

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA de
BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du Diplôme de Master
Spécialité : Electrotechnique
Option : Energies renouvelables

Thème

**Étude d'un Système de Stockage par un
Supercondensateur**

Réalisé par :

M^r: AZIB Said

M^r: ZAIDI A. Allah

Encadré par :

M^r: S.TARAFT

Année universitaire: 2016/2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous aimerions remercier dieu le tout puissant, de nous avoir donné la force et la patience de pouvoir mener ce travail à terme.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Mr Tarafet , enseignant à l'université de Bejaia d'avoir accepté et pris le temps d'être rapporteur de ce travail

Nous adressons également nos remerciements à tous les membres du jury qui ont pris le soin d'examiné nos documents.

Nos sincères gratitudes s'adressent à nos deux chères familles ; sans leurs encouragements permanents et leur soutien moral nous n'arriverons pas là où nous sommes. Qu'ils trouvent dans ce manuscrit toutes nos reconnaissances.

Idem, nous remercions l'ensemble de nos amis qui ont aidé à accomplir ce travail.

Enfin, nous ne terminerons pas sans remercier tous les enseignants du Département Génie électrique

REMERCIEMENTS

DÉDICACES

Dédicace

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Je dédie ce travail à :

Mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours soutenu, et à l'intérêt qu'ils ont

Porter pour mes études

Assez, pour tous ce qu'ils m'ont fait.

Que dieu les protège.

A mes très chers frères et sœurs

A toute ma famille.

A mes chers amis(es) de prés ou de loin

A mon frère binôme Saïd.

Atout les enseignants du département

Génie électrique de Bejaia.

A toute la promotion génie électrique 2016/2017

Zaidi. A. Allah

Dédicace

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Je dédie ce travail à :

Mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours soutenu, et à
l'intérêt qu'ils ont

Porté pour mes études, je ne les remercierai jamais

Assez, pour tous ce qu'ils m'ont fait.

Que dieu les protège.

A mes très chers frères Abdeghani, Nacer et Arezki

A mes sœurs Fayrouze, Zahia, Saida et leurs conjoints

A la mémoire de mes grands parents.

A toute ma famille.

A mes chers amis(es) de prés ou de loin

A mon frère binôme A.Allah

A toute la promotion génie électrique 2016/2017

A. Saïd

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Chapitre I Généralités sur les systèmes de stockages d'énergie électriques

Figure I.1 : Schéma énergétique	3
Figure I.2 : Exemple de diagramme de Ragone énergie /puissance	4
Figure I.3 : Structure d'un condensateur	5
Figure I.4 : Principe de système de stockage inertiel.....	9
Figure I.5 : Batterie au Plomb de Hawke, L'Amasafe.....	12
Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un accumulateur (batterie)	12
Figure I.7 : Modèle et principe de fonctionnement d'une pile à combustible	15
Figure I.8 : Diagramme de Ragone qui compare divers système de stockage d'énergie.....	17
Figure I.9 : Schéma de principe d'un hacheur série	18
Figure I.10 : Schéma de principe d'un hacheur survolteur	18

Chapitre II Description et Modélisation d'un Supercondensateur

Figure II.1 : Exemple de supercondensateur et leur module	21
Figure II.2 : Structure d'un supercondensateur	22
Figure II.3 : Schéma représentatif d'un supercondensateur a double couche électrique	23
Figure II.4 : Schéma électrique d'un supercondensateur	23
Figure II.5 : Structure microscopique d'une électrode en charbon actif	24
Figure II.6 : Structure macroscopique d'une électrode en tissu active	24
Figure II.7 : Application de supercondensateurs dans le domaine militaire, Radars de surveillance aérienne (satellites, missiles balistiques,...)	27
Figure II.8 : Application des supercondensateurs dans le domaine du transport. (a) Voiture électrique "Blue Car" de Bolloré utilisée pour le service Autolib18.Vehicule hybride (b) Utilisation du système SITRA SES de Siemens en station du tramway de Dresde22 (Allemagne).....	28
Figure II.9 : Utilisation des supercondensateurs dans le domaine des éoliennes	28
Figure II.10 : Grues aéroportuaires au Japon combinant un moteur diesel et des modules Supercondensateurs	29
Figure II.11 : Prototype d'un ascenseur alimenté par des supercondensateurs	29
Figure I.12 : (a) souris sans fils équipée de supercondensateurs pour une recharge instantanee30 (Genius DX-Eco). (b) Carte graphique équipées de supercondensateur de type NEC Proadlizer31.	30
Figure II.13 : Schéma de base du comportement des supercondensateurs	31
Figure II.14 : Modèle de J.R. Miller d'un supercondensateur de 0.64 F	32
Figure II.15 : Modèle énergétique a deux branches de R. Bonert et L. Zubieta	32
Figure II.16 : Modèle R-C d'un super condensateur	33
Figure II.17 : L'énergie maximale stockée en fonction de la tension max	34

Figure II.18 : Rendement en fonction du coefficient de décharge	35
Figure II.19 : La tension minimale admissible aux bornes de la capacité en fonction de la puissance du supercondensateur.....	36
Figure II.20 : Ration de la tension minimale admissible en fonction de la puissance du supercondensateur	36
Figure II.21 : L'évolution de la puissance maximale en fonction de la tension maximale du supercondensateur	37
Figure II.22 : L'évolution de la tension aux bornes du supercondensateur pendant la décharge à courant constant.....	38
Figure II.23 : L'évolution du temps de décharge en fonction du courant de décharge.....	38
Figure II.24 : Modèle d'un pack de supercondensateur	39
Figure II.25 : Variation de la tension capacitive en fonction du temps.....	41
Figure II.26 : Variation du courant capacitif en fonction du temps	42
Figure II.27 : Variation de la puissance en fonction du temps.....	42
Figure II.28 : Modèle utilise pour trace du diagramme de Ragone.....	43
Figure II.29 : Diagramme de ragone énergie en fonction de la puissance	44

Chapitre III

Application ET Simulation

Figure III.1 : Schéma générale de l'application.....	46
Figure III.2 : Structure de d'un hacheur survolteur.....	47
Figure III.3 : Structure de la commande par deux boucles de contrôle.....	48
Figure III.4 : Circuit détailler de l'application pour une charge R sous matlab.....	49
Figure III.5 : Variation de la tension du supercondensateur en fonction du temps	50
Figure III.6 : Variation de la tension Vbus et V bus ref en fonction du temps	50
Figure III.7 : Variation de courant de supercondensateur et courant de la charge en fonction du temps	51

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Chapitre I Généralités sur les systèmes de stockages d'énergies électriques

Tableau I.1 : Caractéristiques des différentes technologies de volant d'inertie	9
Tableau I.2 : Quelque type des batteries est ses caractéristiques	14
Tableau I.3 : Caractéristiques des types des piles à combustible	15

Chapitre II Description et Modélisation d'un Supercondensateur

Tableau II.1 : Supercondensateurs actuellement commercialisée	21
Tableau II.2 : Données constructeur pour déférente type des supercondensateurs	25
Tableau II.3 : Comparaison entre divers dispositif de stockage	26

Sommaire

II.2.4.2 Electrolyte.....	25
II.2.4.3 Séparateur	25
II.2.5 Intérêt et l'usage des supercondensateurs.....	26
II.2.6 Domaine d'applications des supercondensateurs	27
II.2.7 Avantage et inconvénient	30
II.3 Modélisation du supercondensateur	30
II.3.1 Modèle électrique de type ligne RC de transmission a constante localisées.....	31
II.3.2 Modèle énergétique de R.Bonert et L. zubieta	32
II.3.3 Modèle simplifié RC sans résistance de fuite (modèle constructeur).....	33
II.3.3.1 Grandeurs et Caractéristique énergétique du modèle	33
II.3.1.2 Caractéristique d'un pack de supercondensateurs	39
II.3.3.2 Conception d'un organe de stockage à supercondensateurs.....	40
II.3.3.1 Utilisation du modèle énergétique simplifié pour tracer le diagramme de Ragone	42
II.4 Conclusion	45

Chapitre III

Application Et Simulation

III.1 Introduction	46
III.2 Schéma représentatif de l'application	46
III.3 Modélisation du convertisseur et la régulation du courant (hacheur parallèle)	47
III.3.1 Le modèle du hacheur survolteur	47
III.3.2 Commande des hacheurs	48
III.3.3 Modèle linéaire du hacheur	49
III.3.5 Simulation et interprétation des résultats	49
III.4 Conclusion.....	51

Conclusion générale	52
---------------------------	----

Référence bibliographique

Annexes

Introduction générale

Introduction Générale

Aujourd'hui, les énergies fossiles représentent plus de deux tiers de la consommation finale d'énergie. Mais ces énergies sont aussi à l'origine d'une crise climatique sans précédent. Depuis le début de l'ère préindustrielle, la température moyenne à la surface du globe s'est élevée de 1°C à cause de l'augmentation de l'effet de serre. La loi sur la transition énergétique pour la croissance verte fait de la lutte contre ce changement climatique l'un de ses objectifs des organisations mondiales [1].

Le stockage de l'énergie produite est une des solutions pour accroître leur évolution sur le territoire. Les technologies de stockage massif de l'énergie se déclinent selon quatre catégories :

- Mécanique (potentielle ou cinétique) : stockage gravitaire par pompage, stockage par air comprimé ;
- Thermique et thermochimique : chaleur sensible ou chaleur latente, énergie par absorption ;
- Chimique : hydrogène ;
- Electrochimique et électrostatique : batterie, condensateur, supercondensateur

La technologie « super condensateur », comme solution pour l'organe de stockage, s'avère très intéressante. Jusqu'à maintenant, les systèmes les plus utilisés sont les accumulateurs qui ont une puissance spécifique et une autonomie relativement élevée. Les condensateurs classiques ont une autonomie insuffisante, mais possèdent une puissance spécifique incomparable. Les super condensateurs apparaissent comme des composants intermédiaires en termes de propriétés énergétiques qui les rendent très intéressants car ils n'ont pratiquement pas de concurrents dans ce domaine. [2]

Pour cette raison on veut étudier le super condensateur comme un système de stockage par rapport à d'autre stockage.

Dans le cadre de notre travail, on a décomposé le mémoire en trois chapitres : Le premier chapitre est un survol sur les différents systèmes de stockages, tout en présentant les principes de fonctionnements de chaque-un, ainsi que les caractéristiques de ces différents éléments de stockage et leurs avantages, comme on a présenté aussi les hacheurs qui s'occupent de la conversion DC/DC et la régulation de la tension.

Introduction Générale

On a consacré le deuxième chapitre principalement sur le supercondensateur en présentant son état de l'art, ainsi que la structure et son principe de fonctionnement. Faisant aussi un passage sur la technologie et l'intérêt de supercondensateur. Aussi on a donné la modalisation de cet élément avec ses différents modèles et ses domaines d'application.

Le dernier chapitre présente le schéma général d'application du supercondensateur, et la simulation de ce dernier, dont le but est l'interprétation des résultats trouvés par cette dernière opération. Le supercondensateur est relié dans le réseau ou à l'alimentation d'une machine électrique à travers un bus continu. Donc, il suffit d'étudier le supercondensateur relié à une charge résistive à travers un hacheur élévateur équipé d'un bus continu.

Chapitre I

Généralités sur les
systèmes de stockage
d'énergie électrique

I.1 Introduction

Les moyens de stockage de l'énergie électrique sont divers et peuvent être classés dans différentes catégories en fonction de leurs performances (capacité de stockage, énergie/puissance, ...) et de leurs caractéristiques : stockage centralisé ou décentralisé, direct ou indirect [3].

Ce premier chapitre traite brièvement les moyens de stockage les plus usuels directs ou indirects qui peuvent être intégrés dans des systèmes embarqués, de les répertorier dans les catégories « source de puissance » ou « source d'énergie » et les comparer les uns par rapport aux autres à fin d'identifier ceux qui regroupent les caractéristiques favorables pour une application embarquée.

Toutes les applications qui nécessitent un système de stockage ont besoin des convertisseurs statiques, parmi les convertisseurs utilisés, les convertisseurs DC/DC, le choix de types de convertisseurs dépend de plusieurs critères tels que le rendement et le coût. Mais généralement, on a besoin d'un étage pour élever la tension en sortie de l'organe de stockage (hacheur parallèle) car la tension de l'organe de stockage diminue en fonction de temps, d'où la nécessité de placer un hacheur parallèle et maintenir la tension de sortie constante en rajoutant une boucle de régulation.

I.2 Définition de L'énergie

L'énergie est définie comme l'aptitude d'un système à fournir un certain travail.

- Source d'énergie : on a des énergies primaires comme (le charbon, pétrole...) et des énergies finales utilisées dans la vie courante (énergie électrique, énergie thermique, etc.....).
- Vecteur d'énergie : ne sont pas forcément des énergies mais qu'ils permettent à l'énergie de transiter depuis les sources primaires jusqu'aux applications finales.

I.3 Définition de stockage d'énergie

On stocke de l'énergie pour pouvoir l'utiliser plus tard, quand on aura besoin (assurer l'autonomie...), mais aussi quand on estimera qu'il est intéressant économiquement et écologiquement. Le stockage n'a pas de sens que dans la dualité réversible (stockage /déstockage).

On stocke facilement des ressources fossiles carbonisées (pétrole...), ces énergies sont polluantes. Tandis que les énergies (solaire, éolienne ...) leur stockage est un peu difficile, ces énergies sont renouvelables et temporaires et non polluantes. Par ailleurs, les énergies électriques ne doivent pas être classées autant qu'énergie, mais comme des vecteurs d'énergie, ces énergies sont mesurées en kWh et leur stockage sont divers, qu'on verra ça par la suite.

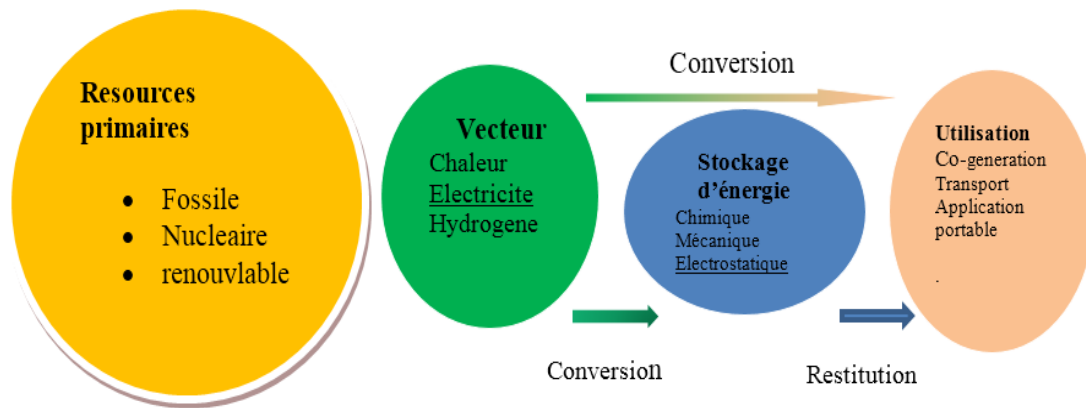


Figure I.1 : Schéma énergétique [4]

I.3.1 Caractéristiques des éléments de stockage d'énergie électrique [3]

Avant de passer en revue les différents moyens de stockage envisageables dans une application embarquée, il est nécessaire de définir les caractéristiques remarquables d'un système de stockage de l'énergie et d'établir celles qui sera retenues-on comparaison.

Tout d'abord, un système de stockage électrique est caractérisé par deux grandeurs fondamentales qui sont l'énergie et la puissance. et d'autres caractéristiques sont comme suit :

- **Énergie** : L'énergie stockée est la quantité d'énergie disponible dans le système de stockage, l'énergie s'exprime en (Wh) ou en joule. parce que l'énergie d'un système ne peut pas toujours être entièrement restituée. On distingue l'énergie maximum stockée obtenue après la charge complète du système et l'énergie utile. Énergie utile est fonction de la profondeur de décharge applicable au dispositif de stockage.
- **Densité énergétique** : La densité énergétique appelée également énergie spécifique, est l'énergie stockée ramenée à la masse ou au volume de l'élément de stockage. on distingue donc la densité énergétique massique en Wh/kg et la densité énergétique volumique en Wh/V.
- **Puissance** : La puissance disponible en (W) est la puissance qu'un système de stockage d'énergie peut fournir lors de sa décharge, on détermine généralement une puissance moyenne et/ou puissance maximum.
- **Densité de puissance** : est la puissance disponible rapportée à la masse ou au volume de l'élément de stockage. elle s'exprime en W/kg.
- **Diagramme Énergie/ puissance** : il est d'usage de recenser sur un diagramme les caractéristique énergétiques d'un système de stockage énergétique (SSE) pour faciliter leur comparaison. ce diagramme, appelé diagramme de Ragone, représente la puissance en fonction de l'énergie [5].

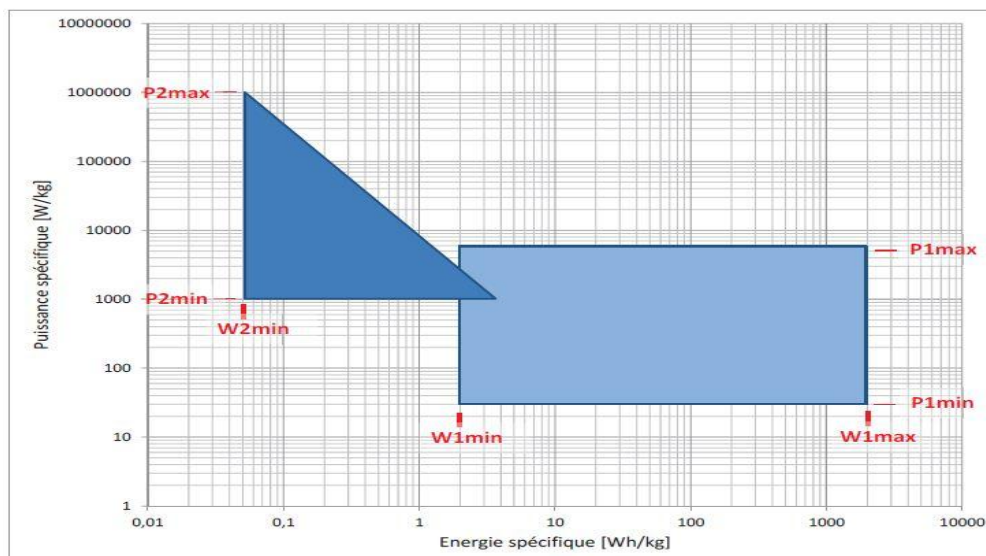


Figure I.2 : Exemple de diagramme de Ragone énergie /puissance [5].

- **Capacité de stockage** : Il s'agit de l'aptitude d'un système à emmagasiner de l'énergie à la conserver pendant un certain temps et à la restituer dans des conditions données.
- **Temps de décharge / Temps de charge** : Pour un SSE (Système de stockage d'énergie électrique), la durée ou le temps de décharge est un critère important. On définit la durée de décharge comme étant le temps de restitution de l'énergie stockée par le système, à puissance maximum, tel que : $t_{dech} = W_{stockee}/P_{max}$ Pour certains élément de stockage, la durée de charge pourra s'avérer comme un critère déterminant dans la comparaison des uns par rapport aux autres. En effet, certaine SSE sont limités en puissance lors de la recharge, ce qui a un impact directement sur leur temps de charge.
- **Autonomie** : On détermine l'autonomie d'un système de stockage en considérant son énergie utile et sa puissance disponible, telle que :

$$\alpha = E_{utile}/P_d \quad (I.1)$$

E_{utile} : Énergie utile (Wh)

P_d : Puissance disponible (W)

- **Durée de vie cyclage** : La durée de vie ou durabilité, définit l'aptitude d'un élément de stockage a délivré, de manière récurrente, son énergie après recharge. Elle s'exprime en nombre de cycle. Un cycle comprend une charge et une décharge.
- **Autodécharge** : Il s'agit d'une certaine quantité d'énergie initialement stockée dans l'élément et progressivement dissipée lorsque l'élément est hors fonctionnement.
- **Rendement** : Le rendement énergétique pour un élément de stockage, est le rapport entre l'énergie restitué sous la forme souhaitée, ici électrique et l'énergie stockée sous quelque forme que ce soit.

D'autres caractéristiques plus qualitatives qui sont : Sureté de fonctionnement, impact environnemental, état de la technologie/application, couts et investissements.

I.3.2 Éléments de stockage comme des sources de puissance

Pour chaque élément de stockage, on rappellera brièvement le principe de fonctionnement avant de présenter ses caractéristiques remarquables. Les moyens de stockage considèrent comme des sources de puissance, relativement à l'échelle de temps de l'application, sont :

- Les condensateurs ;
- Les supercondensateurs ;
- Les bobines supraconductrices ou SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) ;
- Les volants d'inertie.

I.3.2.1 Condensateurs

Les condensateurs sont des composants de stockage électrostatique, direct, considères comme une source de puissance dans une certaine mesure, compte tenu de leur grande puissance spécifique et leur densité d'énergie relativement faible.

1. Principe de fonctionnement

Un condensateur se compose de deux électrodes, d'un isolant diélectrique entre les deux électrodes, et de deux éléments de connexion, comme il est montré sur (la figure I.3). Pour permettre la liaison électrique du composant, un condensateur permet d'emmagasiner transitoirement une charge électrique entre les deux électrodes séparées par un isolant diélectrique [6].

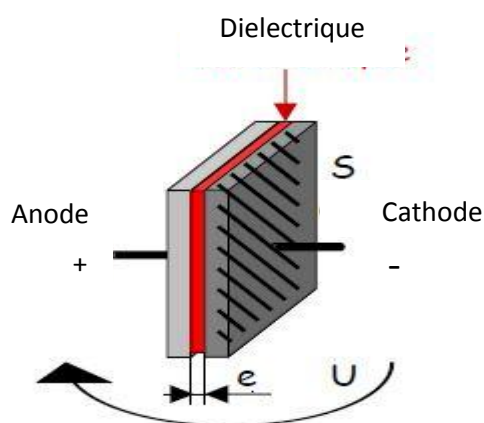


Figure I.3 : Structure d'un condensateur [6]

2. Technologies

On distingue plusieurs familles de condensateurs suivant la nature de l'isolant et des électrodes :

- Condensateur céramique;
- Condensateur électrochimique ou électrolytique;
- Condensateur a film plastique.

3. Grandeurs et caractéristiques

Dans ce paragraphe, on définit les grandeurs et les caractéristiques d'un condensateur, elles sont relatives aux performances électriques du composant. On retrouve généralement ces caractéristiques dans les fiches des constructeurs.

La charge d'un condensateur est donnée par la relation suivante :

$$Q_c = \int I \cdot dt \quad (I.2)$$

Avec :

Q_c : Charge du condensateur [C]

I : Intensité dans le condensateur [A]

t : Temps[s]

La capacité d'un condensateur est donnée par la relation suivante

$$C_c = Q_c / U_c \quad (I.3)$$

Avec :

C_c : Capacité du condensateur [F]

Q_c : Charge du condensateur [C]

U_c : Tension aux bornes du condensateur [v]

L'énergie stockée dans un condensateur est proportionnelle à sa capacité, suivant la relation

$$E_c = \frac{1}{2} C_c \cdot U_c^2 \quad (I.4)$$

Avec :

E_c : Energie stockée dans le condensateur [J]

C_c : Capacité du condensateur [F]

U_c : Tensions aux bornes du condensateur [V]

4. Avantages et Inconvénients

• Avantages

- Une puissance spécifique élevée
- Un bon rendement
- Un nombre de cycle élevé
- Une tenue en tension jusqu'à 300V pour le condensateur a film plastique [7]
- Une densité énergétique volumique de l'ordre de 0.1 à 0.2 Wh/V pour le condensateur utilisé en électronique de puissance [7]

- **Inconvénients**

- Une capacité de stockage très faible
- Une constante de temps très faible. La décharge d'un condensateur s'effectue en quelque fraction de milliseconde.

5. Application

Les domaines d'application des condensateurs sont ceux de l'électronique, télécommunication, informatique, spatial,.... leur application en grande quantité et depuis un grand nombre d'années, fait que leur coût est relativement faible, que les technologies sont éprouvées et que le retour d'expérience est important. Les applications des condensateurs sont devers par exemple : accord de circuits oscillants, résonateurs, découplage, filtrage ... [3].

I.3.2.2 Bobine supraconductrice (*Superconducting magnetic energy storage*)

Les bobines supraconductrices (SMES) sont des éléments de stockage magnétique, direct, considérés comme des sources de puissance très élevée. Le stockage d'énergie magnétique est un des rares moyens de stocker directement l'électricité. L'utilisation de la bobine supraconductrice est nécessaire pour ce type de stockage.

Le SMES est une invention française [8] l'utilisation d'un enroulement supraconducteur pour stocker de l'énergie électrique a été proposée par M. Ferrier dans les années 1970.

1. Principe de fonctionnement

Le stockage de l'énergie dans une bobine supraconductrice est fait sous forme de champ magnétique, créé par la circulation d'un courant continu dans une supraconductrice, présentant une résistance électrique nulle, ainsi si la bobine supraconductrice est refermée sur elle-même, le courant qui la parcourt se maintient car les pertes par effet joule sont nulles ou négligeables car la résistance est nulle dans certaines conditions de température et d'induction.

2. Technologie [8]

Il existe plusieurs catégories de supercondensateur, classées en fonction de leur température critique :

- SBTC (supraconducteur à basse température critique) : fonctionne à très basse température (4 K) sous un champ magnétique nominal de l'ordre de 5T.
- SMTC (supraconducteur à moyenne température critique) : fonctionne autour de 20 à 30 K sous un champ magnétique de l'ordre de 10T.
- SHTC (supraconducteur à haute température critique) : fonctionnant à 92 K sous un champ magnétique nominal de l'ordre de 10 T.

3. Grandeur et caractéristique

L'énergie stockée dans un supraconducteur est proportionnelle à son inductance, suivant la relation :

$$E_s = \frac{1}{2} L I^2 \quad (\text{I.5})$$

Avec :

E_s : Energie stockée dans la bobine supraconductrice [J]

L : inductances de bobine supraconductrice [H]

I : courant bobine supraconductrice [A]

4. Propriété [3]

Les propriétés d'un SMES sont :

- Induction magnétique nominale de 5 à 10 T (inférieure à l'induction critique intrinsèque au matériau)
- Puissance spécifique très élevée ($> 1 \text{KW.L}^{-1}$)
- Densité énergétique volumique de l'ordre de 4Wh.dm^{-3} pour une induction magnétique de 6T

5. Avantages et inconvénients

• Avantages

- une énergie utile proche de l'énergie maximale stockée, soit un rendement énergétique proche de 1
- pas d'autodécharge car les pertes sont nulles, ce qui permet un stockage long. [7]
- constante de temps pour la décharge très faible (100ms) une durée de vie élevée (20 à 30 ans)

• Inconvénients

- Ce moyen de stockage nécessite un climat cryogénique qui, bien qu'elle ne soit pas un problème technologique, rend complexe l'exploitation globale du système (fonctionnement et maintenance) [1]
- les dimensions sont très impressionnantes pour des applications de puissance significative. Les quelques exemples suivants sont l'illustration de l'encombrement imposant des applications SMES : un tore de 11,4 MWh pesant 5600 tonnes ou un solénoïde de 722 KWh pesant 225 tonnes [8].

6. Application

Les bobines supraconductrices sont principalement connectées au réseau, non pas pour un stockage massif d'énergie, mais plutôt pour stabiliser dynamiquement et transitoirement le réseau [8].

Par exemple, une bobine de 30 MJ associée à un convertisseur de 10 MVA a été abonnée à titre expérimental en 1983, sur le réseau BPA (*Bonneville power administration*) aux Etats-Unis [9]. des micros SMES sont utilisés pour le lissage des creux de tension.

I.3.2.3 Volants d'inertie

Les volants d'inertie stockent l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique. Ils sont soit totalement mécanique avec un système d'embrayage et un multiplicateur de vitesse soit le système est composé d'un volant entraîné par une machine électrique voir (la figure I.4).

1. Principe de fonctionnement

Le volant d'inertie est entraîné par une machine électrique réversible fonctionnant dans 1^{er} temps en moteur pour fournir de l'énergie à la masse inertielle, le système d'entraînement de sac, couple le volant d'inertie et stock de l'énergie dans sa rotation à la demande, cette dernière sera transformée en énergie électrique par la machine[10].

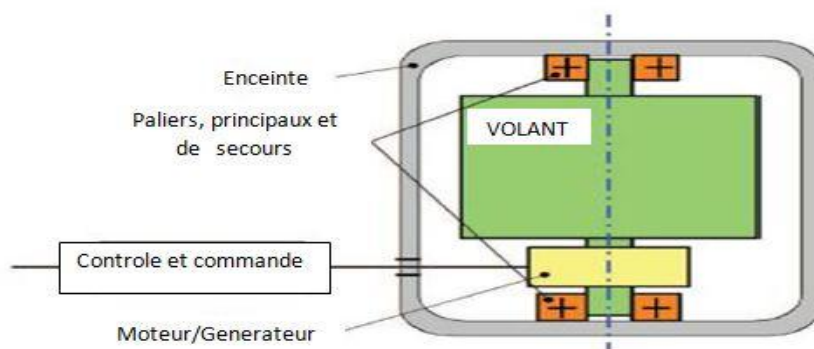


Figure I.4: Principe de système de stockage inertiel [3].

2. Technologie

Pour le volant d'inertie, plusieurs matériaux peuvent être utilisés, en fonction des contraintes mécaniques notamment. On présente quelques matériaux utilisés dans le tableau ci-dessous [11] :

Tableau I.1 : Caractéristiques des différentes technologies de volant d'inertie [3]

Matériaux	Densité énergétique [Wh. Kg ⁻¹]
Aciers	Entre 30 et 70
Aluminium	Entre 30 et 60
Titane	Entre 55 et 80
Composites	Entre 135 et 285

En ce qui concerne le moteur/générateur, plusieurs types de machines peuvent être associés au volant d'inertie : machine asynchrone (MAS), machine synchrone (MS), MS à aimants permanents (MSAP), le choix de la machine se fait par rapport à : son rendement, les bruits mécaniques générés, le cout,...etc.

Concernant les paliers, on distingue deux types de contacts : mécanique (réalise par paliers à billes) et magnétique (paliers actifs, passifs ou supraconducteurs), enfin l'enceinte de confinement est nécessaire pour assurer la protection de l'environnement en cas de défaillance du volant.

3. Grandeur et caractéristique

L'énergie stockée dans un volant d'inertie est proportionnelle à son moment d'inertie et la vitesse de rotation, suivant la relation :

$$E_{vi} = \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2 \quad (\text{I.6})$$

E_{vi} : Energie stockée dans le volant d'inertie [J]

J : Moment d'inertie [Kg.m²]

Ω : vitesse de rotation du volant d'inertie [rad.s⁻¹]

Si le volant d'inertie est considéré comme un cylindre mince, on a la relation suivante :

$$\varepsilon_M = \frac{1}{2} v_{ext}^2 \quad (\text{I.7})$$

$$\varepsilon_v = \frac{1}{2} \rho_{vi} v_{ext}^2 \quad (\text{I.8})$$

Avec :

ε_M : Densité énergétique massique [J.Kg⁻¹]

ε_v : Densité énergétique volumique [J.m⁻³]

v_{ext} : vitesse périphérique du cylindre mince [m.s⁻¹]

ρ_{vi} : Masse volumique du volant [Kg.m⁻³]

L'énergie maximale stockée dans un volant d'inertie est :

$$E_{vi-max} = \frac{1}{2} J \cdot \Omega_{max}^2 \quad (\text{I.9})$$

L'énergie utile restituée par le volant d'inertie [J]

$$E_{vi-utile} = \frac{1}{2} J \cdot \Omega_{max}^2 - \frac{1}{2} J \cdot \left(\frac{\Omega_{max}}{2}\right)^2 = \frac{3}{4} E_{vi-max} \quad (\text{I.10})$$

4. Propriété [3]

Les propriétés d'un volant d'inertie sont les suivantes :

- La densité énergétique massique peut atteindre 100 Wh. Kg^{-1} .
- La densité de puissance massique peut atteindre jusqu'à 2KW.Kg^{-1}
- la durée de décharge est de l'ordre de la minute pour une application impulsionnelle et de l'ordre de l'heure pour une application de lissage de charge par exemple.

5. Application

Les volants d'inertie sont utilisés pour des moyens de transport (train, tramway, bus), notamment pour récupérer l'énergie de freinage et dans des applications stationnaires pour des alimentations non interruptibles ou du lissage de charge.

I.3.2.4 Supercondensateurs

Les supercondensateurs stockent l'énergie sous forme électrostatique. Ils sont des systèmes de stockage d'énergie de faible densité d'énergie mais d'une densité de puissance importante. Par conséquent, ils sont utilisés dans les phases transitoires pour fournir les pics de puissance demandés, afin de réduire les convocations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie (batteries ou pile à combustible).

Il sera l'élément de stockage à présenter dans le chapitre suivant.

I.3.3 Éléments de stockage comme des sources d'énergie

Les moyens de stockage considèrent comme des sources d'énergie sont des dispositifs capables de fournir une puissance pendant un temps relativement long au vu de l'application. à savoir :

- Les accumulateurs électrochimiques (batterie) ;
- Les piles à combustible.

I.3.3.1 Batteries électriques

Ces dispositifs sont des sources d'énergie, dont la densité d'énergie est supérieure à celle des sources de puissance et peut varier notablement en fonction de la technologie.

Une batterie est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement. Cette conversion d'énergie est réversible pour une batterie, contrairement à une pile. Le terme de batterie est utilisé pour définir un ensemble d'accumulateurs électrochimiques.



Figure I.5 : Batterie au Plomb de Hawke, L'Amasafe [6].

1. Principe de fonctionnement

Une cellule d'accumulateur électrochimique est composée de deux électrodes et d'un électrolyte (conducteur ionique et isolant électronique) voir (la figure I.6). Les réactions chimiques sont spontanées dans un accumulateur et mettent en jeu deux couples doxydoreduction de potentiels différent. Durant la decharge de l'accumulateur, l'électrode positive (cathode) est le siège d'une réaction de réduction du couple de plus haut potentiel et l'électrode négative (anode) est le siège d'une réaction d'oxydation du couple de plus faible potentiel. Durant la charge, le phénomène inverse : l'électrode positive (anode) s'oxyde et l'électrode négative (cathode) se réduit.

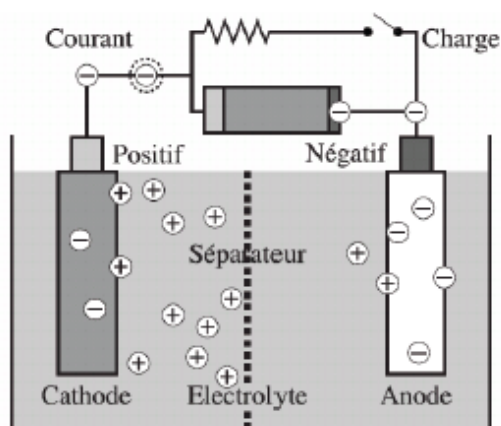


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un accumulateur (batterie) [12].

2. Grandeurs et caractéristiques

La tension électrique, ou appelée également force électromotrice (f.é.m.), aux bornes d'un accumulateur est fixée par la différence de potentiel d'oxydoréduction entre les deux couples redox utilisés. Elle est de l'ordre de quelques volts par élément. Pour obtenir des tensions supérieures, il suffit d'associer en série plusieurs cellules, formant ainsi une batterie d'accumulateur.

Potentiel de chaque électrode

$$E = E_+^0 - E_-^0 \quad (\text{I.11})$$

E_+^0 : Potentiel standard d'électrode positive [V]

E_-^0 : Potentiel standard d'électrode négative [V]

La capacité correspond à la quantité de charge que l'accumulateur peut restituer pendant un temps de décharge. Elle s'exprime en Ah ou en coulomb [C].

On distingue la capacité théorique d'une électrode de celle d'un accumulateur, la capacité théorique d'un accumulateur est la plus petite des valeurs capacité théorique des deux électrodes.

$$C_{acc-th} = \min(C_+; C_-) \quad (I.12)$$

C_{acc-th} : Capacité théorique de l'accumulateur [C]

C_+ : Capacité maximale théorique de l'électrode positive [C]

C_- : Capacité maximale théorique de l'électrode négative [C]

L'État de charge (Apple SOC : state of charge) représente la capacité disponible restante dans un accumulateur, exprimée sous forme de pourcentage de la capacité évaluée [3]

$$SOC = SOC_0 - \frac{C_u}{C_n} \quad (I.13)$$

SOC : État de charge de l'accumulateur [%]

SOC_0 : État de charge initial de l'accumulateur [%]

C_u : Capacité utile de l'accumulateur (positive en décharge, négative en charge) [Ah]

C_n : Capacité nominale de l'accumulateur [Ah]

La profondeur de décharge (appelée DOD : depth of discharge) est la ration de la capacité utile sur la pleine capacité de l'accumulateur.

$$DOD = \frac{C_u}{C_n} \quad (I.14)$$

Avec : DOD : profondeur de décharge de l'accumulateur [%]

L'énergie stockée dans un accumulateur électrochimique est le produit de la charge ou capacité avec la tension à vide, comme donne dans la relation suivante :

$$W_{acc} = C_{acc} \cdot E_0 \quad (I.15)$$

W_{acc} : Énergie stockée dans l'accumulateur [Wh]

C_{acc} : Capacité pratique de l'accumulateur [C]

E_0 : Tension à vide de l'accumulateur [V]

3. Technologie

Il existe diverses technologies de batterie électrochimiques.

- Batterie au plomb
- Batterie au nickel (Ni-Cd, Ni-MH, Ni-Zn)
- Batterie au lithium (Li-métal, Li-ion, Lip, LiPo)

Tableau I.2: Quelque type des batteries est ses caractéristiques [13]

	Energie massique [Wh/Kg]	Densité d'énergie [Wh/l]	Puissance massique [W/Kg]	Densité de puissance [W/l]
<i>NiCd</i>	40-50	50-100	150-200	300-500
<i>NiH₂</i>	45-65	35-50	150-200	200-300
<i>NiMH</i>	50-70	140-180	150-200	300-500
<i>Li-ion</i>	90-150	150-250	200-220	400-500
<i>Li-po</i>	100-200	150-300	>200	>400

I.3.3.2 Pile à combustible

La pile à combustible (PAC), permet la génération d'électricité à partir d'hydrogène et de l'oxygène de l'air, donc la PAC est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible hydrogène hydrocarbure, alcools,... en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique [14].

1. Principe de fonctionnement

La pile à combustible fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Ici, on supprime la source de tension, on alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes, le dispositif est devenu un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté. Pour cela elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, matériau qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions voir la (figure I.7).

Le combustible à base d'hydrogène H₂ est amené sur l'anode. H₂ va se transformer en ions H⁺ et libérer des électrons qui sont captés par l'anode. Les ions H⁺ arrivent sur la cathode où ils se combinent aux ions O₂ constitués à partir de l'oxygène de l'air, pour former de l'eau. C'est le transfert des ions H⁺ et des électrons vers la cathode qui va produire un courant électrique continu à partir de l'hydrogène. Cependant cette tension ne dépasse pas 0,7 V par cellule ; il faut donc utiliser un grand nombre de cellules en série pour obtenir la tension requise. Le courant électrique produit par la pile est continu , il est donc souvent nécessaire de placer en aval de la pile un onduleur permettant la transformation du courant continu en un courant alternatif, notamment lorsque l'installation est utilisée pour fournir du courant domestique.[14]

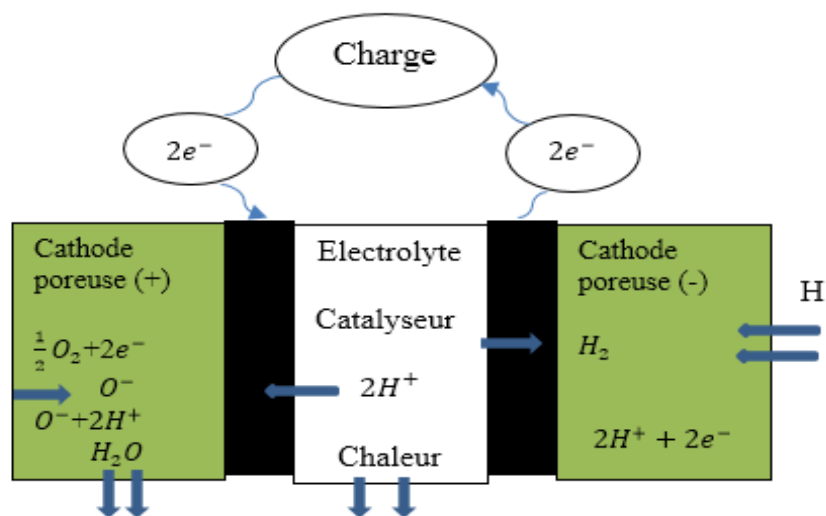


Figure I.7 : Modèle et principe de fonctionnement d'une pile à combustible [14]

2. Type et caractéristique des piles à combustible

On présente dans le tableau suivant les différentes applications et caractéristique de chaque type du piles à combustible.

Tableau I.3 : Caractéristiques des types des piles à combustible [14]

Type	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	Solution alcaline KOH	Membrane Echangeuse de protons	Acide phosphorique H_3PO_4	Mélange de Li_2CO_3 K_2CO_3 dans une matrice $LiAlO_2$	Oxyde de zircon ZrO_2 et yttrium Y_2O_3	MEP ou H_2SO_4
Combustible	H_2	H_2 produit à partir hydrocarbures ou du méthanol	H_2 produit à partir hydrocarbures	H_2 produit à partir hydrocarbures CO_2	H_2 et CO produit à partir hydrocarbures	Méthanol
Oxydants	O_2	Air/ O_2	Air/ O_2	Air/ O_2	Air/ O_2	Air/ O_2
Applications	NASA	Véhicules	stationnaires	stationnaires	stationnaires	Véhicules

3. Avantages et inconvénients

- **avantages**

- Elle produise un très bon rendement par rapport aux moteurs thermiques
- Elle n'est pas polluante
- Elle prend peu de place
- Elle demande peu d'entretien
- Elle est silencieuse

- **inconvénients**

- Durée de vie elle n'est que de quelques milliers d'heures.
- La disponibilité des combustibles de qualité adéquate : pas de réseau de distribution
- Le cout de fabrication est trop élevé [15].

I.3.4 Comparaison entre les différentes sources de stockage

La comparaison entre chaque type de stockage sa sera faire entre deux grandeurs principales, la puissance spécifique et l'énergie spécifique comme indique sur la figure I.8. En remarque que dans le domaine du stockage d'énergie, les batteries et les condensateurs sont les plus connus et les plus prometteurs. Actuellement les supercondensateurs sont ceux qui suscitent le plus d'intérêt de la part des scientifiques, en raison de leurs applications potentielles dans les modules de stockage d'énergie dans de très nombreux domaines. Ces appareils constituent l'intermédiaire entre les batteries et les condensateurs diélectriques conventionnels ce qui les rend très utile pour stocker et libérer rapidement de l'énergie. Ils combinent une densité d'énergie beaucoup plus grande que les condensateurs usuels, ainsi qu'une densité de puissance et une durée de vie supérieure à celles des batteries ($>10^5$). Les piles combustibles et les batteries fournissent une grande énergie mais avec une performance de puissance faible. Si pour cela, on a choisi le supercondensateur comme élément à étudier pour des raisons qu'on va détailler dans les chapitres suivants.

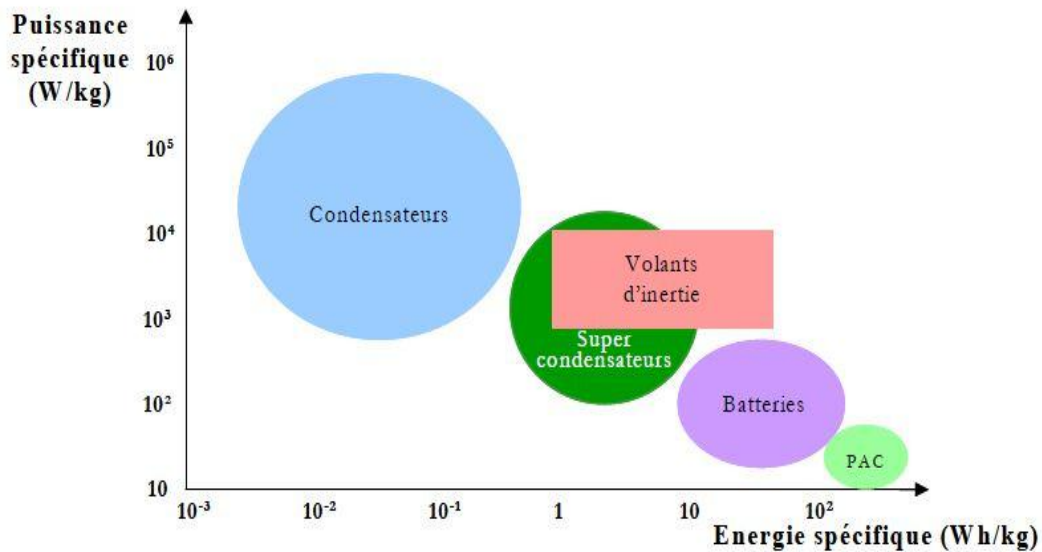


Figure I.8: Diagramme de Ragone qui compare divers système de stockage d'énergie [14]

I.4 Convertisseur DC/DC

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateur, etc.

I.4.1 Hacheur dévolteur (série)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandes (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode).

1. Schéma de principe

Le schéma de base d'un hacheur série (dévolteur) est donnée dans la figure (figure I.9)

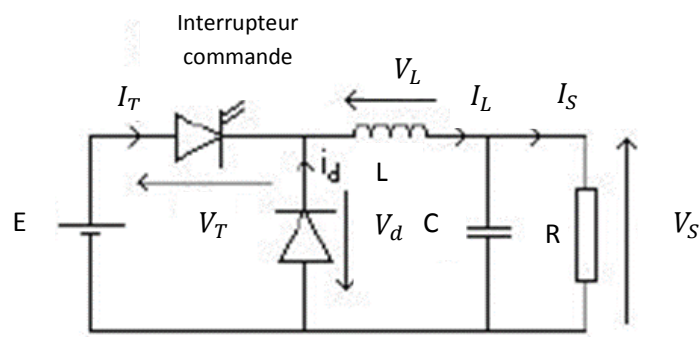


Figure I.9: Schéma de principe d'un hacheur série [16]

2. Fonctionnement

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T ($T = 1/f$), comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à αT , avec α compris entre 0 et 1 . Lors de la seconde, on bloque le transistor la diode devient passante. Cette phase dure de αT à T ; α est appelé rapport cyclique.

3. La valeur moyenne de la tension de sortie

$$V_s = \alpha E \quad (\text{I.16})$$

I.4.2 Hacheur survolteur (Parallèle)

Le hacheur quand va utiliser dans ce mémoire est fait partie de la famille des convertisseurs continu/continu. Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Ce convertisseur est utilisé dans les alimentations à découpage quand la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée, Cette structure demande un interrupteur commande à l'amorçage et au blocage (bipolaire, MOS, IGBT...) et une diode (amorçage et blocage spontanés) et une inductance

1. Schéma de principe

Le schéma de principe d'un hacheur parallèle est donné dans la figure I.10

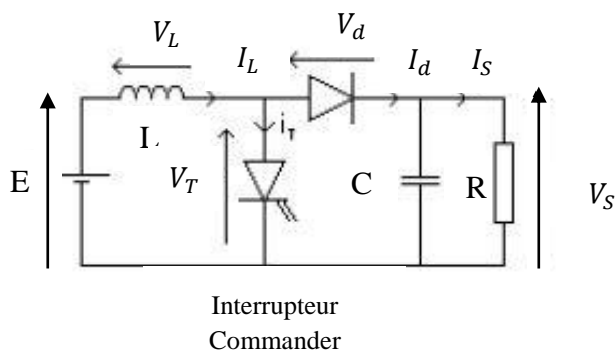


Figure I.10 : Schéma de principe d'un hacheur survolteur [16]

2. Fonctionnement

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à αT , l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée.

Lors de la seconde partie du cycle, de αT à T , on ouvre l'interrupteur commande et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées.

3. Valeur moyenne de la tension de sortie

On sait que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle donc on a, en conduction continue

$$E \alpha T = (-E + V_s)(1 - \alpha)T \quad (\text{I.17})$$

$$\text{Soit : } V_s = \frac{E}{1-\alpha} \quad (\text{I.18})$$

Or comme α est inférieur à 1, la tension moyenne de sortie est bien supérieure à la tension d'entrée.

Relation entre le courant moyen de sortie et le courant moyen dans la diode.

$I_s = I_d$ car le courant moyen dans la capacité est nul.

Donc $I_L = (1-\alpha) \cdot I_s$ de plus, connaissant la tension moyenne de sortie et la résistance de charge, on en déduit facilement I_s ce qui permet de connaître I_L .

Calcul de l'ondulation de courante crête à crête dans l'inductance L

$$\Delta I_L = \frac{\alpha E}{Lf} \quad (\text{I.19})$$

I.5 Conclusion

Comme conclusion, on dit que les systèmes de stockage d'énergie électrique sont divers et en principale, on a quatre systèmes de stockage d'énergie : système mécanique, électrochimique, électrostatique, électromagnétique et deux sources de stockage dont la première est définie comme source de puissance et la deuxième comme source d'énergie.

La nécessité d'étudier le supercondensateur comme élément de stockage à cause de sa densité de puissance élevée pour des applications qui ont besoin d'une grande puissance. Pour cela, on va faire une description du supercondensateur dans le chapitre suivant.

L'utilisation du convertisseur DC/DC au voisinage des systèmes de stockage d'énergie électrique est souvent nécessaire pour des applications embarquées pour maintenir la tension aux bornes de la charge constante donc une puissance constante.

Chapitre II

Description et Modélisation d'un Supercondensateur

II.1 Introduction

L'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie électrique est nécessaire dans de nombreuses applications soit isolé ou embarquée, Les spécifications auxquelles doivent répondre ces dispositifs sont le plus souvent donnés en termes d'énergie stockée en (Wh) et de puissance maximale (en W), ainsi qu'en termes de poids, d'encombrement et de durée de vie.

Jusqu'à maintenant, les systèmes les plus utilisés sont les accumulateurs qui ont une puissance spécifique et une autonomie relativement élevée. Les condensateurs classiques ont une autonomie insuffisante, mais possèdent une puissance spécifique incomparable. Les supercondensateurs apparaissent comme des composants intermédiaires en termes de propriétés énergétiques qui les rendent très intéressants car ils n'ont pratiquement pas de concurrents dans ce domaine [10].

Nous aborderons dans ce chapitre l'état de l'art des supercondensateurs, nous présentant leur historique de fabrication et sont principe de fonctionnement ainsi la technologie de fabrication et bien sur l'intérêt du se composant. Ensuite on va aborder quelque domaine d'application et quelques avantages et inconvénients. Enfin on va modélisée ce système de stockage et extraire les déférentes caractéristiques envisager.

II.2 Etat de l'art des supercondensateurs

II.2.1 Historique de fabrication






L'explication du fonctionnement des supercondensateurs est basée sur le concept de la double couche électrique, théorie qui a été développée au cours du 19ème siècle en premier lieu par Helmholtz, puis par Gouy, Chapman, Stern et Grahame.

C'est en 1957 que Becker, de la société General Electric, pose le premier brevet pour un supercondensateur composé d'électrodes à base de carbone poreux et d'un électrolyte aqueux. En 1969 la société Sohio Corporation propose un nouveau dispositif avec un électrolyte organique permettant une tension de fonctionnement plus grande. Au bout de l'année 1971 les supercondensateurs apparaisse à commercialiser avec succès sous le nom de "supercapacitors".

Au cours des années 80, plusieurs entreprises se lancent dans la production de supercondensateurs : Panasonic (Matsushita Electric Industrial Company) développe en 1978 la série "Gold Capacitor", également dédiée à la sauvegarde mémoire. Elna, en 1987, sort une série baptisée "Dynacap", pour des applications de faible puissance. Les supercondensateurs de puissance apparaissent dans les années 90. Aujourd'hui, les supercondensateurs ont des densités d'énergie comprises entre 1 et 10 Wh.kg-1 et des densités de puissance pouvant aller jusqu'à 20 kW.kg-1 [13].

Le tableau suivant montre des exemples de l'Etat actuel des supercondensateurs : quelques sociétés commercialisent les supercondensateurs avec ses performances.

Tableau II.1 : Supercondensateurs actuellement commercialisée [1]

Fabricant	Tension (V)	Capacité (F)	Résistance série (mΩ)	Energie spécifique (Wh.Kg ⁻¹)	Puissance Spécifique (KW.Kg ⁻¹)	Masse (Kg)	
Batscap	2.7	2600	0.3	5.3	20	0.5	
LS Cable	2.8	3000	0.3	5.2	10.4	0.63	
Maxwell Technologies	2.7	3000	0.29	5.5	11.4	0.55	
NessCap	2.7	3500	0.28	5.2	9.7	0.67	
Nippon	2.5	2400	0.7	4	4.3	0.52	

II.2.2 Définition

Les supercondensateurs stockent l'énergie sous forme électrostatique. Ils sont des systèmes de stockage d'énergie de faible densité d'énergie mais d'une densité de puissance importante. Par conséquent, ils sont utilisés dans les phases transitoires pour fournir les pics de puissance demandés, afin de réduire les sollicitations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie (moteur thermique, batteries ou pile à combustible) [13]. voir quelque exemple du supercondensateur sur la (figure I.1)



a) Module de Maxwell



b) Element unitaire dEsma



c) Module de Bats cap



d) Element unitaire de

Figure II.1 : Exemple de supercondensateur et leur module [13]

II.2.3 Structure et Principe de fonctionnement des supercondensateurs

La structure élémentaire d'un supercondensateur est constituée par des collecteurs de courant en aluminium, des électrodes généralement en charbon actif imprégné dans un électrolyte organique ou aqueux. Un séparateur est inséré entre les deux électrodes pour les isoler comme indiqué sur la (figure II.2).

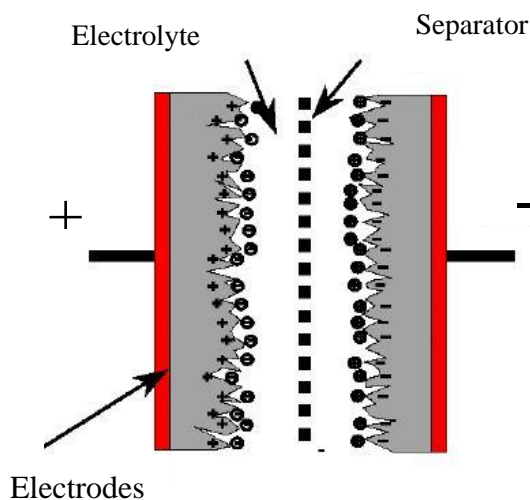


Figure II.2 : Structure d'un supercondensateur [4]

Le principe de fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Le stockage de l'énergie est donc électrostatique et non pas faradique comme dans le cas des batteries, puisqu'il n'y a pas de réaction électrochimique.

Un supercondensateur a une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs classiques, et donc d'obtenir des valeurs très élevées de capacités. Si on veut accroître la capacité de stockage, il faut soit augmenter la permittivité relative soit accroître le rapport S/d [4].

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (\text{II.1})$$

Où S est la surface des électrodes et d est la distance entre les électrodes.

L'assemblage de celui-ci et comme celles des condensateurs classiques un schéma représentative d'un supercondensateur voir la (figure II.3)

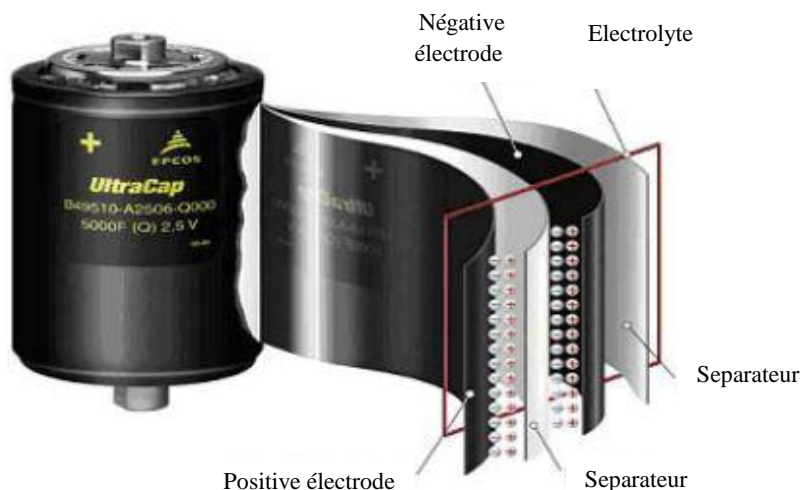


Figure II.3: Schéma représentatif d'un supercondensateur à double couche électrique [15]

Un supercondensateur peut donc être représenté comme montre sur la (figure II.4), par deux capacités représentatives des charges stockées, et connectées en série par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte [12].

La capacité totale vaut :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (\text{II.2})$$

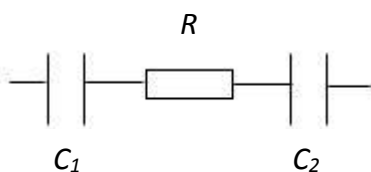


Figure II.4: Schéma électrique d'un supercondensateur [13]

Un supercondensateur unitaire présente une tension de l'ordre de 2.5V à 2.7V ce qui signifie généralement que plusieurs éléments doivent être mis en série afin d'obtenir la tension demandée. Il est évident que connecter en série les condensateurs diminue leur capacité équivalente. Ainsi pour obtenir une capacité élevée à une tension donnée, un arrangement en série et en parallèle de plusieurs éléments est envisagée. Pour cette association, on parle de module complet ou pack [4]

II.2.4 Technologie des supercondensateurs [17]

Plusieurs critères permettent de différencier les super condensateurs : les matériaux d'électrodes, l'électrolyte, la membrane. Nous évaluons, dans cette section, ces différentes technologie.

II.2.4.1 Matériaux d'électrode

Pour exploiter au mieux les potentialités de cette couche double électrique en termes d'énergie spécifique et de capacité volumique, il convient d'accroître la surface de contact entre électrode et électrolyte sans augmenter outre mesure le volume total de l'ensemble. On a recours pour ce faire à des matériaux d'électrodes poreux de très grande surface spécifique.

Il existe différents types de composés carbonés pouvant servir de matériaux d'électrodes polarisables. En particulier, les charbons actifs et les fibres de tissu activé, qui possèdent des surfaces actives très importantes et permettent d'accroître la capacité.

- **Charbon actif**

La technologie actuellement la plus répandue est du charbon actif. Qui présente des surfaces spécifiques supérieures à ($1000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$), et pouvant atteindre ($3000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$), les supercondensateurs issus de cette filière fonctionnent selon un principe du type électrostatique.

Nous présentons (figure II.5) la structure microscopique d'une électrode en charbon actif, dont la porosité est de type cylindrique.

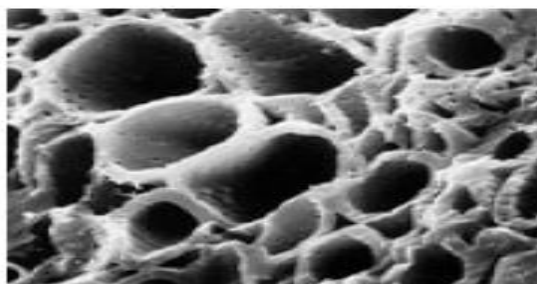


Figure II.5: structure microscopique d'une électrode en charbon actif [17]

- **Tissus activés**

Une autre technologie, employée en particulier par Maxwell, est basée sur l'utilisation de tissus de carbone active (figure II.6). Les surfaces spécifiques obtenues sont également importantes, typiquement de $2000 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$. En pratique, même si la surface spécifique de ces matériaux est relativement élevée, seule une fraction de cette surface est utile.



Figure II.6 : structure macroscopique d'une électrode en tissu active [17]

II.2.4.2 Electrolyte

Le choix de l'électrolyte est au moins aussi important que celui du matériau d'électrode. La puissance maximale que peut fournir une source d'énergie électrique dépend directement de sa résistance interne, cette puissance s'écrit :

$$P_{max} = \frac{E^2}{4.R} \quad (\text{II.3})$$

Dans le cas des supercondensateurs, la résistance interne est composée de deux termes. Le premier est associé à la conduction électronique, et est donc dépendant de la qualité électrique des électrodes. Le second, associé à la conduction ionique, dépend de la conductivité de l'électrolyte, ainsi que de l'aptitude des ions à migrer plus ou moins aisément dans la porosité de l'électrode jusqu'à la couche double.

Le paramètre de la densité d'énergie lie à la stabilité électrochimique du solvant électrolytique.

Il existe deux familles de supercondensateurs qui se distinguent par le type d'électrolyte utilisé : organique ou aqueux. Néanmoins les deux familles utilisent des électrodes en charbon actif. L'électrolyte à base organique accepte des tensions maximales de l'ordre de 2,7V contre seulement 1V pour les autres, en contrepartie, la capacité massique des supercondensateurs de type organique est plus faible que pour la deuxième technologie. Il est à noter que dans le tableau ci-dessous, le supercondensateur Esma* est constitué de deux supercondensateurs en série. [12]

Tableau II.2 : données constructeur pour différentes types des supercondensateurs [12]

Constructeur	Capacité/Tension nominale (F)/(V)	Energie massique (Wh/Kg)	Puissance massique (W/Kg)	Type
Maxwell	3000/2.7V	6	12000	Organique
Bats cap	2600/2.7V	5.3	20000	Organique
Esma	80000/1.7V*	9	500	Aqueuse
Messcap	3000/2.7V	5.73	11000	Organique

II.2.4.3 Séparateur

La construction des super condensateurs fait également intervenir une membrane isolante poreuse, donc conductrice ionique, séparant les deux électrodes imprégnées d'électrolyte. On utilise généralement un polymère ou du papier en milieu organique, une céramique ou de la fibre de verre en milieu aqueux. Le séparateur introduit un terme supplémentaire dans la résistance totale du composant, terme dépendant de la porosité et de l'épaisseur de la membrane.

II.2.5 Intérêt et l'usage des supercondensateurs [1].

Les supercondensateurs sont des systèmes de puissance, ils sont donc utilisés lorsqu'il est nécessaire de fournir un pic de puissance sur une période courte, typiquement quelques secondes. Les batteries possèdent une grande densité d'énergie (10-100 Wh.kg-1) mais une faible densité de puissance (≤ 10 kW.kg-1), A l'opposée, les condensateurs diélectriques possèdent de grandes densités de puissance ($\gg 10^5$ W.kg-1), mais de faibles densités d'énergie ($< 10^{-1}$ Wh.kg-1). Les supercondensateurs se placent entre ces deux types de systèmes, aussi bien en termes d'énergie (1-10 Wh.kg-1) que de puissance (1-20 kW.kg-1). Contrairement aux batteries qui fournissent de l'énergie sur une longue durée (plusieurs heures), les supercondensateurs délivrent des forts pics d'énergie en des temps très courts (plusieurs secondes à quelques minutes). Ils possèdent une plus grande durée de vie (plus de 1 000 000 cycles) que les batteries (quelques milliers de cycles), un rendement énergétique supérieur (de l'ordre de 95 % alors qu'il est inférieur à 80 % pour les batteries) et se rechargent plus rapidement (quelques secondes pour un supercondensateur contre quelques heures pour une batterie). Ces systèmes peuvent aussi être utilisés dans des conditions climatiques extrêmes, Ils peuvent donc être utilisés pour stocker l'énergie récupérée lors du freinage dans les véhicules et les équipements industriels et la fournir de façon efficace en fonction des besoins. Ils sont également utilisés en tant que tampon de puissance : ils délivrent de la puissance lorsque le générateur fournit une puissance plus basse que la moyenne et la stockent lorsque ce dernier fournit une puissance plus haute que la moyenne (téléphonie mobile).

Un tableau comparatif permet de comparer les fonctionnalités des supercondensateurs avec quelque dispositif de stockage.

Tableau II.3 : comparaison entre divers dispositif de stockage [17]

	Condensateur classique	Supercondensateur	Batterie
Temps de charge t	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	1 heure $< t < 5$ heures
Temps de décharge	$\mu s < t < ms$	$1s < t < 30s$	0.3 heure < 3 heures
Rendement Charge/décharge	$> 95\%$	Entre 85% et 98%	Entre 70% et 85%
Densité de puissance (W/Kg)	$> 10^5$	10^4	$< 10^3$
Densité d'énergie (Wh/kg)	Entre 10^{-3} et 100^{-1}	Entre 1 et 10	Entre 10 et 100
Durée de vie nombre de cycles	10^{10}	10^6	10^3

II.2.6 Domaine d'applications des supercondensateurs

Grace à leur large gamme de capacité (de quelques farads a plus de 5000 Farads), les supercondensateurs ils peuvent être utilisés dans nombreux domaines, militaire ou civil, stationnaire ou embarqué quand un pic de puissance sur une courte période (quelques secondes) doit être fourni.

a. Domaine militaire

Ils équipent déjà de nombreux dispositifs militaires comme les émetteurs radios, les alimentations électrique de secours et de capteurs autonomes, les détonateurs, les systèmes d'orientation des radars de suivi des missiles balistique.



Figure II.7 : Application de supercondensateurs dans le domaine militaire, Radars de surveillance aérienne (satellites, missiles balistiques,...)

b. Domaine des transports

Le domaine des transports en est particulièrement demandeur car les supercondensateurs possèdent des temps de charge et de décharge compatible avec les phases de freinage et d'accélération.

Dans un véhicule hybride, l'association d'un supercondensateur à la batterie permet d'absorber les demandes instantanées de forte puissance (démarrage, accélération) ce qui la soulage et permet de prolonger leur durée de vie .Il récupère aussi énergie perdue lors du freinage.

Ils commencent aussi à être intègres dans les transports publics urbains (figure II.8) , pour récupérer l'énergie lors des freinages ou pour les rendre autonome entre deux arrêts, et la consommation d'énergie, les couts de fonctionnement et pollution sont réduits,

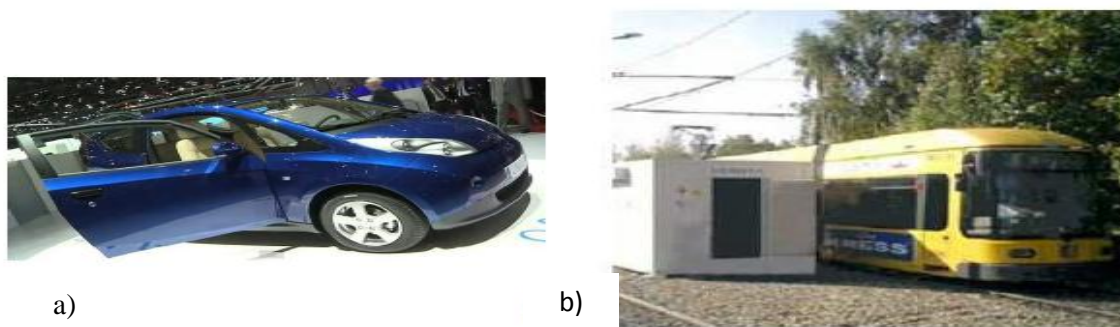


Figure II.8 : Application des supercondensateurs dans le domaine du transport. (a) Voiture électrique "Blue Car" de Bolloré utilisée pour le service Autolib18. Vehicule hybride (b) Utilisation du système SITRA SES de Siemens en station du tramway de Dresde22 (Allemagne).

c. Dans le domaine des énergies renouvelables [2]

Les supercondensateurs sont intégrés dans le système d'orientation des pales d'éoliennes. Les pales sont reliées à un rotor dont la vitesse dépend de celle du vent. La vitesse nominale du rotor est ensuite maintenue constante par l'ajustement des pales par rapport à la direction du vent. L'énergie emmagasinée dans les supercondensateurs intégrés au système de propulsion assure le mouvement des pales pendant Plus de 30 secondes.

On trouve également des travaux sur leur utilisation dans les éoliennes (Figure II.9) Dans un but de lissage de la puissance fournie au réseau.

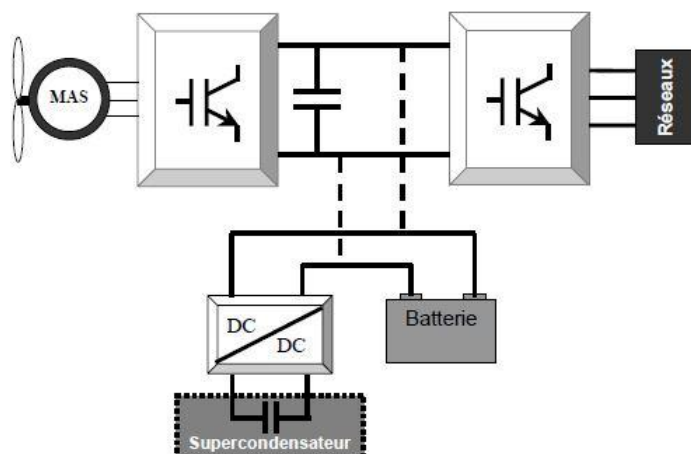


Figure II.9: Utilisation des supercondensateurs dans le domaine des éoliennes [18]

d. Domaine de la logistique

De la restituer en phase de levage. Grace à ce système, la consommation Les supercondensateurs équipent des grues portuaires motorisées, par exemple au japon figure (II.10) ils permettent de récupérer l'énergie cinétique lors de la descente du plateau porteur. On peut citer l'utilisation de supercondensateurs pour l'alimentation des ascenseurs, Dans cette application, les supercondensateurs jouent un double rôle : la récupération d'énergie et le lissage de la puissance prise au réseau.



Figure II.10: Grues aéroportuaires au Japon combinant un moteur diesel et des modules Supercondensateurs [17].

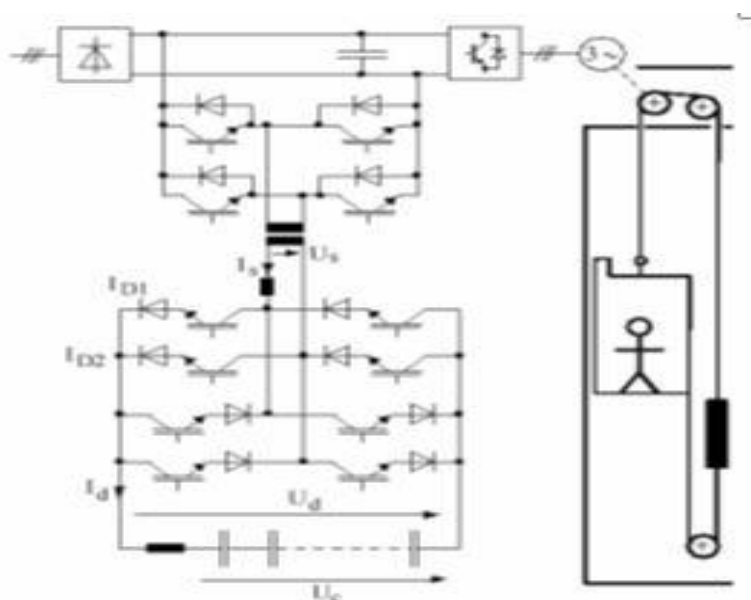


Figure II.11: Prototype d'un ascenseur alimenté par des supercondensateurs [18]

e) Domaine "réseau électrique"

Ils sont aussi utilisés pour pallier aux défaillances de courtes de durée du réseau électrique dans des systèmes d'alimentation sans interruption. En effet, 98% des défaillances électriques (chute de tension ou coupure électrique) durent moins de 10 secondes dans les applications faible tension.

f) Domaine "électronique de puissance"

Les applications de l'électronique de puissance nécessitent des composants de stockage d'énergie électrique de faible poids et de volume. Le choix de ce système dépend de la puissance requise par l'application. Un stockage d'énergie nécessitant peu de puissance (lent) sera assuré par une batterie et un stockage nécessitant beaucoup de puissance (rapide) sera assuré par le supercondensateur. Le remplacement de ces derniers par des supercondensateurs permet de rendre les circuits de micro-électronique plus efficaces et plus rapides. Toutefois, leur intégration est encore délicate car les procédés de fabrication des supercondensateurs doivent être rendus compatibles avec ceux de la micro-électronique.

Ils sont également utilisés comme source d'énergie primaire pour l'alimentation de nombreux appareils portables qui nécessitent des pics de puissance (outillage, jouets, appareils photo)

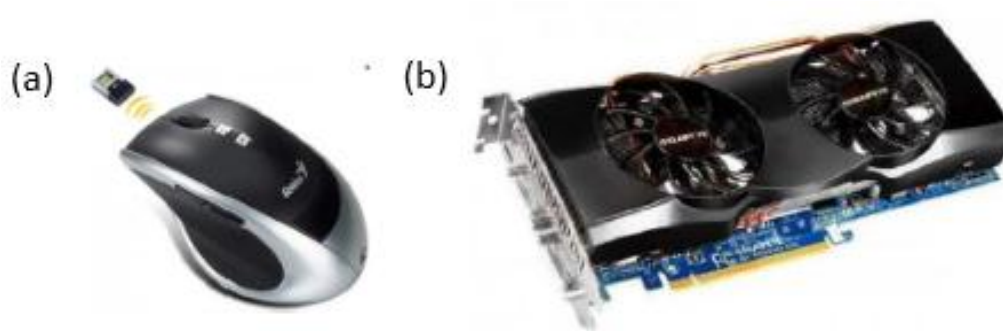


Figure I.12 :(a) souris sans fils équipée de supercondensateurs pour une recharge instantanée³⁰ (Genius DX-Eco). (b) Carte graphique équipée de supercondensateur de type NEC Proadlizer³¹.

II.2.7 Avantage et inconvénient [3]

- Avantages

1. courants de charge et décharge élevés (jusqu'à quelques 100 A pour les gros éléments).
2. faible durée de charge et décharge (de l'ordre de 1s à quelques 10s).
3. durée de vie ou nombre de cycles élevée (quelques 100 000 cycles) par rapport aux accumulateurs
4. Densité puissance élevée.
6. Etat de charge facile à gérer (linéaire en fonction de la tension).

- Inconvénients

1. Faible densité d'énergie
2. Tension maximale très faible par cellule (2,7V) pour la technologie charbon actif
3. Electrolyte dangereux (acétonitrile) charge/décharge
4. composants pouvant contenir de l'acétonitrile (inflammable et explosif)
5. comportements non linéaires du composant

II.3 Modélisation du supercondensateur

De par leur fonctionnement essentiellement électrostatique, les supercondensateurs sont des dispositifs capacitifs. La modélisation de ce dernier permet de prévoir leur comportement dans différentes applications, tout en basant sur une représentation des principaux phénomènes énergétique et électrique apparaissant au sein du composant.

Pour l'électricien, le supercondensateur est un composant parmi d'autres faisant partie d'un système énergétique qu'il convient d'identifier, Pour cela, il est prioritaire d'avoir une bonne représentation énergétique de ce composant puisque sa fonction principale est le stockage.

En second lieu, il est également important de connaître son comportement temporel afin d'évaluer les contraintes qu'il impose au reste du circuit.

La figure II.13 montre un schéma de base représentant le comportement énergétique

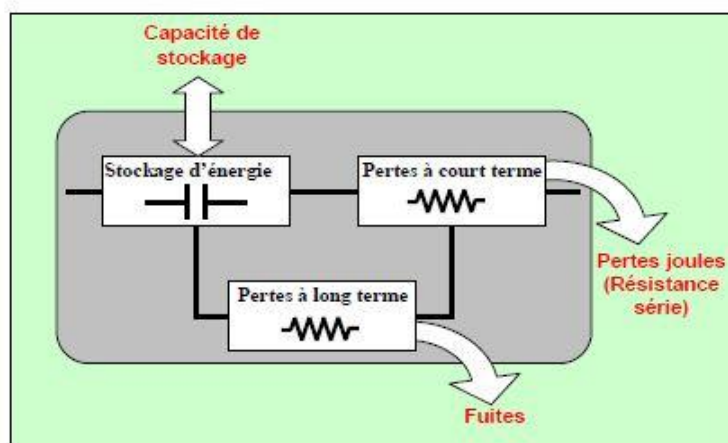


Figure II.13 : Schéma de base du comportement des supercondensateurs [18]

Pour le supercondensateur il existe différents modèles rencontrés

- Les modèles des électrochimies, modèles que l'on peut qualifier de « microscopiques », capables de représenter de manière très précise les phénomènes internes. On trouve trois approches physiques de la couche double électrique [18].
 - L'approche de Helmholtz (1853) ;
 - L'approche de Gouy et Chapman (1910 et 1913) ;
 - L'approche de Stern (1924).

On ne s'intéresse pas à ce modèle. Car il est vraiment compliqué et est difficile à l'étude et même à présent

- Les modèles de type circuit, ce type de modèle il est moins proches de la réalité physique mais plus facile à manipuler, on a plusieurs modèles rencontrés de plus simple ou plus compliqué, pour avoir une bonne représentation électrique et énergétique au sein du composant. Nous nous intéressons par la suite à ce type de modèle.

II.3.1 Modèle électrique de type ligne RC de transmission a constante localisées

Les modèles évolués de supercondensateurs font ils généralement appel à une représentation de type ligne RC de transmission a constantes localisées. Par exemple. J.R. Miller et A.F. Burke décrivent le comportement électrique de ces dispositifs au moyen de cinq cellules RC, comme illustre sur la (figure II.14) pour un supercondensateur de signal. Dans leurs travaux de caractérisation, la détermination des paramètres est réalisée grâce à une approximation, basée sur la méthode des moindres carres, de la réponse fréquentielle du supercondensateur teste. Leur méthode conduit évidemment a une multitude de circuits équivalents possibles.

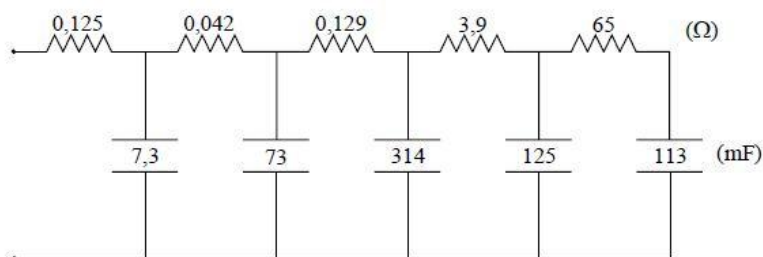


Figure II.14 : Modèle de J.R. Miller d'un supercondensateur de 0.64 F [2]

II.3.2 Modèle énergétique de R.Bonert et L. zubieta [2]

D'autres auteurs se basent sur des considérations énergétiques pour établir leur modèle comportemental. C'est le cas de R. Bonert et L. Zubieta qui exposèrent le premier véritable modèle de supercondensateur de puissance. Ce modèle dit a deux branches, repose sur la répartition de l'énergie électrostatique des supercondensateurs en deux :

- Une énergie rapidement stockée ou disponible.
- une énergie lentement stockée ou disponible.

Et comporte par conséquent deux cellules RC figure :

- La première, dit principale, rend compte de l'évolution de l'énergie durant les évènements de charge ou de décharge.
- La deuxième, dit lent, vient en complément de la première pour décrire la redistribution interne de l'énergie après les dits évènements.

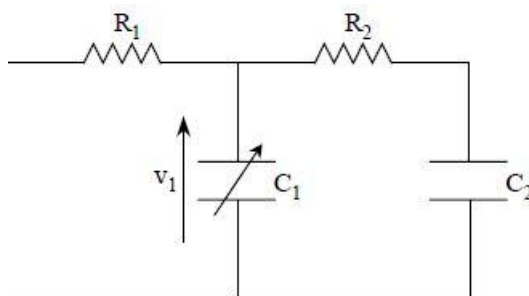


Figure II.15 : Modèle énergétique a deux branches de R. Bonert et L. Zubieta [3]

La capacité de la branche principale est choisie variable en fonction de la tension à ses bornes, la loi de variation adoptée étant linéaire.

II.3.3 Modèle simplifié RC sans résistance de fuite (modèle constructeur)

Le modèle standard est un modèle simple, relative à l'utilisation des supercondensateurs. Il s'agit d'un modèle par circuit électrique équivalent composé d'une capacité et d'une résistance en série voir la (figure II.16).

Ce modèle est couramment utilisé dans le cadre de modélisation fonctionnelle pour l'étude de système énergétique, Il est également utilisé par les constructeurs pour établir leurs fiches techniques.

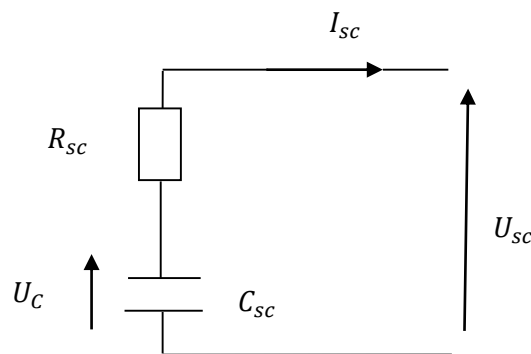


Figure II.16 : Modèle R-C d'un super condensateur [3]

Le modèle est composé de :

- C_{sc} : capacité du supercondensateur [F]
- R_{sc} : résistance en série du supercondensateur [Ω]

II.3.3.1 Grandeurs et Caractéristique énergétique du modèle

Les caractéristiques d'un supercondensateur sont détaillées dans ce paragraphe. Pour faciliter la compréhension.

- Ratio de tension /Profondeur de décharge d'un supercondensateur

On définit généralement une tension minimale U_{sc_min} , en dessous de laquelle il n'est pas conseillé de descendre lors de la décharge d'un super condensateur, et le ratio de tension d tel que :

$$d = \frac{U_{c_min}}{U_{c_max}} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

U_{c_min} : Tension minimale aux bornes de la capacité super condensateur [V]

U_{c_max} : Tension maximale aux bornes de la capacité du super condensateur [V]

- L'énergie maximum stockée $E_{max-stockee}$

Pour une tension maximale U_{sc-max} L'énergie maximum stockée $E_{max-stockee}$ dans le supercondensateur est :

$$E_{max-stockee} = \frac{1}{2} C_{sc} U_{c-max}^2 \quad (II.4)$$

Pour une tension et capacité donnée on trace cette caractéristique $U_{sc-max} = 40 V$, $C_{sc} = 350 F$

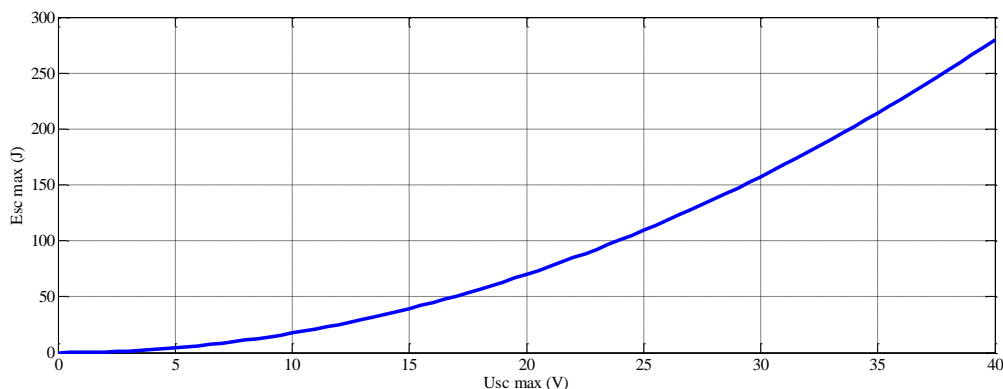


Figure II.17 : l'énergie maximale stockée en fonction de la tension max

Dans cette caractéristique on observe que l'énergie maximale stockée dans le supercondensateur, augmente fur et mesure avec sa tension maximale admissible a si bornes quand on augmente la tension maximale dans le supercondensateur l'énergie maximale stockée augmente.

L'énergie maximale stockée dans un super condensateur ne prouvent être entièrement restituée, on définit alors l'énergie utile E_{sc_utile} [J] en tenant compte du ratio de tension :

$$E_{sc_utile} = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U_{c_max}^2 - \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U_{c_min}^2 = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot U_{c_max}^2 (1 - d^2) = E_{max-stockee} (1 - d^2) \quad (II.5)$$

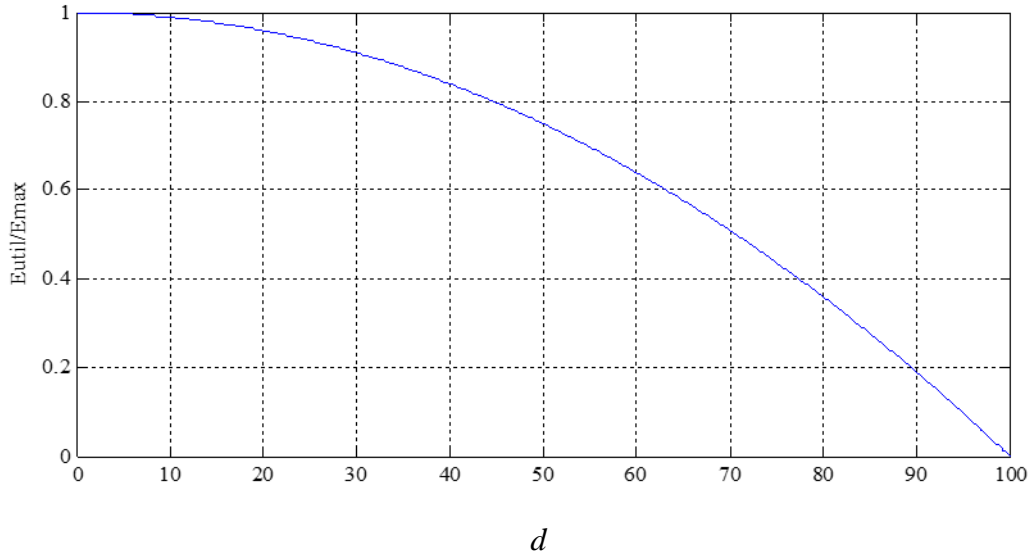


Figure II.18 : Rendement en fonction du coefficient de décharge

Pour un ratio de 0,5 correspondant à une tension minimale égale à la moitié de la tension maximale, énergie utile restituée par le super condensateur est égale aux trois-quarts de l'énergie maximale stockée. Autrement dit, sa profondeur de décharge est de 75% lorsque la variation de tension à ses bornes est de 50%.

- Puissance maximale dans un super condensateur :

La puissance dans un super condensateur P_{sc} être exprimée par le produit entre la bornes U_{sc} et le courant le traversant I_{sc} comme suit :

$$P_{sc} = U_{sc} \cdot I_{sc} \quad (\text{II.6})$$

L'application de la loi de Kirchhoff a la (figure 12) donne la relation suivante :

$$U_{sc} = U_c - I_{sc} \cdot R_{sc} \quad (\text{II.7})$$

Exprimée en puissance et en intégrant l'équation(II.7), cette relation peut s'écrire également :

$$R_{sc} \cdot I_{sc}^2 - U_c \cdot I_{sc} + P_{sc} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Cette équation du second ordre admet deux solution si son déterminant est positif, c'est-à-dire si :

$$\Delta = U_c^2 - 4 \cdot R_{sc} \cdot P_{sc} > 0 \quad (\text{II.9})$$

Cette condition donne lieu à deux limites, une en tension U_{c_min} et une en puissance P_{sc_max} , la condition limite en tension est :

$$U_{c_min} = 2\sqrt{R_{sc} \cdot P_{sc}} \quad (\text{II.10})$$

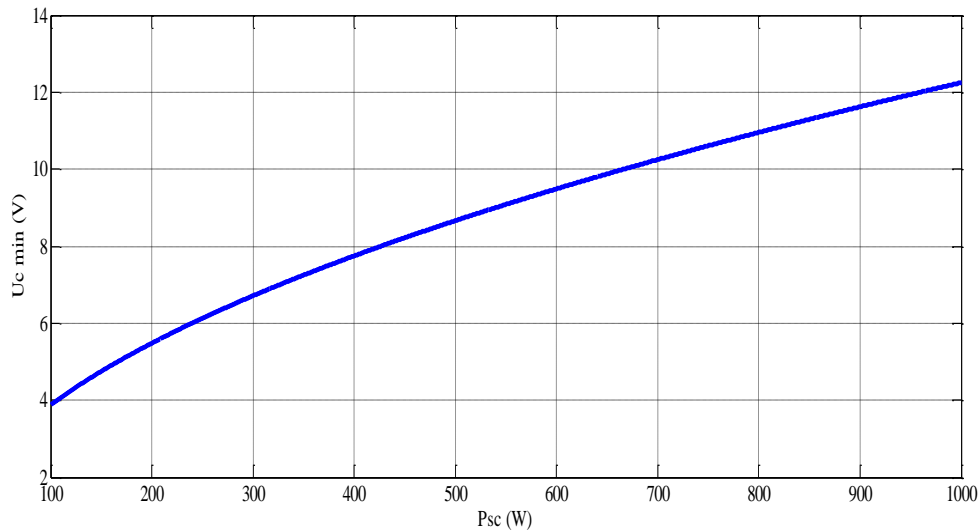


Figure II.19: la tension minimale admissible aux bornes de la capacité en fonction de la puissance du supercondensateur

Dans cette caractéristique on observe que la puissance du supercondensateur influe sur la tension minimale admissible par le supercondensateur, quand la puissance maximale augmente la tension minimale admissible augmente.

On a alors un ratio minimal en tension donne par :

$$d_{min} = \frac{2\sqrt{R_{sc} \cdot P_{sc}}}{U_{c-max}} \quad (\text{II.11})$$

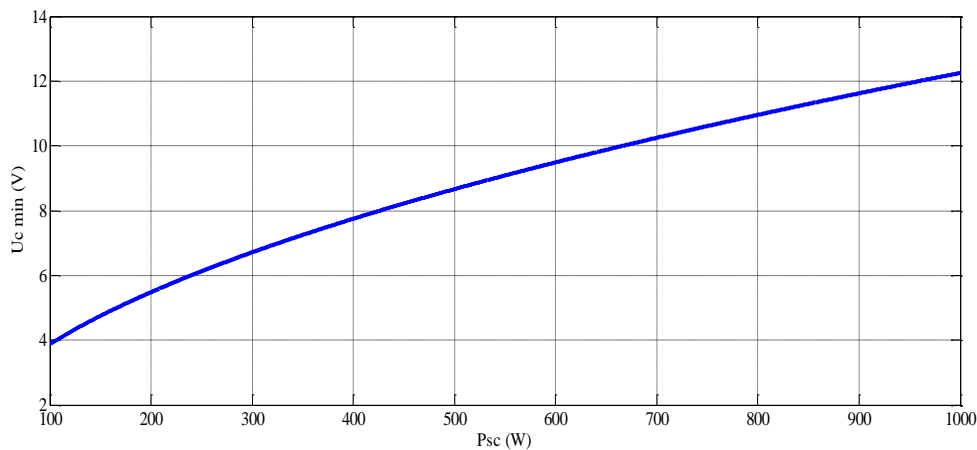


Figure II.20 : Ration de la tension minimale admissible en fonction de la puissance du supercondensateur

L'intégration du ratio minimal dans l'expression de l'énergie utile donne la relation suivante :

$$E_{sc_utile} = E_{sc-max}(1 - d^2) = E_{sc-max} \left(1 - \frac{4R_{sc} \cdot P_{sc}}{U_{c-max}^2}\right) \quad (\text{II.12})$$

Dou la limite en puissance :

$$P_{sc_max} = \frac{U_{c_max}^2}{4.R_{sc}} \quad (\text{II.13})$$

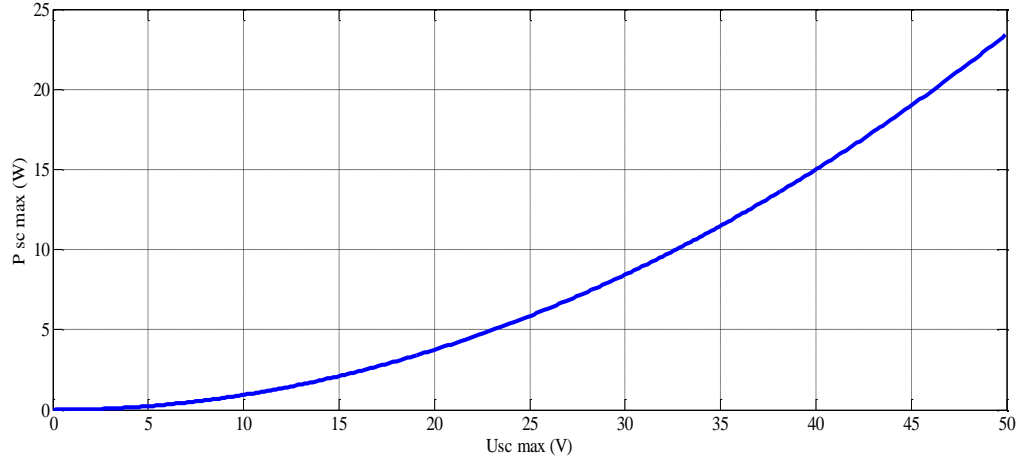


Figure II.21 : l'évolution de la puissance maximale en fonction de la tension maximale du supercondensateur

On observe que la puissance maximale d'un supercondensateur est reliée à sa tension maximale à ses bornes,

Enfin, la solution en courant à l'équation du second ordre est la suivante :

$$I_{sc} = \frac{U_c}{2R_{sc}} - \frac{1}{2R_{sc}} \sqrt{U_c^2 - 4R_{sc} \cdot P_{sc}} \quad (\text{II.14})$$

- Notion de rendement énergétique

Si on considère un supercondensateur à l'état initial chargé (sous tension maximale U_{sc-max}), l'évolution de la tension à ses bornes pendant la décharge à courant constant est :

$$U_{sc} = U_c - R_{sc} \cdot I_{sc} = U_{c-max} - \Delta U_c - R_{sc} I_{sc} = U_{c-max} - \frac{1}{C_{sc}} \cdot I_{sc} \cdot \Delta t - R_{sc} I_{sc} \quad (\text{II.15})$$

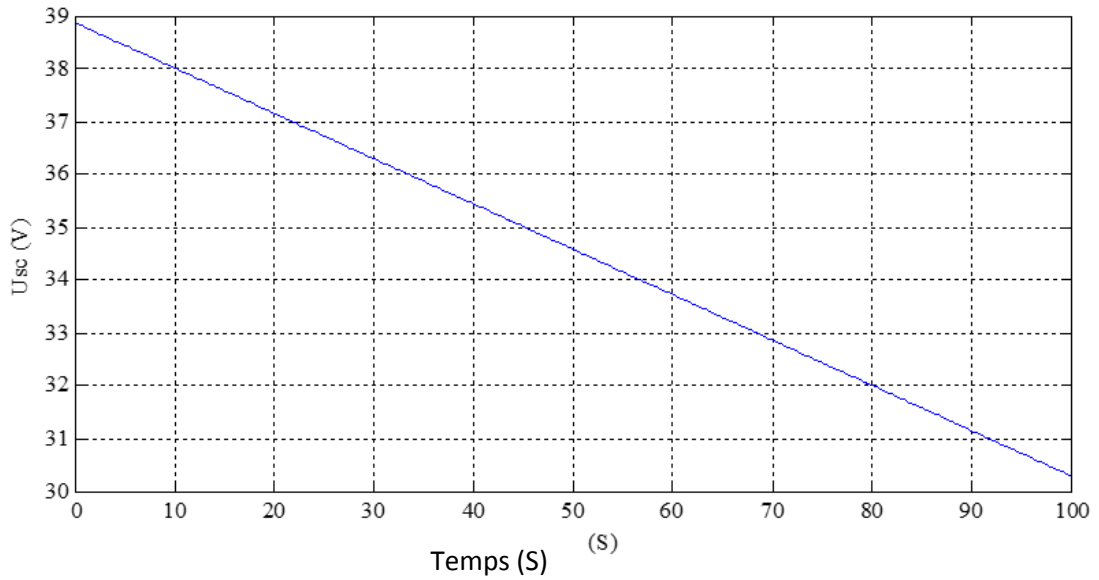


Figure II.22 : L'évolution de la tension aux bornes du supercondensateur pendant la décharge à courant constant

On voit bien dans cette caractéristique que la tension de supercondensateur diminue linéairement donc elle suit le courant de décharge qui est constant.

Le temps de décharge à courant constant, pendant laquelle la tension évolue de U_{c-max} à U_{c-min} est donné par la relation suivante :

$$T_d = C_{sc} \frac{U_{c-max} - U_{c-min}}{I_{sc}} = C_{sc} \frac{U_{c-max}(1-d)}{I_{sc}} \quad (\text{II.16})$$

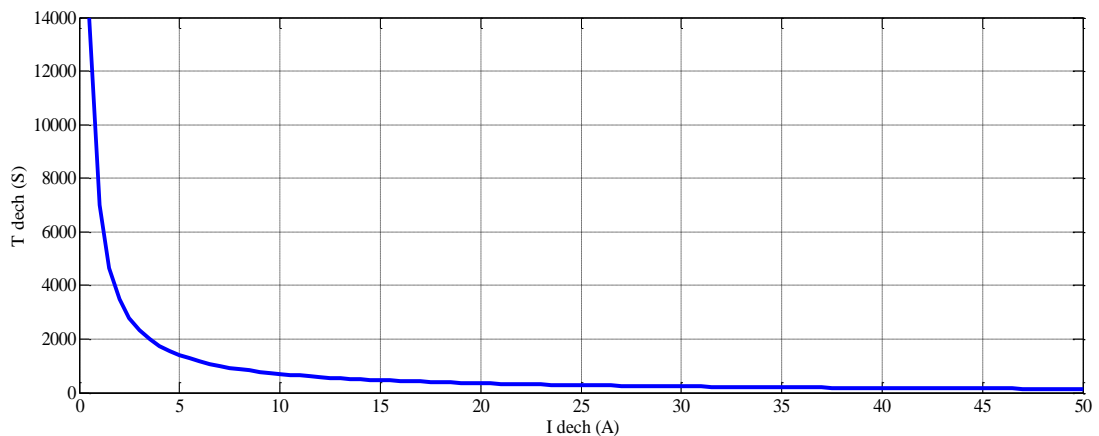


Figure II.23 : L'évolution du temps de décharge en fonction du courant de décharge

On observe que courant de décharge influe sur le temps de décharge quand on augmente le courant de décharge le temps de décharge diminue.

Pendant la période de décharge à courant I_{sc} constant, l'énergie E_{Rsc} [J] dissipée par effet joule dans la résistance interne du supercondensateur est :

$$E_{Rsc} = \int_0^{T_d} R_{sc} \cdot I_{sc}^2 \cdot dt = R_{sc} \cdot I_{sc}^2 \cdot T_d \quad (II.17)$$

En intégrant l'équation 1, l'expression de l'énergie dissipée dans la résistance interne devient :

$$E_{Rsc} = R_{sc} \cdot I_{sc} \cdot C_{sc} \cdot U_{c-max} (1 - d) \quad (II.18)$$

Le rendement énergétique η_{sc} [%] est définie ci-dessous, en fonction de l'énergie utile au sens où elle est donnée dans l'équation II.19 et a courant constant :

$$\eta_{sc} = \frac{E_{sc-utile} - E_{Rsc}}{E_{sc-utile}} = 1 - 2R_{sc} \cdot \frac{I_{sc}}{U_{c-max}} \cdot \frac{1}{(1+d)} \quad (II.19)$$

Le rendement énergétique peut également s'exprime en fonction du temps de décharge, en intégrant

$$\eta_{sc} = 1 - 2R_{sc} C_{sc} \frac{1}{T_d} \cdot \frac{(1-d)}{(1+d)} \quad (II.20)$$

II.3.1.2 Caractéristique d'un pack de supercondensateurs

La (figure II.24) présente le modèle d'un pack de supercondensateur établi à partir du modèle standard un élément de supercondensateur. Les équations établissent les relations entre la grandeur d'une cellule et celles du pack résultant de l'association de Ns_{sc} cellules en serie et Np_{sc} cellules en parallele. Le nombre de cellules totales N_{sc} est égale au produit de Ns_{sc} par Np_{sc}

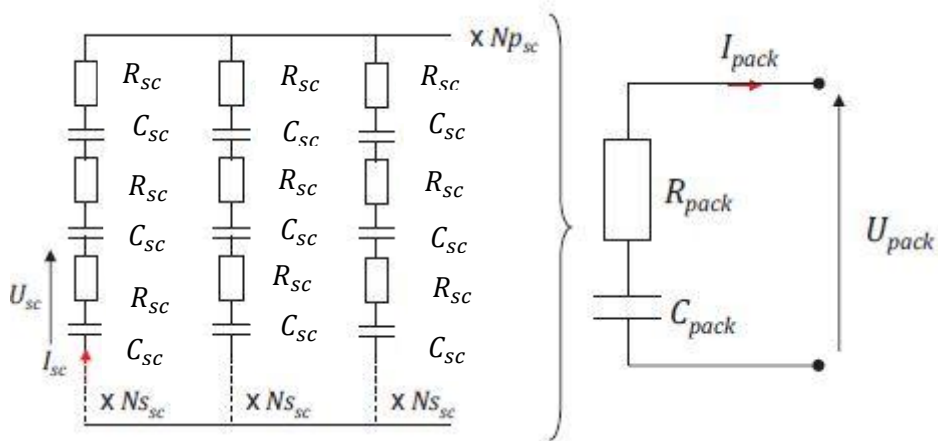


Figure II.24 : Modèle d'un pack de supercondensateur [3]

$$C_{pack} = \frac{Np_{sc}}{Ns_{sc}} \cdot C_{sc} \quad (II.22)$$

$$R_{pack} = \frac{Ns_{sc}}{Np_{sc}} \cdot R_{sc} \quad (II.23)$$

$$I_{pack} = Np_{sc} \cdot I_{sc} \quad (II.24)$$

$$U_{pack} = Ns_{sc} \cdot U_{sc} \quad (II.25)$$

$$N_{sc} = Ns_{sc} \cdot Np_{sc} \quad (II.26)$$

II.3.3.2 Conception d'un organe de stockage à supercondensateurs

La conception d'un organe de stockage a supercondensateur passe en premier lieu par un dimensionnement répondant à un cahier des charges énergétique, et dont le but est de déterminer le triplet capacitance-résistance série-tension nominale caractérisant.

- **Elément de dimensionnement**

Nous opterons ici pour une procédure analytique de dimensionnement de l'organe de stockage à supercondensateur, lequel dimensionnement sera effectué vis-à-vis du régime de décharge. Il convient en premier lieu de se donner un régime extrême d'énergie fournie. Nous traiterons le cas souvent rencontré d'un régime de décharge à puissance constante, sur une durée t_d , nous considérerons que la tension aux bornes d'un supercondensateur peut se développer, au premier ordre, en deux composantes, une composante capacitive, associée à l'évolution de l'énergie stockée dans l'élément, et une composante résistive, liée à la résistance série de l'élément.

On notera enfin :

- U_{sc} la tension aux bornes de l'organe de stockage
- I_{sc} le courant de décharge de l'organe de stockage
- U_{sc-max} la tension aux bornes de l'organe de stockage en début de décharge
- U_{sc-min} la tension aux bornes de l'organe de stockage en fin de décharge

La procédure analytique de dimensionnement, procédure paramétrée par les deux niveaux de

Tension U_{sc-max} et U_{sc-min} , est alors la suivante :

- on évalue la capacité minimale de l'organe de stockage, capacité obtenue pour une conversion sans pertes,
- on détermine dans ces conditions la loi de variation temporelle du courant de décharge

Soit C_{min} cette capacité.

Si l'on néglige les pertes, la relation de base caractérisant le transfert d'énergie envisagé s'écrit :

$$\frac{1}{2} \cdot C_{min} \cdot (U_{sc-max}^2 - U_{sc-min}^2) = P \cdot t_d \quad (\text{II.26})$$

$$C_{min} = \frac{2 \cdot P \cdot t_d}{U_{sc-max}^2 - U_{sc-min}^2} \quad (\text{II.27})$$

La loi de variation de la tension super capacitive comme suit :

$$U_{sc}(t) = U_{sc-max} \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \left(\frac{U_{sc-min}}{U_{sc-max}}\right)^2\right) \cdot \frac{t}{t_d}} \quad (\text{II.28})$$

Relation qui permet de déterminer le courant super capacitif en fonction du temps :

$$I_{sc}(t) = \frac{P}{U_{sc}(t)} \quad (\text{II.29})$$

La variation de La puissance reste constante

$$P_{sc}(t) = U_{sc}(t) \cdot I_{sc}(t) \quad (\text{II.30})$$

Plaçons-nous par exemple dans le cadre d'une application, devant fournir une puissance de 2.5 kW durant 20 s. On prendra pour U_{sc-max} une valeur de 50 V (soit 20 cellules super capacitives en série, une cellule étant une association parallèle de composants élémentaires, et la moitié pour U_{sc-min} . La capacité minimale de l'organe de stockage vaut dans ces conditions 53.3 F (soit 1067 F par cellule élémentaire). La constante de temps super capacitive, produit de la résistance série par la capacitance, étant sensiblement constante et valant environ 2 s, la résistance série de l'organe de stockage vaut 37.5 mΩ.

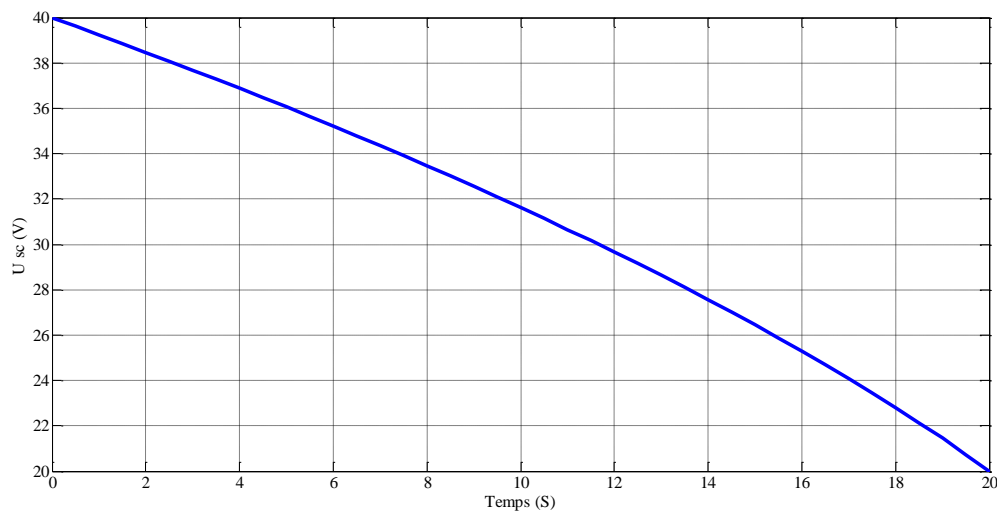


Figure II.25 : Variation de la tension capacitive en fonction du temps

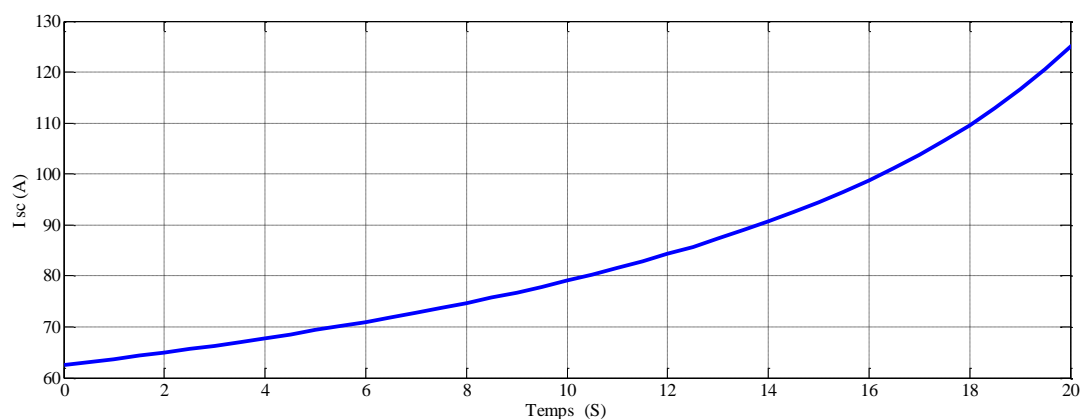


Figure II.26 : Variation du courant capacitif en fonction du temps

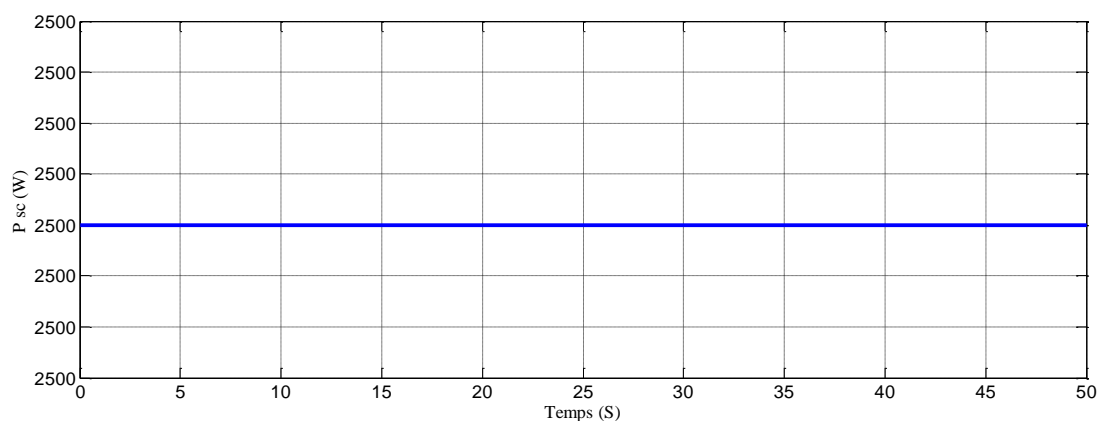


Figure II.27 : Variation de la puissance en fonction du temps

II.3.3.1 Utilisation du modèle énergétique simplifié pour tracer le diagramme de Ragone

Dans cette partie le modèle énergétique simplifié est utilisé et compare aux mesures. On note la puissance $P = UI$, avec U tension aux bornes du module, I le courant qui traverse ce dernier.

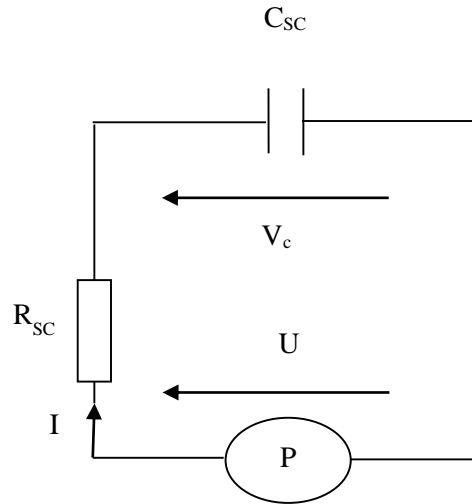


Figure II.28 : Modèle utilisé pour trace du diagramme de Ragone

A l'instant $t=0$, l'énergie stockée dans le module est $E_0 = w(Q_0)$ cette énergie correspond à la tension maximale du module 20V. On note t_∞ le temps au bout duquel le module ne peut plus fournir la puissance demandée. Si la puissance demandée est constante, alors :

$$I = \frac{P}{U} \quad (\text{II.31})$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = Q \quad (\text{II.32})$$

$$E(P) = P \cdot t_\infty \quad (\text{II.33})$$

La courbe $E(P)$ est appelée diagramme de Ragone

En appliquant le théorème des mailles sur le circuit de la figure on trouve l'équation suivante :

$$U = R \cdot I + V_c \quad (\text{II.34})$$

$$-\frac{P}{Q} = R \cdot Q + V_c \quad (\text{II.35})$$

$$V_c = \frac{Q}{C} \quad (\text{II.36})$$

Avec C la valeur de la capacité supposée constante au cours du temps.

$$U = \frac{P}{I} = \frac{Q}{C} - R \cdot I \quad (\text{II.37})$$

On dérive cette équation alors :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \frac{dQ}{dt} - R \cdot \frac{dI}{dt} = -\frac{I}{C} + R \frac{P}{U^2} \cdot \frac{dU}{dt} = -\frac{P}{C \cdot U} + R \cdot \frac{P}{U^2} \cdot \frac{dU}{dt} \quad (\text{II.38})$$

$$\frac{dU}{dt} \left(1 - \frac{R.P}{U^2}\right) = -\frac{P}{C.U} \quad (\text{II.39})$$

Dou

$$\left(1 - \frac{R.P}{U^2}\right) \cdot \frac{d(U^2)}{dt} = -\frac{2.P}{C} \quad (\text{II.40})$$

$$-\frac{C}{2.P} \left(1 - \frac{R.P}{U^2}\right) \cdot d(U^2) = dt \quad (\text{II.41})$$

On intègre l'équation précédente à variable séparées (C, R, P sont constantes)

$$t(U) = \frac{C}{2.P} \cdot (R.P \cdot \text{Ln}\left(\frac{U}{U_0}\right)^2) - U^2 + U_0^2 \quad (\text{II.42})$$

Avec :

U_0 : La valeur initiale de la tension aux bornes du circuit RC.

Pour trouver la tension à partir de laquelle la source ne peut plus fournir l'énergie, on calcule la tension pour laquelle la dérivée de $t(U)$ s'annule :

$$\frac{dt}{dU} = \frac{C}{P} \cdot \left(\frac{R.P}{U} - U\right) = 0 \quad (\text{II.43})$$

Dont on ne retient que la solution positive :

$$U_\infty = \sqrt{R.P} \quad \text{Et} \quad t_\infty = \frac{C}{2.P} (R.P \cdot \text{Ln}\left(\frac{R.P}{U_0^2}\right) + U_0^2 - R.P) \quad (\text{II.44})$$

$$E_c(P) = P \cdot t_\infty = \frac{C}{2} (R.P \cdot \text{Ln}\left(\frac{R.P}{U_0^2}\right) + U_0^2 - R.P) \quad (\text{II.45})$$

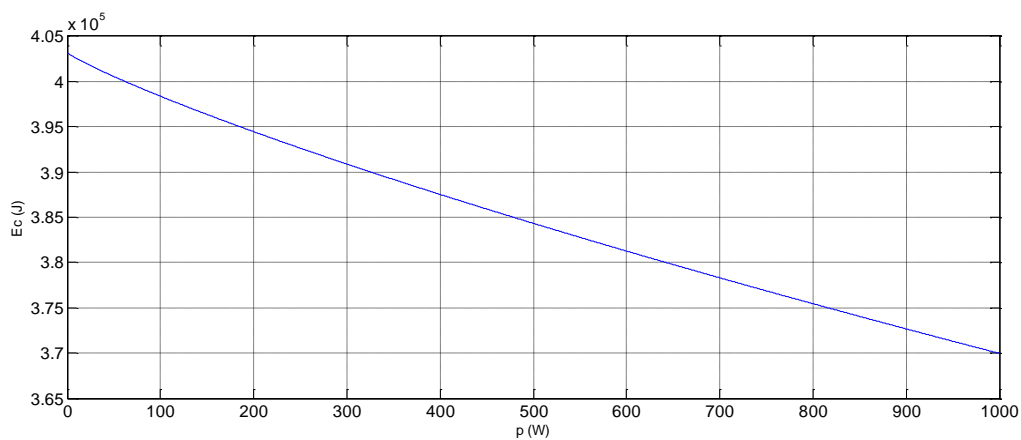


Figure II.29 : Diagramme de l'énergie en fonction de la puissance

Ce diagramme de Ragone met bien en évidence le fonctionnement du supercondensateur. L'énergie totale ne peut être extraite que sous une faible puissance. Plus la puissance demandée est importante et plus l'énergie disponible est faible en raison des pertes. Pour le dimensionnement de l'élément de stockage, le plan de Ragone donne donc des informations très utiles.

II.4 Conclusion

Comme conclusion nous avons présenté, dans ce chapitre, un élément de stockage de l'énergie électrique adapté aux systèmes électriques où les régimes de fonctionnement transitoires occupent une place importante dans les cycles de fonctionnement.

De nos jours, les super condensateurs suscitent un intérêt certain dans le domaine de la conception des systèmes électriques. En l'espace de quelques années, ils sont devenus une réalité industrielle.

Les supercondensateurs sont comme moyen fiable de stockage et d'échange d'énergie à forte puissance et courte durée, via un convertisseur, pour alimenter une charge à puissance constante. L'étude du convertisseur permettant l'échange d'énergie, est présentée aux chapitres suivants.

Table des matières

Figure II.1 : Exemple de supercondensateur et leur module	22
Figure II.2 : Structure d'un supercondensateur	22
Figure II.3: Schéma représentatif d'un supercondensateur a double couche électrique	23
Figure II.4: Schéma électrique d'un supercondensateur	23
Figure II.5: structure microscopique d'une électrode en charbon actif	24
Figure II.6 : structure macroscopique d'une électrode en tissu active	24
Figure II.7 : Application de supercondensateurs dans le domaine militaire, Radars de surveillance aérienne (satellites, missiles balistiques,...)	27
Figure II.8 : Application des supercondensateurs dans le domaine du transport. (a) Voiture électrique "Blue Car" de Bolloré utilisée pour le service Autolib18.Vehicule hybride (b) Utilisation du système SITRA SES de Siemens en station du tramway de Dresde22 (Allemagne).	28
Figure II.9: Utilisation des supercondensateurs dans le domaine des éoliennes [18]	28
Figure II.10: Grues aéroportuaires au Japon combinant un moteur diesel et des modules Supercondensateurs [17].	29
Figure II.11: Prototype d'un ascenseur alimenté par des supercondensateurs [18]	29
Figure I.12 :(a) souris sans fils équipée de supercondensateurs pour une recharge instantanee30 (Genius DX-Eco). (b) Carte graphique équipées de supercondensateur de type NEC Proadlizer31.....	30
Figure II.13 : Schéma de base du comportement des supercondensateurs [18].....	31
Figure II.14 : Modèle de J.R. Miller d'un supercondensateur de 0.64 F [2]	32
Figure II.15 : Modèle énergétique a deux branches de R. Bonert et L. Zubieta [3]	32
Figure II.16 : Modèle R-C d'un super condensateur [3]	33
Figure II.17 : l'énergie maximale stockée en fonction de la tension max	34
Figure II.18 : Rendement en fonction du coefficient de décharge.....	35
Figure II.19: la tension minimale admissible aux bornes de la capacité en fonction de la puissance du supercondensateur	36
Figure II.20 : Ration de la tension minimale admissible en fonction de la puissance du supercondensateur	36
Figure II.21 : l'évolution de la puissance maximale en fonction de la tension maximale du supercondensateur	37
Figure II.22 : L'évolution de la tension aux bornes du supercondensateur pendant la décharge à courant constant	38
Figure II.23 : L'évolution du temps de décharge en fonction du courant de décharge	38
Figure II.24 : Modèle d'un pack de supercondensateur [3]	39
Figure II.25 : Variation de la tension capacitive en fonction du temps.....	41
Figure II.26 : Variation du courant capacitif en fonction du temps	42

Figure II.27 : Variation de la puissance en fonction du temps	42
Figure II.28 : Modèle utilise pour trace du diagramme de Ragone.....	43
Figure II.29 : Diagramme de ragone énergie en fonction de la puissance	44

Chapitre III

Application et Simulation

III.1 Introduction

Pour étudier le comportement d'un supercondensateur on a besoin de faire une application qui nécessite une charge à puissance constante. L'inconvénient majeur des supercondensateurs est la tension, car généralement la tension des supercondensateurs est très faible, donc on est obligé de mettre un convertisseur statique qui est le hacheur parallèle à l'intermédiaire du supercondensateur et la charge pour augmenter la tension qui satisfait la charge et de faire une régulation de la tension ainsi que du courant pour maintenir la puissance de la charge constante.

III.2 Schéma représentatif de l'application

Le schéma représentatif de notre application est constitué d'un pack de supercondensateur comme source principale et une charge à puissance constante et d'un hacheur survolteur dans le but d'augmenter la tension de sortie de l'organe de stockage et une régulation de la tension de tel sorte de maintenir la tension et le courant aux bornes de la charge constante.

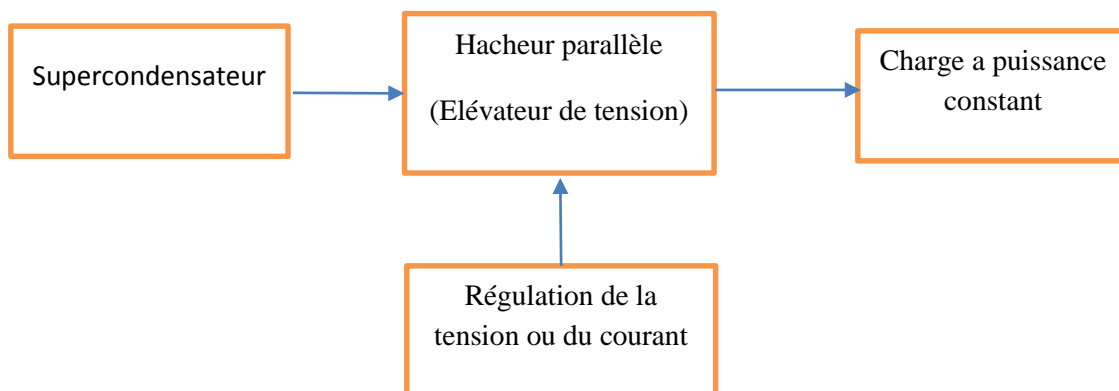


Figure III.1 : Schéma général de l'application

III.3 Modélisation du convertisseur et la régulation du courant (hacheur parallèle)

Le hacheur étudié ici fait partie de la famille des convertisseurs continue/continue. Il permet de produire une tension de sortie U_2 supérieure ou égale à la tension d'entrée U_1 .

III.3.1 Le modèle du hacheur survolteur

Le convertisseur continu - continu est un hacheur à transistor de type parallèle donc élévateur de tension. En appelant α le rapport cyclique (rapport du temps pendant lequel le transistor est fermé, à la période de hachage) :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{III.1})$$

Avec $\alpha < 1$

Pour une puissance incidente, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini. Ce modèle de hacheur survolteur (*Boost*) ou, est utilisé pour augmenter la tension de sortie, par rapport à la source. Sa forme la plus simple est présentée comme suit :

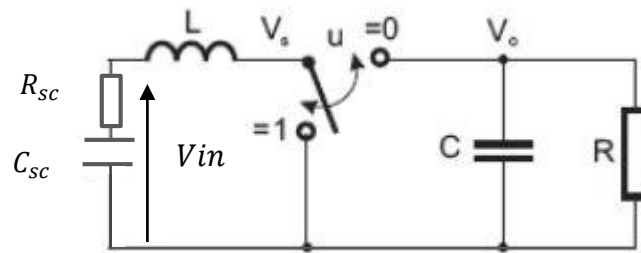


Figure III.2 : Structure de d'un hacheur survolteur

Ce hacheur comporte trois composants : Une inductance L , une capacité C et un interrupteur qui peut prendre deux états, $u=1$ et $u=0$. Son principe peut être expliqué de la manière suivante : Quand l'interrupteur est en position 1, le circuit est séparé en deux parties : à gauche, la source charge l'inductance, pendant ce temps, la capacité à droite maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée. Quand l'interrupteur change de position vers 0, la source DC et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit à droite, d'où une augmentation de la tension de sortie. Dans les conditions idéales, c'est à dire : interrupteur idéal, capacité idéale et inductance idéale, le hacheur Boost peut être modélisé en utilisant les équations différentielles ordinaires suivantes :

$$C \frac{dV_C}{dt} = (1 - u)I_L - \frac{V_C}{R} - I_0 \quad (\text{III.2})$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = Vin - (1 - u)V_C \quad (\text{III.3})$$

$$V_0 = Ri \quad (\text{III.4})$$

III.3.2 Commande des hacheurs

Ce type de contrôle très répandu dans l'industrie rentre dans la classe des commandes linéaires qui se basent sur un modèle linéaire du système pour synthétiser le contrôleur. Nous retenons la structure à deux boucles. Son avantage est qu'elle améliore les performances dynamiques et la robustesse du contrôleur. Elle permet aussi de simplifier le contrôle du hacheur « boost » dont la fonction de transfert présente un zéro dans partie droite de l'axe des imaginaires rendant son contrôle par une seule boucle de tension compliqué. La structure de la commande est représentée par la Figure

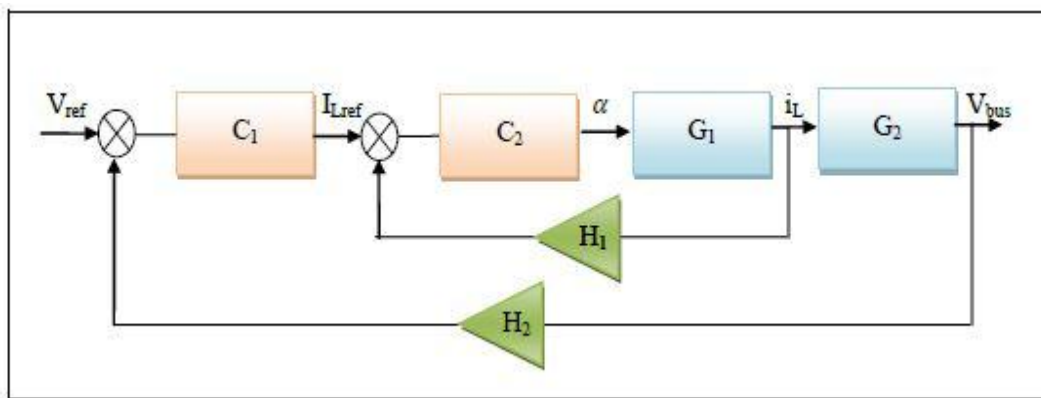


Figure III.3 : Structure de la commande par deux boucles de contrôle

Avec :

V_{bus} : Tension de référence V_{bus}

C_1 : Correcteur de la boucle externe

C_2 : Correcteur de la boucle interne de courant

G_1 : Processus $\frac{I_L(s)}{\alpha(s)}$

G_2 : Processus $\frac{V_{bus}(s)}{I_L(s)}$

H_1 : Gain du capteur courant I_L

H_2 : Gain du capteur de V_{bus}

α : Rapport cyclique de la commande

L'erreur corrigée entre la tension mesurée et celui de référence sert comme une référence de courant pour la boucle interne de courant. C'est la boucle de courant qui impose la valeur du rapport cyclique.

III.3.3 Modèle linéaire du hacheur

Pour la boucle de contrôle présente par la figure, nous avons besoin de déterminer les fonctions de transfert G_1 et G_2 . Les fonctions fonction de transfert linéarisées autour du point de fonctionnement (α, R)

$$G_1(s) = \frac{I_L(s)}{\alpha(s)} = \frac{2V_{bus}}{R(1-\alpha)^2} \frac{1 + \frac{RC}{2}s}{1 + \frac{L}{R(1-\alpha)^2}s + \frac{LC}{R(1-\alpha)^2}s^2} \quad (III.5)$$

$$G_2(s) = \frac{V_{bus}(s)}{I_L(s)} = \frac{(1-\alpha)R}{2} \frac{1 - \frac{L}{R(1-\alpha)^2}s}{1 + \frac{RC}{2}s} \quad (III.6)$$

III.3.5 Simulation et interprétation des résultats

On va utiliser une charge R et tester le circuit dans (la figure III.4) pour un temps de simulation de 5 secondes. L'objectif sera d'observer le comportement du supercondensateur connecte a une charge résistive à travers un hacheur. Les résultats à prélever seront la tension du bus continue celle aux bornes de condensateur, le courant du condensateur et de charge ainsi que l'état de charge de condensateur.

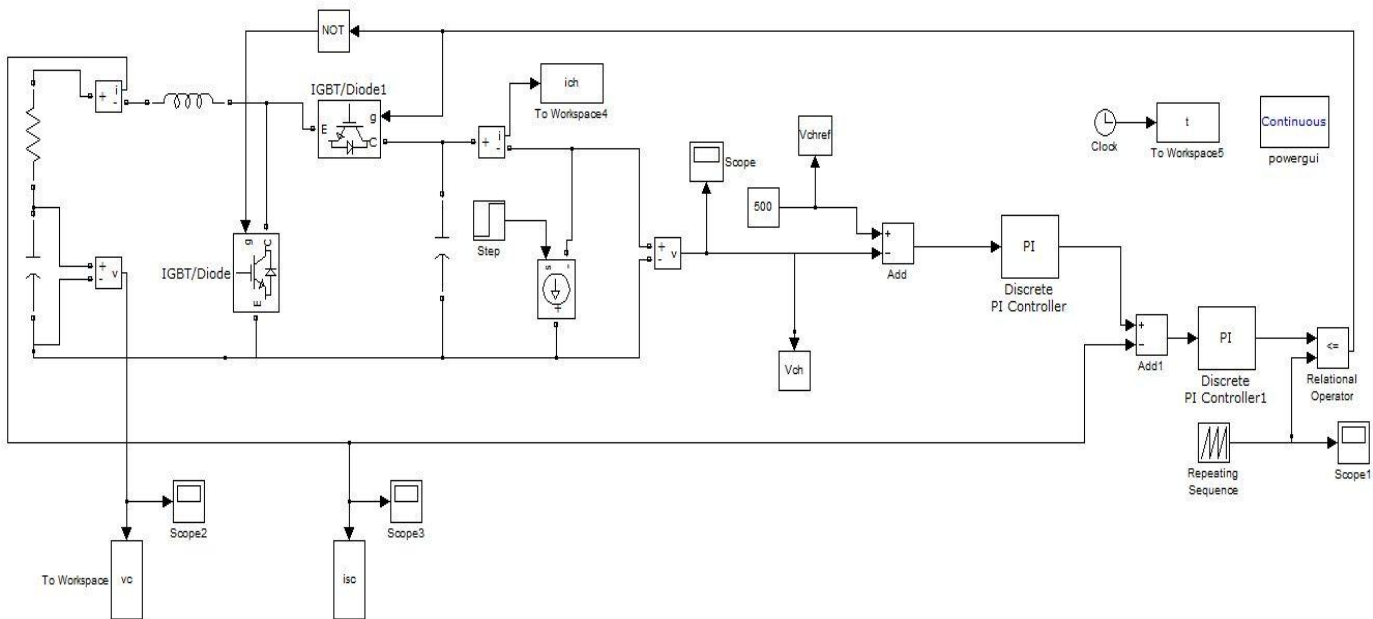


Figure III.4 : Circuit détailler de l'application pour une charge R sous matlab (SimPowerSysteme)

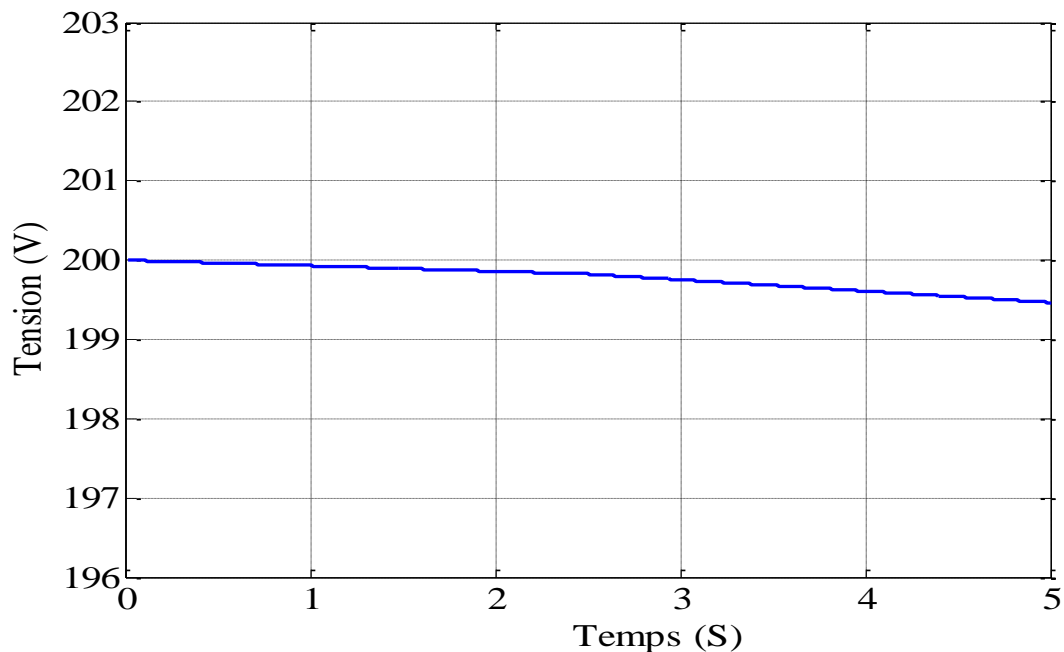


Figure III.5 : Variation de la tension du supercondensateur en fonction du temps

On remarque d'après ce résultat de simulation que la tension de supercondensateur lors de sa décharge se diminue à travers le temps

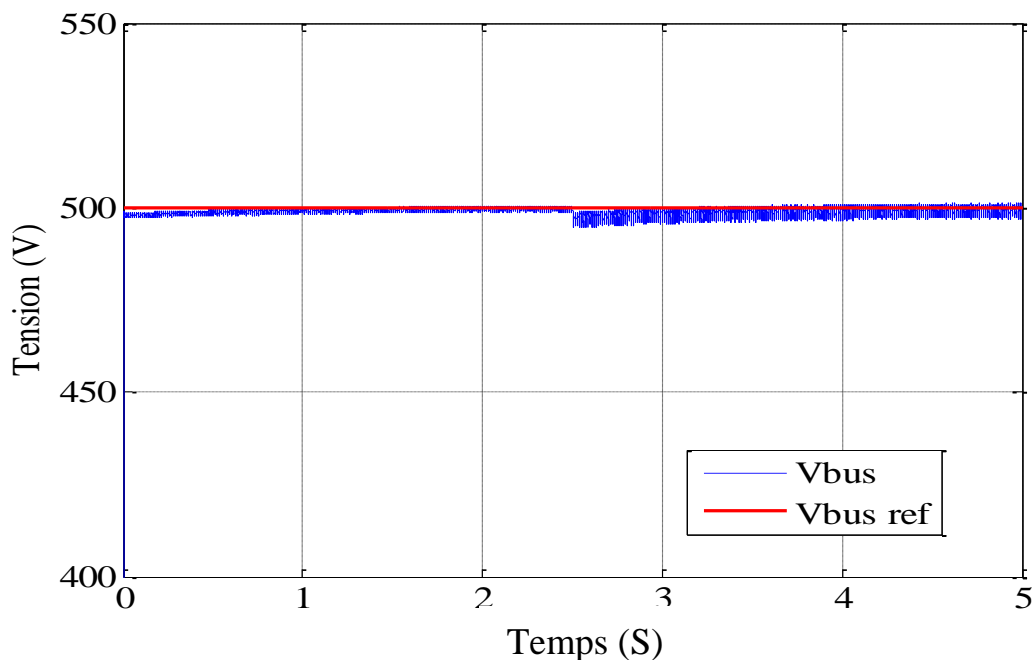


Figure III.6 : variation de la tension Vbus et V bus ref en fonction du temps

D'après la figure III.6, la tension à la sortie de hacheur elle est régulée de telle sorte que la tension aux bornes de la charge elle reste constante donc elle suit la tension de référence qu'on a imposée. ce qui explique que la régulation de tension elle est parfaite.

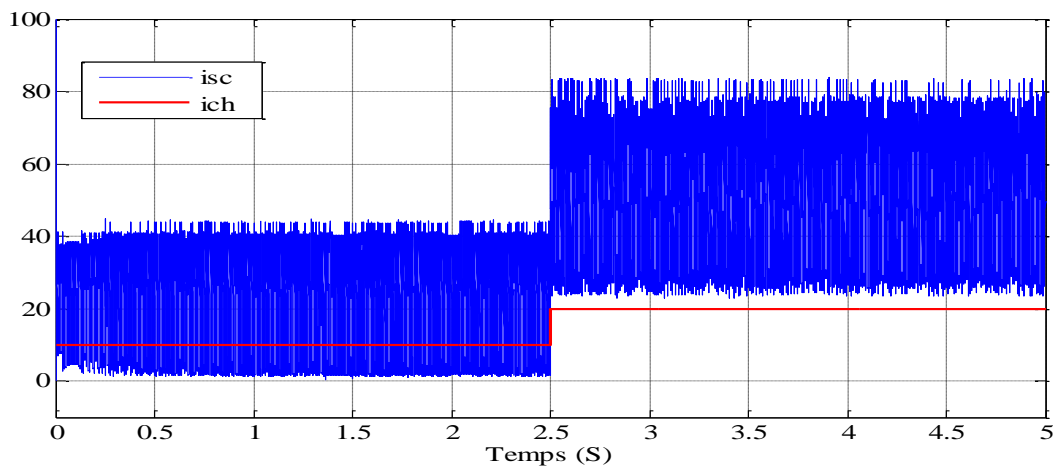


Figure III.7 : Variation de courant de supercondensateur et courant de la charge en fonction du temps

Après la figure III.7 on remarque que le courant de supercondensateur augmente fur et à mesure lors sa décharge à travers le temps, après la régulation du courant on observe que le courant aux borne de la charge il reste constant. On a teste deux résistance déférente pour des courant traversant celle-ci différent entre 0 et 2.5 s un courant de 10A, entre 2.5 et 5 s un courant de 20A

III.4 Conclusion

Comme conclusion les systèmes de stockage d'énergie ont besoin des convertisseurs statique (hacheur parallèle) à l'intermédiaire de celle-ci et la charge dans le but d'augmenter la tension à ses bornes. Pour alimenter un système de stockage à une charge à puissance constante on aura besoin d'une régulation de la tension ou du courant à la sortie du convertisseur qui implique une commande PI de hacheur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les énergies propres et renouvelables, ainsi que leur stockage, sont l'une des grandes préoccupations actuelles. Les avancées technologiques concernant les supercondensateurs, qui sont des systèmes de stockage d'énergie écologiques situés à mi-chemin entre les batteries et les condensateurs conventionnels, sont donc régulières. Les applications commerciales sont très nombreuses, souvent pour soutenir les batteries, surtout en ce qui concerne les véhicules électriques (voitures, bus, tramways et locomotives).

Ce mémoire a permis d'étudier les possibilités d'utilisation des supercondensateurs comme organe de stockage tampon d'énergie sur un bus continu comportant des charges. Nous avons été amenés à étudier le supercondensateur en présentant les caractéristiques de cet élément de stockage et des grandeurs principales, ainsi que sa technologie et son intérêt dans les divers domaines d'applications. La modélisation de ce dernier permet de prévoir leur comportement dans différentes applications, tout en basant sur une représentation des principaux phénomènes énergétique et électrique apparaissant au sein du composant.

L'architecture qui a été étudiée dans l'application d'assimilation, le supercondensateur est directement connectée à un hacheur élévateur et un régulateur qui permettent de créer un dispositif puissant tout en conservant le caractère énergétique et un temps de réponse rapide.

Références bibliographiques

Bibliographies

- [1] Céline Largeot, «Développement de supercondensateurs carbone/carbone : relation entre la taille des ions de l'électrolyte et la taille des pores de la matière active », Délivre par l'université Toulouse III-Paul Sabatier, Thèse doctorat, 23mars 2009
- [2] Mohamed-Yacine Ayad « mise en œuvre des super condensateurs dans les sources hybrides continues »institut national polytechnique de lorraine, Thèse Doctorat, 2004
- [3] Nathalie Devellers «Caractéristique et modélisation de composant de stockage électrochimique et électrostatique », université de Franche-Comté, Thèse Doctorat., 2012
- [4] Toufik Azib « Contribution à l'Etude d'Electro-générateurs à Pile à Combustible » Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », Thèse doctorat, 14 décembre 2010
- [5] A. Allègre, « Méthodologies de modélisation et gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides », Thèse de doctorat de l'Université de Lille 1, 6 septembre 2010.
- [6] A.Beauger, J. Haussonne et J. Niepce, « condensateur », Technique de l'ingénieur, Vol. E19925, 2007.
- [7] A. Marquet, c. Levillain, A. Davriu, S. Laurent et P. Jaud, « stockage d'électricité dans les systèmes électriques », Techniques de l'ingénieur, Traite de génie Electrique, vol. D4030, 1998.
- [8] P. Tixador, « Stockage supraconducteur », Journée Electrotechnique du Club EEA, Belfort, 17-18 mars 2010.
- [9] K. Mazouz, « Stockage supraconducteur d'énergie magnétique pour alimentation impulsionnelle », Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté, Belfort, 20 décembre 1995.
- [10] H.Gualous, R.Gallay, A. Berthon « Utilisation des super condensateurs pour les stockages de l'énergie embarquée : applications transport », Laboratoire L2ES, UFC-UTBM-INRETSBat F, UTBM, rue Thiery-Mieg 90 010 Belfort, Maxwell Technologies
- [11] F. Faure, « suspension magnétique pour volant d'inertie », Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, Grenoble, 20 juin 2003.
- [12] Y. Brunet, Problématiques du stockage d'énergie, Traite Electronique, Génie Electrique, Microsystèmes, Paris : Lavoisier, 2009.

- [13] Stéphane Butterbach « Stockage d'énergie électrique par association de batteries au plomb et de super condensateurs pour véhicule lourd » Laboratoire d'Electromécanique, EA1006 Laboratoire d'accueil : Laboratoire des technologies nouvelles de l'IFSTTAR, Thèse Doctorat, 20 septembre 2012.
- [14] Haroun Aouzellag, « Optimisation de la gestion énergétique des véhicules hybrides », université A.MIRA, BEJAIA, Thèse Doctorat, 12.01.2017.
- [15] P. Mestre, S.Astier, «Utilization of ultra-capacitors as auxiliary power source in electric vehicle», EPE, 1997.
- [16] Nordine Maherzi, «Etude, conception et réalisation d'un convertisseur d'énergie DC/DC associe à des supercondensateurs » mémoire pour obtenir le diplôme d'ingénieur, soutenu le 29 novembre 2010.
- .
- [18] Hamid Gualous, « Caractérisation, modélisation et intégration des supercondensateurs dans des applications embarquées », Universite de Caen-IUT de Cherbourg, laboratoire LUSAC
- [19] Nassim Rizoug« Modélisation électrique et énergétique des super condensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d'un module de super condensateurs basse tension en grande puissance », Doctorat délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, Thèse Doctorat.2006

Annexes

Annexe

Paramètres du supercondensateur

Capacité de stockage du supercondensateur C_{sc} : 350 F

Résistance série du supercondensateur R_{sc} : 0.03 Ω

Tension du pack de supercondensateur U_{sc} : 200 V

Paramètres du hacheur

La bobine L : 350 10^{-6}

Paramètre du bus continu

Valeur de la capacité C : 700 10^{-6} F

Paramètres des régulateurs PI

Régulateur 1

Gain proportionnel K_p : 10

Gain intégrateur K_i : 10

Régulateur 2

Gain proportionnel K_p : 8

Gain intégrateur K_i : 10

Paramètres de la charge

Résistance R : 10 et 20 Ω

La tension de référence V_{ref} : 500 V