

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie et Environnement

Présenté par :

- ABBOU Bouchra
- DJOUDI Boutkhil

Thème

Modélisation d'un convertisseur DC-DC dans un
système de stockage batterie Li-ion et
supercondensateur

Soutenu publiquement, le 14 / 09 / 2022, devant le jury composé de :

Dr.M.MEBROUKI MCA	ESSA. Tlemcen	Président
Dr.M.BOUCHAOUR MCA	UNIV Tlemcen	Directeur de mémoire
Professeur L.MERAD	UNIV Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Dr.A.CHEMIDI MCA	ESSA Tlemcen	Examineur 1
Dr.I. BOUSMAHA MCB	ESSA Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2021/2022

Dédicaces:

Je dédie ce mémoire à ma famille à mes amis.

Un sentiment particulier de gratitude envers mes parents bien-aimés, maman et papa qui m'ont soutenue émotionnellement jusqu'au bout, leurs mots d'encouragement résonnent encore dans mes oreilles. Mes sœurs Zeyneb et Dounia et ma nièce Rouaa qui ne m'ont jamais quittée et qui me sont très chères. J'apprécie énormément ce qu'ils ont fait pour moi et j'en serais toujours reconnaissante.

Je dédie ce travail également à mes meilleurs amis et tous ceux qui m'ont très chers, je les remercie d'avoir été là pour moi quand j'avais besoin de support.

Bouchra

Dédicaces

A ma tendre mère. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours et pour toi. Que dieu, vous protège, préserve santé et longue vie.

A mon très cher père, Que Dieu lui fasse miséricorde et fasse de sa place le paradis

À mes frères : Youcef, Nourdine, Hmimo, Rachid, Yazid

A ma famille et tous mes amis

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Boutkhil

Table de matières :

Dédicaces:	2
Dédicaces	3
Table de matières :	4
Liste de figures :	6
Liste de tableaux :	7
Notations et abréviations :	7
Introduction générale:	9
chapitre 1: convertisseurs dc-dc	11
1.1 Introduction :	12
1.2 Convertisseurs DC/DC :	12
1.3 Rôle des convertisseurs DC-DC :	13
1.4 Applications des convertisseurs DC/DC :	13
1.5 Types des hacheurs :	14
1.5.1 Hacheurs réversibles :	14
1.5.2 Hacheurs non réversibles :	15
1.5.2.1 types des hacheurs non réversibles :	15
1.5.2.1.1 Convertisseurs Buck :	15
1.5.2.1.2 Hacheur survolteur (Boost) :	16
1.5.2.1.3 Le convertisseur Buck-Boost:	16
1.5.2.1.4 Le convertisseur Cuk :	17
1.5.2.1.5 Hacheur ZETA :	18
1.6 Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur :	18
1.7 Comparaison des montages :	18
1.8 Contrôle des convertisseurs DC/DC :	20
1.8.1 Contrôle linéaire des convertisseurs DC/DC :	20
1.8.2 Contrôle non-linéaire des convertisseurs DC/DC :	21
1.8.2.1 Technique des modes glissants :	21
1.8.2.2 Linéarisation entrée/sortie :	21
1.9 Conclusion :	21
Chapitre 2 :	22
Eléments du stockage hybride ; batterie.....	22
li-ion et supercondensateur	22
2.1 Introduction :	23
2.2 Les Batteries Lithium:	23
2.2.1 Fonctionnement : [6].....	24

2.2.2	La cellule de base lithium-ion :	25
2.2.3	Réactions chimiques :	26
2.2.4	Composants des batteries Li-ion :	27
2.2.4.1	Anodes:	27
2.2.4.2	Cathodes :	28
2.2.4.3	Électrolytes :	28
2.2.5	Avantages des batteries Li-ion :	28
2.2.6	Inconvénients des batteries Li-ion :	30
2.3	Le supercondensateur :	30
2.3.1	Le condensateur :	30
2.3.2	Les supercondensateurs :	31
2.3.3	Fonctionnement :	32
2.3.4	Applications des supercondensateurs :	33
2.3.5	Avantage des supercondensateurs : [12] :	34
2.3.6	Inconvénients : [12] :	34
2.3.7	Système hybride de stockage d'énergie (SHSE) :	35
2.3.7.1	Systèmes hybrides de stockage d'énergie dans les véhicules électriques :	35
2.4	Conclusion:	36
Chapitre 03: topologies		37
3.1	Introduction:	38
3.2	Topologies du SSEH Batterie-SC :	38
3.2.1	Topologie active :	38
3.2.2	Topologie passive :	39
3.2.3	Topologie semi-active :	40
3.3	Avantages et inconvénients :	41
3.4	Gestion de l'énergie :	42
3.5	Conclusion :	43
Chapitre 04 :		44
modélisation, simulation et résultats		44
4.1	Introduction:	45
4.2	CONTRÔLE EN BOUCLE OUVERTE DU CONVERTISSEUR CC-CC ALIMENTÉ PAR SUPERCONDENSATEUR :	46
4.2.1	Mode éleveur:	46
4.2.2	Mode Abaisseur:	46
4.3	CONTRÔLE EN BOUCLE FERMÉE:	47
4.4	CONVERTISSEUR BUCK BOOST ALIMENTÉ PAR BATTERIE :	48
4.5	Pour un véhicule électrique:	49

4.5.1	Simulation :	50
4.5.2	Résultats et interprétations :	51
4.6	Système de stockage d'énergie hybride dans un système PV :	53
4.6.1	Modélisation des convertisseurs DC-DC :	53
4.6.2	Contrôle du système de stockage hybride:	55
4.6.3	Résultats de simulation :	56
4.7	Conclusion :	58
	Conclusion générale:	59
	Perspectives:	59
	Liste de références	60
	Résumé:	64
	Abstract:	64
	ملخص	64

Liste de figures :

Figure 1.1 : Convertisseur DC/DC.

Figure 1.2 : Différentes types des hacheurs.

Figure 1.3 : Schéma réel d'un convertisseur buck..

Figure 1.4 : Convertisseur survolteur (boost).

Figure 1.5 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur.

Figure 1.6 : Schéma de base d'un convertisseur « cuk ».

Figure 1.7 : Hacheur Zeta.

Figure 1.8 : Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.

Figure 1.9 : Evolution du gain en tension en tenant compte des convertisseurs.

Figure 2.1: Charge et décharge de la batterie lithium ion

Figure 2.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule Lithium-ion.

Figure 2.3: Composants d'une batterie Li-ion.

Figure 2.4 : Comparaison entre plusieurs types de batteries selon la densité d'énergie(Les batteries Li-ion sont en avance sur la plupart des autres types de batteries à ces égards.)

Figure 2.5 : Représentation schématique d'un SC dans l'état de charge et de décharge.

Les électrodes sont à base de carbone activé* de grande surface spécifique.

Figure 2.6: Utilisation de SC dans les circuits électroniques.

Figure 3.1 : Topologie active.

Figure 3.2 : Topologie passive.

Figure 3.3: Topologie semi active.

Figure 4.1 : Contrôle en boucle ouverte du convertisseur DC-DC alimenté par un SC.

Figure 4.2 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.

Figure 4.3: Contrôle en boucle ouverte du convertisseur DC-DC alimenté par un SC (mode buck).

Figure 4.4: Tension de sortie du convertisseur DC-DC (buck).

Figure 4.6: Tension de sortie du convertisseur.

Figure 4.7: Convertisseur buck boost alimenté par batterie.

Figure 4.8 : Tension de sortie du convertisseur buck boost

Figure 4.9: Configuration semi active d'un système de stockage hybride par batterie Li-ion et SC.

Figure 4.10 courant, tension et état de charge de la batterie Li-ion.

Figure 4.11 courant, tension et état de charge du SC.

Figure 4.12 : Puissances du supercondensateur et de la batterie Li-ion.

Figure 4.13 : Puissance requise et puissance délivrée par le système hybride.

Figure 4.14 : Système de stockage hybride batterie SC dans un circuit PV (configuration active).

Figure 4.15 : Schéma du convertisseur bidirectionnel.

Figure 4.16 : Système de stockage hybride batterie SC dans un circuit PV (configuration active)

Figure 4.17: Schéma de contrôle du système de stockage d'énergie hybride.

Figure 4.18: (1) Puissance du générateur PV,(2) puissance de la charge, (3) puissance du système hybride batterie et supercondensateur .

Liste de tableaux :

Tableau 1.1 : Caractéristique des montages en mode conduction continu

Tableau 2.1 : Comparaison entre batterie Li-ion et SC

Notations et abréviations :

SSEH-BS : système de stockage d'énergie par batterie et supercondensateur

SGE : système de gestion d'énergie

LIB : batterie Lithium ion

SC supercondensateur

DC : courant continu

PV : photovoltaïque :

EV véhicule électrique

EDLC : Capacité électrique à double couche

FP : pseudo-capacité faradique.

Introduction générale:

Avec la consommation excessive d'énergie fossile mondiale et le problème croissant de la pollution de l'environnement [1], une nouvelle ère de révolution énergétique, caractérisée par le développement à grande échelle et l'utilisation des énergies renouvelables et le développement rapide de nouveaux véhicules énergétiques, est florissante. Cependant, les ressources énergétiques renouvelables, représentées par, par exemple, l'énergie éolienne et solaire [2], entraîneront des fluctuations de puissance en raison de leurs caractéristiques intermittentes. Les nouveaux véhicules énergétiques [3,4], en particulier les véhicules électriques purs, nécessitent un stockage d'énergie approprié pour garantir un fonctionnement réalisable. Pour résoudre les problèmes mentionnés, les techniques de stockage d'énergie, qui sont tenues de fournir une efficacité de conversion énergétique élevée, un stockage d'énergie sûr et sain, et la faisabilité économique, deviennent la clé [5]. Les dispositifs de stockage d'énergie peuvent être divisés en dispositifs de stockage orientés vers l'énergie.

Les premiers, tels que les supercondensateurs [6], les supraconducteurs [7] et les volants d'inertie, présentent les avantages d'une densité de puissance élevée et d'une vitesse de réponse rapide, mais avec l'inconvénient d'une faible densité d'énergie. Ces derniers, comme les batteries [8] et les STEP s [9] ont l'avantage d'une densité d'énergie élevée, mais avec une faible densité de puissance et une vitesse de réponse lente. Il est donc difficile pour un seul dispositif de stockage d'énergie de fournir à la fois une puissance élevée et une densité d'énergie, ce qui limite les scénarios d'application. Par conséquent, il est nécessaire de combiner deux ou plusieurs types de dispositifs de stockage d'énergie, formant un système hybride de stockage d'énergie (SSEH), pour fournir une complémentarité technique [10].

Au cours des dernières années, l'utilisation de batteries a augmenté rapidement dans les véhicules électriques, la production photovoltaïque, la production d'énergie éolienne, le rasage de pointe et les applications de stabilité des systèmes d'alimentation. Les perturbations du système d'alimentation causées par des pannes d'équipement peuvent entraîner l'instabilité du système, car l'alimentation électrique fournie par les générateurs du réseau peut ne plus correspondre à la demande de charge. Cela peut entraîner des fluctuations de fréquence inacceptables, des pannes en

cascade ou même des pannes d'électricité si une mesure corrective n'est pas prise rapidement.

Les batteries sont de plus en plus utilisées pour améliorer les performances des systèmes d'alimentation en raison des avantages d'une haute densité d'énergie et d'une meilleure exploitation des sources d'énergie propre. Cependant, un nombre élevé d'opérations rapides et profondes de charge/décharge de la batterie entraîne la dégradation de la batterie et finalement réduire la durée de vie de la batterie. Une autre technologie de stockage d'énergie est le supercondensateur (SC) [1][2]. La combinaison d'un supercondensateur avec une batterie fournit un système de stockage d'énergie supérieur où le supercondensateur peut répondre à des opérations de charge / décharge très rapides et la batterie peut répondre plus lentement, mais avec des transferts d'énergie nets plus importants.

Cependant, la technologie des supercondensateurs présente des défis de conception en raison de sa densité énergétique inférieure à celle des batteries [3]. Dans ce mémoire on étudie des conceptions de système de stockage d'énergie (SSE) qui combinera des batteries, des supercondensateurs et des convertisseurs DCDC pour une utilisation dans une application de compensation dynamique de système d'alimentation dans un véhicule électrique et un application de stockage dans un système photovoltaïque.

Les deux systèmes de stockage d'énergie sont couplés chacun à des convertisseurs bidirectionnels DC-DC pour faciliter les réglages et le dimensionnement individuels [4].

Dans ce mémoire, nous présentons une étude du SSEH-BS en termes de concept, topologies et applications.

Le premier chapitre est un aperçu sur les convertisseurs DC-DC, le second contient des généralités sur les batteries Lithium ion et les supercondensateurs.

Le troisième chapitre parle des topologies du système de stockage hybride par batterie et supercondensateur et le dernier chapitre représente diverses simulations de ce système hybride.

CHAPITRE 1:
CONVERTISSEURS DC-DC

1.1 INTRODUCTION :

L'électronique de puissance est la partie du génie électrique qui traite des modifications de la présentation de l'énergie électrique. Pour cela il utilise des convertisseurs statiques semi-conducteurs. Au fur et à mesure de l'avancement de ces composantes et de leur mise en œuvre, L'électronique de puissance occupe une place très importante dans tout le domaine Électricité industrielle. Au début des années 1990, deux nouvelles structures sont créées. Il s'agit d'une structure multi-unités série et parallèle adaptée à une famille de convertisseurs multi niveaux. Les deux structures multi-cellules série ou parallèle assurent une juste répartition de la contrainte en tension ou en courant appliquée aux semi-conducteurs de puissance du fait de l'association série ou parallèle des multiples cellules de commutation. Une réflexion est actuellement menée sur les architectures de conversion pour déterminer celles qui semblent les mieux adaptées à l'intégration, la modularité et la reconfiguration. Les convertisseurs multicellulaires, séries ou parallèles, offrent les degrés de libertés qui permettent d'aller dans ce sens. Ils permettent, en modifiant le nombre de cellules, de s'adapter à un cahier des charges nécessitant des fortes tensions ou de forts courants, d'améliorer la qualité des formes d'ondes obtenues sans pour autant augmenter les fréquences de découpage et d'imaginer des stratégies de reconfiguration pour faire face à la défaillance d'un composant par exemple. Cependant, les convertisseurs multicellulaires nécessitent des architectures de commandes plus complexes et plus évoluées.

1.2 CONVERTISSEURS DC/DC :

Les convertisseurs continu-continu ou commercialement appelés DC-DC constituent une partie essentielle des alimentations de puissance. On peut les trouver dans de nombreuses applications à différents niveaux de puissance. Ces convertisseurs généralement réalisent deux fonctions : modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et la réguler.

- Convertisseurs DC–DC non isolés (hacheurs) ; qu'ils soient réversibles ou bien non réversibles, le type réversible permet l'inversion du courant ou de la tension, le non réversible en revanche permet le transfert de l'énergie électrique unidirectionnellement (de la source vers la charge).

- Convertisseurs DC-DC isolés (alimentations à découpage) : correspondent aux applications petites puissances de la conversion DC-DC. Ils comportent au sein des cellules de commutation des transformateurs permettant d'assurer un isolement galvanique, et d'élever ou abaisser les niveaux de tension et de courant. [1]

1.3 RÔLE DES CONVERTISSEURS DC-DC :

Pour la conversion de puissance, un rendement élevé doit être maintenu pour éviter la dissipation de puissance et éviter la surchauffe des composants électroniques. C'est pourquoi toutes les conversions de puissance à découpage doivent tourner autour d'éléments de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et de commutateurs. L'interrupteur de puissance utilisé dépend du niveau de puissance à convertir ou à contrôler. [1]

Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont utilisés d'habitude à une puissance plutôt basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors sont utilisés dans les plus hauts niveaux de puissance. La figure 1.1 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [1].

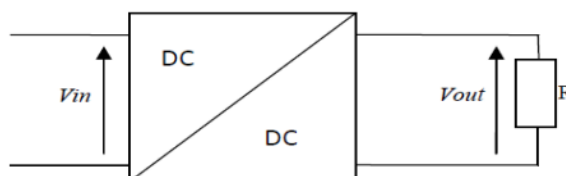


Figure 1.1 : convertisseur DC/DC.

1.4 APPLICATIONS DES CONVERTISSEURS DC/DC :

Les niveaux de puissance dans les convertisseurs vont de moins d'un watt dans les convertisseurs d'équipements portables à 10 ou 100W dans les alimentations d'ordinateurs de bureau, en passant par les kilo/mégawatts dans le contrôle des moteurs à vitesse variable et les centrales solaires dans l'industrie, pour les applications portables à très faible puissance (<1watt), l'efficacité et la taille des convertisseurs sont critiques.

L'électronique de conversion se situe à l'interface entre la batterie et l'ensemble des briques du système considéré, circuits électroniques numériques et analogiques, écrans, actionneurs, claviers, etc. Plus de 5 à 6 niveaux de tension peuvent coexister dans un ordinateur portable [2].

1.5 TYPES DES HACHEURS :

Selon le parcours de l'énergie électrique entre la source et la charge, on distingue deux catégories de hacheurs : réversibles et non réversibles (Figure 1.2) :

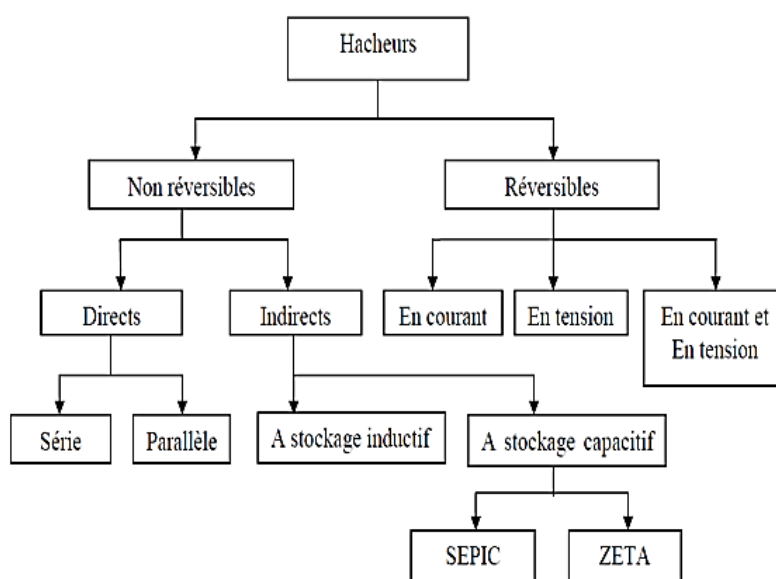


Figure 1.2 : Différents types des hacheurs [3].

1.5.1 HACHEURS REVERSIBLES :

Structures assurant la réversibilité de la tension et/ou du courant. Et donc, le sens de propagation de l'énergie peut être inversé. Ce qui fait qu'une source peut devenir une charge et vice versa. Ce comportement est couramment retrouvé dans les systèmes d'entraînement électrique. Par conséquent, le moteur qui se trouve à la sortie du hacheur représente la charge. Mais au cas d'un freinage, le moteur devient un générateur, provoquant ainsi un retour d'énergie à la source (mieux qu'un simple freinage mécanique).

Dans cette catégorie, on distingue trois types :

- Hacheur réversible en tension.

- Hacheur réversible en courant.
- Hacheur réversible en courant et en tension.

Un convertisseur DC-DC peut être caractérisé par l'indication de sa/ses réversibilités communes à la source de tension et à la source de courant :

- Un convertisseur réversible en tension relie deux sources réversibles en tension.
- Un convertisseur réversible en courant relie deux sources réversibles en courant.
- Un convertisseur réversible en courant et en tension relie deux sources réversibles en courant et en tension [3].

1.5.2 HACHEURS NON REVERSIBLES :

Appelés convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension où le flux d'énergie ne peut se faire que dans un seul sens.

Cela revient également à considérer :

- des sources de tension unidirectionnelles en courant, dont la tension qu'elles imposent ne peut être que d'un seul signe.
- des sources de courant unidirectionnelles en tension, dont le courant qu'elles imposent ne peut être que d'un seul signe.

Ce qui amène à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples.

Dans ce cadre, on distingue trois familles de hacheurs :

- Hacheur série ou abaisseur (Buck).
- Hacheur parallèle ou élévateur (Boost).
- Hacheur série-parallèle ou abaisseur-élévateur (Buck-Boost) [3]

1.5.2.1 TYPES DES HACHEURS NON REVERSIBLES :

1.5.2.1.1 CONVERTISSEURS BUCK :

Le convertisseur dévolteur également appelé (série/ buck) est représenté sur la figure 1.3. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure [1].

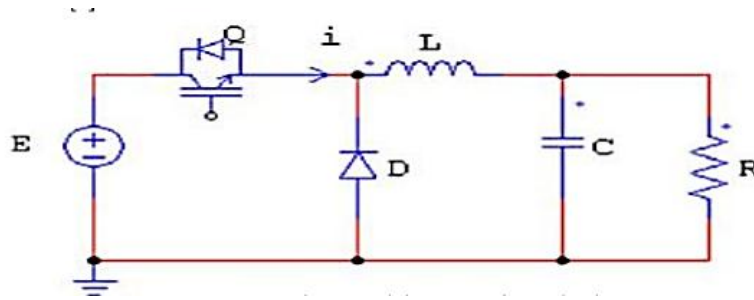


Figure 1.3 : schéma réel d'un convertisseur buck [1].

1.5.2.1.2 HACHEUR SURVOLTEUR (BOOST) :

Aussi appelé boost/hacheur parallèles; son schéma de principe de base est représenté sur la figure 1.4. Son rôle est convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

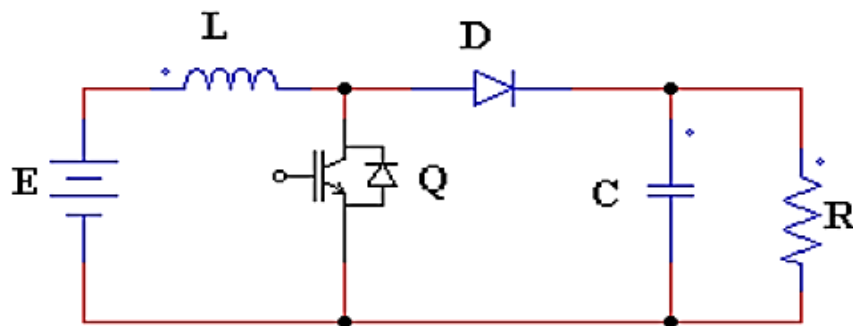


Figure 1.4 : convertisseur survolteur (boost) [1].

1.5.2.1.3 LE CONVERTISSEUR BUCK-BOOST:

La topologie de base du DC/DC buck boost est représentée sur la figure (1.5). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée.

Quand le commutateur est sur la position (off) l'énergie stockée est transférée vers la charge via la diode. L'équation décrivant le fonctionnement est donnée par l'équation (1.1) : [1]

$$Us = \frac{D}{1-D} U_e \quad (1.1)$$

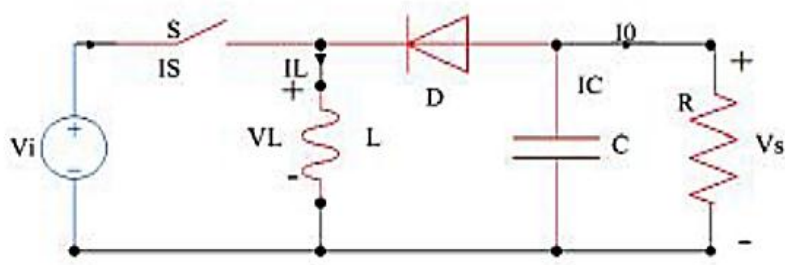


Figure 1.5 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur. [1]

1.5.2.1.4 LE CONVERTISSEUR CUK :

Le convertisseur Cuk, (du nom de son inventeur), est une variante du SEPIC. Il en diffère par une disposition légèrement différente des composants. Comme il s'agit ici aussi de composants réactifs, le rendement théorique est excellent. Le schéma de ce convertisseur est donné par la figure (1.6). Le convertisseur Cuk sans isolation galvanique est constitué de deux inductances, deux condensateurs, d'interrupteur (ici un transistor) et d'une diode. Le condensateur est utilisé pour transférer l'énergie entre la source de tension d'entrée V_{in1} et celle de sortie V_{out} .

Pour cela, il est connecté alternativement à l'entrée ou à la sortie du convertisseur grâce à l'interrupteur k ainsi qu'à la diode D . Les deux inductances $L1$ et $L2$ sont utilisées pour convertir respectivement la source de tension d'entrée et la source de tension de sortie (C) en sources de courant. Ces conversions sont nécessaires pour limiter le courant quand le condensateur $C1$ se trouve relié à une source de tension (V_{out} ou V_{in}). Comme les autres convertisseurs, le convertisseur Cuk fonctionne en conduction continue ou discontinue en courant. Mais contrairement aux autres convertisseurs, il peut aussi fonctionner avec une conduction discontinue en tension (la tension aux limites du condensateur s'annule pendant une partie du cycle de commutation [4]).

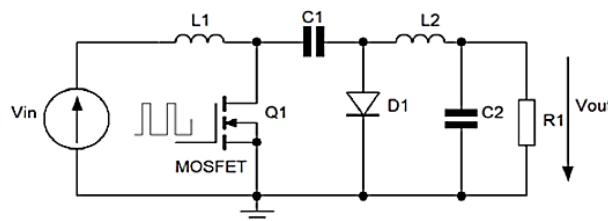


Figure 1.6 : schéma de base d'un convertisseur « cuk »[4]

1.5.2.1.5 HACHEUR ZETA :

Le hacheur ZETA (Figure 1.7) dérive du hacheur à stockage capacitif comme le convertisseur Cuk et Il présente des caractéristiques semblables (non inverseur) [3].

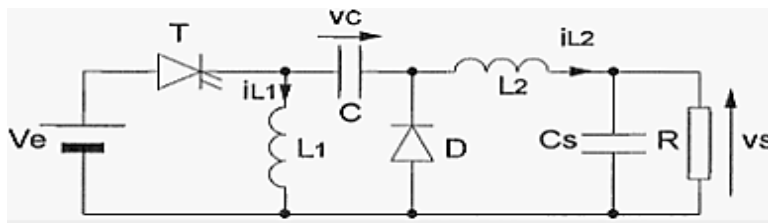


Figure 1.7 : Hacheur Zeta [3]

1.6 RECAPITULATIF D'ANALYSE ET CHOIX DU CONVERTISSEUR :

Un panneau solaire PV (photovoltaïque) est une génératrice continue basse tension. Il est préférable de placer un dispositif d'amplification entre la source et la charge comme étage d'adaptation d'impédance. Tous les convertisseurs mentionnés ci-dessus, à l'exception de Buck, peuvent agir comme un booster. De plus, les structures Buck-Boost, Cuk et SEPIC ont plus de la moitié du rapport cyclique. Si l'on regarde la complexité de la structure, Boost est le plus simple. Les contraintes de tension et de courant sur le commutateur et la diode sont presque similaires pour différentes topologies boost [5].

1.7 COMPARAISON DES MONTAGES :

Le tableau (1.1) résume les gains en tension et les contraintes sur les interrupteurs des différents montages. Pour ces convertisseurs, l'évolution des gains en tension en fonction du rapport cyclique est présentée sur la figure 1.8.

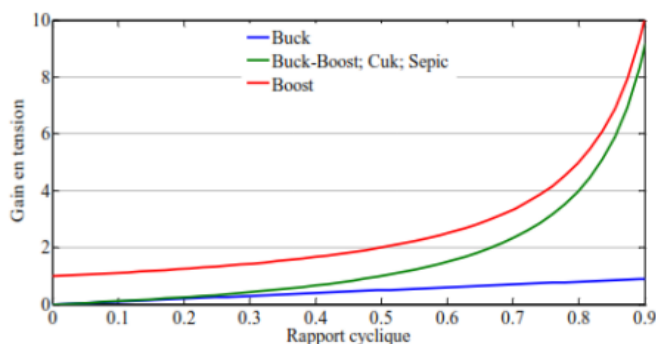


Figure 1.8 : Evolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs [5].

Si plusieurs montages peuvent être considérés comme élévateurs, et plus particulièrement si le rapport cyclique est $> 0,5$, seul le montage Boost est élévateur sur toute la plage de réglage des rapports cycliques. Pour un rapport cyclique de 0,5 par exemple, le Boost possède une tension de sortie double de la tension d'entrée. Alors que pour les autres montages élévateurs, la tension de sortie est pour cette valeur du rapport cyclique égale à la tension d'entrée. Ce n'est que lorsque le rapport cyclique se rapproche de 1 que les autres montages élévateurs tendent à ressembler au montage Boost (figure 1.9) [5].

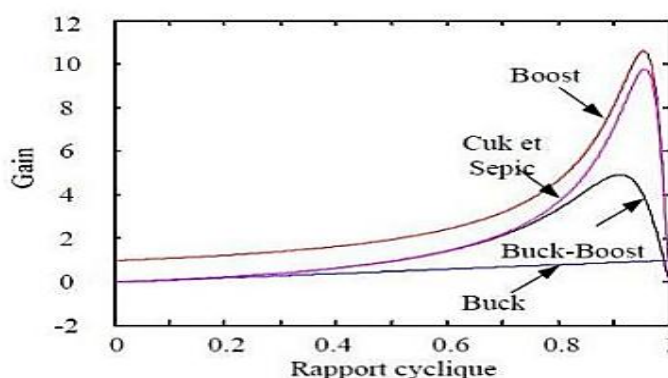


Figure 1.9 : Evolution du gain en tension en tenant compte des convertisseurs [5].

	Boost	buck	Buck-boost
Gain de tension	$\frac{1}{1-\alpha}$	α	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$
v_k, \max , $ v_d, \max $	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta v_s}{2}$	V_e	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta v_s}{2}$
I_k, \max I_d, \max	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\alpha \cdot V_e}{2 \cdot L \cdot f}$	$I_s + \frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{2 \cdot L \cdot f}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\alpha \cdot V_e}{2 \cdot L \cdot f}$
Courant de source	Continu	discontinu	Discontinu

	Cuk	Sepic
Gain de tension	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$

v_k, \max , $ v_d, \max $	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_e}{2}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s + \Delta V_e}{2}$
$I_{k, \max}$ $I_{d, \max}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\alpha \cdot V_e}{2 \cdot f} \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L'} \right)$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\alpha \cdot V_e}{2 \cdot f} \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L'} \right)$
Courant de source	Continu	Continu

Tableau 1.1 : Caractéristique des montages en mode conduction continu [5].

1.8 CONTROLE DES CONVERTISSEURS DC/DC :

Différentes techniques sont utilisées pour asservir un signal électrique à un signal de référence pour la commande des convertisseurs DC/DC. La technique dite MLI (PWM) (Modulation par Largeur d'Impulsion) utilise des régulateurs linéaires (PI, PID...) ou non linéaires (glissant, entrée/sortie...) dont la sortie est une grandeur de commande continue qui est alors comparée à un signal porteur ; par conséquent on obtient les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence du signal porteur fixe la fréquence de découpage à condition que les grandeurs de sorties des régulateurs évoluent lentement sur une période du signal porteur. Cette technique, facile d'utilisation, assure un fonctionnement à fréquence fixe, un contenu harmonique parfaitement identifié mais possède aussi de par sa structure, des propriétés dynamiques limitées. [5]

1.8.1 CONTROLE LINEAIRE DES CONVERTISSEURS DC/DC :

La façon la plus répandue pour commander des convertisseurs DC-DC est d'utiliser des correcteurs linéaires (PI ou PID). Ils sont conçus en utilisant un modèle petit signal autour d'un point d'équilibre nominal. Cette approche de contrôle donne des résultats satisfaisants dans de nombreuses applications. Cependant, il existe aussi des situations où cette approche offre des performances limitées (propriétés dynamiques dépendant du point de fonctionnement, robustesse, performances dynamiques insuffisantes). [5]

1.8.2 CONTROLE NON-LINEAIRE DES CONVERTISSEURS DC/DC :

1.8.2.1 TECHNIQUE DES MODES GLISSANTS :

La technique par mode de glissement (TMG) est un mécanisme de contrôle non-linéaire largement utilisé dans les convertisseurs de puissance de par ses propriétés de stabilité, de robustesse, et de bande passante élevée. Son principal défaut est de générer des signaux de commande à fréquence variable. Cette technique consiste à amener la trajectoire d'état du système considéré vers une surface de commutation où une logique de commutation adaptée la fera osciller de part et d'autre de celle-ci jusqu'à convergence vers le point d'équilibre situé sur cette surface. [5]

1.8.2.2 LINEARISATION ENTREE/SORTIE :

C'est une technique qui utilise une transformation en boucle ouverte permettant d'exprimer les variables de sortie du système en fonction des grandeurs d'entrée. Le système obtenu après la transformation entrée/sortie, est un système linéaire découplé à m entrées possédant tous ses pôles à l'origine. Cette technique a pour principal intérêt (en plus de la linéarité) de découpler complètement le système à contrôler et donc de faciliter la conception de sa commande.

Cette méthode possède un certain nombre d'inconvénients qui limitent son champ d'application. Elle n'est applicable qu'aux systèmes dynamiques ne possédant pas de zéro dynamique instable et reste très sensible aux variations paramétriques. Pour assurer un bon contrôle du système obtenu après linéarisation entrée/sortie, il est donc nécessaire d'utiliser des contrôles robustes vis-à-vis des variations paramétriques comme le contrôle à structures variables ou la commande par mode de glissement. [5]

1.9 CONCLUSION :

Ce chapitre concernait quelques généralités concernant les convertisseurs DC-DC. Nous avons vu leurs types, leurs fonctionnements et quelques applications.

Le stockage par batterie Lithium ion et par supercondensateur est traité dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2 :
ELEMENTS DU STOCKAGE
HYBRIDE ; BATTERIE
LI-ION ET
SUPERCONDENSATEUR

2.1 INTRODUCTION :

La majorité des appareils électroniques portatifs, ainsi que des systèmes de télécommunications et des véhicules électriques et hybrides possèdent des caractéristiques de profil de charge communes, décrites par des exigences relativement élevées de puissance de crête à moyenne. Ces charges peuvent être étroitement représentées par des profils de consommation pulsée avec des caractéristiques de charge à courant constant. Afin de satisfaire les exigences d'une telle charge, une source de haute puissance à haute densité d'énergie est essentielle. Les batteries modernes peuvent posséder l'une ou l'autre des caractéristiques, mais pas les deux

Les batteries Lithium-ion, qui sont de loin les plus puissantes et les plus riches en énergie parmi les batteries modernes, sont couramment utilisées dans de telles applications. Cependant, les compromis puissance/énergie entraînent souvent un retour de batterie non optimal, fournissant la quantité d'énergie requise tout en surpuissant et vice versa.

L'une des solutions possibles est l'hybridation de batteries à haute énergie avec des supercondensateurs. La technologie SC à développement rapide permet d'atteindre une densité de puissance de plusieurs milliers de W/kg à un coût raisonnable. Certaines batteries polymères Li-ion atteignent la même densité de puissance, mais à des prix beaucoup plus élevés [1]. En outre, l'efficacité de charge/décharge du SC est beaucoup plus élevée que celle de toute batterie, ce qui réduit les pertes du système, ce qui, en plus d'une efficacité plus élevée, contribue à une durée de vie prolongée du système d'alimentation en raison de la température de fonctionnement plus basse.

2.2 LES BATTERIES LITHIUM:

Les batteries lithium sont largement utilisées dans de petites applications, telles que les téléphones et les appareils électroniques portables; par conséquent, la production brute annuelle est d'environ 2 milliards de cellules [2]. Certains fabricants de batteries (SAFT, Shin-Kobe, Japan Storage, Avestor) mettent au point des batteries au lithium dans des configurations à haute énergie et à haute puissance pour les VE et VEH [3].

Une batterie lithium se compose de deux types principaux : les cellules lithium-ion et lithium-polymère [4].

La haute densité d'énergie et de puissance des cellules lithium-ion les rend attrayantes pour un large éventail d'applications, de l'électronique portable aux applications satellites [5].

Pour les batteries lithium-ion, le taux de décharge automatique est très faible à un maximum de 5 % par mois et la durée de vie de la batterie peut atteindre plus de 1500 cycles [5]. Cependant, la durée de vie de la batterie lithium-ion dépend de la température, le vieillissement prenant son péage beaucoup plus rapidement à des températures élevées, et peut considérablement raccourcir en raison de décharges profondes. Cela rend les batteries lithium-ion inadaptées à une utilisation dans des applications de secours où elles peuvent être complètement déchargées. Le principal obstacle est le coût élevé (4 600 \$/kWh) dû au conditionnement spécial et aux circuits internes de protection contre les surcharges [5].

2.2.1 FONCTIONNEMENT : [6]

Une batterie lithium-ion (Li-ion) est une technologie de batterie avancée qui utilise les ions lithium comme composant clé de son électrochimie.

Au cours d'un cycle de décharge, les atomes de lithium dans l'anode sont ionisés et séparés de leurs électrons. Les ions lithium se déplacent de l'anode et traversent l'électrolyte jusqu'à atteindre la cathode, où ils se recombinent avec leurs électrons et se neutralisent électriquement. Les ions lithium sont suffisamment petits pour pouvoir se déplacer à travers un séparateur micro-perméable entre l'anode et la cathode. En partie à cause de la petite taille du lithium (troisième seulement après l'hydrogène et l'hélium), les batteries Li-ion sont capables d'avoir une très haute tension et un stockage de charge par unité de masse et de volume unitaire.

Les batteries Li-ion peuvent utiliser un certain nombre de matériaux différents comme électrodes. La combinaison la plus courante est celle d'oxyde de cobalt et de lithium (cathode) et de graphite (anode), que l'on trouve le plus souvent dans les appareils électroniques portables tels que les smartphones et les ordinateurs portables. D'autres matériaux de cathode comprennent l'oxyde de manganèse et de lithium (utilisé dans les automobiles hybrides et électriques) et le phosphate de fer et de lithium. Les

batteries Li-ion utilisent généralement de l'éther (une classe de composés organiques) comme électrolyte.

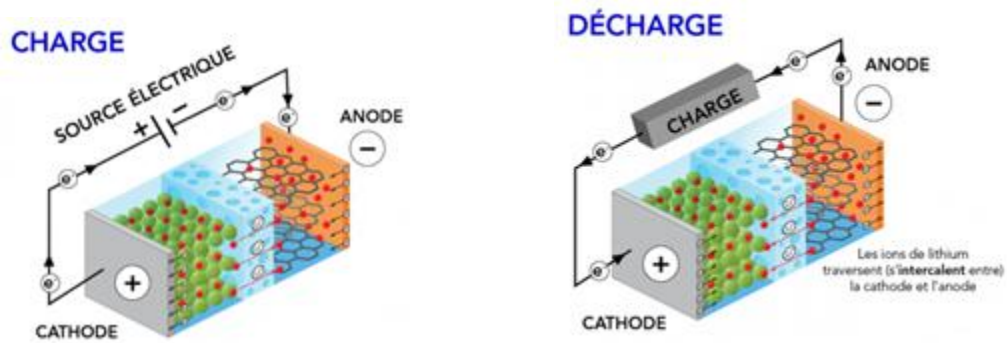


Figure 2.1: Charge et décharge de la batterie lithium ion [6].

Tout comme les piles sèches alcalines utilisées dans les horloges et les télécommandes, par le mouvement des ions fait que les batteries lithium-ion fournissent de l'énergie. Sous sa forme élémentaire, le lithium est extrêmement réactif. Le lithium élémentaire n'est donc pas utilisé dans les batteries lithium-ion.

La cathode contient plutôt du lithium métallique, comme le dioxyde de cobalt et de lithium (LiCoO_2). C'est ce qui fournit les ions de lithium. Quant à l'anode, elle contient du lithium carbonique. L'emploi de ces matériaux permet l'intercalation. Il s'agit de l'insertion d'une molécule entre deux autres molécules. Dans ce cas, les ions de lithium peuvent facilement s'insérer dans les électrodes, ou s'en retirer.

2.2.2 LA CELLULE DE BASE LITHIUM-ION :

L'élément de base est une cellule qui se présente un peu comme un feuilleté : une plaque d'aluminium servant à collecter le courant, puis la cathode, l'électrolyte, puis l'anode, enfin une plaque de cuivre [6]

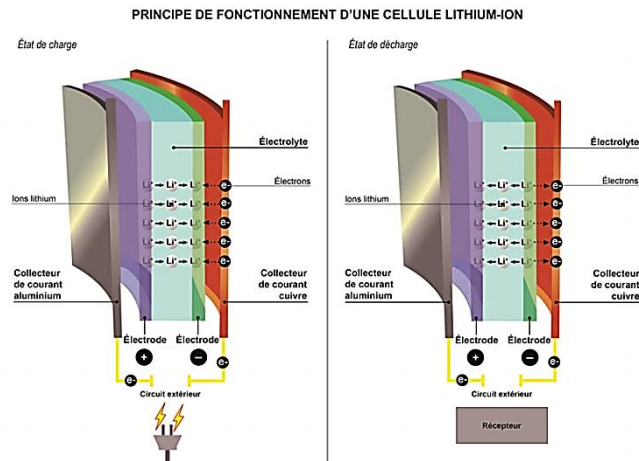
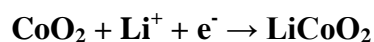


Figure 2.2 : principe de fonctionnement d'une cellule Lithium-ion [6]

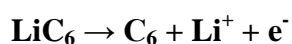
Quand la batterie se charge, les ions de lithium Li^+ quittent l'électrode positive (la cathode) et sont stockés dans l'électrode négative (l'anode). Quand elle se décharge, c-à-d quand elle produit le courant électrique, les ions Li^+ font le mouvement inverse. Ces cellules, de quelques volts chacune, sont regroupées en plus ou moins grand nombre selon la puissance recherchée pour alimenter un téléphone portable ou une batterie de voiture. [6]

2.2.3 REACTIONS CHIMIQUES :

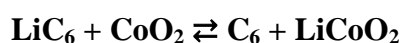
Des réactions d'oxydo-réduction (redox) ont lieu à l'intérieur d'une batterie li-ion. La réduction a lieu du côté de la cathode. Là, l'oxyde de cobalt se combine aux ions de lithium pour former de l'oxyde de lithium et de cobalt (LiCoO_2). Cela donne la demi-réaction suivante :



L'oxydation a lieu de côté de l'anode. Là, le composé d'intercalation de graphite (LiC_6) forme du graphite (C_6) et des ions de lithium. Cela donne la demi-réaction suivante :



Et voici la réaction complète (de gauche à droite = décharge, de droite à gauche = charge) :



2.2.4 COMPOSANTS DES BATTERIES LI-ION :

Une batterie est composée de plusieurs piles individuelles connectées les unes aux autres. À son tour, chaque pile comprend trois éléments principaux : une électrode positive (une cathode), une électrode négative (une anode) et un électrolyte liquide.

COMPOSANTS D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION

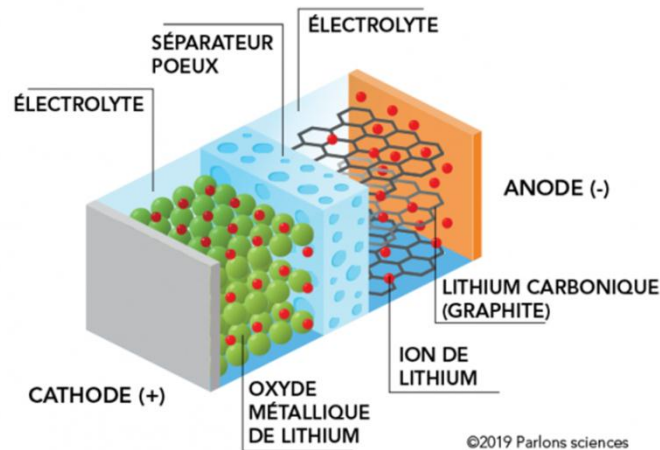


Figure 2.3: Composants d'une batterie Li-ion [7]

2.2.4.1 ANODES:

Les anodes sont des matériaux à base de graphite en raison du faible coût et de la grande disponibilité du carbone. Le graphite est courant dans les LIB commerciales en raison de sa stabilité pour s'adapter à l'insertion de lithium. La faible dilatation thermique des LIB contribue à leur stabilité pour maintenir leur capacité de charge/décharge même après de longs cycles. Cependant, la capacité du graphite à accueillir l'insertion de lithium (372 mAh/g) est relativement faible, et les LIB attireront davantage l'attention si cette propriété est améliorée. Heureusement, ces dernières années, des efforts considérables ont été déployés pour optimiser les matériaux d'anode à base de graphite, et plusieurs nouveaux matériaux d'anode, notamment le silicium, les alliages et les oxydes métalliques, sont développés. La capacité et la durée de vie des LIB ont été efficacement améliorées grâce au développement de nouveaux matériaux d'anode (par exemple, un composite silicium/carbone) ou de nouveaux matériaux de cathode riches en nickel. [7]

2.2.4.2 CATHODES :

Le nom des LIB commerciales actuelles provient du donneur lithium-ion dans la cathode, qui est le principal déterminant des performances de la batterie. Généralement, les cathodes sont constituées d'un matériau composé lithié complexe, en particulier plusieurs matériaux d'oxyde de lithium métallique, tels que $LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$ et $LiFePO_4$. Avec différentes cathodes, les performances de la batterie diffèrent considérablement. Mais, par rapport au lithium métallique, tous les composés susmentionnés présentent une impédance élevée en raison de leurs faibles coefficients de diffusion et conductivités ioniques, ce qui se traduira par une EE et une durée de vie faibles. Cette limitation peut être surmontée en fabriquant la cathode à partir de matériaux composés de lithium finement pulvérisés et en la mélangeant avec des matériaux conducteurs (le carbone par exemple) en mélangeant avec un liant (comme le fluorure de polyvinylidène) et un solvant (la N-méthyl-2-pyrrolidone par exemple). La cathode sur la feuille d'aluminium est formée en forme de plaque ou de spirale. [7]

2.2.4.3 ÉLECTROLYTES :

Les électrolytes des LIB sont principalement divisés en deux catégories, à savoir les électrolytes liquides et les électrolytes semi-solides/à l'état solide. Habituellement, les électrolytes liquides sont constitués de sels de lithium [par exemple, $LiBF_4$, $LiPF_6$, $LiN(CF_3SO_2)_2$ et $LiBOB$], qui sont dissous dans des carbonates organiques (par exemple, carbonate d'éthylène, carbonate de propylène, carbonate de méthyle éthyle, carbonate de diméthyle et leurs mélanges). En règle générale, les électrolytes semi-solides / à l'état solide sont composés de sels de lithium en tant que sels conducteurs et de matrices polymères de poids moléculaire élevé (par exemple, le fluorure de polyvinylidène, le polyoxyde d'éthylène) et le fluorure de polyvinylidène-hexafluoropropylène). [7]

2.2.5 AVANTAGES DES BATTERIES LI-ION :

Par rapport aux autres technologies de batteries rechargeables de haute qualité (nickel-cadmium ou nickel-métal-hydrure), les batteries Li-ion présentent de nombreux avantages.

- Des densités d'énergie les plus élevées de toutes les technologies de batterie aujourd'hui (100-265 Wh/kg ou 250-670 Wh/L).

- Les cellules de batterie Li-ion peuvent fournir jusqu'à 3,6 Volts, 3 fois plus que des technologies telles que Ni-Cd ou Ni-MH. Cela signifie qu'elles peuvent fournir de grandes quantités de courant pour les applications à haute puissance et ont relativement peu besoin d'entretien et ne nécessitent pas de cycle programmé pour maintenir leur durée de vie.
- Les batteries Li-ion n'ont pas d'effet mémoire, un processus préjudiciable où des cycles de charge/décharge partielle répétés peuvent amener une batterie à « se souvenir » d'une capacité inférieure. C'est un avantage par rapport au Ni-Cd et au Ni-MH, qui présentent cet effet.
- Les batteries Li-ion ont également un faible taux d'autodécharge d'environ 1,5 à 2 % par mois. Elles ne contiennent pas de cadmium toxique, ce qui les rend plus faciles à éliminer que les batteries Ni-Cd.

En raison de ces avantages, les batteries Li-ion ont remplacé les batteries Ni-Cd en tant que leader du marché des appareils électroniques portables (tels que les smartphones et les ordinateurs portables). Les batteries Li-ion sont également utilisées pour alimenter les systèmes électriques de certaines applications aérospatiales, notamment dans le nouveau Boeing 787, plus respectueux de l'environnement, où le poids est un facteur de coût important. Du point de vue de l'énergie propre, une grande partie de la promesse de la technologie Li-ion vient de leurs applications potentielles dans les voitures alimentées par batterie. Actuellement, les voitures électriques les plus vendues, la Nissan Leaf et la Tesla Model S, utilisent toutes deux des batteries Li-ion comme principale source de carburant. [7]

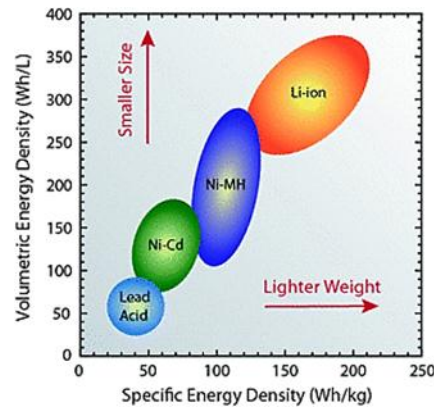


Figure 2.4 : Comparaison entre plusieurs types de batteries selon la densité d'énergie
[core.ac.uk]

2.2.6 INCONVENIENTS DES BATTERIES LI-ION :

Malgré leur promesse technologique, les batteries Li-ion présentent encore un certain nombre de lacunes, notamment en matière de sécurité. Les batteries Li-ion ont tendance à surchauffer et peuvent être endommagées à haute tension. Dans certains cas, cela peut entraîner un emballement thermique et une combustion. Les batteries Li-ion nécessitent des mécanismes de sécurité pour limiter la tension et les pressions internes, ce qui peut augmenter le poids et limiter les performances dans certains cas. [7]

Les batteries Li-ion sont également sujettes au vieillissement, ce qui signifie qu'elles peuvent perdre de leur capacité et tomber fréquemment en panne après plusieurs années. Un autre facteur limitant leur adoption généralisée est leur coût, qui est environ 40 % plus élevé que le Ni-Cd. La résolution de ces problèmes est un élément clé de la recherche actuelle sur la technologie.

Enfin, malgré la densité énergétique élevée du Li-ion par rapport aux autres types de batteries, elles sont encore environ cent fois moins denses énergétiquement que l'essence (qui contient 12 700 Wh/kg en masse ou 8 760 Wh/L en volume).[7]

2.3 LE SUPERCONDENSATEUR :

2.3.1 LE CONDENSATEUR :

Les condensateurs stockent l'énergie sous forme de charge électrique entre deux plaques métalliques ou conductrices séparées par un matériau isolant appelé

diélectrique lorsqu'un différentiel de tension est appliqué sur les plaques [8]. Quand une plaque est chargée d'électricité à partir d'une source de courant continu, l'autre plaque aura induit en elle une charge du signe opposé [9]. Les facteurs qui déterminent la capacité sont la taille des plaques, la séparation des plaques et le type de matériau utilisé pour le diélectrique. L'énergie stockée dans les condensateurs est directement proportionnelle à leur capacité et au carré de la tension entre les bornes de la cellule électrochimique, tandis que la capacité est proportionnelle à la distance entre les électrodes. Les condensateurs sont déjà utilisés dans de nombreuses applications de contrôle d'alimentation. Les avantages des condensateurs pour un faible stockage d'énergie et une décharge courte sont une longue durée de vie et une capacité de recharge immédiate [10]. Cependant, le principal problème présenté par les condensateurs est la faible densité d'énergie. Si une grande capacité est nécessaire, la surface du diélectrique doit être très grande. Ce fait rend l'utilisation de grands condensateurs peu économique et souvent encombrante [11].

2.3.2 LES SUPERCONDENSATEURS :

Les SCs sont des dispositifs électrochimiques de stockage de l'énergie de forte puissance spécifique également appelé ultra-condensateur ou condensateur électrochimique (EC). Sa capacité provient de deux manières ; la capacité électrique à double couche (EDLC) et la pseudo-capacité faradique (FP) [12].

1. EDLC : Le stockage électrostatique a été réalisé par séparation de charge dans une double couche de Helmholtz, et aucun transfert de charge à travers l'interface électrode/électrolyte. Le stockage de charge est hautement réversible, permettant des stabilités de cycle de vie élevées. La distance de séparation de charge dans une double couche est de l'ordre de 0,3 à 0,8 nm. Le matériau d'électrode EDLC le plus courant est le carbone. Actuellement, le SC à base de carbone représente environ 85 % du chiffre d'affaires mondial des SCs. Le charbon actif représente le matériau carboné le plus utilisé dans les dispositifs commerciaux en raison de la disponibilité de ses précurseurs et de son faible coût[12].

2. FP : Des réactions redox rapides et réversibles se produisent à la surface des matériaux d'électrode, améliorant considérablement la capacité des matériaux d'électrode. La capacité FP peut être 10 à 100 fois supérieure à celle de l'EDLC. Ce type de matériau comprend principalement des oxydes de métaux de transition (par

exemple, RuO₂) et des polymères conducteurs (par exemple, polyaniline, polypyrrole, polythiophène et leurs dérivés correspondants). Les réactions impliquent une adsorption réversible (par exemple, l'adsorption d'hydrogène), des réactions redox (par exemple, RuO₂) et un dopage/dédopage électrochimique réversible (par exemple, des électrodes conductrices à base de polymère). FP souffre généralement d'une densité de puissance relativement plus faible que EDLC car les processus faradiques sont normalement plus lents que les processus non faradiques. De plus, FP manque souvent de stabilité pendant le cyclage en raison des réactions redox se produisant aux électrodes. Les capacités EDLC et FP contribuent à la capacité totale du SC. Le rapport des deux varie considérablement en fonction de la conception des électrodes et de la composition de l'électrolyte. Sur la base de la conception des électrodes, EC est divisé en trois familles. [12]

- **Condensateurs EDLC:** Le carbone ou ses dérivés servent d'électrodes. Les charbons actifs commerciaux ont une capacité inférieure à 200 F g^{-1} dans les électrolytes aqueux et inférieure à 100 F g^{-1} dans les électrolytes organiques. La densité d'énergie moyenne est d'environ 5 Wh kg^{-1} .
- **Condensateurs FP :** Les électrodes sont constituées d'oxydes métalliques ou de polymères conducteurs, qui présentent une capacité FP beaucoup plus élevée que celle des EDLCs. Une capacité de 600 à 1000 F g^{-1} est réalisable.
- **Condensateurs hybrides :** Ce type de condensateur a une configuration d'électrode asymétrique (par exemple, une électrode est en carbone tandis que l'autre est en FP)

2.3.3 FONCTIONNEMENT :

Les SCs ont le même principe que les condensateurs. (C-à-d ils stockent l'énergie sous forme de charge électrique entre deux plaques métalliques ou conductrices séparées par un matériau isolant appelé diélectrique lorsqu'un différentiel de tension est appliqué sur les plaques [9]. Quand une plaque est chargée d'électricité à partir d'une source de courant continu, l'autre plaque aura induit en elle une charge du signe opposé.)

Contrairement au condensateur, le matériau isolant est remplacé par un conducteur ionique électrolytique dans lequel le mouvement ionique est effectué le long d'une électrode conductrice avec une surface spécifique très grande fournissant une densité

d'énergie plus élevée au système [10]. La conception des électrodes et le choix de l'électrolyte permettent une densité de charge très élevée sur les surfaces de l'électrode, mais limite la tension à environ 2,7 V par cellule. Malgré la basse tension, la teneur en énergie est beaucoup plus élevée que dans les condensateurs conventionnels et peut atteindre l'échelle de quelques Wh pour certains des plus grands SCs qui sont maintenant disponibles sur le marché.

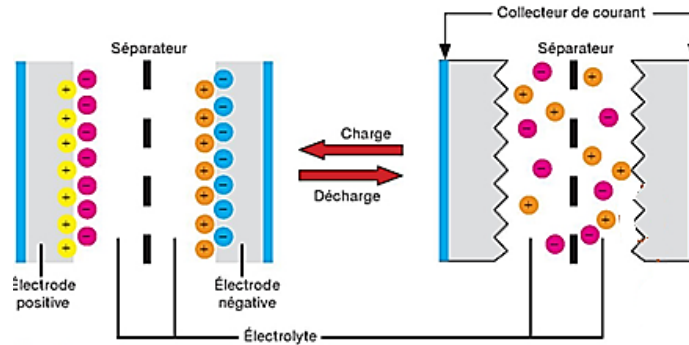


Figure 2.5 : Représentation schématique d'un SC dans l'état de charge et de décharge. [openedition.org]

2.3.4 APPLICATIONS DES SUPERCONDENSATEURS :

Les applications des supercondensateurs couvrent le transport (VE, VEH, les métros et les tramways) (conservation d'énergie, freinage régénératif et aide au démarrage à froid, etc.), la sauvegarde (appareils photo numériques, ordinateurs, alimentations sans coupure, et télécommunications), industrielles (automatisation des usines et robotique) et énergies renouvelables (énergie solaire et éolienne), etc.

Dans la plupart des applications, l'énergie stockée ne fournit la charge que pendant quelques secondes ou quelques minutes. Le nombre de cycles de charge et de décharge est pratiquement illimité, mais le débit d'énergie en fonctionnement cyclique rapide est limité. Un circuit de contrôle pour équilibrer les tensions individuelles de chaque SC est nécessaire pour un fonctionnement sûr et fiable si les SCs sont connectés en série pour atteindre une tension de sortie élevée. La durée de vie des supercondensateurs sera probablement dans la gamme des grands condensateurs conventionnels, p.ex. 10 ans. L'efficacité d'entrée-sortie est très élevée, mais le taux d'autodécharge est considérable par rapport aux batteries. Enfin, on peut

noter que l'inconvénient le plus important des supercondensateurs est leur coût élevé estimé à 5 fois celui des batteries plomb-acide [13]

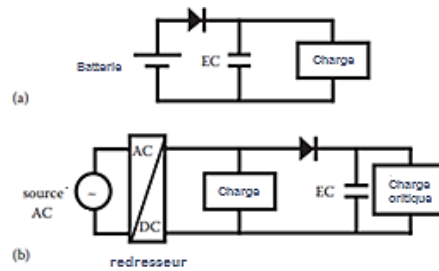


Figure 2.6: Utilisation de SC dans les circuits électroniques.[12]

- (a) Dispositif alimenté par batterie où le SC assure l'alimentation de secours de la charge en cas de déconnexion de la batterie.
- (b) Dispositif alimenté en courant alternatif impliquant de forts courants de commutation. Le SC protège la charge critique des chutes de tension importantes.

2.3.5 AVANTAGE DES SUPERCONDENSATEURS : [12]

- Longue durée de vie.
- Large plage de température de fonctionnement.
- Ecologiques.
- Haute efficacité.

2.3.6 INCONVENIENTS : [12]

- Prix élevé.
- Faible densité d'énergie.
- Basse tension.
- Absence de normes.
- Sensibilisation limitée des consommateurs.

Tableau 2.1: Comparaison entre batterie Li-ion et SC :

Fonction	Supercondensateur	Batterie lithium-ion
Temps de charge	1-10 secondes	10-60 minutes
Cycle de vie	1 million ou 30 000h	500 et plus
Tension d'une cellule	De 2.3 à 2.75 V	3.6 à 3.7 V

Energie spécifique Wh/kg	5	100-200
Puissance spécifique W/kg	Jusqu'à 10 000	1000-3000
Durée de service (véhicule)	10 à 15 ans	5 à 10 ans
Température de charge	-40 à 65°C	0 à 45°C
Température de décharge	-40 à 65°C	20 à 60°C
Coût par Wh	\$20	0.50-1.00 (système large)

2.3.7 SYSTEME HYBRIDE DE STOCKAGE D'ENERGIE (SHSE) :

L'hybridation des supercondensateurs de batteries aide à surmonter les limites des batteries ou des supercondensateurs. Il réduit les contraintes appliquées aux batteries, améliorant ainsi leur durée de vie.

L'hybridation des systèmes de stockage d'énergie intégrés offre les avantages suivants:

- Amélioration de la durée de vie de la batterie Li-ion.
- Récupération d'énergie maximale au freinage.
- Réduction de la taille du système de stockage d'énergie intégré.
- Réduction du coût des sources intégrées. [14]

2.3.7.1 SYSTEMES HYBRIDES DE STOCKAGE D'ENERGIE DANS LES VEHICULES ELECTRIQUES :

L'électrification est un moyen important de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports. Le parc mondial de voitures électriques a maintenant dépassé les 5 millions et continuera d'augmenter à l'avenir. Le système de stockage d'énergie est un élément essentiel du véhicule électrique (VE). Le système de stockage doit être rentable, léger, efficace, sûr, fiable, occupe moins d'espace et a une longue durée de vie. Il devrait également être produit et éliminé de manière écologique. Il est intéressant de noter que les véhicules électriques peuvent servir de réserve pendant les périodes de panne de réseau ou de flambée de la demande. Elverlingsen, en Allemagne, recueille près de 2000 batteries de VE Mercedes Benz pour créer une batterie fixe de la taille d'une grille pouvant contenir 9 MW d'énergie [15].

La technologie des batteries Lithium-ion (Li-ion) joue un rôle majeur dans les VEs en raison de sa puissance et de sa densité énergétique. Les supercondensateurs (SC)

possèdent une densité de puissance extrêmement élevée, un temps de cycle élevé, une efficacité de cycle et une faible densité d'énergie. La connexion d'un bloc-batterie à des supercondensateurs est considérée comme une méthode efficace pour fournir de l'énergie et de la puissance aux véhicules électriques (VE) et aux véhicules électriques hybrides (VEH), car elle donne à la fois une puissance élevée et une capacité énergétique élevée. [15]

2.4 CONCLUSION:

Dans ce chapitre nous avons vu quelques généralités concernant les batteries Lithium ion et les supercondensateurs, leurs caractéristiques et fonctionnement, leurs avantages et inconvénients, le but de leur hybridation et l'intérêt de l'utilisation de ce système hybride dans les véhicules électriques.

Les différentes topologies du SSEH sont introduites dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 03:
TOPOLOGIES

3.1 INTRODUCTION:

La distribution de l'énergie entre diverses sources d'énergie est coordonnée à l'aide de systèmes de gestion de l'énergie (SGE) et de topologies appropriés pour les SSE. En outre, en distribuant correctement la puissance de sortie dans l'ensemble du système, ces méthodes améliorent l'économie et l'efficacité du système tout en prolongeant la durée de vie des SSEH.

3.2 Topologies du SSEH Batterie-SC :

La distribution de l'énergie entre diverses sources d'énergie est coordonnée à l'aide de systèmes de gestion de l'énergie (SGE) et de topologies appropriés pour les SSH.

De plus, en distribuant correctement la puissance de sortie dans l'ensemble du système, ces méthodes améliorent l'économie et l'efficacité du système tout en prolongeant la durée de vie des SSEH [1].

Le SSEH peut être relié au bus DC ou au bus AC à l'aide d'un convertisseur DC-AC séparé.

Pour utiliser les deux et minimiser leurs inconvénients, le SSEH est généralement développé en connectant le supercondensateur et la batterie via un convertisseur DC-DC bidirectionnel [2].

Il existe trois types de topologies d'interconnexion : passive, semi-active et active. En fonction des exigences du système et des fonctions du système de gestion de l'énergie, un large éventail de topologies peut être choisi.

3.2.1 TOPOLOGIE ACTIVE :

Dans les topologies HESS actives, deux convertisseurs d'alimentation CC-CC bidirectionnels sont utilisés pour connecter les éléments ESS au bus CC et gérer activement le flux de leur puissance. La tension des dispositifs de stockage d'énergie peut être distincte de la tension du bus CC en raison des convertisseurs DC-DC. [3]

Dans les applications EV, les tensions des bus DC doivent rester constantes pendant la durée de conduite ; par conséquent, une topologie entièrement active est la principale option pour ces types d'applications.

Un SSEH entièrement opérationnel peut être utilisé pour mettre en œuvre le contrôle optimal. Cependant, cette conception compromet l'efficacité, le coût et la taille des composants du SSEH.

La conception est également plus complexe qu'une conception passive.

Il existe deux types de topologies actives : parallèles et séries.

En insérant un convertisseur DC-DC entre le supercondensateur et la charge, la topologie parallèle élimine les inconvénients des fluctuations de tension du SC, ce qui en fait de loin le meilleur hybride actif.

En plaçant un convertisseur DC-DC entre la batterie et la liaison DC, il est possible d'atteindre à la fois le flux de courant constant de la batterie et les différences de charge et de tension de la batterie.

Le stockage de puissance élevée et le stockage d'énergie élevé sont cascades dans l'architecture de série avec un convertisseur de puissance pour l'isoler du bus DC. Comme cette topologie exige que le convertisseur de puissance respecte la puissance nominale globale du SSEH, elle est souvent ignorée. [3]

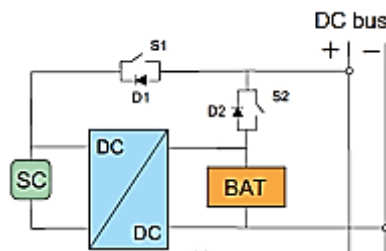


Fig 3.1: Topologie active [3]

3.2.2 TOPOLOGIE PASSIVE :

Pour les topologies passives, les caractéristiques électriques des dispositifs SSE n'influencent que le mécanisme de partage de puissance et la réactivité des bornes directement liées au bus DC. Le rapport d'impédance détermine comment la charge

est divisée dans l'architecture passive, qui est similaire aux générateurs synchrones fonctionnant en parallèle. [3]

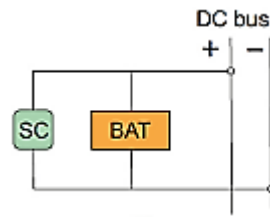


Fig 3.2: Topologie passive [3]

La charge est répartie de façon similaire en fonction des caractéristiques de sortie et de la résistance interne du SSE. La température et l'état de charge actuel ont des répercussions importantes sur la résistance dans cette situation. [3]

En raison de ses limites, telles que le manque de contrôlabilité et le partage variable de la puissance dépendant de l'impédance de la source, et en raison de leur connexion directe au système, les SSE sont susceptibles de défaillance en cascade en cas d'urgence, et la tension de bus DC ou de charge doit correspondre exactement à la tension du SSE. [3]

Une unité de stockage d'énergie se connecte directement au bus DC, tandis que l'autre est connectée via un convertisseur DC-DC dans une configuration SSEH semi-active, ce qui est un compromis décent entre le prix du système et l'efficacité. En outre, la topologie semi-active peut être utilisée pour exécuter la majorité des techniques de contrôle. Les structures semi-actives dotées de SC et de batteries réglementées ont été examinées dans la littérature. [3]

3.2.3 TOPOLOGIE SEMI-ACTIVE :

Dans la topologie semi-active du supercondensateur, la batterie est directement couplée au bus DC tandis que le SC est couplé en série avec un convertisseur DC-DC bidirectionnel pour utiliser sa large gamme de tension. Comme la batterie est reliée directement, la tension du bus DC est stable. Par conséquent, le choix et la conception d'un convertisseur capable de gérer des courants forts et des variations de tension significatives ajoutent au prix. [3]

Dans la topologie semi-active de la batterie, le SC est directement connecté au bus DC tandis que la batterie est connectée en série avec un convertisseur bidirectionnel DC-DC. Depuis la batterie est déconnecté, le convertisseur peut configurer les profils de courant de la batterie pour être très lisse. Des valeurs élevées de variations de courant pendant l'accélération et la décélération d'urgence peuvent être absorbées par l'ultra-condensateur. Cependant, en raison de la connexion du condensateur ultra-direct, la tension du bus DC fluctuera.[3]

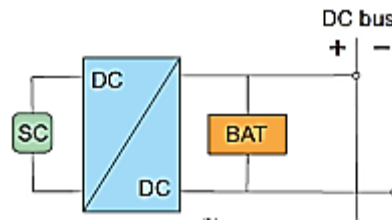


Fig 3.3 : Topologie semi-active [3]

Par conséquent, la topologie la plus appropriée pour les applications véhiculaires est la topologie semi-active qui est généralement choisie comme la topologie idéale comme équilibre entre les dépenses et la complexité de la technique de contrôle. Parmi les deux types de topologies semi-actives, il y a des distinctions, comme les économies d'énergie où SC/batterie semi-active SSEH peut économiser plus d'énergie par rapport au système batterie / SC. [3]

3.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS :

Le SSEH pleinement actif offre les meilleures performances, car il utilise deux convertisseurs DC-DC pour la gestion de l'énergie de la batterie et du supercondensateur, respectivement. Néanmoins, cette topologie a des coûts élevés, et le contrôle de l'interaction en temps réel entre les deux convertisseurs est complexe [9]

Le SSEH semi-actif n'utilise qu'un seul convertisseur de puissance, et bien que ses performances de contrôle ne soient pas parfaites, le coût et la complexité du système sont considérablement réduits. En outre, la plupart des stratégies de contrôle peuvent être appliquées à cette topologie. En raison de ces avantages, SSEH semi-actif est actuellement la topologie la plus populaire [4].

La topologie passive est très simple, mais en raison du manque de contrôle, l'effet de compensation de puissance du supercondensateur est relativement faible [3].

3.4 GESTION DE L'ÉNERGIE :

Il existe diverses stratégies de contrôle, et les principes de base de ces stratégies sont similaires en raison de la structure simple de du système de stockage d'énergie hybride.

Par exemple une stratégie de contrôle dynamique polynomiale de type courant pour le SSEH semi-actif supercondensateur/batterie est basée sur la puissance de sortie du convertisseur DC-DC régulée en contrôlant le courant du supercondensateur. Cette stratégie calcule la référence de courant du supercondensateur à l'aide du modèle de convertisseur DC-DC, et les paramètres d'efficacité du convertisseur dans le modèle sont corrigés en ligne. Étant donné que les paramètres d'efficacité du convertisseur sont simultanément affectés par de nombreux facteurs tels que le rapport cyclique, la puissance d'entrée, la tension et le courant, la puissance de sortie du convertisseur DC-DC peut ne pas être contrôlée avec précision en utilisant le courant du supercondensateur comme référence.

Le SGE peut être largement ramifié en deux niveaux. Le système de commande de bas niveau ajuste la tension du bus DC et régule le débit du courant entrant et sortant des composants SSE conformément aux signaux de référence produits par le système de commande de haut niveau. Le système de contrôle de haut niveau applique une approche d'allocation de puissance, de surveillance et de contrôle du SOC et d'autres stratégies d'innovation et de gestion environnementale pour atteindre les objectifs de contrôle souhaités [5]

Les méthodes simples de répartition de la puissance peuvent ne pas être adéquates pour répartir efficacement la demande d'énergie des composants du système de stockage d'énergie dans le HESS en raison des propriétés complexes et non linéaires de la batterie et du supercondensateur pendant l'opération de chargement/déchargement. Des algorithmes avancés de contrôle de surveillance du SGE ont été élaborés en conséquence [3]; par conséquent, les méthodes de contrôle fondées sur des règles et les méthodes de contrôle fondées sur l'optimisation constituent la majorité de leur classification [3].

3.5 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons vu les topologies active, semi-active et passive du système de stockage d'énergie hybride.

Le chapitre suivant fait l'objet de plusieurs simulations et la discussion de leurs résultats.

CHAPITRE 04 :
MODELISATION, SIMULATION ET
RESULTATS

4.1 INTRODUCTION:

Pour relever les défis que posent les combustibles fossiles en tant que principale source d'énergie pour les transports, les véhicules électriques (VE) alimentés par des systèmes de batteries à faibles ou nulles émissions polluantes gagnent en popularité. Bien que les progrès réalisés dans le domaine des batteries puissent améliorer le rendement des VE, le courant de charge ou de décharge illimité des batteries réduira la durée de vie des batteries et leur efficacité. La combinaison d'une batterie et de supercondensateurs comme système de source d'énergie hybride (SSEH) pour VE est considérée comme un bon moyen d'améliorer l'efficacité globale du véhicule et la durée de vie de la batterie. Les supercondensateurs ont des avantages de haute densité de puissance, une durée de vie élevée et une très bonne efficacité de charge/décharge. Ils peuvent également fournir une grande puissance transitoire pratiquement instantanément et sont, par conséquent, adaptés pour répondre à des changements soudains de puissance EV tels que l'accélération ou la rencontre d'une inclinaison

La plage de gain est souhaitée pour que le HESS puisse connecter des supercondensateurs basse tension à un bus DC haute tension.

Il existe deux grandes classifications pour les convertisseurs DC bidirectionnels, à savoir les convertisseurs isolés et les convertisseurs non isolés.

Les convertisseurs bidirectionnels isolés peuvent atteindre un gain de haute tension facilement. Cependant, l'énergie de l'inductance de fuite du transformateur peut fournir une tension élevée, augmenter les pertes de commutation, et causer de graves interférences électromagnétiques.

Par conséquent, un convertisseur DC-DC bidirectionnel non isolé est souvent plus souhaitable pour réduire le coût, réduire le volume du convertisseur et améliorer l'efficacité de la conversion. [1]

Compte tenu des problèmes décrits, un convertisseur DC-DC bidirectionnel avec condensateur commuté est proposé pour améliorer le gain de tension et réduire la contrainte de tension entre les composants.

4.2 CONTRÔLE EN BOUCLE OUVERTE DU CONVERTISSEUR CC-CC ALIMENTÉ PAR SUPERCONDENSATEUR :

4.2.1 MODE ELEVATEUR:

L'énergie circule du côté basse tension vers le côté haute tension.

La tension de sortie du supercondensateur est de 40 volts.

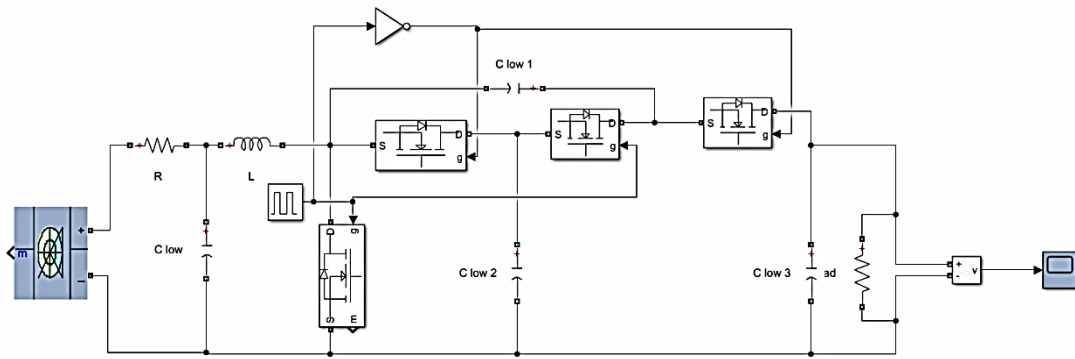


Fig 4.1 Contrôle en boucle ouverte du convertisseur DC-DC alimenté par un SC (mode boost up)

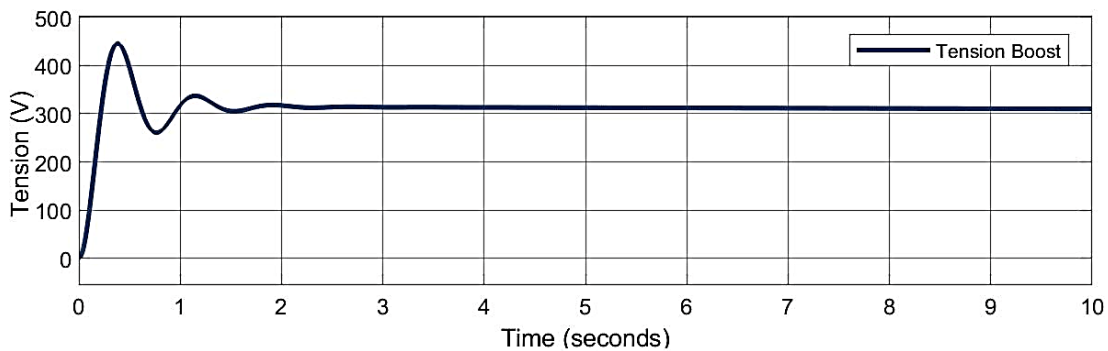


Fig 4.2 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC (boost)

La sortie du convertisseur est montrée ci-dessous. Le convertisseur augmente la tension de 40 volts à 300 volts.

4.2.2 MODE ABAISSEUR:

L'énergie circule du côté haute tension vers le côté basse tension. La tension de sortie du supercondensateur est de 300 volts.

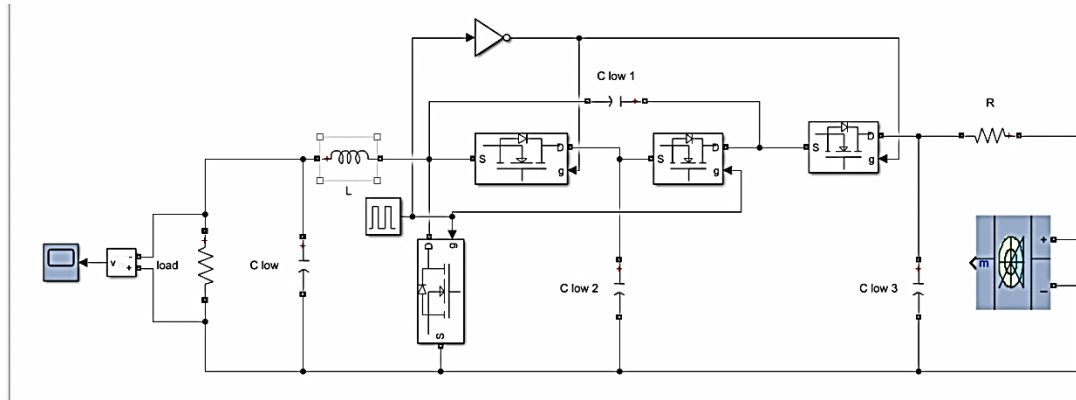


Fig 4.3: Contrôle en boucle ouverte du convertisseur DC-DC alimenté par un SC (mode buck)

La sortie du convertisseur est montrée ci-dessous. Le convertisseur abaisse la tension de 300 volts à 40 volts.

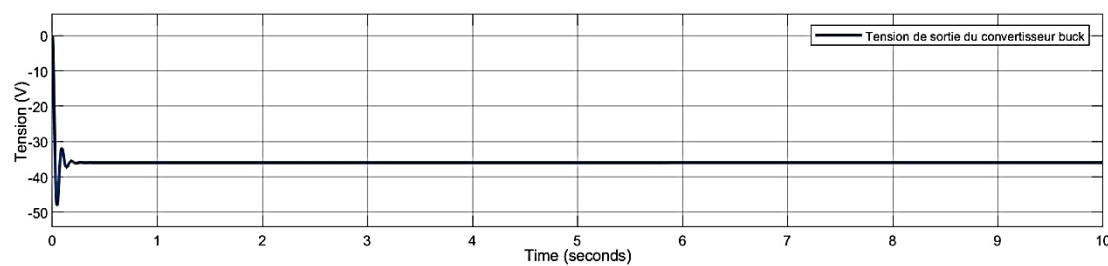


Fig 4.4: Tension de sortie du convertisseur DC-DC (buck)

4.3 CONTRÔLE EN BOUCLE FERMÉE:

La commande en boucle fermée est utilisée pour maintenir la tension de sortie constante du convertisseur bien qu'il y ait une variation dans la tension d'entrée du convertisseur. Un régulateur proportionnel et intégral est actionné dans la boucle de tension.

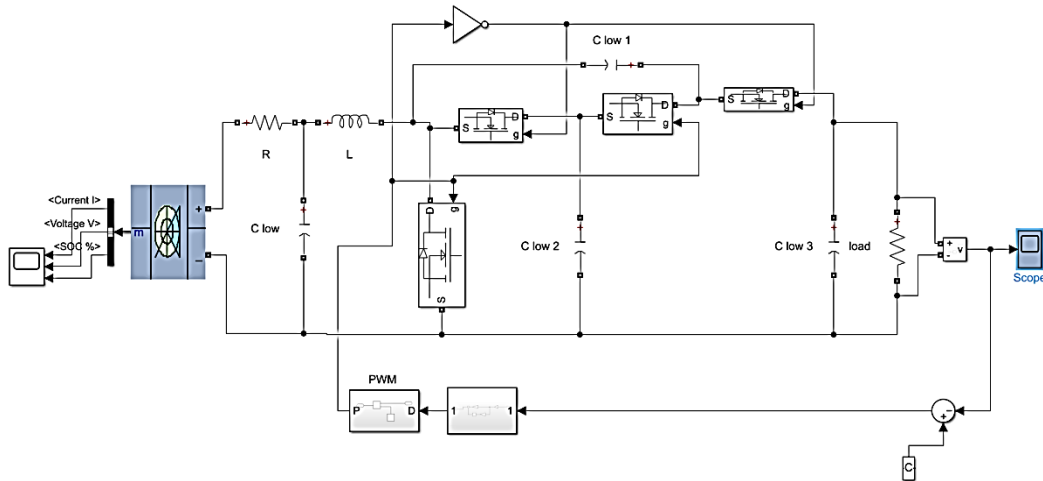


Fig 4.5 : contrôle en boucle fermée du SC

La tension de sortie du convertisseur est indiquée ci-dessous. Avec l'aide d'un régulateur proportionnel et intégral, la sortie de la tension du convertisseur est maintenue à 300volts.

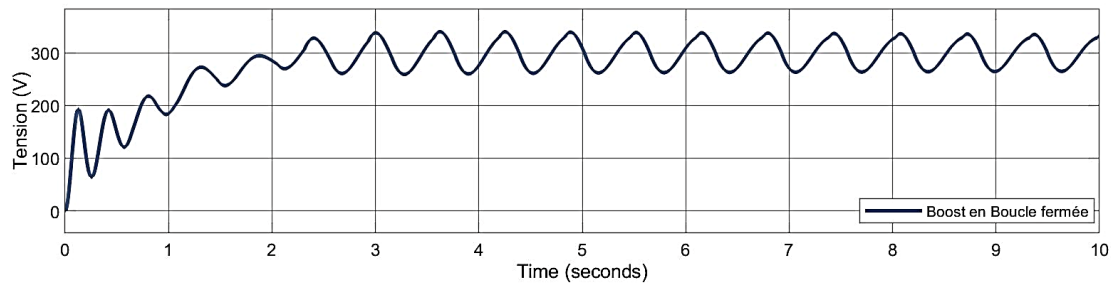


Fig 4.6: tension de sortie du convertisseur

4.4 CONVERTISSEUR BUCK BOOST ALIMENTÉ PAR BATTERIE :

Une batterie est utilisée pour alimenter un convertisseur buck boost. La tension de sortie de la batterie est de 50 volts. Ici, le convertisseur augmente la tension à 300 volts. Pour maintenir une tension constante à la sortie du convertisseur, un régulateur proportionnel et intégral est utilisé en boucle de tension.

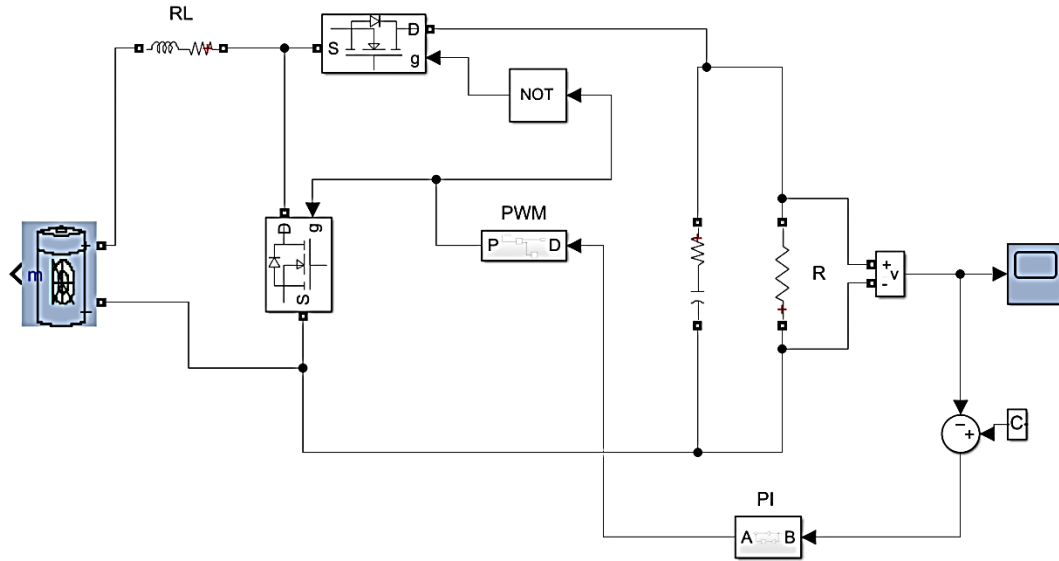


Fig 4.7: convertisseur buck boost alimenté par batterie

La tension de sortie du convertisseur est indiquée ci-dessous. La tension de sortie est maintenue constante à 300 volts.

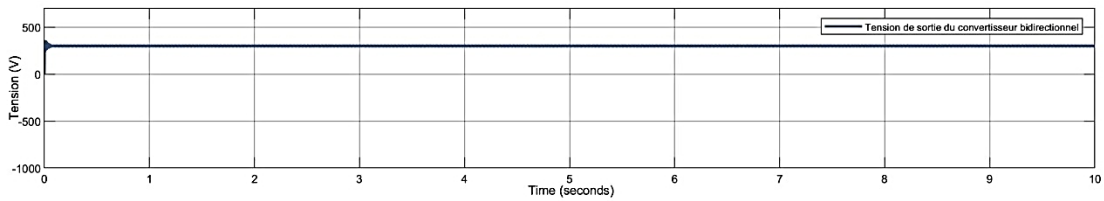


Fig 4.8 : tension de sortie du convertisseur

Un convertisseur bidirectionnel dc-dc à condensateur commuté a été développé. Le contrôle en boucle fermée est utilisé afin de réduire les variations de la tension de sortie avec la variation de tension d'entrée respective. Un prototype de 300 W peut être développé à partir des sources d'énergie hybrides ci-dessus.

4.5 POUR UN VEHICULE ELECTRIQUE:

Le SSEH batterie/SC est présenté comme une configuration semi-active.

Le supercondensateur est relié à un convertisseur Buck/Boost, tandis que la batterie est couplée avec un convertisseur Buck DC/DC.

La demande totale de puissance doit être satisfaite par la batterie et le supercondensateur ensemble. Par conséquent, [2]

$$P_{totale} = P_{batt} + P_{sc} \tag{4.1}$$

La puissance de la batterie et la puissance du supercondensateur doivent être comprises entre leurs valeurs minimales et maximales individuelles [2]

$$P_{batt_{min}} \leq P_{batt}(t) \leq P_{batt_{max}} \quad (4.2)$$

$$P_{sc_{min}} \leq P_{sc}(t) \leq P_{sc_{max}} \quad (4.3)$$

La puissance minimale indique la puissance minimale requise pour la charge et la puissance maximale indique la puissance maximale pour décharger parmi les dispositifs de stockage. La fonction d'objectif de minimisation prise en compte dans ce travail est donnée en (4.4) [2]

$$J = \min \sum^{t=N} \{P_{totale}(t) - (u_{batt} \times P_{batt}(t) + u_{sc} \times P_{sc}(t))\} \quad (4.4)$$

Où N représente l'intervalle de période basé sur le cycle de conduite considéré et u_{batt} et u_{sc} sont les facteurs de poids de la batterie et du supercondensateur. [2]

4.5.1 SIMULATION :

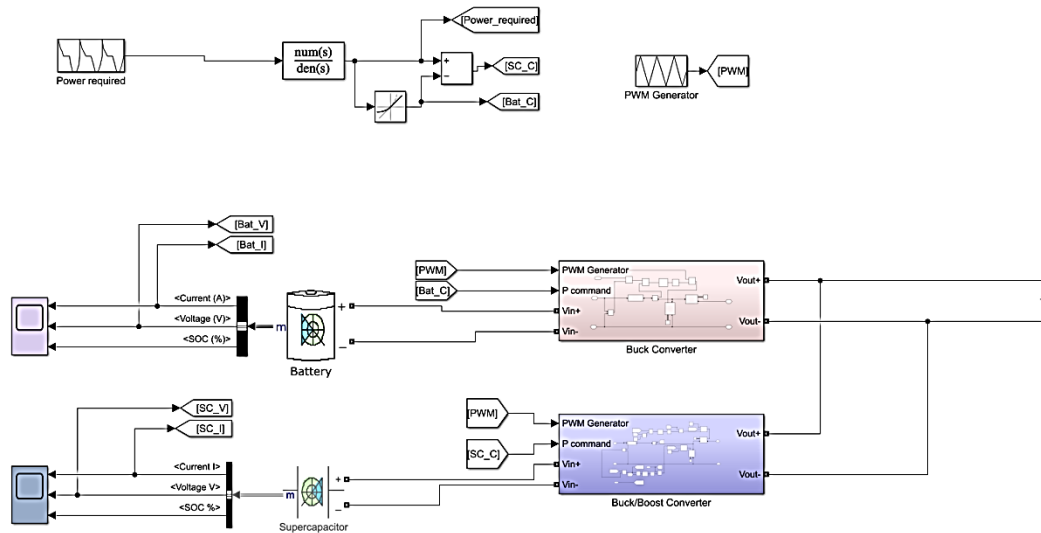


Figure 4.9 : Configuration semi active d'un système de stockage hybride par batterie Li-ion et SC

4.5.2 Résultats et interprétations :

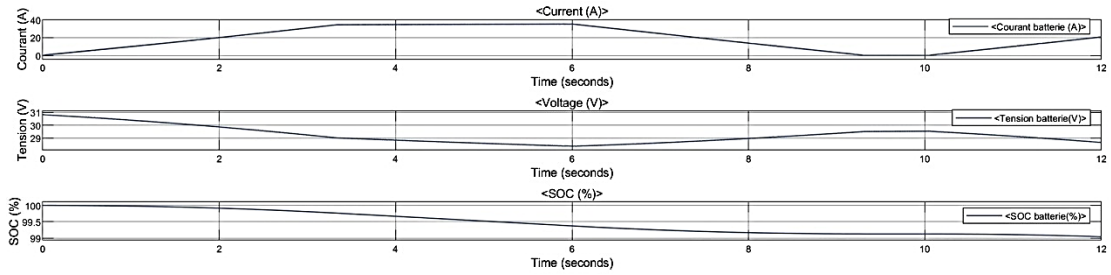


Figure 4.10 : Courant, tension et état de charge de la batterie Li-ion pour une configuration semi active d'un système de stockage hybride

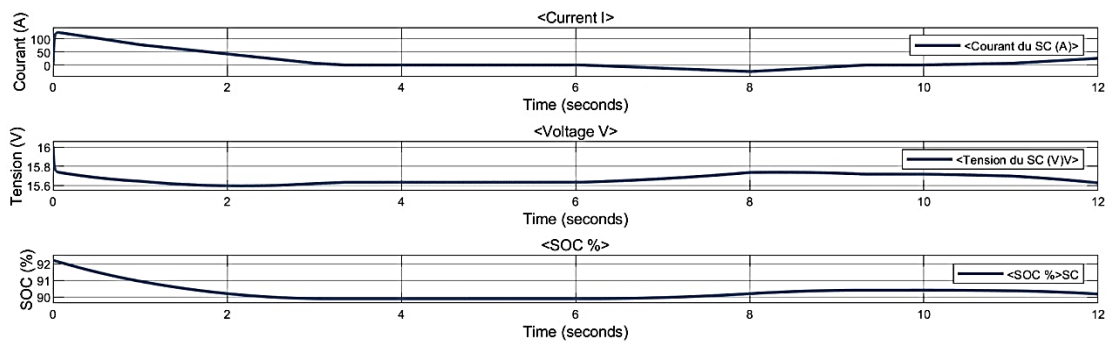


Figure 4.11 : Courant, tension et état de charge du supercondensateur pour une configuration semi active d'un système de stockage hybride

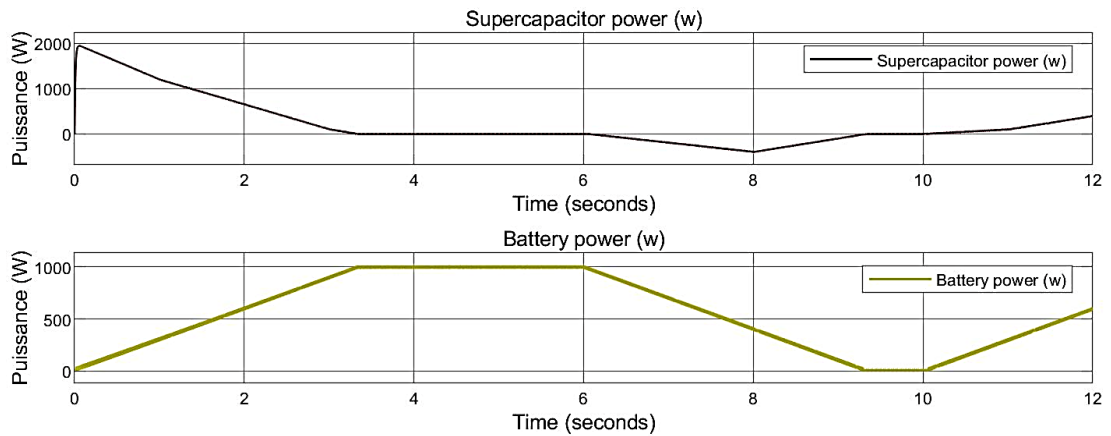


Figure 4.12 : Puissances du supercondensateur et de la batterie Li-ion

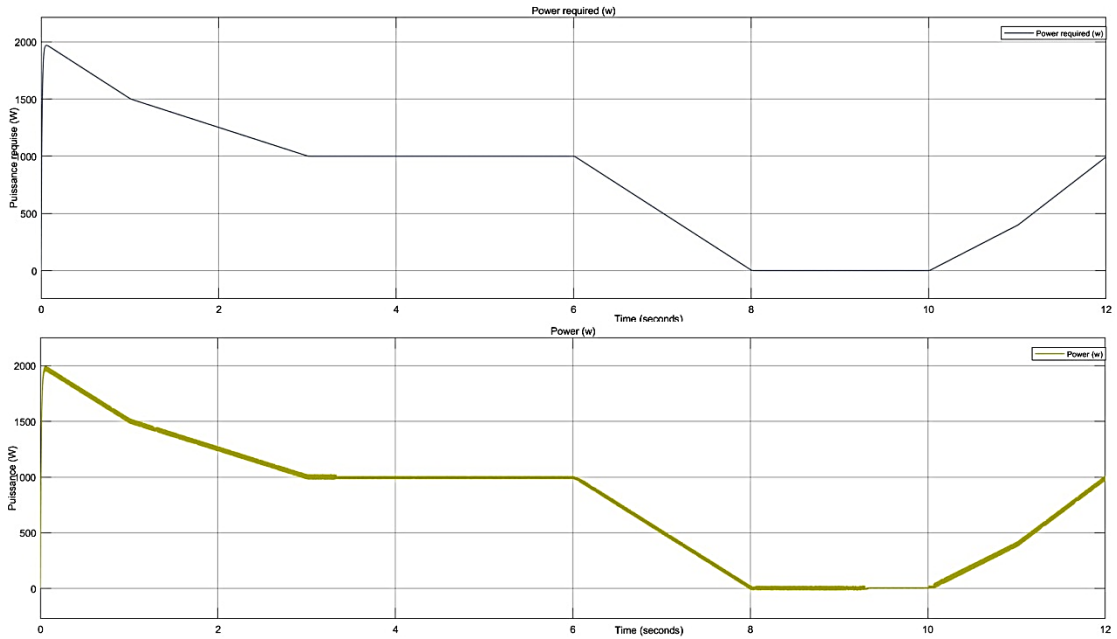


Figure 4.13 : Puissance requise et puissance délivrée par le système hybride

Le supercondensateur est relié à un convertisseur Buck/Boost, tandis que la batterie est couplée à un convertisseur Boost DC/DC.

En raison de la puissance limitée de la batterie causée par un module de limiteur de débit, le supercondensateur fournit une alimentation transitoire au bus CC à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel DC/DC alors que la batterie est correctement branchée au bus correspondant. La batterie fournit une énergie constante à cette configuration semi-active.

Le supercondensateur fournit l'alimentation transitoire nécessaire au système électrique motorisé.

La commande du convertisseur lui permet de fournir une puissance maximale pendant la durée de l'accélération et d'économiser de l'énergie pendant la durée du freinage régénératif.

Le convertisseur élévateur est lié à la batterie et renforce son amélioration de 400V à 600V.

Le convertisseur bidirectionnel a deux fonctionnalités : En mode de charge, le convertisseur bidirectionnel agit comme un convertisseur buck, transmettant l'énergie du côté tension supérieure (bus DC) au côté tension inférieure (dispositif ESS).

Alors qu'il agit d'un convertisseur buck en mode de décharge c.-à-d. l'énergie transmise du SSE au bus DC d'abord.

Le processus Buck est également appliqué pour charger le supercondensateur via le bus DC.

4.6 SYSTEME DE STOCKAGE D'ENERGIE HYBRIDE DANS UN SYSTEME PV :

4.6.1 MODELISATION DES CONVERTISSEURS DC-DC :

Le niveau de puissance d'un convertisseur buck-boost est décrit comme sur la figure (4.14). Il est composé des commutateurs transistor Q1 et Q2, la capacité de lissage de sortie C, l'inductance de lissage L, et la charge réelle R.

Dans le cas du mode Buck, Q1 est toujours éteint et le courant passe du bus DC à la source hybride (batterie ou SC). Par le control de Q2, le convertisseur peut diminuer la tension VDC pour charger le système de stockage d'énergie.

En mode boost, le commutateur Q2 est éteint, et la diode en Q2 permet le flux de courant dans une direction du SSE au bus DC. En contrôlant le rapport cyclique de Q1, le convertisseur peut augmenter la tension VSSE pour alimenter le bus DC. [3, 4].

En mode convertisseur Buck, la tension du SSE est :

$$V_{SSE} = \frac{V_{dc}}{D} \quad (4.5)$$

En contrôlant le rapport cyclique D du convertisseur, VSSE peut être contrôlée.

En mode convertisseur de suralimentation, la tension du bus DC est :

$$V_{dc} = \frac{V_{EES}}{1 - D} \quad (4.6)$$

Dans ce cas, V_{dc} est toujours plus élevée que la tension V_{SSE} . Le gain du convertisseur boost peut être contrôlé en faisant varier le rapport cyclique D.

CHAPITRE 04 : Simulation et résultats

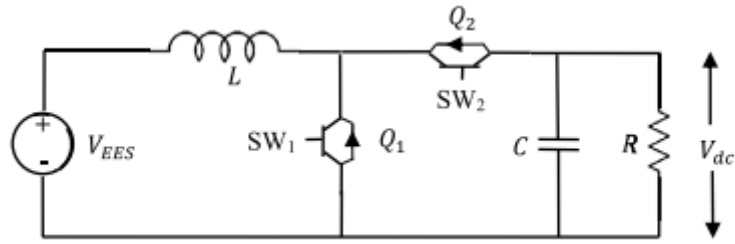


Figure 4.14 : modèle du circuit buck-boost[6]

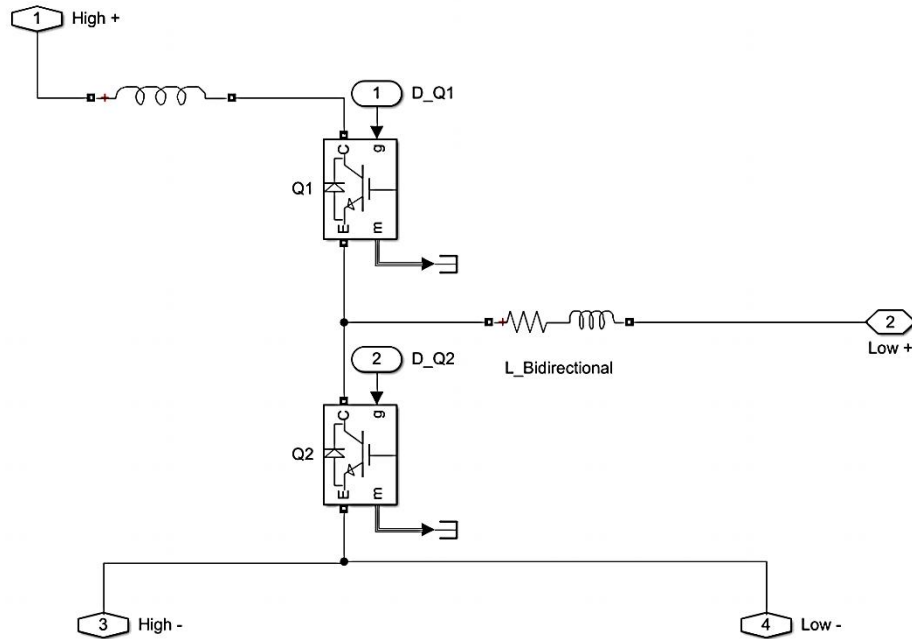


Figure 4.15 : Schéma du convertisseur bidirectionnel

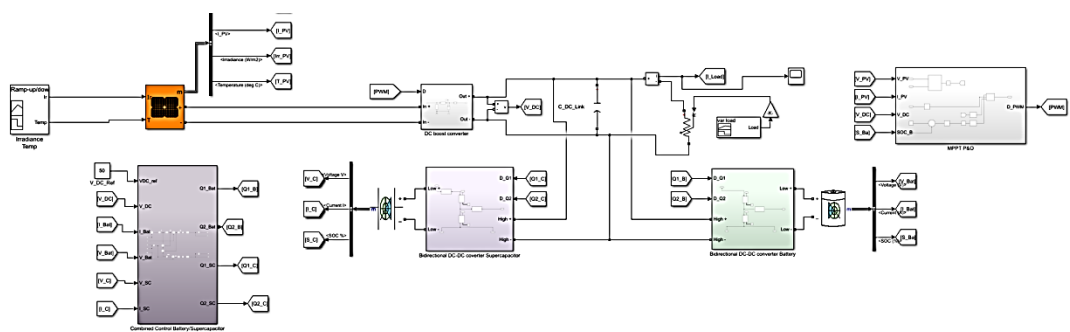


Figure 4.16 : Système de stockage hybride batterie SC dans un circuit PV (configuration active)

En mode de charge, le convertisseur bidirectionnel agit comme un convertisseur buck, transmettant l'énergie du côté tension supérieure (bus DC) au côté tension inférieure (dispositif SSE).

Alors qu'il agit d'un convertisseur buck en mode de décharge c.-à-d. l'énergie transmise de l'ESS au bus DC.

$$\text{En mode buck : } V_o = V_i D \quad (4.7)$$

$$\text{En mode boost : } V_o = \frac{V_i}{(1-D)} \quad (4.8)$$

Où V_o, V_i, D sont respectivement la tension de sortie du convertisseur DC/DC, la tension d'entrée et le rapport cyclique

4.6.2 CONTROLE DU SYSTEME DE STOCKAGE HYBRIDE:

Le SC est principalement ajouté pour absorber l'énergie transitoire de pointe qui résulte des changements de charge instantanés ou de fluctuations météorologiques, réduisant ainsi les contraintes de charge de la batterie. Pour ce faire, la dérive de puissance entre la production et la consommation sera divisée en deux composantes, la composante basse fréquence régulière et la composante haute fréquence transitoire. La batterie sera responsable de la première tandis que le SC s'occupera de la seconde. [5]

Ce système de gestion comprend trois boucles de contrôle comme indiqué à la figure (4.16).

Tout d'abord, la boucle de contrôle de tension de liaison DC pour maintenir la tension du bus DC à 50 V. La sortie de cette boucle génère le courant de référence total ($I_{réf}$) qui doit être compensé pour éliminer toute dérive de tension, c.-à-d. toute dérive de puissance, maintenant ainsi l'équilibre requis. Simultanément, l' $I_{réf}$ est divisé en deux composants : le CFT et le courant haute fréquence CHF.

Ainsi, il passera d'abord par un filtre passe-bas pour extraire son LFC ($I_{réf_HF}$) qui sera la référence à la deuxième boucle qui est la boucle de la batterie. Ce dernier permet à la batterie de compenser le niveau moyen de dérive de puissance basse fréquence.

D'autre part, le courant de référence CHF ($I_{réf_HF}$) est compensé par la troisième boucle qui est la boucle de contrôle SC. La référence de cette boucle ($I_{SC\ réf}$) est calculée par $I_{réf_HF}$ et le courant d'erreur de la batterie (IB-error) comme suit [5];

$$I_{réf_HF} = I_{réf} - I_{réf\ BF} \quad (4.9)$$

La puissance ($P_{B-incomp}$) qui n'est pas compensée par la batterie et doit être remplie par le SC est donnée par :

$$P_{B-incomp} = V_B(I_{ref-HF} + I_{B-err}) \quad (4.10)$$

Ainsi, le courant de référence pour la boucle SC I_{SC-ref} :

$$I_{SC-ref} = \frac{P_{B-incomp}}{V_{SC}} \quad (4.11)$$

Où V_B , V_{SC} sont les tensions de la batterie et le SC respectivement.

Chacune des boucles discutées rencontre un contrôleur PI. La sortie de la boucle de la batterie subit alors un PWM pour produire des signaux de synchronisation de commutateurs du convertisseur bidirectionnel de la batterie (S_{B-1} est activé pour le mode de charge tandis que S_{B-2} est activé pour le mode de décharge).

De même, après PWM de la sortie de la boucle SC, des signaux de synchronisation pour les commutateurs du convertisseur bidirectionnel SC sont produits (S_{SC-1} pour la charge et S_{SC-2} pour la décharge). [5]

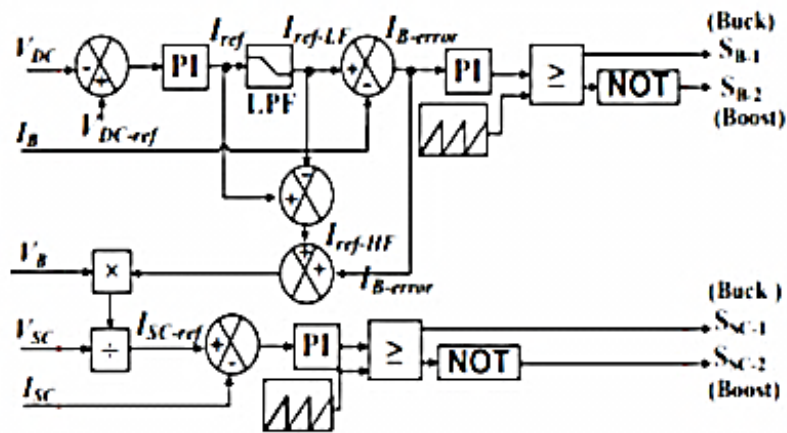


Fig 4.17: Schéma de contrôle du système de stockage d'énergie hybride [7]

4.6.3 RESULTATS DE SIMULATION :

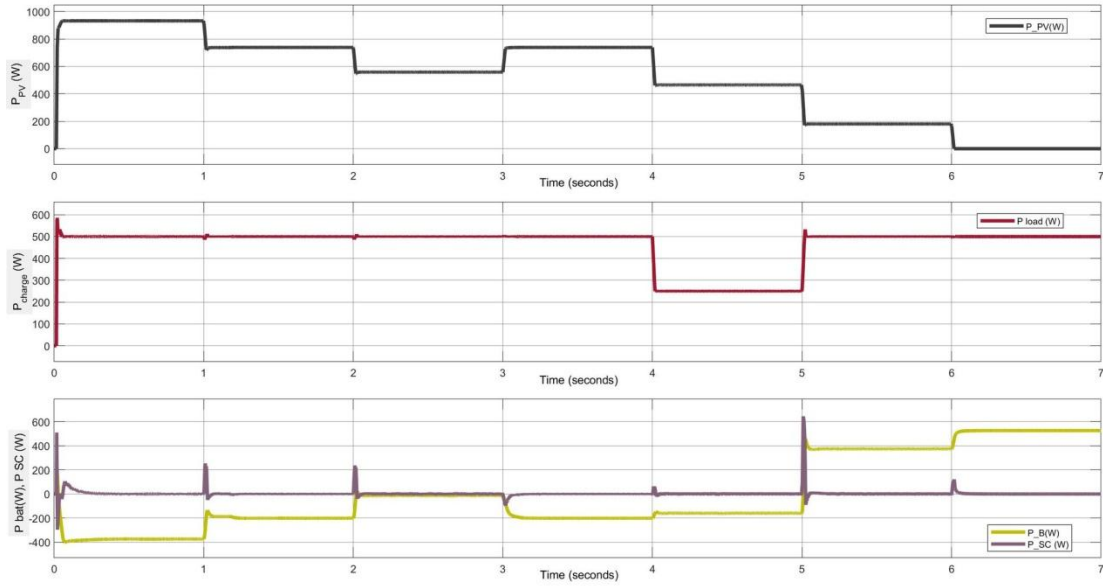


Fig 4.18: (1) Puissance du générateur PV,(2) puissance de la charge, (3) puissance du système hybride batterie et supercondensateur

La première courbe indique que la puissance P_{PV} maximale a été suivie avec précision en fonction des irradiations autour du réseau PV.

La courbe rouge montre la demande de charge et comment elle a connu une diminution soudaine de 500 à 250W à $t=3\text{sec}$ puis de nouveau à 500W à $t=4\text{sec}$.

L'analyse des valeurs de puissance constante résultantes de PV, Charge et batterie, présentées dans la figure (4.17) pour chaque cas, il est prouvé que le bilan énergétique requis est garanti et la charge est toujours remplie.

En zoomant sur la courbe de puissances du système de stockage hybride, il est clair que le SC montre une réponse rapide en compensant les puissances transitoires de pointe pendant les changements de charge ou des irradiations, ce qui soulage la batterie de ces pics de tension pour prendre les devants et compenser toute dérive régulière entre l'alimentation et les puissances de charge.

Dans les deux premiers cas, la batterie a réussi à stocker la puissance excédentaire puisque la puissance PV extraite était supérieure à la puissance de charge totale et aux pertes du système.

Dans le cas 3, bien qu'il n'y ait eu aucune variation de l'irradiation ni de la demande de charge, la batterie est a continué à se charger.

Par conséquent, le contrôle PV a été déplacé du mode MPPT au mode de contrôle de la tension et la puissance PV a diminué pour simplement répondre à la demande de charge pour protéger la batterie contre la surcharge.

Dans le 4ème cas, la batterie a commencé à fournir de la puissance depuis la charge a augmenté au double qui était au-dessus de la capacité PV dans ce cas.

Enfin, dans les trois derniers cas, la demande de charge est revenue à sa valeur initiale (500 W). Cependant, l'irradiation a continué à diminuer jusqu'à son absence dans le dernier cas. Ainsi, la batterie a continué à partager avec PV dans l'alimentation en charge jusqu'à prendre la tête dans le dernier cas.

Le SSEH pleinement actif offre les meilleures performances, car il utilise deux convertisseurs DC-DC pour la gestion de l'énergie de la batterie et du supercondensateur

4.7 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons vu la simulation de plusieurs systèmes avec des convertisseurs DC-DC.

Conclusion générale:

Notre thème du master étant « la modélisation des convertisseur DC-DC dans un système de stockage hybride batterie Lithium ion et supercondensateur » avait pour objectif d'étudier le comportement du système de stockage hybride avec des convertisseurs DC-DC. On a tiré quelques conclusions :

- La complémentarité entre batterie et supercondensateurs permet l'amélioration des performances globales du système de stockage d'énergie en termes de durée de vie et d'autonomie.
- Le supercondensateur fournit l'alimentation transitoire nécessaire au système électrique motorisé.
- La commande du convertisseur dans un véhicule électrique lui permet de fournir une puissance maximale pendant la durée de l'accélération et d'économiser de l'énergie pendant la durée du freinage régénératif.
- En mode de charge, le convertisseur bidirectionnel agit comme un convertisseur buck, transmettant l'énergie du côté tension supérieure (bus DC) au côté tension inférieure (dispositif ESS). Alors qu'il agit d'un convertisseur buck en mode de décharge c.-à-d. l'énergie transmise de l'ESS au bus DC.

Perspectives:

Pour l'avenir, augmenter la durée de vie des batteries un couplage entre les batteries et les supercondensateurs pour les nouveaux véhicules électriques semble être le moyen le plus approprié, au moins pour les véhicules destinés à des opérations de démarrage/arrêt plus. Étant donné que le processus utilisé pour produire des batteries et des supercondensateurs est principalement responsable de la consommation d'énergie plus élevée et des émissions de gaz à effet de serre, les véhicules électrifiés devraient être utilisés le plus longtemps possible pour réduire au minimum les effets nocifs du procédé de production sur l'environnement.

Une amélioration significative est démontrée dans les VE lorsque l'hybridation batterie/SC est utilisée. Avec une conception et un développement appropriés, les VE non seulement éliminent la pollution, mais peuvent aussi être plus efficaces que les véhicules conventionnels à base de pétrole et de diesel. Cependant, ils sont encore en recherche et ont encore de nombreux problèmes non résolus. Trouver une source

d'énergie potentielle est l'un de ces problèmes. L'utilisation d'une seule source, telle qu'une batterie, présente certains inconvénients tels que la recharge, la longévité, la faible densité de puissance, etc. Une solution possible et prometteuse pour ce problème est la VE multi-sources. L'utilisation de batteries et de supercondensateurs peut réduire les inconvénients des deux.

Liste de références

Chapitre 01 :

[1] FERRAH FATEH, « Etude et simulation d'un étage mppt pour un système à énergie renouvelable », Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013.

[2] SAHAR GHANDOUR, « Conception de convertisseurs DC/DC à base de mems », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble. 2011.

[3] BOUZGHAYA IMED, « Etude d'un hacheur à stockage capacitif » Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2014.

[4] PIERRE PETIT, « Optimisation du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Metz. 2011.

[5] BELKAID ABDELHAKIM, « Conception et implémentation d'une commande mppt de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif 1 2015.

Chapitre 02:

[1] F. Díaz-González, A. Sumper, O.G. Bellmunt, R.V. Robles, A review of energy storage technologies for wind power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 2154–2171.

[2] A.G. Ritchie, Recent developments and future prospects for lithium rechargeable batteries, *Journal of Power Sources* 96 (2001) 1–4.

[3] K. Zaghbi, M. Dontignya, A. Guerfi, P. Charest, I. Rodrigues, A. Mauger, Safe and fast charging Li-ion battery with long shelf life for power applications, *Journal of Power Sources* 196 (2011) 3949–3954.

- [4] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou, Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1513–1522.
- [5] International Energy Agency. *World Energy Outlook-2006*. IEA, 2007
- [6] Planète-energies.com. « Decryptages, la batterie Lithium ion, comment ça marche? » publié le 15 avril 2019.
- [7] P. Ribeiro, B. Johnson, M. Crow, A. Arsoy, Y. Liu, Energy storage systems for advanced power applications. In: *Proceedings of IEEE*, 2001, vol. 89, No. 12, pp. 1744–1756
- [8] [electricitystorage.org /tech/technologies_technologies](http://electricitystorage.org/tech/technologies_technologies).
- [9] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, A. Berthon, Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling, *Journal of Power Sources* 165 (2007) 928–934.
- [10] H.S. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C.Q. Tan, Y.L. Li, Y.L. Ding, Progress in electrical energy storage system: a critical review, *Progress in Natural Science* 19 (3) (2009) 291–312.
- [11] Supercapacitors' applications Guoping Wang, Hongqing Wang, Benhe Zhong, Lei Zhang, and Jiujun Zhang • December 2015.
- [12] H. Gualous, D. Bouquain, A. Berthon, J.M. Kauffmann, Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature, *Journal of Power Sources* 123 (2003) 86–93.
- [13] A. Kusko, J. Dedad, Short-term and long-term energy storage methods for standby electric power systems, *IEEE Industry Applications Magazine* 19 (2007) 66–72.
- [14] Rizoug, N., Mesbahi, T., Sadoun, R., Bartholomeüs, P., & Le Moigne, P. (2018). Development of new improved energy management strategies for electric vehicle battery/supercapacitor hybrid energy storage system. *Energy Efficiency*, 11(4), 823–843.
- [15] patent-art.com “Battery-supercapacitor hybrid energy storage systems” (stetch patent art).

Chapitre 03:

- [1] Hassan, M.; Paracha, Z.J.; Armghan, H.; Ali, N.; Said, H.A.; Farooq, U.; Afzal, A.; Hassan, M.A.S. Lyapunov based adaptive controller for power converters used in hybrid energy storage systems. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2020, 42, 100853.

[2] Sadeq, T.; Wai, C.K.; Morris, E.; Tarboosh, Q.A.; Aydogdu, O. Optimal Control Strategy to Maximize the Performance of Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicle Considering Topography Information. *IEEE Access* 2020, 8, 216994–217007

[3] Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review Diana Lemian and Florin Bode, Faculty of Automotive, Mechatronics and Mechanics, Technical University of Cluj-Napoca, B-dul Muncii Nr. 103-105, 400641 Cluj-Napoca, Romania

[4] Dong-Jing, L.; Wang, L. Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2008, 23, 311–320.

[5] Babu, T.S.; Vasudevan, K.R.; Ramachandaramurthy, V.K.; Sani, S.B.; Chemud, S.; Lajim, R.M. A Comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects. *IEEE Access* 2020, 8, 148702–148721.

Chapitre 04:

[1] K. Maanasa “A switched capacitor bidirectional dc-dc converter with wide voltage gain range for electric vehicles with hybrid energy sources”.

[2] A. Geetha, C. Subramani “A significant energy management control strategy for a hybrid source EV” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* Vol.9, No.6, December 2019, pp. 4580_4585.

[3] K.V.G. Raghavendra, K. Zeb, A. Muthusamy, T.N.V. Krishna, S.V.S.V.P. Kumar, D.- H. Kim, M.S. Kim, H.G. Chao, H.-J. Kim, A Comprehensive Review of DC–DC Converter Topologies and Modulation Strategies with Recent Advances in Solar Photovoltaic Systems, *Electronics (Basel)* 9 (1) (2020) 31.

[4] H.F. Gharibeh, A.S. Yazdankhah, M.R. Aziziani, Energy management of fuel cell electric vehicles based on working condition identification of energy storage systems, vehicle driving performance, and dynamic power factor, *Journal of Energy Storage* 31 (30) (2020), 101760.

[5] A. Thakur, and L. M. Saini, “A New Control Scheme for BatterySupercapacitor Hybrid Energy Storage System for Standalone Photovoltaic Application”, *International Journal of Engineering, Management & Sciences*, vol. 2, no. 5, 2015, p. 25-32.

[6] Hocine GUENTRI ,Tayeb ALLAOUI b , Mustafa MEKKI b , Mouloud DENAI “POWER management and control of A PHOTOVOLTAIC system with hybrid battery-supercapacitor

energy storage BASED ON HEURISTICS METHODS” journal of Journal of Energy Storage Volume 39, July 2021, 102578

[7] N. E. Zakzouk, R. A. Lotfi. Electrical and Control Engineering Department. “Power Flow Control of a Hybrid Battery/Supercapacitor Standalone PV System under Irradiance and Load Variations” 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems.

Résumé:

Dans ce mémoire nous allons présenter le thème “modélisation d’un convertisseur DC-DC dans un système de stockage d’énergie hybride par batterie Lithium ion et supercondensateur.

Nous avons fait une étude de deux système : un véhicule électrique et; un système photovoltaïque avec stockage hybride BS.

Dans le véhicule électrique on a étudié un système avec une topologie semi active et pour le système photovoltaïque la topologie était active c’est-à-dire l’utilisation de deux convertisseurs bidirectionnels.

Abstract:

In this thesis we will present the theme “Modelling a DC-DC converter in a hybrid Lithium ion battery and supercapacitor energy storage system”.

We studied two systems: an electric vehicle and a photovoltaic system with hybrid BS storage.

In the electric vehicle we studied a system with a semi-active topology and for the photovoltaic system the topology was active, that is to say the use of two bidirectional converters.

ملخص

في هذه المذكرة، سنقدم موضوع نمذجة محول تيار مستمر-تيار مستمر في نظام تخزين طاقة هجين (بطارية أيونات الليثيوم مع مكثفة فائقة) تمت دراسة نظامين: سيارة كهربائية ونظام كهروضوئي بهما نظام التخزين الهجين.

في السيارة الكهربائية درسنا نظامًا به طوبولوجيا شبه نشطة وبالنسبة للنظام الكهروضوئي، كانت الطوبولوجيا نشطة، أي استخدام محولين ثنائيي الاتجاه.

