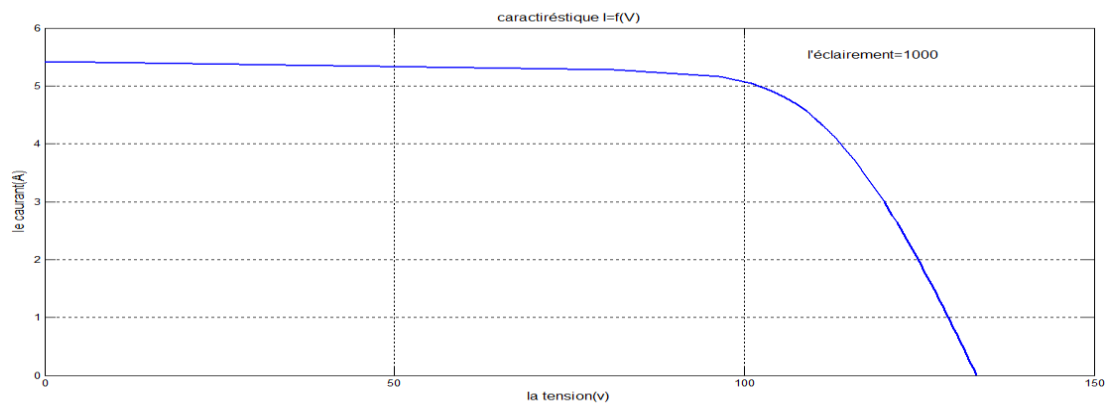


Figure (2.3) : Caractéristiques I-V du module photovoltaïque

2.2.1.2 Influence de l'éclairement et de la température

Avec une température de la jonction constante ($T_c=25^\circ\text{C}$). à différents éclairements (figure (2.4)), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, puisque le courant de court-circuit (I_{CC}) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert (V_{oc}) est une fonction logarithmique[31].

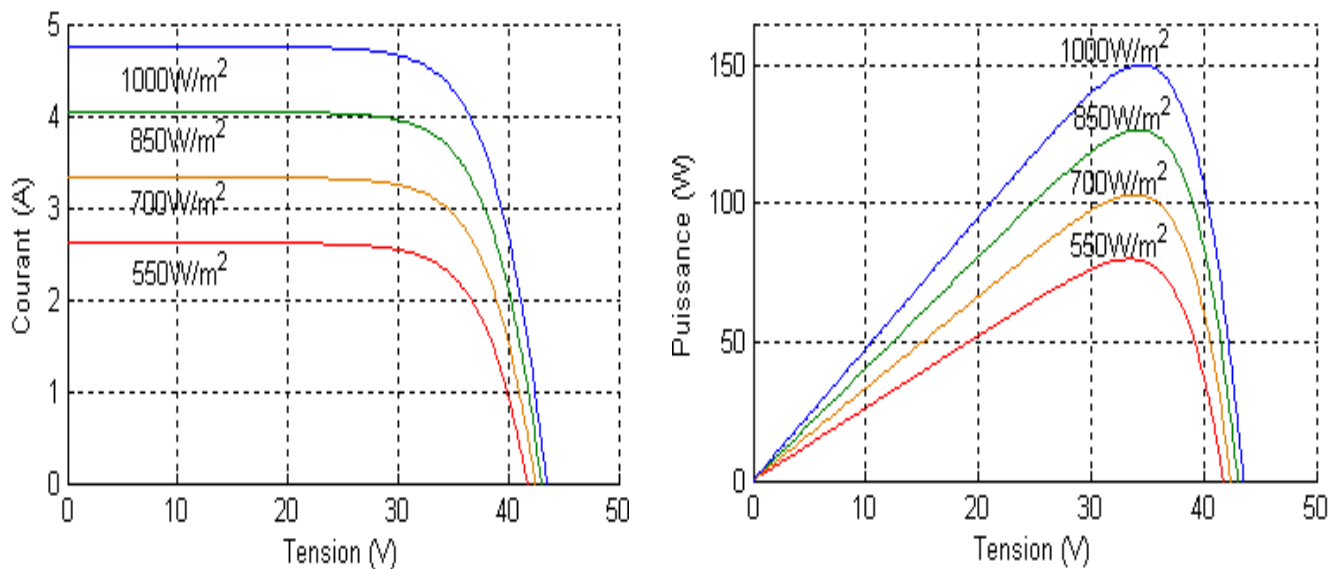


Figure (2.4) : influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ à $T=25^\circ\text{C}$

Puisque l'énergie du band gap décroît avec l'augmentation de la température, plus de photons ont assez d'énergie pour créer des paires électrons-trous. Par conséquent, le courant de court-circuit augmente légèrement [23]. Nous avons effectué une simulation pour un éclairement constant et des différentes températures (fig. (2.5)). Les résultats de simulation montrent que la tension diminue avec l'augmentation de la température alors que le courant augmente légèrement, cela se traduit par une baisse de puissance d'environ de $0.4\%/^\circ\text{C}$.

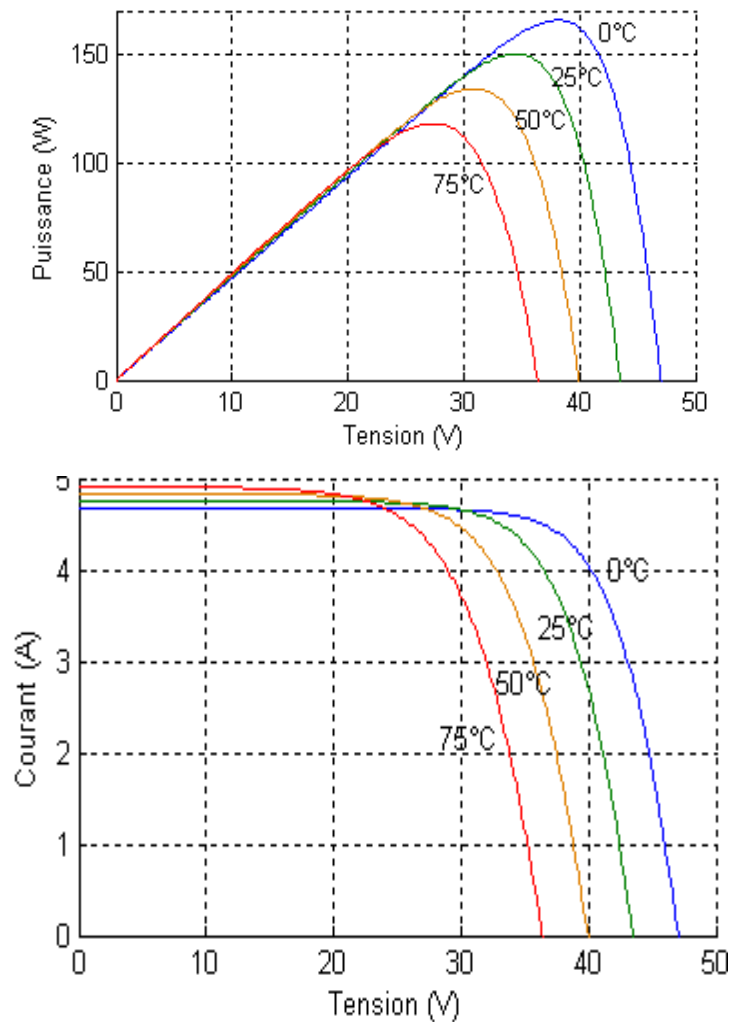


Figure (2.5) : influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à 1000 W/m²

2.2.2 Module du supercondensateur

Les supercondensateurs constituent une nouvelle technologie de stockage d'énergie spécifique supérieure à celle des condensateurs usuels, et de puissance spécifique supérieure à celle des accumulateurs électrochimique.

Les supercondensateurs à couche double électrique, curieusement appelées capacités électrochimiques, ont en fait fonctionnement analogue à celui des capacités électrostatiques classique. Les dites sont typiquement constituées de deux électrodes séparées par un matériau diélectrique. L'énergie est stockée sous forme d'une charge électrique induite au voisinage de l'interface électrodes-diélectrique, par l'application d'une différence de potentiel Le ces deux électrodes. Le rapport de la charge stockage sur la tension appliquée est connu sous le nom de capacitance, ou capacité, et est représentatif de l'aptitude du dispositif à stocker de l'énergie. Les relations de base s'écrivent, pour une capacité linéaire [27] :

$$cc_1 = \frac{Q}{V_1} = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2.7)$$

$$W = \frac{1}{2} c_1 V_1^2 \quad (2.8)$$

Ainsi, l'objectif est d'établir un modèle de connaissance du stockage de l'énergie par supercondensateurs, suffisamment précis et accessible. Le modèle équivalent d'un élément supercondensateurs est un condensateur C_{sc} en série avec une résistance (R_{sc}) [28] (fig. (2.6)). La résistance décrit les pertes ohmiques de la composante tandis que la capacité désigne le comportement du supercondensateur pendant la charge et la décharge [20].

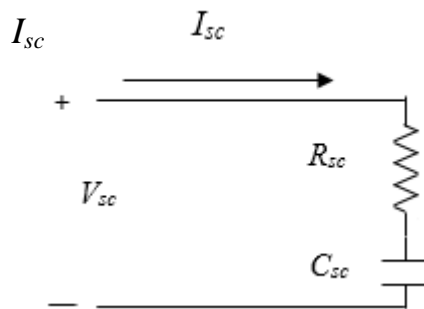


Figure (2.6) : Module d'un supercondensateur

2.2.2.1 Equation électrique de charge et décharge

Pour analyser le circuit du modèle précédent, on admet que le courant du supercondensateur i_{sc} est positif pendant la phase de décharge et il est négatif pendant la phase de charge. La tension aux bornes des supercondensateur peut être présentée par :

$$V_{sc} = V_{c_{sc}} + R_{sc} \cdot i_{sc} \quad (2.9)$$

2.2.2.2 Equation de l'état de charge

L'état de charge, appelé SOC_{sc} , caractérise la quantité d'énergie présente dans les supercondensateur. Il vaut 100% lorsqu'ils sont complètement chargés et 0% lorsqu'ils sont chargés à leur valeur minimale. L'équation (2.16) présente le modèle adopté dans ce travail [29]

$$SOC_{sc} = \frac{V_{sc}^2}{V_{scmax}^2} \quad (2.10)$$

Pour tester ce modèle, le graphe (2.7) illustre les tracés de la tension du supercondensateur et son état de charge lors du passage en créneau du courant de décharge de 0 à 20A. Comme on peut le constater, la tension et l'état de charge diminuent. Il est à noter que la tension aux

bornes du supercondensateur peut être développée en deux termes : une composante capacitive, associée à l'évolution de l'énergie stockée dans l'élément, et une composante résistive, liée à la résistance série de l'élément. Le profil de charge sera similaire, mais dans un sens inverse de telle sorte que la tension aux bornes de la supercapacité augmente avec le temps de charge [55].

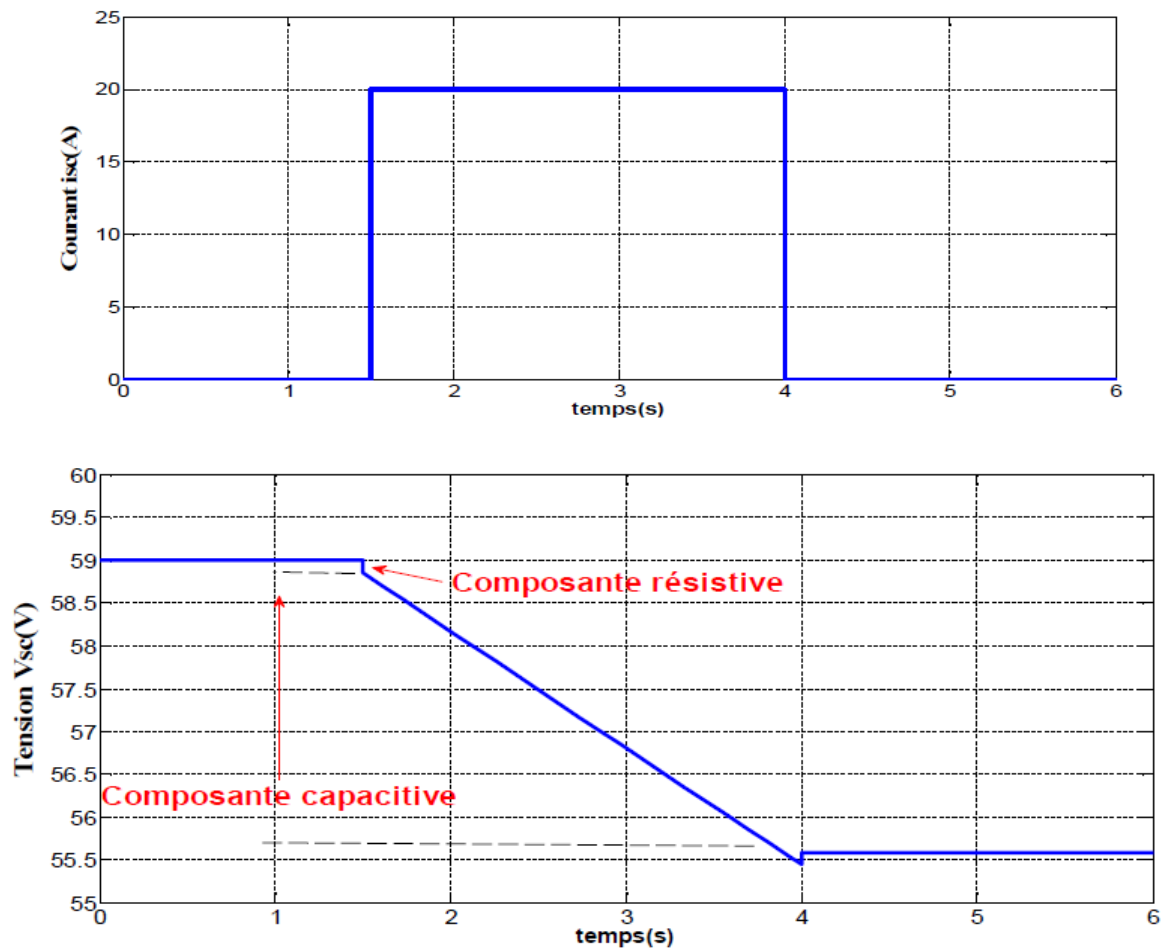


Figure (2.7) : Tension, courant et l'état de charge des supercondensateurs en cas de décharge

2.2.3 Modèles des convertisseurs statiques

Dans beaucoup de cas, nous avons intérêt à transformer le système original en un système continu qui représente macroscopiquement au mieux les comportements dynamiques et statiques du circuit. A cet effet, le comportement moyen est tout à fait adapté. Le modèle dit « moyen » associe trouve un vaste champ d'applications que ce soit en commande, simulation ou encore en analyse des modes [30]. Le modèle moyen permet de répondre à trois exigences essentielles :

- Une simplicité de mise en œuvre et d'utilisation.
- Une précision suffisante dans son domaine de validité.
- La possibilité d'utilisation en boucle fermée : possibilité éventuelle de passer en fonction de transfert. Pour toutes ces raisons, le modèle moyen des convertisseurs statiques est adopté :

2.2.3.1 Modèle moyen du convertisseur survolteur du GPV

La figure (2.8) illustre le synoptique du hacheur survolteur pour la déduction du modèle d'état moyen [24]. Le transistor étant fermé de 0 à αT et ouvert de αT à T , avec :

- α est le rapport cyclique.
- T est la période de découpage

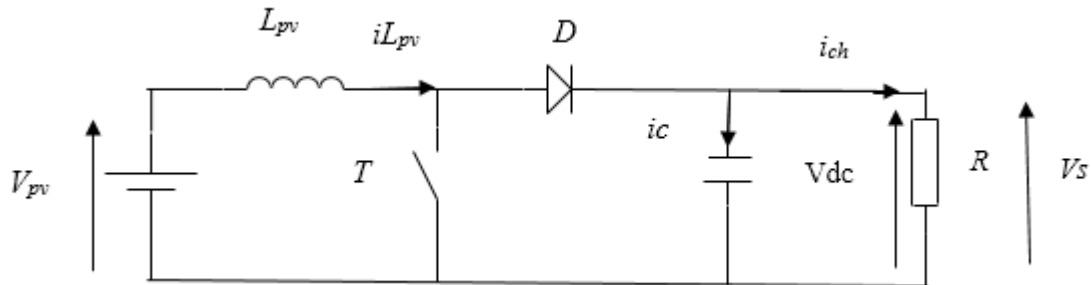


Figure (2.8) : Le schéma de principe d'un hacheur survolteurs

Dans de tels systèmes, l'ordre d'équations d'états est égal au nombre des éléments de stockage (dans présent $n=2$) [24].

Dans le cas ou système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ y = C_1 \cdot X \end{cases} \quad (2.11)$$

Ou X est le vecteur d'état, compos du courant de la bobine i_{Lpv} et la tension de sortie V_{dc} :

$$X = [i_{Lpv}, V_{dc}] \quad (2.12)$$

u : vecteur de commande, A : matrice d'état, B : matrice d'entrée et C_1 : matrice de sortie.

Séquences de fonctionnement et équations d'état :

Première séquence de conduction $[0-\alpha T]$

Le transistor est en position "on" et la diode en position "off", et le schéma de principe devient :

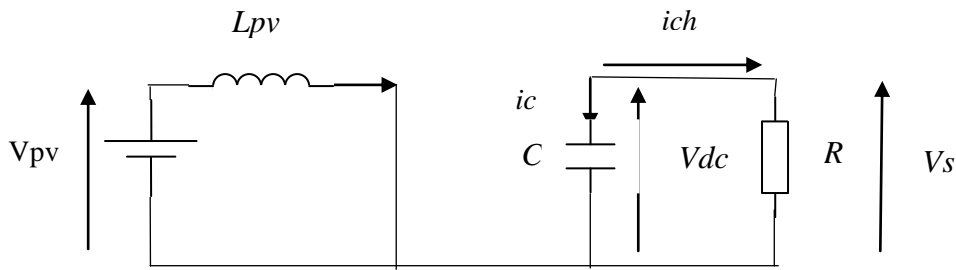


Figure (2.9) : schéma de principe de la première séquence de conduction

Les équations dynamique des éléments de stockage (bobine, condensateur) s'écrivent :

$$V_{pv} = L_{pv} \frac{di_{Lpv}}{dt} \quad (2.13)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{V_{pv}}{L_{pv}} \quad (2.14)$$

$$V_{dc} = \frac{1}{c} \int i_c dt \quad (2.15)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{c} i_c \quad (2.16)$$

$$i_c = -i_{ch} \quad (2.17)$$

Donc :

$$\dot{x}_2 = -\frac{V_{dc}}{Rc} \quad (2.18)$$

$$\text{D'où : } \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{Rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (2.19)$$

Où peut être écrit sous la forme :

$$\dot{X} = A_1 X + B_1 V_e \quad (2.20)$$

$$V_s = C_1 X \quad (2.21)$$

$$\text{Avec : } C_1 = [0 \quad 1]$$

-Deuxième séquence de conduction : [α T-T]

Le transistor est en position ‘‘off’’ et la diode en position ‘‘ON’’, et le schéma de principe devient :

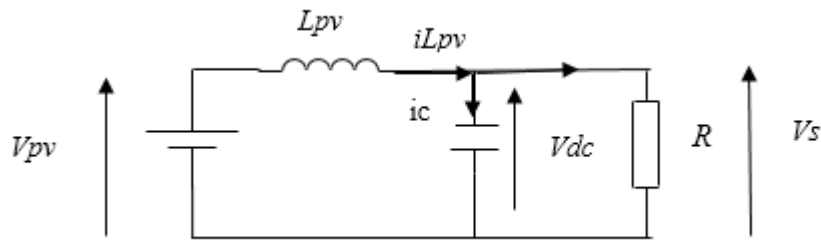


Figure (2.10) : le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction

Les équations des deux mailles fournissent :

$$L_{pv} \frac{di_{Lpv}}{dt} = V_{pv} - V_{dc} \quad (2.22)$$

$$c \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{Lpv} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (2.23)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{V_{pv}}{L_{pv}} - \frac{1}{L_{pv}} x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{c} x_1 - \frac{1}{Rc} x_2 \end{cases} \quad (2.24)$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_{pv}} \\ \frac{1}{c} & -\frac{1}{Rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (2.25)$$

Qui peut être mit sous la forme :

$$\dot{X}_1 = A_2 X + B_2 V_e \quad (2.26)$$

$$V_s = C_1 X \quad (2.27)$$

Modèle moyen :

A partir des équations (2.19) et (2.25), on peut déduire la forme d'état moyenne de X et Y pour toute la période :

$$\dot{X}_1 = (A_1 X + B_1 V_e)\alpha + (A_2 X + B_2 V_e)(1 - \alpha) \tag{2.28}$$

$$V_s = (C_1 \alpha + C_1(1 - \alpha))X \tag{2.29}$$

Avec :

$$\begin{cases} A = A_1 \alpha + A_2(1 - \alpha) \\ B = B_1 \alpha + B_2(1 - \alpha) \end{cases} \tag{2.30}$$

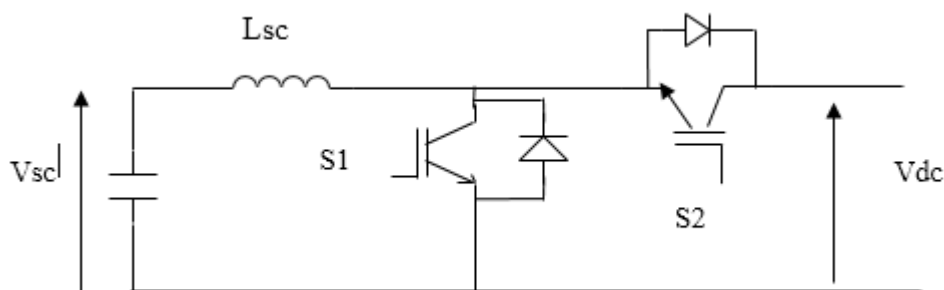
En conclusion : le modèle moyen du hacheur survolteur se met sous :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-\alpha}{L_{pv}} X_2 + \frac{1}{L_{pv}} u \\ \dot{x}_2 = \frac{1-\alpha}{c} X_1 - \frac{1}{Rc} X_2 \end{cases} \tag{2.31}$$

2.2.3.2 Modèle moyen du convertisseur buck boost de la supercondansateur

Dans le cas du l'hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur PV) vers le bus continu.

Dans le cas du l'hacheur utilisé pour la charge/décharge des supercondensateur, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés comme l'indique la Figure (2.11)



[25].

Figure (2.11) : convertisseur associe aux supercondensateurs

Séquences de fonctionnement et équations d'état :

De même, le modèle moyen du convertisseur réversible en courant de la suprecapa est adopté. Ce dernier permettra de tester les algorithmes de commande dans des modèles continus du système global. On distingue les deux phases de commutation des IGBT, représentés par un fil lorsqu'ils sont fermés et l'absence de connexion lorsqu'ils sont ouverts. Ainsi, la période de découpage (T_{pwm}) est scindée en deux [26],[19]

-Première séquence de conduction $t \in [0 ; \alpha_{sc} \cdot T_{Pwm}]$

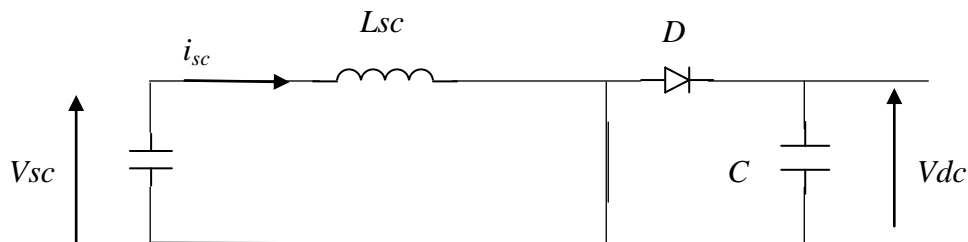


Figure (2.12) : le schéma de principe de la première séquence de conduction

L'équation dynamique du courant de la bobine s'écrit :

$$V_{sc} = L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} \tag{2.32}$$

-Deuxième séquence de conduction $t \in [\alpha_{sc} \cdot T_{Pwm} ; T_{Pwm}]$

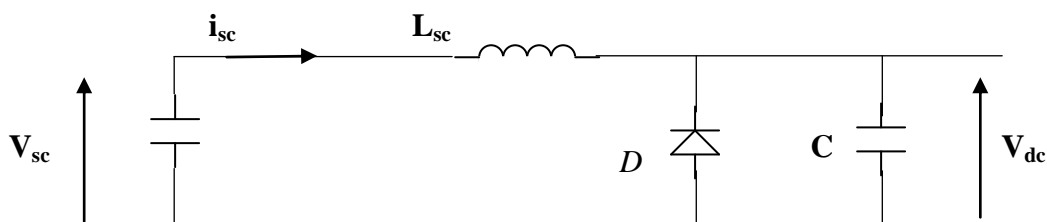


Figure (2.13) : le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction

La relation dynamique reliant tension du suprecondensateur et le bus est donnée par :

$$V_{sc} = L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} + V_{dc} \tag{2.33}$$

La moyenne temporelle de ces deux équations donne ainsi un modèle moyen de ce convertisseur :

$$L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = V_{sc} - (1 - \alpha_{sc})V_{dc}$$

(2.34)

Le modèle de l'équation (2.34) reproduit le comportement de la supercondensateur en cas de la charge ($i_{sc} < 0$) et en décharge ($i_{sc} > 0$).

Remarque : Le convertisseur back boost de la batterie est modélisé de façon analogue à celui de la supercondensateur:

$$L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha_{bat})V_{dc}$$

(2.35)

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un SEH constitué par des panneaux photovoltaïques, et un système de stockage. Cette modélisation nous permettra de prédire les performances du système une fois les approches de commande par platitude au chapitre suivant sont appliquées.

Chapitre 3 : commande du système et résultat de simulation

3.1 Introduction

Ce chapitre propose un design pour une centrale électrique à base des énergies renouvelable hybride qui est alimenté par une source photovoltaïque (PV) avec un dispositif de stockage (supercondesateur (SC)). Le système est adapté pour une application autonome de production.

Le photovoltaïque est utilisé comme générateur principal, et la SC comme une source auxiliaire pour raisons de stockage (Transitoire et l'état d'équilibre).

Pour applications de forte puissance, convertisseurs élévateurs parallèle et convertisseurs bidirectionnels parallèles sont mises en œuvre en tant que convertisseur de PV et un dispositif de stockage, respectivement.. En utilisant une approche non linéaire qui se base sur la notion de platitude, nous proposons une solution simple à la dynamique, stabilisation, et la robustesse des problèmes dans les systèmes des puissances hybride.

3.2 Topologie de système étudié

3.2.1 Architecture à bus continu

Dans le système hybride présenté dans la figure suivante, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu.

. Les générateurs sont connectés via un jeu de barre continue pour alimenter une charge autonome. L'application est destinée au micro smart grid.

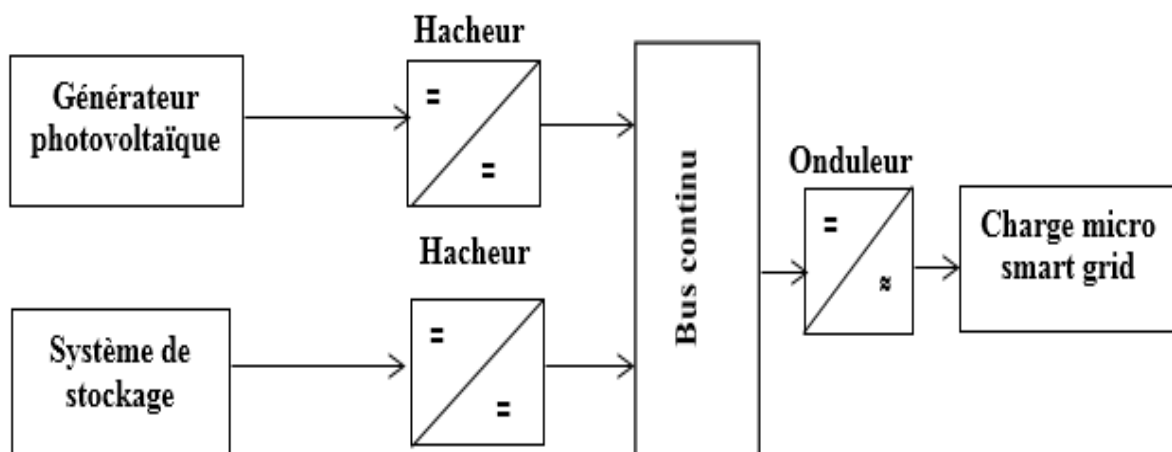


Figure (3.1) : configuration du système hybride à bus continu

3.2.2 Commande MPPT

La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) (The maximum power point tracker) est nécessaire pour extraire le maximum de puissance du module PV. En général, un convertisseur DC/DC est placé entre la PV et la charge, et en faisant varier le rapport cyclique du point de fonctionnement [35].

3.2.2.1 Les méthodes de poursuite de MPP

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [35].

3.2.2.2 Méthodes a contre réaction de tension

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes [36] :

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode a tension de référence en fonction de V_{oc}
- Tension de référence extrême (Cellule pilote)

3.2.3 Méthodes a contre réaction de courant

Cette méthode utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [37]. Permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance [36]

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit I_{sc}
- Méthode de maximisation du courant de sortie

3.2.3 Méthodes a contre réaction de puissance

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation

permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donné on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintient cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé [36].

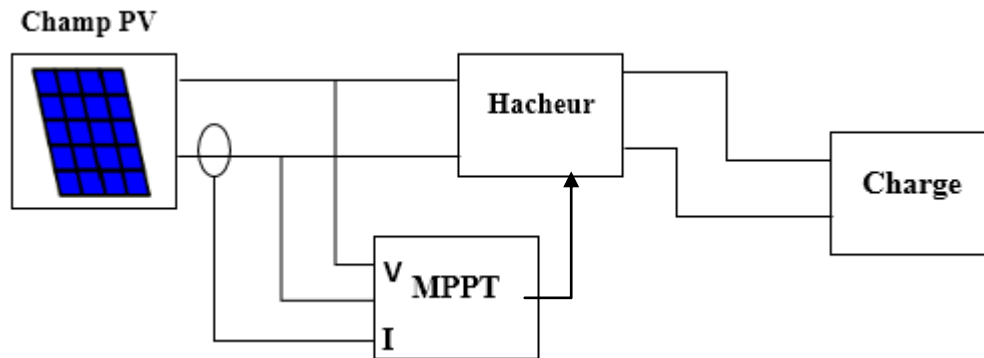


Figure (3.2) : Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur DC-DC commandé par la MPPT

3.2.4 CENTRALE SOLAIRE

3.2.4.1 Structure des Convertisseurs électriques étudiées

Les convertisseurs à Basse tension et haute intensité (puissance) sont nécessaires pour les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque et la Banque SC. Un convertisseur élévateur classique est souvent utilisé comme un Convertisseur PV [49], et un convertisseur classique de deux-quadrants (bidirectionnel) est souvent utilisé comme un SC ou comme un convertisseur batterie [47]. Cependant, les convertisseurs classiques seront limités lorsque les augmentations de puissance ou à des rapports de « step-up » plus élevés. Par conséquent, l'utilisation des convertisseurs d'une puissance parallèle (convertisseurs multi-phases en parallèle) avec entrelacement peut offrir de meilleures performances en termes de dynamique [50] et réduire la taille des inductances et des condensateurs.

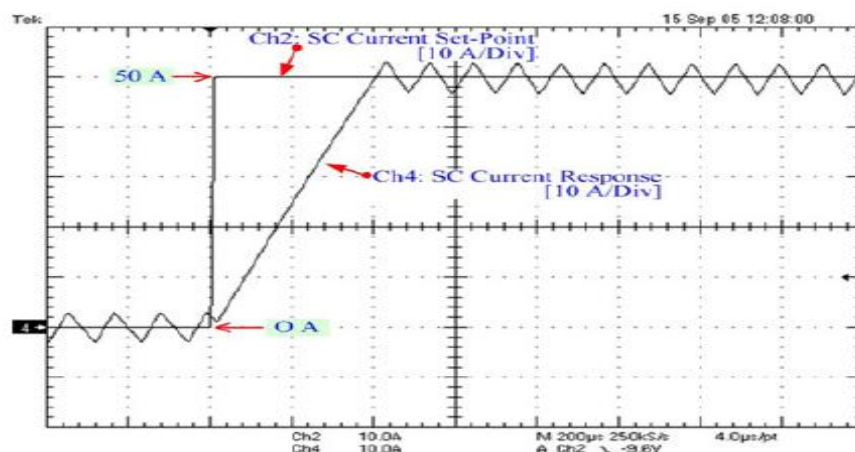


Figure (3.3) : SC réponse actuelle à un 0-50 A l'étape (déchargement).

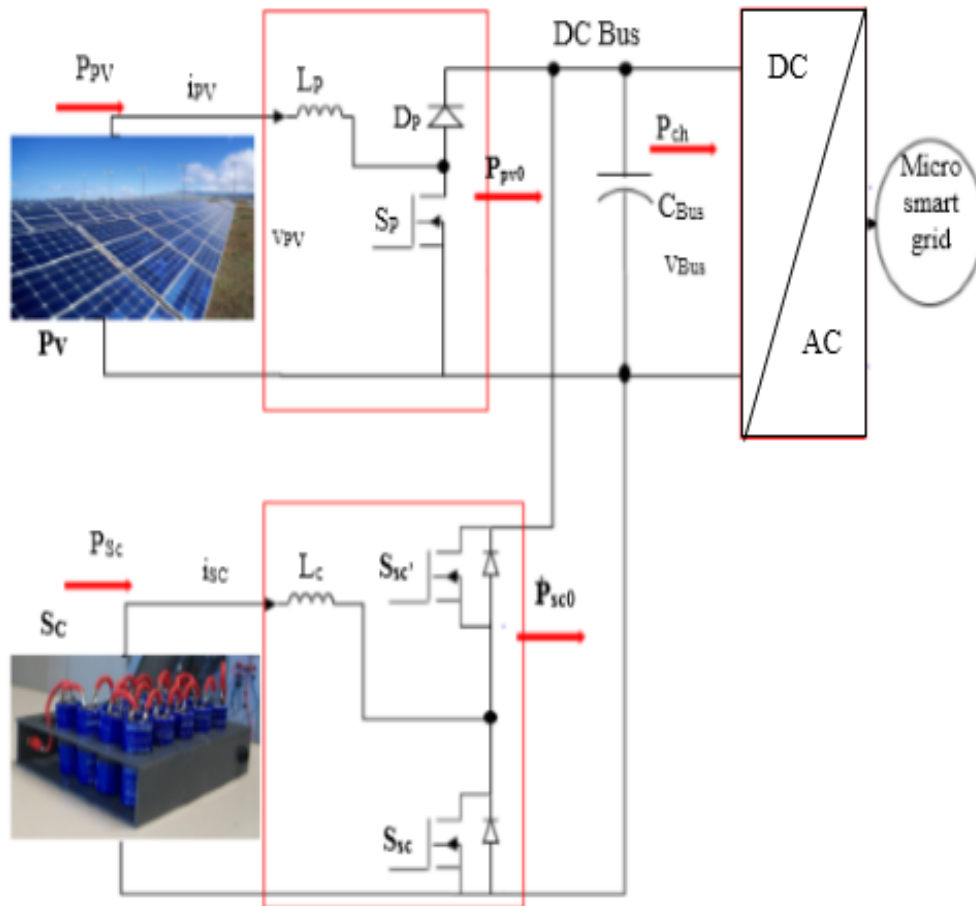


Figure (3.4) : Projet de schéma de circuit du système de production distribuée fournie par un PV et SC

Ensuite, La figure (3.4) représente la structure de la source hybride proposée. Les convertisseurs PV combinent des convertisseurs à quatre-phares éleveurs parallèles avec entrelacement, et le Convertisseur de SC emploie des convertisseurs bidirectionnels parallèles à quatre phases avec entrelacement.

3.2.4.2 La réglementation des Boucles de la centrale électrique proposée

Pour la sécurité et la dynamique, les convertisseurs photovoltaïques et SC sont principalement contrôlés par des boucles de régulation de courant intérieures (ou boucles de régulation de puissance), comme représenté sur les figures. (3.5) et (3.7) [48]. Ces boucles de commande de puissance sont alimentées par deux signaux de référence : la référence de SC de puissance P_{SCREF} et la référence de puissance PV P_{PVREF} , générées par les lois de contrôle présentées plus tard.

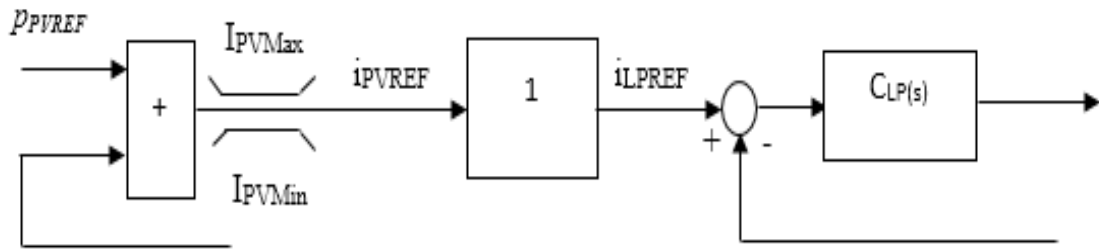


Figure (3.5) : Photovoltaïque boucle de commande de puissance.

Pour le contrôle de l'énergie photovoltaïque, un p_{PVREF} de référence de puissance PV est divisée par la tension photovoltaïque V_{PV} mesurée, résultant en un courant de référence PV i_{PVREF} . Pour la boucle de commande de puissance de SC, un p_{SCREF} de référence de puissance de SC est divisé par le SC mesurée V_{SC} tension limitée et pour maintenir la tension de SC dans un intervalle $[V_{SCMin}, V_{SCMax}]$, selon la remarque 2 par le SC la fonction de limitation de courant. Ce calcul aboutit à une SC i_{SCREF} de référence actuelle [48].

3.2.4.3 Modèle Mathématique de la centrale

Nous supposons que les courants de PV et SC suivent leurs valeurs de référence parfaitement. En conséquence,

$$i_{PV} = i_{PVREF} = \frac{p_{PV}}{v_{PV}} = \frac{p_{PVREF}}{v_{PV}} \quad (3.1)$$

$$i_{SC} = i_{SCREF} = \frac{p_{SC}}{v_{SC}} = \frac{p_{SCREF}}{v_{SC}} \quad (3.2)$$

Nous considérons juste les pertes statiques dans ces convertisseurs, ainsi que R_{PV} et R_{SC} représentent des pertes statiques dans les convertisseurs photovoltaïques et SC, respectivement. Maintenant, le photovoltaïque et la fonction de dispositif de stockage de SC en tant que sources de courant commandées connectées avec l'équivalent résistance en série que l'on appelle un modèle d'ordre réduit [51].

Le DC-bus E_{Bus} d'énergie capacitif et supercondensateur E_{SC} de l'énergie peut être écrite comme

$$E_{Bus} = \frac{1}{2} C_{Bus} v_{Bus}^2 \quad (3.3)$$

$$E_{SC} = \frac{1}{2} C_{SC} v_{SC}^2 \quad (3.4)$$

Le total ET de l'énergie électrostatique emmagasinée dans le condensateur du bus dc C_{BUS} et le SC C_{SC} peuvent aussi être écrites comme

$$E_T = \frac{1}{2} C_{BUS} v_{BUS}^2 + \frac{1}{2} C_{SC} v_{SC}^2 \quad (3.5)$$

Notez que le total de l'énergie électrostatique E_T est presque égale à l'énergie stockée dans le SC C_{SC} parce que la taille de la SC est C_{SC} beaucoup plus grande que la taille du bus dc du condensateur C_{BUS} .

La dérivé de DC-bus E_{BUS} d'énergie capacitif est donné par rapport P_{PVO} , P_{SCO} et P_{ch} par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{E}_{BUS} = p_{PVo} + p_{SCO} - p_{ch} \quad (3.6)$$

Où

$$p_{PVo} = p_{PV} - r_{PV} \left(\frac{p_{PV}}{v_{PV}} \right)^2 \quad (3.7)$$

$$p_{SCO} = p_{SC} - r_{SC} \left(\frac{p_{SC}}{v_{SC}} \right)^2 \quad (3.8)$$

$$p_{ch} = v_{BUS} \cdot i_{ch} \quad (3.9)$$

On notera que la dérivé de l'énergie capacitif de jeu de barre dc « dE_{BUS} / dt » est le flux d'énergie dans le condensateur P_{BUS} DC-bus. Cela signifie que E_{BUS} est égal à $Debus / dt$ (\dot{E}_{BUS}) (voir figure (3.3)).

3.3 Cahier de charge

3.3.1 Définition et catégories

Les réseaux intelligents ou « smart grid » sont des réseaux d'électricité qui, grâce à des technologies informatiques, ajustent les flux d'électricité entre fournisseurs et consommateurs. En collectant des informations sur l'état du réseau, les smart grid contribuent à une adéquation

entre production, distribution et consommation. Il est nécessaire de différencier smart grid et compteur communicant (ou « smart meter »), qui renseigne le consommateur sur sa demande en électricité. « Smart grid » est une appellation générale pour l'ensemble des technologies et des infrastructures « intelligentes » installées. Chez le particulier, le compteur communicant est une première étape dans la mise en place des smart grid.

Les réseaux intelligents peuvent être définis selon quatre caractéristiques en matière de :

- flexibilité : ils permettent de gérer plus finement l'équilibre entre production et consommation ;
- fiabilité : ils améliorent l'efficacité et la sécurité des réseaux ;
- accessibilité : ils favorisent l'intégration des sources d'énergies renouvelables sur l'ensemble du réseau ;
- économie : ils apportent, grâce à une meilleure gestion du système, des économies d'énergie et une diminution des coûts (à la production comme à la consommation).

3.3.2 Fonctionnement

Au sens large, un réseau intelligent associe l'infrastructure électrique aux technologies numériques qui analysent et transmettent l'information reçue. Ces technologies sont utilisées à tous les niveaux du réseau : production, transport, distribution et consommation.

- Un contrôle des flux en temps réel : des capteurs installés sur l'ensemble du réseau indiquent instantanément les flux électriques et les niveaux de consommation. Les opérateurs du réseau peuvent alors réorienter les flux énergétiques en fonction de la demande et envoyer des signaux de prix aux particuliers pour adapter leur consommation (volontairement ou automatiquement).
- L'interopérabilité des réseaux : l'ensemble du réseau électrique comprend le réseau de transport et le réseau de distribution. Le premier relie les sites de production d'électricité aux zones de consommation : ce sont les grands axes qui quadrillent le territoire. Le réseau de distribution s'apparente aux axes secondaires. Il achemine l'électricité jusqu'aux consommateurs finaux. Par l'échange instantané d'informations, les smart grids favorise une interopérabilité entre les gestionnaires du réseau de transport et ceux du réseau de distribution.

- L'intégration des énergies renouvelables au réseau : les réseaux intelligents reposent sur un système d'information qui permet de prévoir à court et à long terme le niveau de production et de consommation. Les énergies renouvelables qui fonctionnent souvent par intermittence et de façon peu prévisible (ex : l'éolien) peuvent ainsi être mieux gérées.
- Une gestion plus responsable des consommations individuelle : les compteurs communicants (ou compteurs évolués, « Linky » pour l'électricité) sont les premières versions d'application du réseau intelligent. Installés chez les consommateurs, ils fournissent des informations sur les prix, les heures de pointe de consommation, la qualité et le niveau de consommation d'électricité du foyer. Les consommateurs peuvent alors réguler eux-mêmes leur consommation au cours de la journée. De leur côté, les opérateurs du réseau peuvent détecter plus vite les pannes.

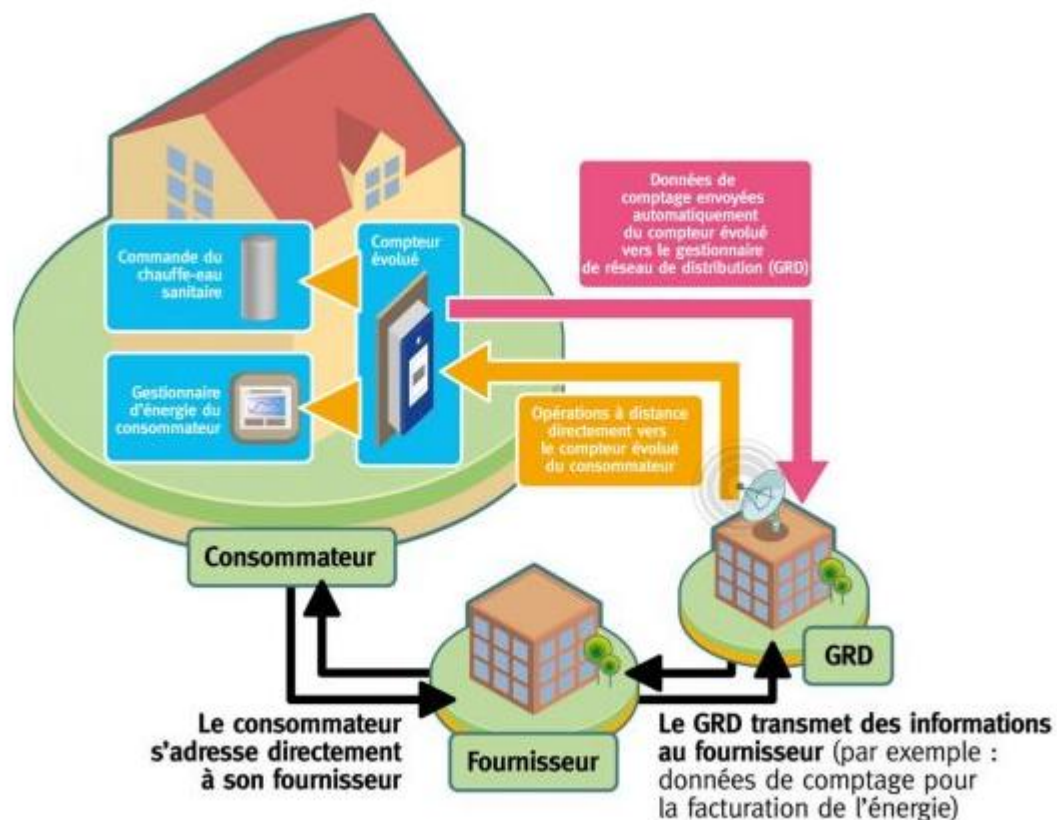


Figure (3.6) : Principe des compteurs électriques évolués (Commission de régulation de l'énergie)

3.3.3 En jeux par rapport à l'énergi

À l'heure actuelle, les réseaux électriques doivent faire face à de nouveaux besoins en énergie, avec notamment le développement de la climatisation, des appareils électroniques ou du chauffage électrique. Cette hausse devrait être amplifiée par de nouveaux usages tels

que la voiture électrique ou les pompes à chaleur. Les smart grid visent à apporter une réponse à ces contraintes.

3.3.4 Des avantages économiques et environnementaux

Les smart grid améliorent la sécurité des réseaux électriques. En équilibrant l'offre et la demande, ils évitent le suréquipement des moyens de production et permettent une utilisation plus adaptée des moyens de stockage de l'électricité, disponibles de manière limitée. Les réseaux intelligents augmentent aussi l'efficacité énergétique globale : ils réduisent les pics de consommation, ce qui atténue les risques de panne généralisée. Enfin, ils limitent l'impact environnemental de la production d'électricité en réduisant les pertes et en intégrant mieux les énergies renouvelables.

3.3.5 Les limites dans la mise en œuvre

Cependant, le coût des investissements reste élevé. En effet, les smart grids doivent être implantés sur l'ensemble du réseau et impliquer tous les acteurs pour être efficaces. L'autre obstacle est la diversité des acteurs, car ils doivent mettre au point des systèmes communicants variés avec des logiques convergentes. De plus, les données recueillies sont complexes à gérer et à stocker, compte tenu de l'importante quantité d'informations à traiter. Enfin, les informations sur les horaires ou les activités des consommateurs et des producteurs sont confidentielles. Des normes sur la protection des données doivent être appliquées.

Tableau (3.1) : Paramètre de la source photovoltaïque

Parameter	Value
PUISSANCE CRETE	300W
NOMBRE DES PANEUX EN PARALLELE	4
TENSION DE CIRCUIT OUVERT	45.3V
TENSION NOMINAL	36.9V
COURANT DE COURT CIRCUIT	8.13A
PUISSANCE DE SYSTÈME PV	1200W

Tableau (3.2) Paramètre de stockage des supercondensateurs

Parameter	Value
TENSION DE BANC MAXIMAL	48V
CAPACITÉ DE BANC	1200-67 F
TENSION MAXIMAL DE CELLULE	2.7 V

Le profil de la charge et représenté dans la figure (3.12).

3.3.6 Système autonome

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.

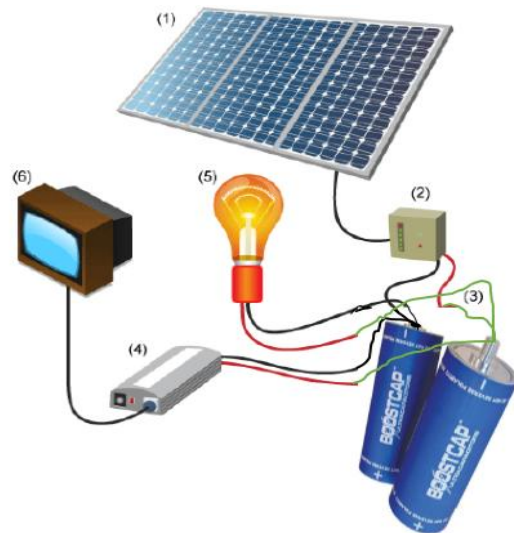


Figure (3.17) Exemple d'un système autonome

3.4. Contrôle d'une centrale

3.4.1 Bilan énergétique

Dans le système proposé, représentée sur la figure (3.4), il existe deux variables de tension (ou deux variables de l'énergie) pour être réglés.

- 1) Le E_{Bus} d'énergie dc-bus est la variable la plus importante.
- 2) Le SC E_{SC} énergétique de stockage est le prochain le plus important.

Par conséquent, nous proposons SC utilisant, qui sont la plus rapide source d'énergie dans le système proposé, pour fournir l'énergie pour le bus de courant continu [48]. En fait, nous

prévoyons pour fonctionnaliser le photovoltaïque en fournissant de l'énergie que pour charger le SC C_{sc} . Cependant, pendant la charge, l'énergie de la cellule photovoltaïque circule à travers le bus en courant continu à la banque de SC. Pour cette raison, le générateur photovoltaïque est mathématiquement actionné pour fournir de l'énergie à la fois pour le DC-bus condensateur C_{BUS} et la SC C_{SC} pour les garder chargée.

3.4.2 Différentiel planéité de la propriété

Laissez-nous d'abord de révéler une propriété physique, utilisé pour établir le système planéité [44], [45], [52], ce sera le concept principal nos générations de référence. Les sorties plat y , l'entrée de commande les variables u , et les variables d'état x sont définis comme

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{Bus} \\ E_T \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{SCREF} \\ p_{PVDEM} \end{bmatrix};$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{Bus} \\ v_{SC} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

p_{PVDEM} où est la demande de puissance photovoltaïque. Il est généré par le dispositif de commande externe. Ce signal enverra à un MPPT pour à saturer la puissance maximale PV. Il devient la puissance PV p_{PVREF} référence, présentée ci-après.

À partir de (3.3) et (3.6), la tension continue V_{bus} et DC-bus (définie comme un état x_1 variable) et la SC power (définie en tant que variable d'entrée de commande u_1) peut être exprimée comme une fonction algébrique

$$x_1 = \sqrt{\frac{2y_1}{C_{Bus}}} = \varphi_1(y_1) \quad (3.11)$$

$$u_1 = 2p_{SCLim} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\dot{y}_1 + i_{ch} \cdot \varphi_1(y_1) - p_{PV0}}{p_{SCLim}} \right)} \right] = \psi_1(y_1, \dot{y}_1) = p_{SCREF} \quad (3.12)$$

$$p_{SCLim} = \frac{v_{SC}^2}{4r_{SC}} \quad (3.13)$$

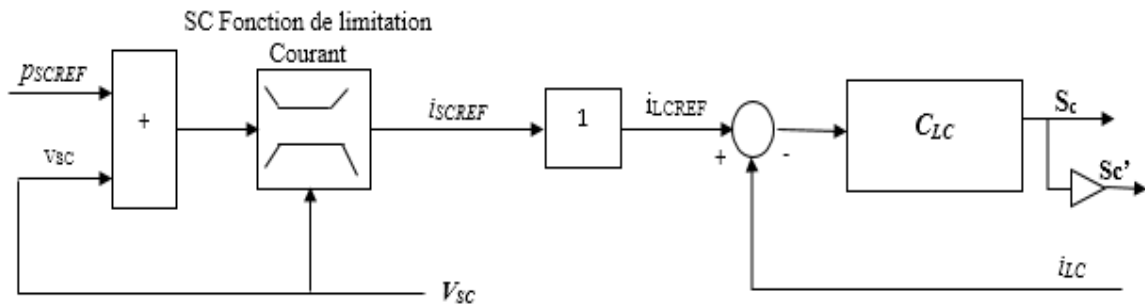


Figure (3.7) SC boucle de commande de puissance.

p_{SCLim} où la puissance maximale est limitée par le convertisseur SC. A partir de (3.5) et (3.6), le V_{SC} tension de SC (définie comme un état variable x_2) et le p_{PV} photovoltaïque (défini comme une entrée de commande la variable u_2) peut être exprimée comme une fonction algébrique

$$x_2 = \sqrt{\frac{2(y_2 - y_1)}{C_{SC}}} = \varphi_2(y_1, y_2) \quad (3.14)$$

$$u_2 = 2p_{PVLim} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\dot{y}_2 + i_{ch} \cdot \varphi_1(y_1)}{p_{PVLim}} \right)} \right] = \psi_2(y_1, \dot{y}_2) = p_{PVDEM} \quad (3.15)$$

$$p_{PVLim} = \frac{v_{PV}^2}{4r_{PV}} \quad (3.16)$$

p_{PVLim} où la puissance maximale est limitée à partir de la PV convertisseur.

Il est évident que $x_1 = \varphi_1(y_1)$, $x_2 = \varphi_2(y_1, y_2) = \psi_1(y_1, \dot{y}_2)$ et $u_2 = \psi_2(y_1, \dot{y}_2)$.

Par conséquent, le PV / SC la centrale peut être considéré comme un système à plat [60].

3.4.3 Loi sur le contrôle et la stabilité

Concentrons-nous maintenant notre attention sur la conception de la rétroaction à suivre une trajectoire de référence de l'énergie dc-bus y_{1REF} et une énergie totale référence y_{2REF}

Nous visons à concevoir une loi de retours tels que le tracking error

$$(y_1 - y_{1REF}, y_2 - y_{2REF}) \text{ Asymptotiquement disparaît.}$$

Ainsi, le degré relatif du premier v_1 d'entrée et la seconde entrée v_2 est 1. Les lois de contrôle proposées [55] sont

$$(\dot{y}_1 - \dot{y}_{1REF}) + K_{11}(y_1 - y_{1REF}) = 0 \tag{3.17}$$

$$(\dot{y}_2 - \dot{y}_{2REF}) + K_{21}(y_2 - y_{2REF}) = 0 \tag{3.18}$$

Parce que le SC peut stocker énorme quantité d'énergie, et du supercondensateur énergie est définie comme une variable dynamique plus lente que la variable d'énergie du bus-dc, pour compenser effets non idéales, un terme intégral est ajouté à la loi de commande (3.17). Ce rendement

$$v_1 = \dot{y}_1 = \dot{y}_{1REF} + K_{11}(y_{1REF} - y_1) + K_{12} \int_0^t (y_{1REF} - y_1) dt \tag{3.19}$$

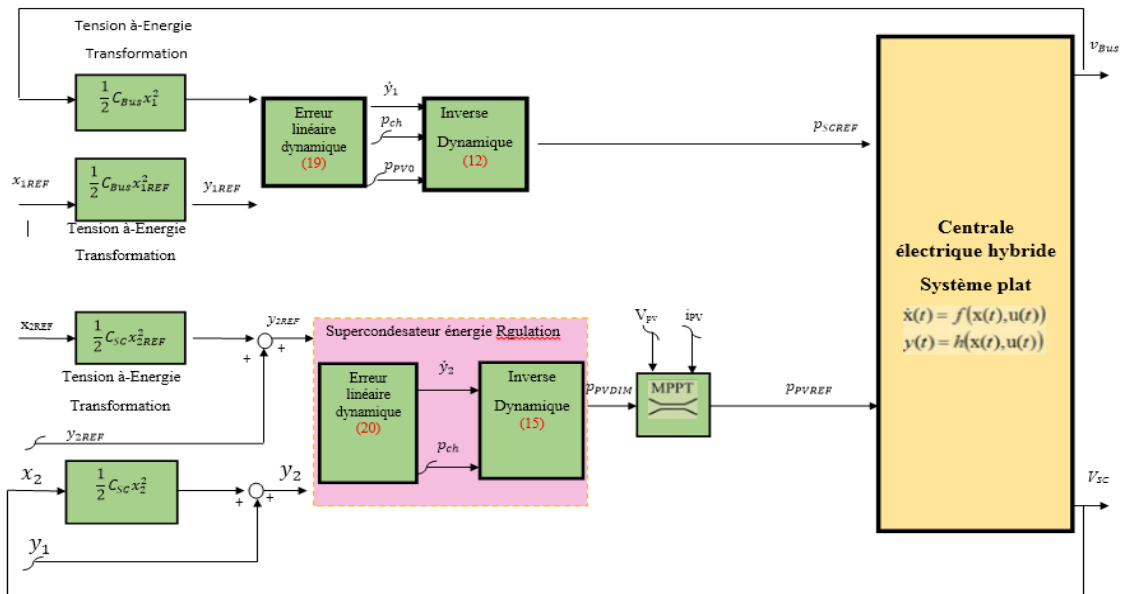


Figure (3.8) : Commande multi variable d'une centrale électrique hybride PV / SC basée sur une approche de planéité différentiel...

$$v_2 = \dot{y}_2 = \dot{y}_{2REF} + K_{21}(y_{2REF} - y_2) \tag{3.20}$$

À partir de (3.19), si l'on définit $e_1 = y_1 - y_{1REF}$, $K_{11} = 2\zeta\omega_n$, et $K_{21} = \omega_n^2$, on obtient

$$\ddot{e}_1 + 2\zeta\omega_n \dot{e}_1 + \omega_n^2 e_1 = 0$$

(3.21)

En substituant l'expression de \dot{y}_1 à partir de (3.19) dans (3.12) donne l'équation de la boucle fermée état statique puissance évaluations de SC.

À partir de (3.20), si l'on définit e_2 , nous obtenir

$$\tau_s \dot{e}_2 + e_2 = 0$$

(3.22)

En substituant l'expression de \dot{y}_2 (3.20) dans (3.15) donne l'équation de la boucle fermée état statique puissance évaluations de PV.

Il est clair que le système de contrôle soit asymptotiquement stable, $K_{12} > 0$, et $K_{21} > 0$. Cependant, basé sur la puissance électronique ω_s de fréquence et structure de changement constants de régulation en cascade, la boucle d'avertissement externe (ici le contrôle d'énergie de C.C-autobus) doit fonctionner $\omega_e \ll \omega_c \ll \omega_s$ de fréquence de coupure, où le ω_c est une fréquence de coupure de la boucle de puissance de Sc. Une fois les sorties plates sont stabilisés, le système entier devient exponentiellement écurie parce que toutes les variables du système sont exprimées en termes des sorties plates [52].

Dans la Figure (3.8), l'algorithme de commande proposée du renouvelable la centrale d'énergie, comme indiqué plus haut, est représenté. Le DC-bus le droit de contrôle de l'énergie génère une référence de puissance de SC p_{SCREF} ($= u_1$, reportez-vous à (3.12)). La loi de maîtrise de l'énergie totale (ou le SC maîtrise de l'énergie) génère une demande de puissance PV p_{PVDEM} ($= u_2$, reportez-vous à (3.15)). Ce signal doit être saturé au maximum point en MPPT de puissance selon la remarque 1.

3.5 Simulation et résultats

Les résultats montrent la tension de jeu de barre dc, la puissance de charge (perturbation), la puissance de Sc, et Tension de Sc. L'état initial est dans la puissance à vide, le stockage de Sc le dispositif est plein de la charge, i.e., la tension de Sc = 48 V ($v_{SCREF} = 48$ V), et la tension de jeu de barre dc est réglée à 120 V ($v_{BusREF} = 120$ V) ;

À $t = 0.7$ s, la puissance de charge fait un pas de 300 W à une valeur constante de 600W (transition positive). Pendant l'état transitoire la puissance du pce du PV est limitée par évaluation de MPPT, les Sc fournie à la charge le pce demandé

Le bus continu est peu influence par la variation de la charge.

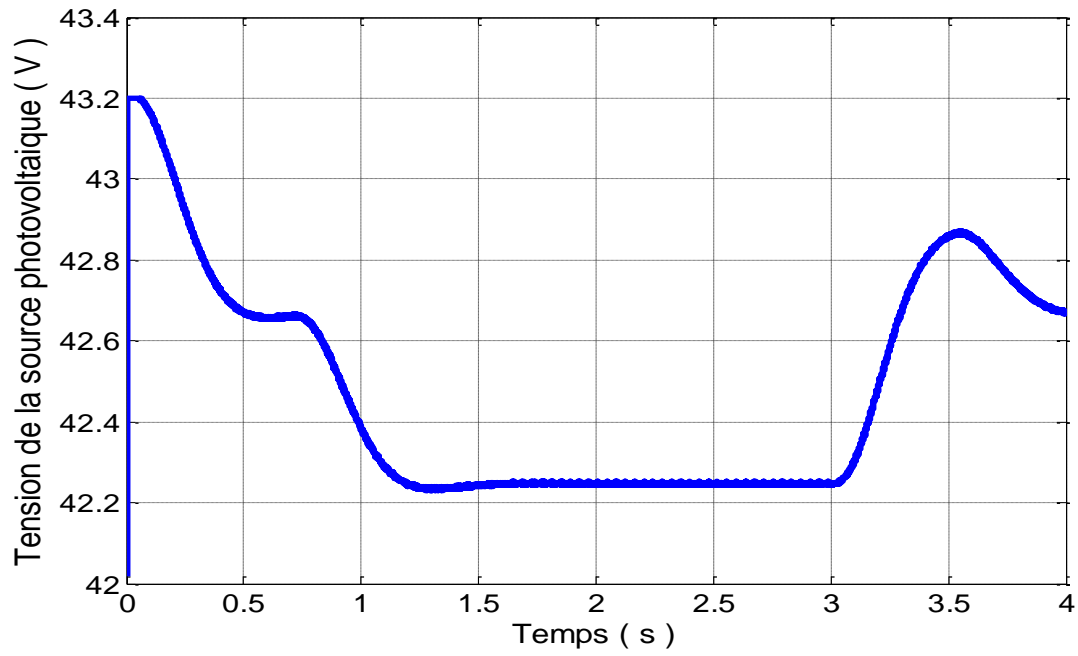


Figure (3.9) : tension de la source photovoltaïque

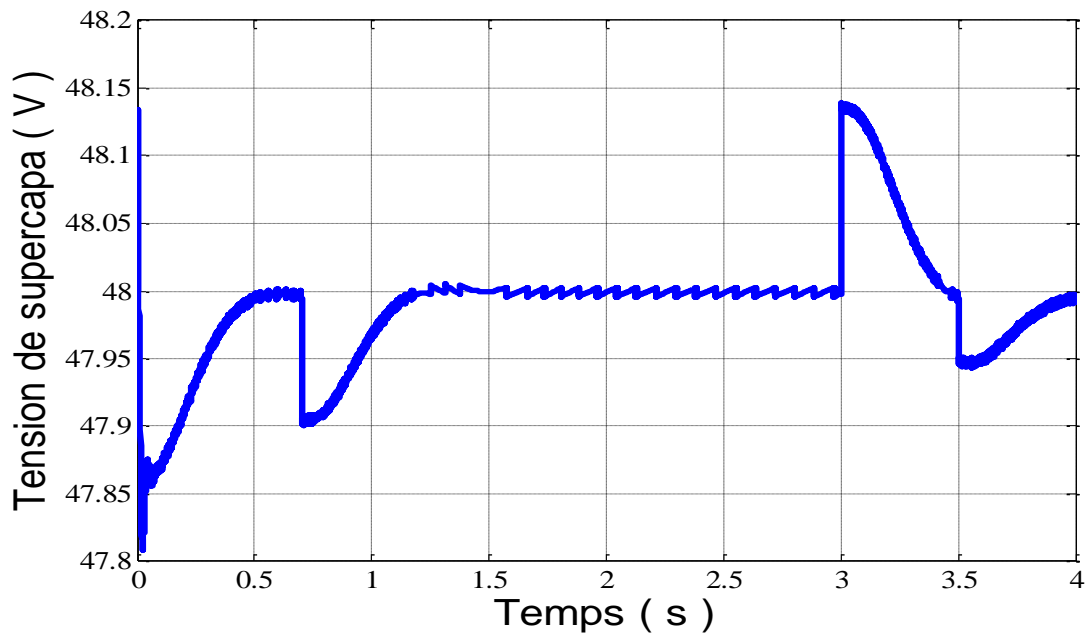


Figure (3.10) : tension de supercapa

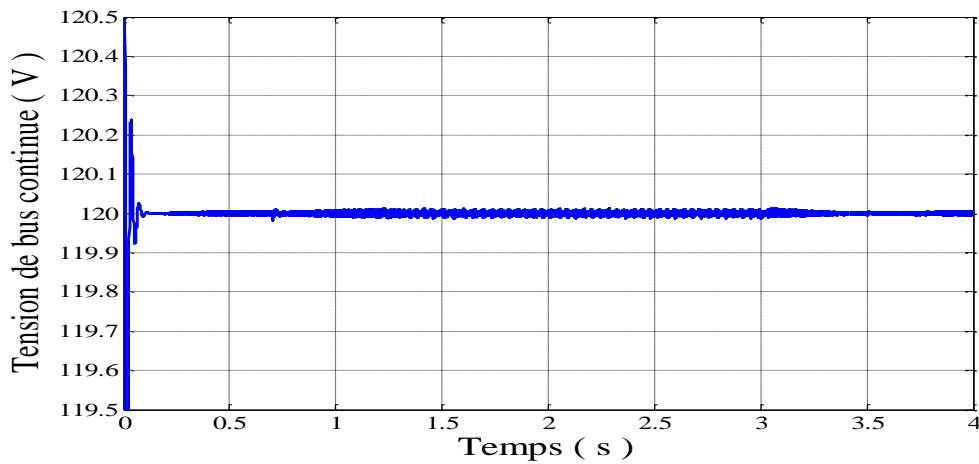


Figure (3.11) : tension de bus continue

La figure 3.11 montre que l'algorithme de contrôle conservé la tension du bus cc au sein de leur $V_{busref} = 120V$. La légère variation de tension dans $T = 1s, 3s$ due à la variation de charge. Le changement de la tension du bus DC ne dépasse pas le $0.01V$ croix=0,01%.

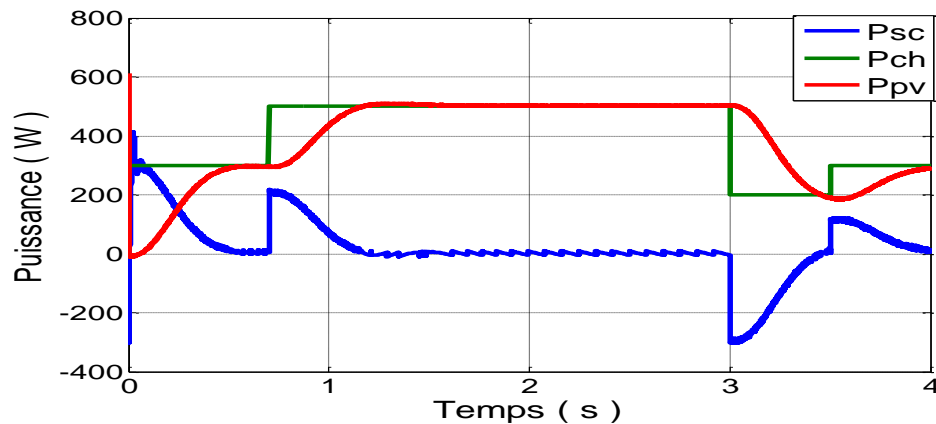
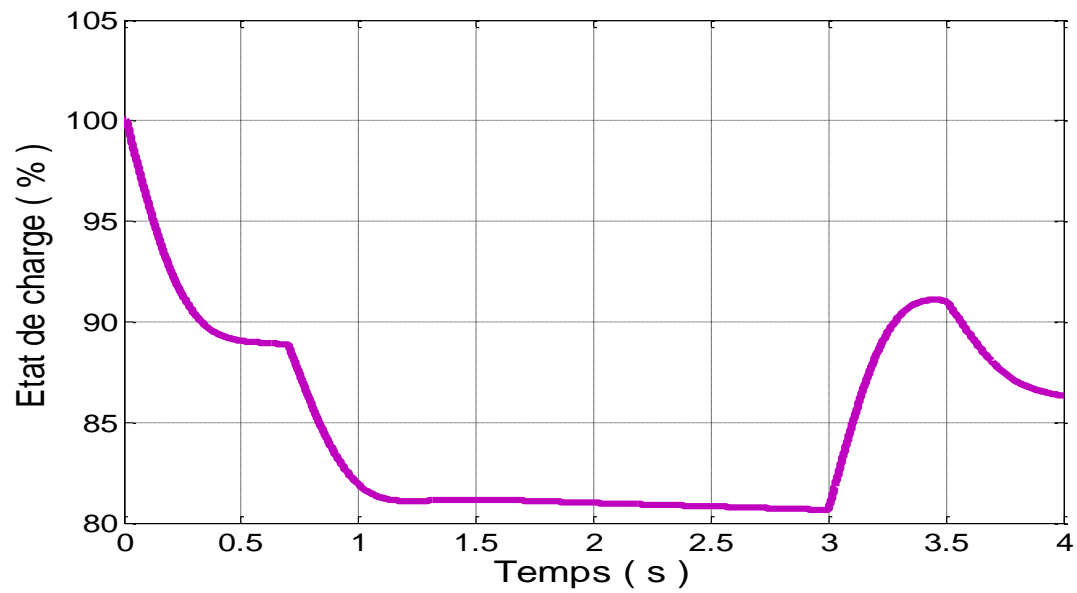
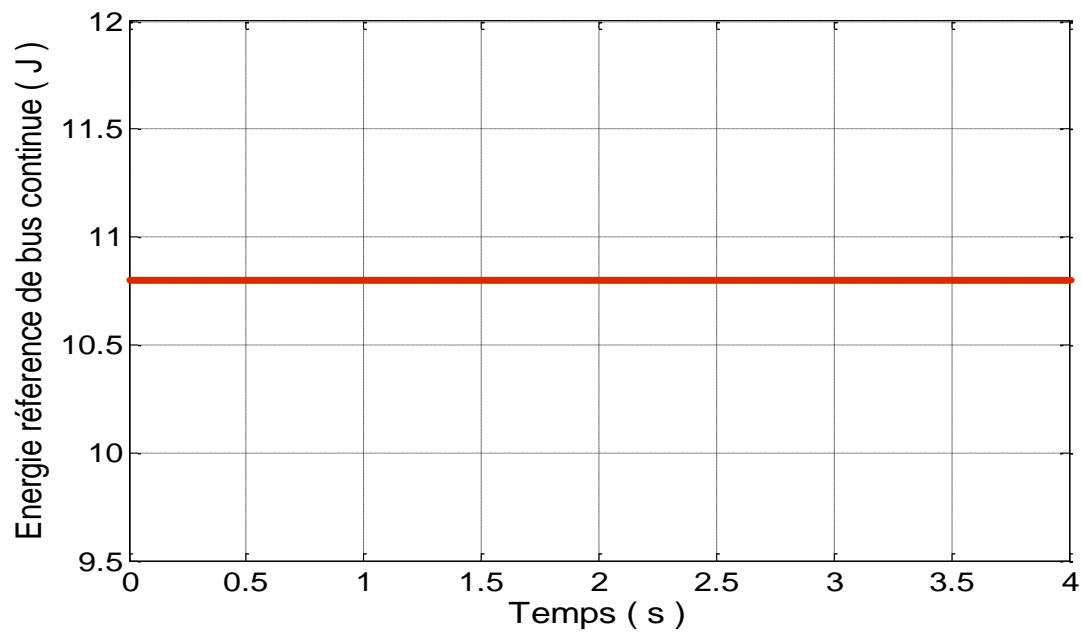


Figure (3.12) : puissance de supercapa et la charge et le photovoltaïque

Figure. La figure 3.12 présente les formes d'onde de l'énergie produite à partir des sources associées au système hybride que l'on obtient au cours de simulation dans l'environnement de matlab simulink.

De 0 à 0.5s les supercondensateur fournir de l'énergie pour satisfaire la demande de charge, dans l'autre main le système PV, qui est la source primaire, commencer à produire de l'énergie pour satisfaire la puissance de la charge demandée.

**Figure (3.13) :** état de charge**Figure (3.14) :** Energie référence de bus continue

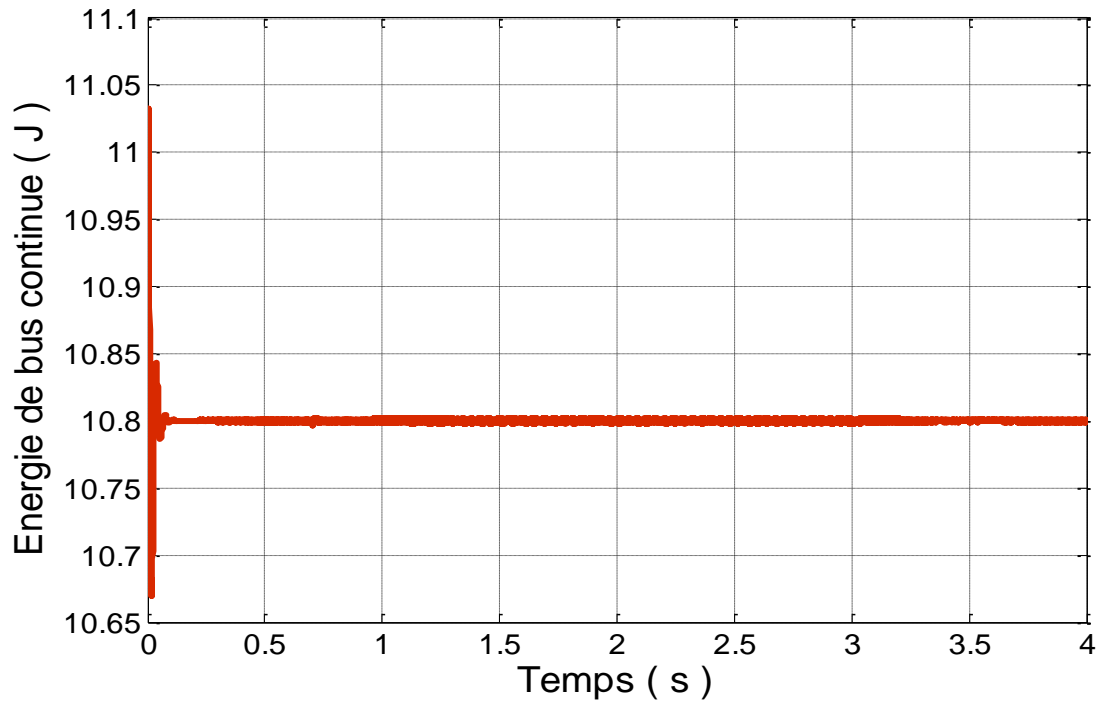


Figure (3.15) : énergie de bus continue

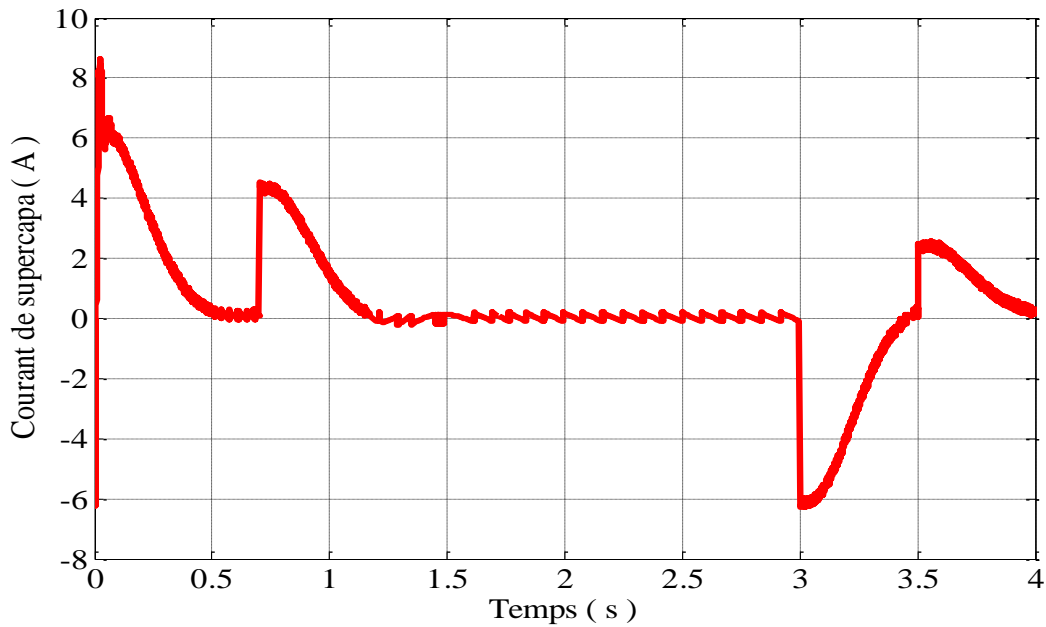


Figure (3.16) : courant de supercapa

3.5.1 Interprétation

Dans cet travail, un algorithme pour la conception de commande d'un système PV-SC autonome a été présenté. Utilisation du contrôle à base de platitude, les résultats de l'algorithme proposé montrent que la commande permis le contrôle de la planification pour réguler la

tension fournie pour des charges diverses. Ils supportent le contrôle des flux d'énergie à l'interface entre le panneau solaire, et le système de stockage (SC). Cette technique augmente la fiabilité du système, le contrôle du flux d'énergie et la gestion de l'énergie.

Dans cette analyse, une méthode de conception a été donnée. Lorsque, le PV est la source principale. La banque des supercapa sert à fonctionner comme dispositif de stockage pour compenser les incertitudes des sources photovoltaïques dans l'état permanent et transitoire.

Cette méthode ne nécessite pas un contrôle de l'algorithme de commutation, ce qui est le principal avantage de gérer l'énergie dans les systèmes électriques hybrides. Avec un contrôle à base de platitude, il est possible d'opérer dans différentes étapes, même chargement ou déchargement de plusieurs type des dispositifs de stockage.

3.6 Conclusion

La principale contribution de ce mémoire est de modéliser et de contrôler une centrale électrique hybride PV / SC. Le central prototype est composé d'un générateur photovoltaïque (800W, Ekarat solaire) et un module de SC (100 F, 32 V, Maxwell Technologies). Une topologie compacte, approprié aux applications de haute puissance, est proposé. Son travail le principe, l'analyse, et la procédure de conception sont présentés. Le picovolt la rangée est la source principale, et le Sc fonctionne comme dispositif de stockage (ou une source auxiliaire) pour compenser les incertitudes de la source de picovolt dans l'équilibré et l'état transitoire. Un Sc peut avancer la charge, suivre les caractéristiques de la canalisation sources, en fournissant une réponse plus forte de puissance aux changements dedans la charge du système. Ajouter le stockage de l'énergie à la puissance distribuée les systèmes améliore la qualité et l'efficacité de puissance. Utilisant l'approche non linéaire de contrôle basée sur la planéité propriété, nous proposons une solution simple au dynamique, stabilisation, et problèmes de robustesse dans la puissance non linéaire électronique système. Et aussi, il n'y a aucun point d'opération comparable avec un contrôle linéaire classique. C'est un concept nouveau pour cette sorte d'application. Cependant, les lawneeds proposés de contrôle un courant de charge mesure pour estimer la puissance de charge. Pour les travaux futurs, un observateur de charge sera employé pour éviter une mesure d'une charge courant, comme a été exploré dedans [46].

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques en fonctionnement autonome couplés au réseau électrique, et les supercondensateurs sont un moyen de stockage de l'énergie électrique permettant de satisfaire des appels de puissance électrique très importants sur des durées de l'ordre de 1 à 10 secondes, voire moins. Leur intégration dans des systèmes de conversion de l'énergie solaire auprès d'autres moyens de stockage de dynamiques moins rapides est envisagée dans divers études et projets, Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production de l'énergie et d'un meilleur respect de l'environnement. Associées à une production décentralisée, ces petites ou moyennes unités peuvent permettre une mutualisation avantageuse de ressources très réparties. Très fluctuantes, et contribuer à une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte de développement durable, et Cette thèse a permis l'établissement d'un modèle de stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs pour des applications non raccordées au réseau. Le modèle d'une chaîne de conversion d'énergie radiative solaire comprenant un programme de calcul de l'éclairement solaire, la conversion photovoltaïque des panneaux, le régulateur de charge, le stockage d'électricité par batteries, ainsi qu'un moteur à courant continu a été établi sous le logiciel Matlab/Simulink.

L'intérêt porté aux énergies renouvelables. Nous a amené à nous intéresser aux systèmes photovoltaïques comme production décentralisée. Ces systèmes utilisent des convertisseurs pour se connecter au réseau électrique et la puissance injectée est fortement variable puisqu'elle est dépendante de l'éclairement et la température. Une étude bibliographique a permis de recenser les différents systèmes photovoltaïques pouvant être connecté au réseau.

Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT).

De cette étude ressort l'importance de la modélisation du système hybride au réseau intelligent. La commande de le hacheur et les systèmes de productions déterminent le comportement principal de la production décentralisée sur le réseau basse tension. Les technologies actuelles permettent une souplesse de commande importante et même de s'adapter aux défauts du réseau et ainsi de ne pas être déconnectée de charge smart grid. Pour les systèmes photovoltaïques, la souplesse de l'utilisation des convertisseurs statiques est sous

employée. Il serait intéressant d'étudier dans quelle mesure les limites d'une déconnexion du réseau peuvent être repoussées.

Le principal objectif de ce mémoire était de proposer une stratégie de gestion d'énergie permettant les échanges de flux d'énergie entre les sources et la charge. Des simulations sous Matlab/Simulink de l'ensemble du sous-système sont effectuées à la quatrième partie pour valider les approches de commandes définies au chapitre 3. De ce fait, quelques conclusions ont été déduites :

- Le régulateur MPPT flou donne un suivi adéquat de la puissance maximale du générateur photovoltaïque, avec une oscillation moindre autour de sa référence et permet la poursuite du point optimum lors d'une variation brusque de l'éclairement ou de la charge.
- Le concept de platitude a été proposé il y a une quinzaine d'années, et a été utilisé dans différentes applications du génie électrique. On peut citer par exemple la commande de convertisseur *Boost et Back Boost*, de redresseur contrôlé ou de source hybride à base de photovoltaïque.
- La tension du bus DC du système est bien régulée et que la réponse suit sa référence sans dépassement.
- Une efficacité notable du gestionnaire d'énergie proposé permet de gérer les échanges de flux d'énergie entre les sources et la charge.

En fin, on propose quelques perspectives pour l'avenir :

- L'utilisation de la commande par passivité et la commande plate, pour le contrôle du système.

Bibliographies

Bibliographie

- [31] **MECHALIKH Med Nadjib et HAMADA Charaf Eddine** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau »
Mémoire MASTER ACADEMIQUE, Le : 25/06/2013
- [32] **Guy Chateigner, Michel Boës**, "Manuel de génie électrique", Dunod, 2007
- [33] **Abouchabana Nabil**, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT",
Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2009
- [34] **Philippe Barrade**, "électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire", press polytechnique et universitaires, 1ère édition 2006.
- [35] Jordana Bratt, "grid connected pv inverters: modeling and simulation", Mémoire de Master, Université de San Diego State, 2011
- [36] Sobaihi Khaled, " Etude et réalisation d'un hacheur de Tracking du Point de Puissance Maximale (MPPT) a contre réaction de tension", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003
- [37] Abbassen Lyes, "étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université de Tizi Ouzou, 05/05/2011.
- [38] Yann RIFFONNEAU, "Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau", thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, 23/10/2009
- [39] Phatiphat Thounthong, Stéphane Raël, and Bernard Davat, «Control Strategy of Fuel Cell and Supercapacitors Association for a Distributed Generation System», IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 54, no. 6, December 2007
- [40] Redha Sadoun, «Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage », Thèse de doctorat de l'ECOLE CENTRALE DE LILLE, soutenue publiquement le 03/06/2013.
- [41] Lahlah Salah, «Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C). », Thèse de Magistère de l'Université de BATNA, 2007.
- [42] Yamina Hasni¹, Maher CHAABENE², «Réseau électrique hybride autonome: Supervision et gestion des sources», International Renewable Energy Congress – Sousse, Tunisia, November 5-7, 2010.
- [43] J. W. Dixon et M. Ortúzar, «Ultracapacitors dc-dc converters in regenerative braking system», IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, vol. 17, n° 8, 2002.
- [44] M. Fliess, J. L'évine, Ph. Martin, and P. Rouchon, "Flatness and defect of nonlinear systems: Introductory theory and examples," *Int. J. Contr.*, vol. 61, no. 6, pp. 1327–1361, 1995.
-

- [45] M. Fliess, J. L'evine, Ph. Martin, and P. Rouchon, "A Lie-Bäcklund approach to equivalence and flatness of nonlinear systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 44, no. 5, pp. 922–937, May 1999.
- [46] A. Gensior, H. Sira-Ramirez, J. Rudolph, and H. Guldner, "On some nonlinear current controllers for three-phase boost rectifiers,," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 2, pp. 360–370, Feb. 2009.
- [47] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, Jul. 2010.
- [48] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Analysis of supercapacitor as second source based on fuel cell power generation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 247–255, Mar. 2009.
- [49] G. Spagnuolo, G. Petrone, S. V. Araujo, C. Cecati, E. Friis-Madsen, E. Gubia, D. Hissel, M. Jasinski, W. Knapp, M. Liserre, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and P. Zacharias, "Renewable energy operation and conversion schemes: A summary of discussions during the seminar on renewable energy systems," in *IEEE Ind. Electron. Mag.*, no. 1, vol. 4, Mar. 2010, pp. 38–51.
- [50] P. Thounthong and B. Davat, "Study of a multiphase interleaved stepup converter for fuel cell high power applications,," *Energy Convers. Manage.*, vol. 51, no. 4, pp. 826–832, Apr. 2010.
- [51] S. D. Sudhoff, K. A. Corzine, S. F. Glover, H. J. Hegner, and H. N. Robey, Jr., "DC link stabilized field oriented control of electric propulsion systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 13, no. 1, pp. 27–33, Mar. 1998.
- [52] P. Thounthong, S. Pierfederici, and B. Davat, "Analysis of differential flatness-based control for a fuel cell hybrid power source," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 909–920, Sep. 2010.
- [53] P. Thounthong and S. Pierfederici, "A new control law based on the differential flatness principle for multiphase interleaved DC–DC converter," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 57, no. 11, pp. 903–907, Nov. 2010.
- [54] Phatiphat Thounthong, Model Based-Energy Control of a Solar Power Plant With a Supercapacitor for Grid-Independent Applications, *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 26, NO. 4, DECEMBER 2011.
-

Bibliographie

[55] Maamir Madiha, Gestion d'énergie d'un système d'entraînement électrique hybride basé sur un moteur synchrone à aimants permanents, mémoire Magister Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

