HAL open science

Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie

Seïma Shili

To cite this version:

Seïma Shili. Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie. Energie électrique. Université de Lyon, 2016. Français. ⟨NNT : 2016LYSE1124⟩. ⟨tel-01403314⟩

HAL Id: tel-01403314

https://theses.hal.science/tel-01403314v1

Submitted on 25 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Autorisation HAL

HAL Authorization

N°d'ordre NNT : 2016LYSE1124

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
L'Université Claude Bernard Lyon 1

Ecole Doctorale EEA - N° accréditation : ED160
Electronique Electrotechnique et Automatique

Spécialité de doctorat : Génie Electrique

Soutenue publiquement le 11/07/2016, par :
SHILI Seïma

Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie

Devant le jury composé de :

FORGEZ Christophe, PU (HDR) / LEC / Président

LAHYANI Amine, MC(HDR) / MMA / Rapporteur
VINASSA Jean-Michel, PU (HDR) / IMS/ Rapporteur
CREBIER Jean-Christophe, DR (HDR) / G2ELab / Examinateur
PELISSIER Serge, CR (HDR) / IFSTTAR / Examinateur

VENET Pascal, PU (HDR) / Ampère / Directeur de thèse
HIJAZI Alaa, MC / Ampère / Co-directeur de thèse
SARI Ali, MC / Ampère / Co-directeur de thèse

A mes très chers parents, sans votre amour et soutien je ne suis rien…

A ma Loulou, Biscuita et Dodi vous êtes mon oxygène…

A Fafoune le seul l'unique…

A Mimita, Handev, Sallouma, Amye, Nounou, Jouja, Houta et Nanoussa

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au laboratoire AMPERE (UMR CNRS 5005) au département « Méthode pour l'ingénierie des systèmes » dans le groupe « Fiabilité, Diagnostic et Supervision ». Je remercie donc tous les membres de ce laboratoire pour leur accueil.

Mon immense gratitude et considération vont envers mon directeur de thèse Pascal VENET. Je tiens à le remercier de m'avoir permis de réaliser cette thèse, d'avoir cru en moi et de m'avoir toujours rigoureusement dirigé et soutenu sur le plan scientifique et humain. Cette collaboration était très enrichissante et c'est un immense honneur pour moi de figurer aujourd'hui parmi ses doctorants.

Mon admiration et gratitude vont envers mon co-directeur de thèse Ali SARI. Je tiens à le remercier pour le précieux encadrement et soutien sur le plan scientifique et moral. Je le remercie aussi d'avoir toujours été disponible pour moi malgré son emploi du temps très chargé. Et surtout un grand merci pour sa motivation, son énergie et sa joie de vivre qui ont toujours été une source d'inspiration pour moi.

Mon admiration et gratitude vont aussi envers mon co-directeur Alaa HIJAZI. Cette collaboration était très enrichissante sur tous les plans. Merci d'avoir été un encadrant très gentil et sévère mais aussi d'avoir été le grand frère qui me manquait en France.

Un grand merci à Pascal BEVILACQUA pour son aide lors de la réalisation de la maquette expérimentale. C'était un honneur pour moi de travailler avec une personne aussi inspirante, rigoureuse et passionnée.

Un grand merci à Xuefang LIN-SHI pour ses conseils en automatique.

Je tiens aussi à remercier les membres de l'équipe de recherche « Gestion de l'Energie et Stockage pour les Transports » (GEST) et en particulier Serge PELLISIER, Eduardo REDONDO et Mohamed BEN MERZOUK pour leur accueil au sein de l'IFSTTAR où les essais de vieillissement accéléré ont été réalisés.

Un grand merci à Amine LAHYANI et Jean-Michel VINASSA d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ma thèse et à Christophe FORGEZ, Jean-Christophe CREBIER et Serge PELLISSIER d'être les examinateurs de ma thèse.

Un grand merci à tous mes chéris, amis, proches et membres de ma famille. Mon quotidien n'était pas évident et votre présence et soutien ont toujours été une source de motivation.

Durant cette thèse et même avant, à AMPERE, je me suis toujours sentie chez moi dans un cadre chaleureux et amicale. Je remercie donc toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à cela…

Titre

Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie

Résumé

Dans les applications de puissance, les systèmes de stockage d'énergie électrique tels que les supercondensateurs sont fortement sollicités. Compte tenu des limitations existantes lors de l'utilisation d'un seul composant, un système de stockage d'énergie électrique (module) est constitué d'une association d'éléments (cellules) permettant de s'adapter aux besoins de l'application visée. Afin d'assurer la sécurité de l'équipement et de son utilisateur, un système de gestion d'énergie, qui a pour rôle de surveiller et de contrôler continuellement les cellules, est associé au module de stockage.

Le but des travaux de thèse est l'amélioration de la durée de vie des systèmes de stockage d'énergie. Cet objectif est réalisé grâce au contrôle des circuits d'équilibrage, éléments du système de gestion d'énergie, et déjà présents sur ces modules de stockage.

Différentes méthodes de contrôle sont donc présentées, analysées et comparées afin d'évaluer l'état de santé des supercondensateurs surveillés. Une nouvelle approche d'équilibrage se basant sur le niveau de dégradation estimée est exposée. Elle permet d'équilibrer les vitesses de vieillissement des cellules et ainsi de prolonger la durée de vie de l'ensemble du système.

Certains principes des résultats obtenus sont transposables aux batteries.

Mots clés

Supercondensateur, Circuit d'équilibrage, Durée de vie, Etat de Santé, Système de gestion d'énergie, Résistance Equivalente Serie.

Title

Balancing circuit control for energy storage system (supercapacitors) state of health estimation and lifetime maximization

Abstract

Energy storage elements such as supercapacitors are widely used in high power applications. However, due to single cell voltage limitation, an energy storage system (module) with large number of supercapacitors is often employed. It contains a chain structure of identical elements and ensures voltage adaptation to the corresponding application requirements. Energy management systems are associated to energy storage systems in order to assure user and equipment security. Their main role is to continuously monitor and control energy storage systems elements.

The work presented in this thesis aims to enhance the lifetime of energy storage systems. It relies on better controlling balancing circuits on the terminals of the storage system elements. These balancing circuits are a part of energy management system device.

Thus, various control approaches of balancing circuits are discussed, analysed and compared. They aim to estimate and enhance the supercapacitor's state of health.

In order to sublimate the work, a new balancing approach is proposed. It is based on the estimation of the elements degradation level. Thus, it allows aging speed's equalization between elements of a module and ensures a maximum lifetime to the energy storage system.

Some main results of the work could be generalized to batteries.

Key words

Supercapacitor, Balancing circuit, Lifetime, State of Health, Energy storage system, Equivalent series resistance.

Table des matières

Introduction générale ……12

Chapitre 1 Présentation du contexte de travail et de la problématique……..……..15

1 Introduction.....15

2 Supercondensateur, de l'élément au système de stockage d'énergie électrique.16

2.1 Présentation du supercondensateur.....16

2.1.1 Histoire du supercondensateur 16

2.1.2 Familles de supercondensateurs 17

2.1.3 Structure générale et construction 18

2.1.4 Processus de stockage.....19

2.1.5 Caractéristiques générales du supercondensateur.....20

2.1.6 Quelques exemples de modélisation du supercondensateur 22

2.1.7 Comparaison aux autres dispositifs de stockage d'énergie.....27

2.1.8 Vieillissement du supercondensateur.....29

2.2 Présentation du système de stockage d'énergie électrique par supercondensateur 37

2.2.1 Mise en série/parallèle des éléments.....37

2.2.2 Quelques exemples de domaines d'application.....39

3 Problématique de la gestion d'un système de stockage d'énergie 41

4 Systèmes de gestion d'énergie 43

4.1 Définition d'un système de gestion d'énergie 43

4.2 Topologies.....44

4.3 Catégories de système.....47

4.4 Fonctions du système de gestion d'énergie protecteur 49

4.4.1 Mesure.....50

4.4.2 Estimation des paramètres.....52

4.4.3 Gestion 53

4.4.4 Sauvegarde et communication.....55

4.5 Circuits d'équilibrage.....56

4.5.1 Circuits d'équilibrage dissipatif 56

4.5.2 Circuits d'équilibrage non dissipatif.....57

4.5.3 Comparaisons des circuits d'équilibrage 61

4.5.4 Quelques exemples de commandes des circuits d'équilibrage 63

4.6 Présentation de la problématique et du travail demandé.....64

5 Conclusion 66

Chapitre 2 Surveillance de la durée de vie des supercondensateurs par commande de leurs circuits d'équilibrage 67

1 Introduction.....67

2 Exemples de méthodes d'évaluation des états de santé des supercondensateurs.....67

2.1 Les méthodes hors ligne.....68

2.1.1 La caractérisation temporelle 68

2.1.2 La caractérisation fréquentielle 70

2.2 Les méthodes en ligne.....72

2.2.1 L'estimateur.....72

2.2.2 L'observateur.....73

3 Principe général de la surveillance de la durée de vie par commande des circuits d'équilibrage 74

3.1 Choix de l'estimation instantanée de la résistance équivalente série 75

3.2 Définition de la durée de vie prédite.....76

3.3 Variation de la résistance estimée en fonction des conditions d'utilisation....78

4 Estimation de la durée de vie par commutation rapide des interrupteurs des circuits d'équilibrage 80

4.1 Principe de la commutation directe 81

4.2 Principe de la commutation par méthode complémentaire 86

4.3 Résultats de la commande par simulations 88

4.4 Les limitations de la méthode complémentaire 91

5 Estimation de la durée de vie par commutation à la fréquence de résonance des interrupteurs des circuits d'équilibrage 92

5.1 Le comportement fréquentiel du supercondensateur 92

5.2 Principe de la commutation à la résonance 95

5.3 Résultats par simulation de l'estimation de l'ESR avec la commande proposée.....96

5.4 Validation expérimentale 98

5.4.1 Description du prototype réalisé.....98

5.4.2 Résultats expérimentaux et interprétations 101

6 Conclusion 102

Chapitre 3 Maximisation de la durée de vie des systèmes de stockage d'énergie par commande prédictive de leurs circuits d'équilibrage.....104

1 Introduction.....104

2 Description du système et de la commande en durée de vie 104

3 Présentation de la commande prédictive 105

3.1 Généralités sur la commande optimale prédictive.....105

3.2 Principe général de la commande prédictive.....106

3.3 Eléments de la commande prédictive 107

3.3.1 Objectifs de fonctionnement 107

3.3.2 Modèle prédictif 107

3.3.3 Fonction coût.....108

3.3.4 Contraintes 108

3.3.5 Commande prédictive à ensemble de commande finie.....109

4 Modèle prédictif du système commandé 110

5 Commande des circuits d'équilibrage 115

6 Contraintes.....116

7 Objectifs de commande en durée de vie.....116

8 Validation de la commande par simulation 118

8.1 Principe de simulation.....118

8.2 Description de la simulation réalisée 118

8.2.1 Description générale 118

8.3 Analyse et interprétations de l'approche d'équilibrage en durée de vie 121

8.3.1 Analyse des commandes lors de dispersion de température 122

8.3.2 Analyse des commandes lors de dispersion de la résistance équivalente série.....125

8.3.3 Analyses des commandes lors de dispersion de tous les paramètres.....128

8.4 Récapitulatif 132

9 Commande en durée de vie et coût sur cycle de vie du système de stockage d'énergie 133

9.1 Rendement énergétique du processus d'équilibrage.....133

9.2 Coût sur cycle de vie du système de stockage d'énergie 134

10 Conclusion 136

Chapitre 4 : Etude expérimentale de la commande des circuits d'équilibrage en vue d'estimer et d'améliorer la durée du système de stockage d'énergie.....137

1 Introduction.....137

2 Objectifs de l'étude expérimentale.....137

3 Description de la maquette 138

3.1 Système de gestion d'énergie 139

3.2 Banc de cyclage 141

3.3 Instrumentation.....142

3.4 Interface homme-machine.....143

3.5 Systèmes de stockage d'énergie expérimentés.....144

3.5.1 Choix des supercondensateurs.....144

3.5.2 Sollicitation thermique.....145

3.6 Vieillissement accéléré 146

3.6.1 Cyclage proposé 146

3.7 Circuits d'équilibrage et Commande 149

3.8 Estimation des paramètres et vieillissement accéléré 149

4 Résultats expérimentaux et interprétations 150

4.1 Analyse de la commande d'égalisation des tensions. 151

4.2 Analyse de la commande pour maximiser la durée de vie. 153

5 Améliorations possibles de la réalisation 156

6 Conclusion 158

Conclusion générale…….....159

Références bibliographiques……...…….……...161

Annexes……...……..170

Introduction générale

Malgré la crise économique, la société de consommation n'a pas disparu mais elle a évolué. On parle d'un niveau de consommation toujours croissant mais avec un nouveau consommateur plus conscient, souvent plus malin et surtout plus exigeant. L'humain de ce siècle cherche à consommer toujours plus, mieux et moins cher. Le niveau de consommation de ces dernières décennies, s'il continue ainsi, met la planète en péril. En effet, dans son 5ème rapport remis en 2014, le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) explique que le réchauffement climatique est « sans équivoque » et sans précédent. La principale cause de celui-ci est due aux activités humaines qui sont déjà responsables d'une hausse de température de 0,85 °C depuis l'époque préindustrielle. Sans interventions, ce réchauffement pourrait atteindre 4 °C à 5 °C d'ici 2100. Ce niveau de réchauffement, s'il est atteint, entraînera des conséquences dramatiques et irréversibles sur la planète (pertes de la biodiversité, des ressources en eau, …).

Dans le but de ralentir ce réchauffement planétaire, la dernière conférence sur le climat de Paris, la Cop 21, a réussi à conclure un accord engageant 195 états. Cet accord stipule que chaque état devra contribuer à ce que le réchauffement climatique planétaire, dû aux activités humaines, se stabilise et reste en dessous de 2 °C d'ici 2100 (la cible finale étant de 1,5 °C). Avec un tel réchauffement, les conséquences ne seraient certes pas nulles mais moins dramatiques. Cet engagement nécessite des changements drastiques essentiellement dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, les GES.

Les GES proviennent essentiellement de la combustion des énergies fossiles qui constituent 85 % des sources d'énergie utilisées sur terre (40 % concerne le pétrole, 20 % le charbon, 19% le gaz naturel et 6% l'uranium). On retrouve essentiellement la consommation du pétrole dans les transports routiers et le charbon dans la production d'électricité et de chaleur. Cela signifie que pour maintenir et stabiliser l'augmentation de la température mondiale à 2 °C, la manière de consommer et de vivre doit être repensée. On parle de logements dont l'isolation est optimale, nécessitant peu ou pas de chauffage, des alternatives comme les énergies renouvelables pour les besoins d'électricité, d'eau chaude ou de chauffage, de l'électrification des moyens de transports, …

L'Union européenne, 196ème signataire de l'accord de la COP 21, aussi appelée conférence sur le climat à Paris, 3ème émetteur mondial de GES et 1ère zone économique mondiale a un grand rôle à jouer vis à vis des engagements à tenir face aux objectifs de la COP 21. Une solution proposée consiste en l'augmentation du nombre de véhicules hybrides et électriques en circulation. Ségolène Royal, organisatrice de la COP 21 et actuelle ministre de l'écologie, a annoncé par exemple sa volonté de voir naître en France une voiture électrique populaire, accessible à tous et souhaite que d'ici 5 ans, 50 % des véhicules qui circulent soient électriques. L'essor de l'électrification des transports est dépendant des systèmes de stockage d'énergie électrique (batteries lithium-ion, supercondensateurs, …). Cette volonté semble très ambitieuse face aux limitations des systèmes de stockage d'énergie actuels.

On parle généralement de limitation d'autonomie car les systèmes de stockage électrique ne rivalisent toujours pas avec leur principal concurrent, à savoir le pétrole. La rapidité de recharge, l'autonomie et l'implantation des stations de service fait que le consommateur favorise encore, malgré sa conscience écologique, le véhicule non électrique. Ainsi, face à ces limitations, des efforts politiques sont menés pour faciliter l'accès des véhicules électriques ou hybrides aux consommateurs et pour subventionner la recherche afin d'améliorer les performances des systèmes de stockage.

Une autre limitation, dont on parle moins, est la durée de vie de ces systèmes de stockage. En effet, ceux-ci ont une durée de vie limitée de l'ordre d'une dizaine d'années. Cette dernière semble assez intéressante en termes d'amortissement vis à vis de la durée de vie du véhicule et en particulier de sa partie mécanique. Néanmoins, elle n'est pas garantie. Elle correspond à des conditions d'utilisations spécifiques qui peuvent être différentes de la réalité et donc être réduite considérablement. En effet, les modes de sollicitations et les conditions environnementales ont un fort impact sur la longévité des systèmes de stockage d'énergie. A titre d'exemple, une hausse de température de plus de 10 °C peut réduire de moitié la durée de vie d'un système de stockage tel qu'une batterie ou des supercondensateurs.

C'est dans le cadre de l'amélioration de la longévité des systèmes de stockage d'énergie électrique que s'inscrit cette thèse. L'objectif est de maximiser la durée de vie des systèmes de stockage existants dans leurs domaines d'application en intervenant via le matériel de surveillance préexistant (à savoir leur système de gestion d'énergie et leurs circuits d'équilibrage). L'idée de base consiste à ne pas modifier, ni la composition des systèmes de stockage, ni leurs modes d'utilisation, mais à améliorer le mode de contrôle de leur système de

surveillance afin de maximiser le temps global de leur utilisation. L'analyse a porté sur des modules de supercondensateurs comme première approche d'étude mais le principe pourra certainement être généralisé en partie aux batteries.

L'objectif de cette thèse est donc d'estimer et d'améliorer la durée de vie des systèmes de stockage d'énergie (les supercondensateurs) grâce à la commande de leurs circuits d'équilibrage.

Le premier chapitre de ce mémoire consiste en une synthèse bibliographique du contexte du travail. Après une présentation générale des supercondensateurs à double couche électrique, les modules de stockage d'énergie électrique sont introduits ainsi que les systèmes de gestion d'énergie et leurs circuits d'équilibrage. Toutes ces informations permettent de comprendre le contexte, la problématique et les objectifs de ces travaux de thèse.

Le deuxième chapitre porte sur le premier objectif de travail, c'est-à-dire l'estimation de la durée de vie des supercondensateurs. On y présente les approches développées afin d'estimer et de surveiller l'état de santé des supercondensateurs constituants les systèmes de stockage via la commande de leurs circuits d'équilibrage. Ces approches sont analysées grâce à des simulations reproduisant les conditions expérimentales et grâce à des prototypes exploitant de vrais supercondensateurs.

Le troisième chapitre porte sur le second objectif fixé, soit la maximisation de la durée de vie des modules de supercondensateurs via la commande de leurs circuits d'équilibrage. On y présente la problématique, les objectifs, les outils et l'approche de commande. L'algorithme développé est ensuite analysé grâce à une simulation afin d'étudier les résultats de cette commande sur le module de stockage et la prolongation de sa durée de vie pour différents cas de figures.

La quatrième et dernière partie traite d'un prototype expérimental du système de stockage qui a été développé afin d'étudier la commande des circuits d'équilibrage visant l'estimation et la maximisation de la durée de vie. Ce prototype est donc présenté et les résultats obtenus analysés.

Enfin la conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus et une dernière partie expose les perspectives découlant de ces travaux.

Chapitre 1 : Présentation du contexte de travail et de la problématique

1 Introduction

Dans ce premier chapitre, on se propose d'introduire les informations nécessaires à la compréhension du contexte général et de la problématique du travail réalisé durant le doctorat.

Ce mémoire traite principalement de la commande des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie dans un but d'amélioration de leur durée de vie. Trois notions sont donc à introduire afin de comprendre la problématique et le travail demandé. Celles-ci concernent les systèmes de stockage d'énergie, leur durée de vie et les circuits d'équilibrage.

Nous présentons dans ce chapitre les systèmes de stockage d'énergie électrique constitués de supercondensateurs. Les supercondensateurs ont été choisis comme premiers éléments d'étude compte tenu de leur relative simplicité d'étude.

Les supercondensateurs bénéficient d'une relativement grande capacité de stockage, d'une faible résistance série, d'une forte densité de puissance, d'une bonne stabilité en température et d'une forte cyclabilité. Ces bonnes caractéristiques font qu'aujourd'hui ces systèmes de stockage sont utilisés dans différentes applications. Cette technologie est en développement continu et les recherches sur la gestion d'énergie ainsi que l'équilibrage des systèmes à base de supercondensateurs ne sont aujourd'hui pas aussi développés que pour les batteries. Il était donc intéressant de se livrer à cette étude sur l'équilibrage appliqué aux supercondensateurs. Ces éléments ont aussi un comportement relativement moins complexe, comparés aux batteries.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du supercondensateur et de ses différentes propriétés et caractéristiques. On présentera par la suite les systèmes de stockage d'énergie à base de supercondensateurs ; leurs constitutions, les différentes applications utilisant ces systèmes ainsi que les phénomènes à prendre en considération lors de l'utilisation d'un système de stockage d'énergie constitué de plusieurs éléments en série.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la gestion d'énergie des systèmes de stockage. On y présente les différents dispositifs existants et les fonctions les plus répandues dont l'équilibrage de tension, cette dernière fonction étant assurée par les circuits d'équilibrage.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de la problématique abordée dans cette thèse.

2 Supercondensateur, de l'élément au système de stockage d'énergie électrique

2.1 Présentation du supercondensateur

2.1.1 Histoire du supercondensateur

Les supercondensateurs, appelés aussi supercapacités ou condensateurs à double couches électriques sont des éléments de stockage d'énergie électrique dont la commercialisation est relativement récente. Le principe sur lequel repose les supercondensateurs (le phénomène de double couche électrique) a été découvert au 19ème siècle [1]. Cependant, la première version de supercondensateur « FA Serie » n'a été commercialisée qu'en 1978, par le fabricant Japonais NEC. Cette première version était de faible capacité (<10 F). Les premiers supercondensateurs de grande capacité (>100 F) n'ont été commercialisés qu'à partir de 1990 par Panasonic [2]. Différents industriels se sont intéressées par la suite au développement de cette technologie.

Les recherches pour le développement des supercondensateurs sont aujourd'hui importantes entre autres suite à la forte demande de solutions énergétiques pour des applications dans des domaines en croissance tels que les transports électrifiés. Sur le marché, on peut trouver différentes marques de supercondensateurs tels que Maxwell, Nesscap, Panasonic, Blue Solutions, Skelton, … (figure 1.1). Les capacités dépassent actuellement plusieurs milliers de farads pour des résistances série équivalentes ne dépassant pas quelques centaines de micro-ohms.

Figure 1. 1 Exemple de supercondensateurs commercialisés

2.1.2 Familles de supercondensateurs

Le rôle d'un supercondensateur est de stocker l'énergie électrique. Il est constitué de deux électrodes imprégnées par un électrolyte. Il existe deux principes de stockage (électrochimique et électrostatique) ainsi que deux grandes familles de supercondensateurs (les « pseudo-capacités » et les condensateurs à double couche électrique) [3][4].

Ceux qui utilisent des transferts de charge, processus de stockage électrochimique, repose sur la présence de réactions d'oxydoréduction (figure 1.2). Cette famille de supercondensateur (« pseudo-capacités ») comprend ceux dont les électrodes sont en oxyde métallique ou en polymère conducteur. Ceux qui utilisent le processus de stockage électrostatique reposent sur le phénomène de double couche, interactions entre les ions de l'électrolyte liquide et les charges électroniques à la surface des électrodes (figure 1.2). Cette famille de supercondensateur (condensateurs à double couche électrique), comprend ceux dont l'électrode est en charbon actif. En réalité, un processus de stockage parfait n'existe pas et les deux modes sont toujours présents, seul « le rapport de force » entre ces deux principes varie suivant le type d'électrode utilisée[4][5][6].

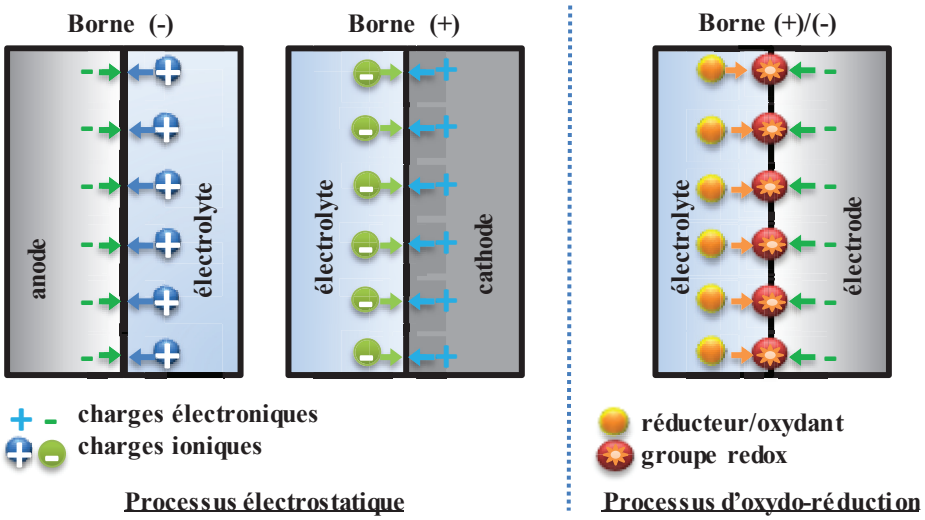


Figure 1.2 Processus de stockage électrique dans les supercondensateurs

Le travail de cette thèse porte sur les supercondensateurs les plus répandus sur le marché, soit la famille des supercondensateurs à double couche électrique (ou EDLC pour Electrical Double Layer Capacitor). On se propose dans ce qui suit d'expliquer plus en détail leur constitution et leur principe de fonctionnement.

2.1.3 Structure générale et construction

Le supercondensateur est constitué de collecteurs, d'électrodes en charbon actif baignant dans de l'électrolyte et d'un séparateur comme illustré sur la figure 1.3. Les électrodes sont assemblées par paire, chacune de part et d'autre d'un collecteur grâce à un liant. Le collecteur d'une polarité donnée dépasse d'un même côté et sert de conducteur électrique jusqu'à la borne du supercondensateur. Ces électrodes sont protégées des courts-circuits par un film séparateur. Cet assemblage est bobiné et placé à l'intérieur d'un boitier (pour les supercondensateurs cylindriques). Les collecteurs dépassant sont ensuite soudés sur les deux bornes du supercondensateur [4][7].

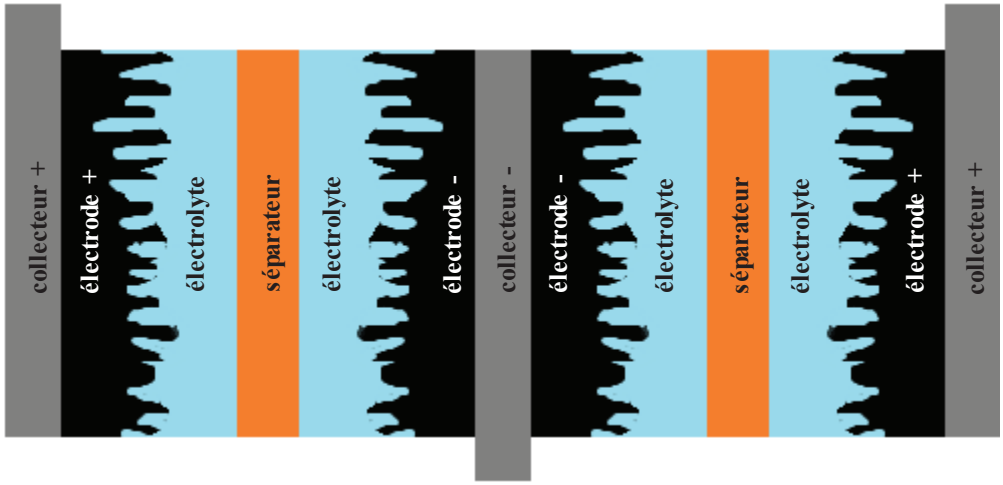


Figure 1.3 Constitution et assemblage d'un supercondensateur

2.1.4 Processus de stockage

Le processus de stockage d'énergie électrique des supercondensateurs en charbon actif se déroule comme suit : en appliquant une différence de potentiel entre les deux électrodes, un champ électrostatique est créé. Sous l'effet de ce champ, les ions présents dans l'électrolyte migrent vers la surface de l'électrode de signe opposé. Sur chaque borne vont donc s'accumuler, à l'interface, des charges ionique (électrolyte) et électroniques (électrode) formant une zone de charge d'espace appelée double couche électrique (figure 1.4). L'épaisseur de cette zone (de l'ordre du nanomètre) ainsi que la surface active élevée du charbon actif sont à l'origine des valeurs de capacité élevée du supercondensateur [8][9].

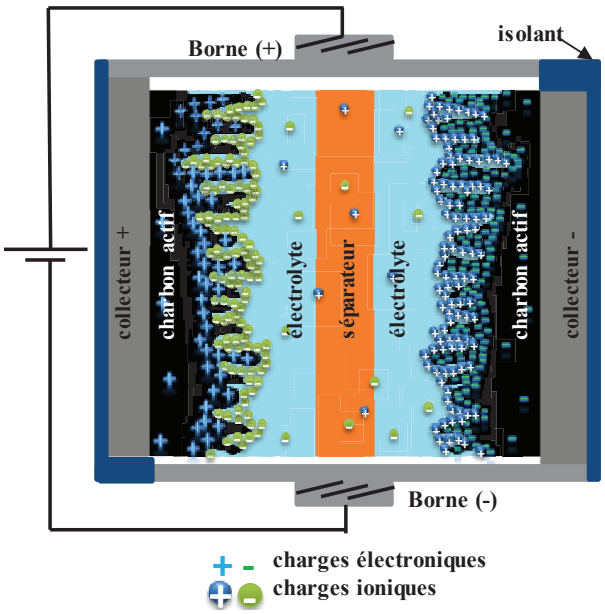


Figure 1.4 Principe du stockage d'énergie utilisant la double couche électrique

Les couches crées sur chaque électrode sont assimilables à un condensateur. Ainsi, une cellule fonctionnant sur ce principe peut être vue comme la mise en série de deux condensateurs, chacun représentant une interface électrode/électrolyte, connectés par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte (figure 1.5) [5][10].

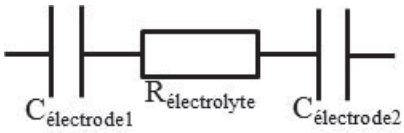


Figure 1.5 Schéma équivalent simplifié d'un supercondensateur

Les principaux critères permettant d'avoir des performances élevées sont : une forte porosité des électrodes permettant une grande surface active, une bonne conduction électronique, une forte conduction ionique de l'électrolyte et du séparateur, une forte résistance électronique du séparateur.

2.1.5 Caractéristiques générales du supercondensateur

2.1.5.1 Tension

La tension entre les deux bornes du supercondensateur doit être limitée pour éviter la décomposition de l'électrolyte à moins de 3 V [11]. On trouve aujourd'hui sur le marché des supercondensateurs ayant des tensions maximales d'application allant jusqu'à 3 V (figure 1.6).

Figure 1.6 Supercondensateur Maxwell 3000 F/3 V

2.1.5.2 Capacité

La capacité, exprimée en farads (F), correspond comme pour un condensateur classique à la quantité de charge électrique stockée pour une différence de potentiel donnée. La capacité C, sous l'hypothèse d'une géométrie plane, peut s'exprimer comme suit :

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \frac{S}{D} \qquad (1.1)$$

Avec ε_0 la permittivité absolue du vide, ε_r la permittivité relative de l'électrolyte, S la surface de l'électrode, D la distance entre les centres des charges ioniques et électroniques en vis à vis. Grâce au choix des matériaux des constituants du supercondensateur, on peut atteindre de très grande capacité allant jusqu'à plusieurs milliers de farads [12]. Toutefois, cette capacité non linéaire est fortement corrélée à la tension de polarisation du supercondensateur [3].

Afin de modéliser la relation entre la capacité et la tension, un modèle simple linéaire peut être retenu [3][13] :

$$C(V) = C_0 + kV \qquad (1.2)$$

La capacité est modélisée ici par une capacité de valeur constante C_0 et une capacité qui évolue de façon linéaire avec la tension V.

2.1.5.3 Résistance interne

La résistance interne, assimilable à la résistance série équivalente (ESR), correspond aux pertes par effet joules dans le supercondensateur. Elle est associée aux pertes dans les connexions, les électrodes, et dans l'électrolyte. Grâce à la forte conductivité ionique de l'électrolyte et à la forte conductivité électronique du collecteur, le supercondensateur bénéficie d'une résistance interne faible comparée aux autres éléments de stockage d'énergie électrique [5][14][15]. Celle-ci est de l'ordre de quelques centaines de micro-ohms pour les composants de fortes capacités.

2.1.5.4 Densité d'énergie / de puissance

Deux densités d'énergie sont couramment utilisées : la densité d'énergie massique (exprimée en Wh/kg) et la densité d'énergie volumique (exprimée en en Wh/l).

L'énergie du supercondensateur est directement proportionnelle à sa tension et à sa capacité par l'équation 1.3 suivante [16] :

$$E = \frac{C \cdot V^2}{2} \qquad (1.3)$$

La densité d'énergie du supercondensateur est étroitement liée à sa tenue en tension (équation 1.3). Cette tenue en tension est elle-même étroitement liée au choix d'électrolyte comme expliqué précédemment.

Les densités de puissance quant à elles, exprimées en W/kg ou en W/l, correspondent aux densités de puissance massique ou volumique. C'est le rapport entre la puissance maximale de l'élément de stockage et sa masse ou son volume. La puissance étant inversement proportionnelle à la résistance interne, le supercondensateur présente l'avantage d'une forte densité de puissance grâce à sa très faible résistance interne.

2.1.5.5 Rendements

La notion de rendement n'est pas unique. Il existe différentes terminologies derrière ce terme. L'expression du rendement la plus répandue est celle du rendement énergétique, correspondant au rapport entre l'énergie restituée et l'énergie absorbée. Les supercondensateurs grâce à leur principe de stockage électrostatique et leur faible résistance interne bénéficient d'un rendement énergétique élevé très proche de l'unité (entre 85 % et 98 %) [17][18].

Ces caractéristiques seront comparées pour différents systèmes de stockage de l'énergie électrique par la suite.

2.1.6 Quelques exemples de modélisation du supercondensateur

Une des approches pour la modélisation du supercondensateur consiste à représenter ce dernier par un circuit électrique équivalent. Cette modélisation permet de prévoir son comportement électrique correspondant à l'application dans laquelle il se trouve. La fonction principale du supercondensateur étant le stockage, une modélisation énergétique adéquate est souvent nécessaire.

Dans cette partie nous énonçons quelques exemples de modèles existants de la littérature. Ceux-ci sont présentés du plus simple au plus complexe.

2.1.6.1 Modèle constructeur

Le modèle constructeur du supercondensateur, identique au modèle du condensateur électrolytique, est constitué d'une capacité C en série avec une résistance équivalente série ESR. Cette modélisation permet de représenter la fonction « stockage » et la dissipation de l'énergie [16].

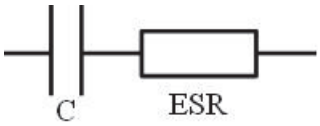


Figure 1.7 Modèle constructeur

L'ESR, la résistance série équivalente, peut-être déterminée grâce à une charge ou décharge de la cellule à courant constant. En effet, l'effet de l'ESR se manifeste par une chute de tension qui apparait à l'application du courant. Ainsi, l'ESR peut être estimée en mesurant la chute de tension aux bornes de la cellule lors de l'application d'un courant continu (par exemple de décharge) (figure 1.8). L'ESR est alors exprimée comme suit :

$$ESR = \frac{\Delta U_{ESR}}{I_d} \qquad (1.5)$$

Compte tenu de la valeur de l'ESR qui peut être assez faible, la précision de mesure de l'instrumentation utilisée joue un rôle majeur dans son estimation.

La capacité C, représentant la fonction de stockage dans le supercondensateur, est estimée en surveillant l'évolution de la tension durant un temps donné lors d'une décharge ou d'une charge à courant constant. Elle peut être exprimée lors de la décharge à titre d'exemple comme suit :

$$C = I_d \cdot \frac{\Delta t_c}{\Delta U_c} \qquad (1.6)$$

Afin d'obtenir une bonne estimation de C, le courant appliqué et la variation de tension doivent être clairement définis. Ces valeurs peuvent être définies par le constructeur ou par des

normes (par exemple : EC 62391-2, IEC 62576) afin de garantir la répétabilité des résultats de mesure [19].

Il est préférable que les estimations de la capacité et de l'ESR soient faites à chaque fois dans les mêmes conditions initiales de température et de tension en raison de la dépendance avec ces deux paramètres.

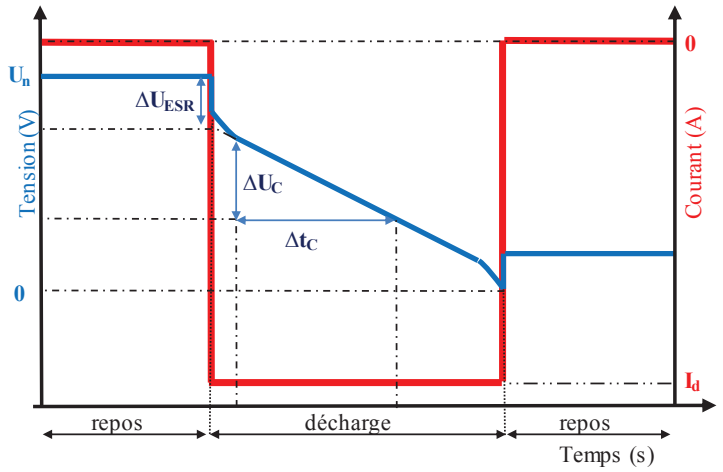


Figure 1.8 Estimation de l'ESR et de la capacité d'un supercondensateur

2.1.6.2 Modèle à deux branches

Ce modèle permet d'améliorer le précèdent en prenant en considération la non linéarité de la capacité du supercondensateur mais aussi d'autres phénomènes tel que la redistribution des charges [20]. Il est constitué de deux circuits R_iC_i, chacun avec une constante de temps différente. La première branche (C_1, R_1), dite rapide, modélise la phase de charge décharge où la capacité évolue non linéairement en fonction de la tension (équation 1.2). La deuxième branche (C_2, R_2), dite lente, modélise la phase de redistribution des charges durant les phases de repos.

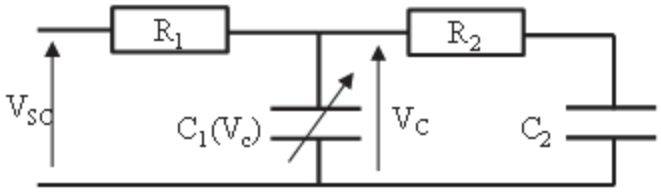


Figure 1.9 Modèle à deux branches

Les paramètres de la branche rapide (C_1, R_1) sont définis lors d'une charge (décharge) à courant constant comme pour le modèle constructeur (figure 1.8).

La branche lente nécessite quant à elle de maintenir le supercondensateur au repos durant une certaine période et de faire différentes approximations [3][7][20][21].

On peut rajouter une résistance parallèle de fuite R_f pour modéliser le phénomène d'autodécharge du supercondensateur, celle-ci prenant place après la phase de redistribution des charges [5].

Les modèles, constructeur et à deux branches, sont des modèles pouvant être qualifiés de temporels car leurs paramètres sont définis grâce à l'exploitation du comportement électrique du supercondensateur lors de différentes phases (repos, charge, décharge).

2.1.6.3 Modèle simple pore

Ce modèle prend en considération la distribution volumique de la capacité. On considère que l'électrode en charbon actif du supercondensateur comprend des pores identiques, cylindriques, de diamètre plus faible que leur longueur et disposés de parallèlement les uns par rapport aux autres [22] (figure 1.10).

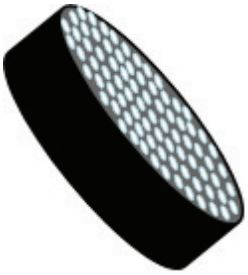


Figure 1.10 Représentation des pores dans l'électrode en charbon actif dans l'hypothèse du modèle simple pore

Cette modélisation permet de représenter l'impédance de l'électrode constituée de n pores comme suit [7]:

$$Z = \sqrt{\frac{R_{el}}{j \cdot \omega \cdot C_{dl}}} \cdot coth\sqrt{j \cdot \omega \cdot R_{el} \cdot C_{dl}} \qquad (1.7)$$

Avec C_{dl} la capacité de la double couche, R_{el} la résistance liée à l'accessibilité des pores par l'électrolyte et ω la pulsation électrique.

L'impédance Z peut être représentée par un schéma électrique équivalent correspondant à une capacité C_{dl} mise en série avec n branches parallèles ($\frac{C_{dl}}{2}$, R_i) comme représenté sur la figure ci-dessous. La résistance R_s représente les résistances de l'électrolyte, des électrodes, des collecteurs et des connexions. L'inductance L représente le comportement en haute fréquence lié aux enroulements et aux connexions du composant (figure 1.11).

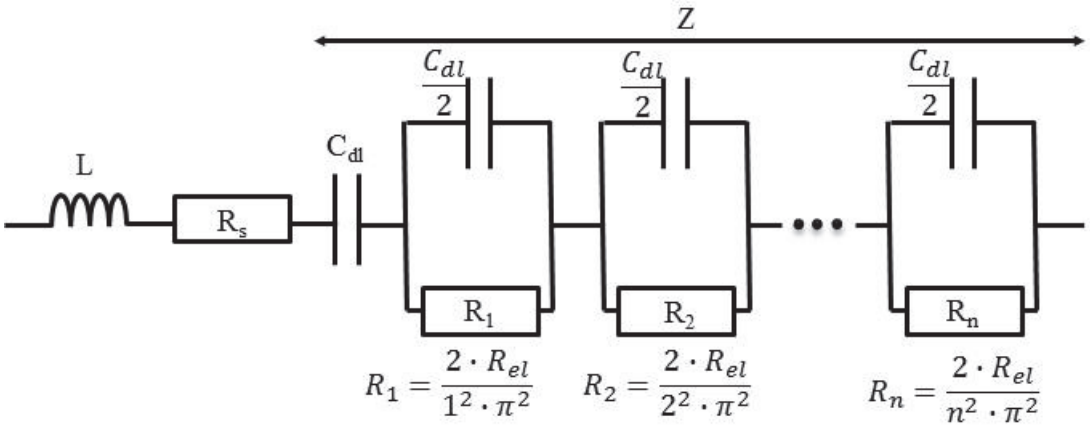


Figure 1.11 Modèle simple pore

Les paramètres de ce modèle sont définis grâce à l'exploitation des résultats d'une caractérisation fréquentielle (cf. (chapitre 2) § « 1.1.2. La spectroscopie d'impédance ») [3][5][8][22].

2.1.6.4 Modèle multi-pores

Ce modèle permet d'améliorer le précèdent en prenant en compte les différentes tailles des pores des électrodes. Tout comme le précèdent modèle les pores sont supposés cylindriques mais de tailles différentes [7][23]. On considère m tailles de pores représentées par m impédances (Z_1, Z_2, …, Z_m).

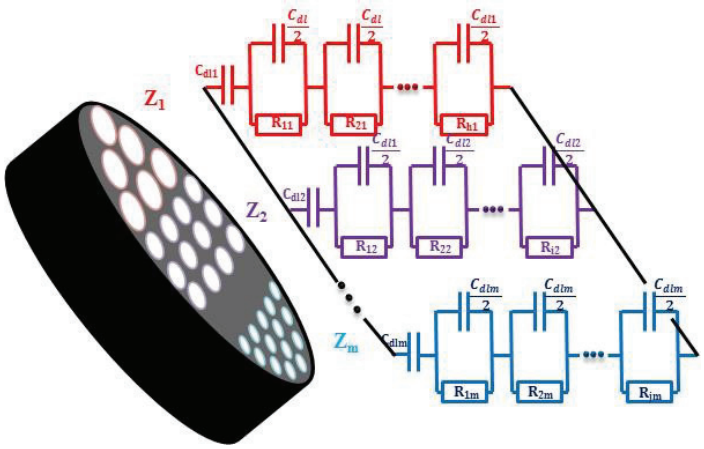


Figure 1.12 Représentation des pores de l'électrode en charbon actif et leur modélisation multi-pores associée

Ainsi le modèle multi-pores est représenté par la mise en parallèle de m modèles simple pore auquel on peut rajouter la résistance de l'électrolyte, des électrodes, des collecteurs et des connexions ainsi que L pour le comportement en haute fréquence comme précédemment.

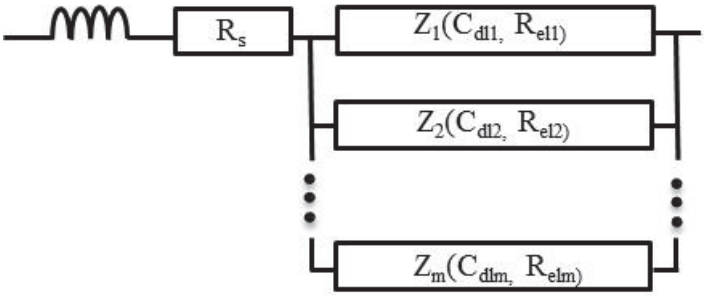


Figure 1.13 Modèle multi-pores

2.1.7 Comparaison aux autres dispositifs de stockage d'énergie

Les éléments de stockage les plus répandus sur le marché de l'énergie électrique sont les batteries, les supercondensateurs et les condensateurs.

La structure générale de ces éléments est assez semblable : deux électrodes séparées par un isolant électronique sont utilisées. C'est le principe de stockage qui diffère puisque celui-ci peut être électrostatique, électrochimique ou hybride. Ces composants peuvent donc être classés suivant leur principe de stockage mais aussi leurs performances (densité d'énergie, densité de puissance, durée de vie, …).

Le tableau 1.1 suivant récapitule quelques caractéristiques de ces éléments de stockage d'énergie électrique [18][24][25].

Tableau.1. 1. Comparaison des éléments de stockage d'énergie électrique

	Le condensateur	Le supercondensateur	La batterie	
			Plomb	Li-ion
Processus de stockage d'énergie	Electrostatique	Electrostatique	Electrochimique	
Densité d'énergie massique (Wh/kg)	0.01 - 0.1	1 - 10	10 - 100	100 - 200
Densité de puissance massique (W/kg)	5 k à 100 k	4 k à 10 k	0.1 k à 1 k	1 k à 3 k
Rendement énergétique (%)	> 95	85 à 98	70 à 95	
Température de fonctionnement (°C)	-55 à 125	-40 à 65	-20 à 65	-20 à 65
Durée de vie (cycles de charge décharge)	> 1M	100 k à 1 M	0.1 k à 2 k	

Grace à sa faible résistance interne et à son principe de stockage majoritairement électrostatique, le supercondensateur bénéficie d'un meilleur rendement énergétique (proche de l'unité) que la batterie.

Même si l'électrolyte limite la température de fonctionnement du supercondensateur, ce dernier a un meilleur comportement avec la température (en particulier négative) que les batteries citées dans le tableau 1.1.

La présence de réactions d'oxydoréduction impacte la durée de vie de l'élément de stockage. C'est ainsi qu'un condensateur à processus de stockage purement électrostatique se voit accordé une durée de vie supérieure aux supercondensateurs et aux batteries. Le supercondensateur bénéficie d'une espérance de vie importante comparé aux batteries en raison des processus électrochimiques non présents (hors réactions parasites).

Le vieillissement du supercondensateur est exposé plus en détail dans la suite (cf. § 2.1.8. « Vieillissement du supercondensateur »).

La figure 1.14 représente le diagramme de Ragone. Ce graphique permet de comparer les performances énergétiques et en puissance des éléments de stockage d'énergie électrique. Le graphique en échelle log-log représente la densité d'énergie massique (Wh/kg) en fonction de la densité massique de puissance (W/kg).

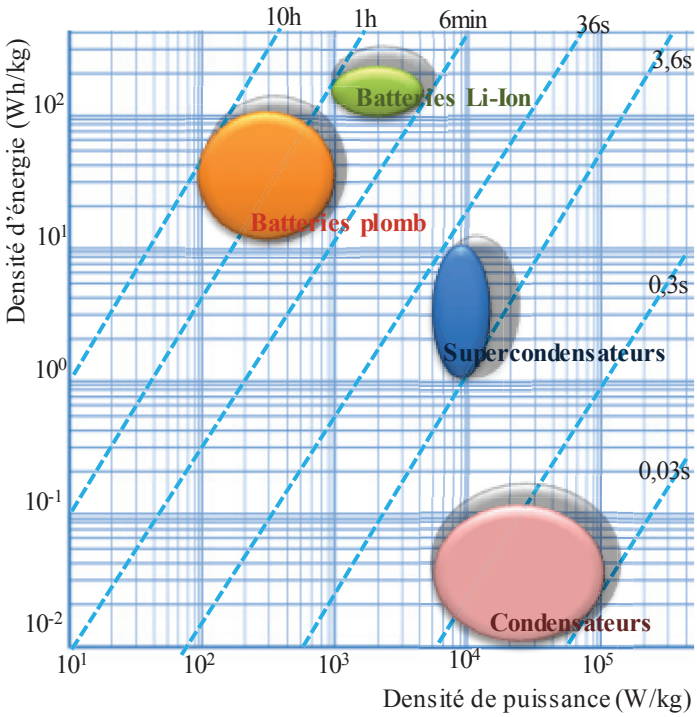


Figure 1.14 Diagramme de Ragone

D'un point de vue performance énergétique, le supercondensateur se place entre la batterie et le condensateur. En effet, pour une masse donnée, il bénéficie d'une énergie plus importante qu'un condensateur classique et d'une puissance plus importante qu'une batterie.

Les lignes en pointillées sur ce diagramme représentent les temps de charge et de décharge à puissance constante. Le supercondensateur, grâce à son processus de stockage, nécessite un temps plus réduit pour sa charge ou sa décharge (quelques secondes à quelques dizaines de secondes), contrairement à la batterie pour laquelle les réactions d'oxydo-réduction prennent plus de temps (quelques dizaines de minutes à quelques heures).

Compte tenu de l'évolution continuelle des performances de ces éléments de stockage, des parties ombrées sur le diagramme de Ragone ont été ajoutées [5].

2.1.8 Vieillissement du supercondensateur

Les supercondensateurs bénéficient d'une durée de vie importante comparée à celle des batteries grâce à leurs processus de stockage d'énergie majoritairement électrostatique. Néanmoins, ils ont une durée de vie limitée. Leur vieillissement se traduit par une dégradation de leurs performances au cours du temps jusqu'à atteindre la fin de vie.

Rappelons que la dégradation représente l'évolution irréversible des caractéristiques d'un composants avec le temps.

2.1.8.1 Causes de vieillissement

Les causes de vieillissement sont les circonstances qui conduisent aux mécanismes de dégradation. Les causes considérées ici sont intrinsèques. Elles sont dues à la conception et à la constitution du supercondensateur. Le charbon actif, constituant l'électrode à base de carbone, nécessite des transformations, appelées processus d'activation pour devenir hautement poreux. Ce processus d'activation n'est pas parfait et laisse des résidus tels que le souffre, l'azote, l'hydrogène, l'oxygène, etc. Par ailleurs certaines impuretés peuvent être présentes dans l'électrolyte et dans le liant [8][26][27].

2.1.8.2 Mécanismes de dégradation

Les mécanismes de dégradation sont les processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent à la défaillance.

Le charbon actif, peut contenir des groupes fonctionnels de surface comme par exemple, une quantité infime d'eau. L'eau s'électrolyse au-delà de 1,23 V et produit un dégagement gazeux (H_2 et O_2). Les groupes fonctionnels de surface sont très réactifs ; sous des contraintes de tension et de température, ils peuvent donc produire un dégagement gazeux (H_2, O_2 et CO_2) et des dépôts solides (fluor, azote, bore...) en réaction avec les molécules et les impuretés présentes dans l'électrolyte [11][26]. Enfin, la dégradation du liant au cours du temps peut entrainer aussi la production de particules et une usure du contact électrode/collecteur [4][5][28].

Les dépôts solides bouchent les pores des électrodes en charbon actif. Les émanations gazeuses, quant-à-elles, errent à l'intérieur du supercondensateur. Elles peuvent obstruer les pores des électrodes et du séparateur . Elles entrainent aussi l'augmentation de la pression interne. Cette augmentation de pression peut avoir plusieurs conséquences telles que la

fissuration de l'électrode et l'altération du contact électrode/collecteur. Une forte augmentation de pression peut entrainer la fuite de l'électrolyte (figure 1.15) [8][26][29][30].

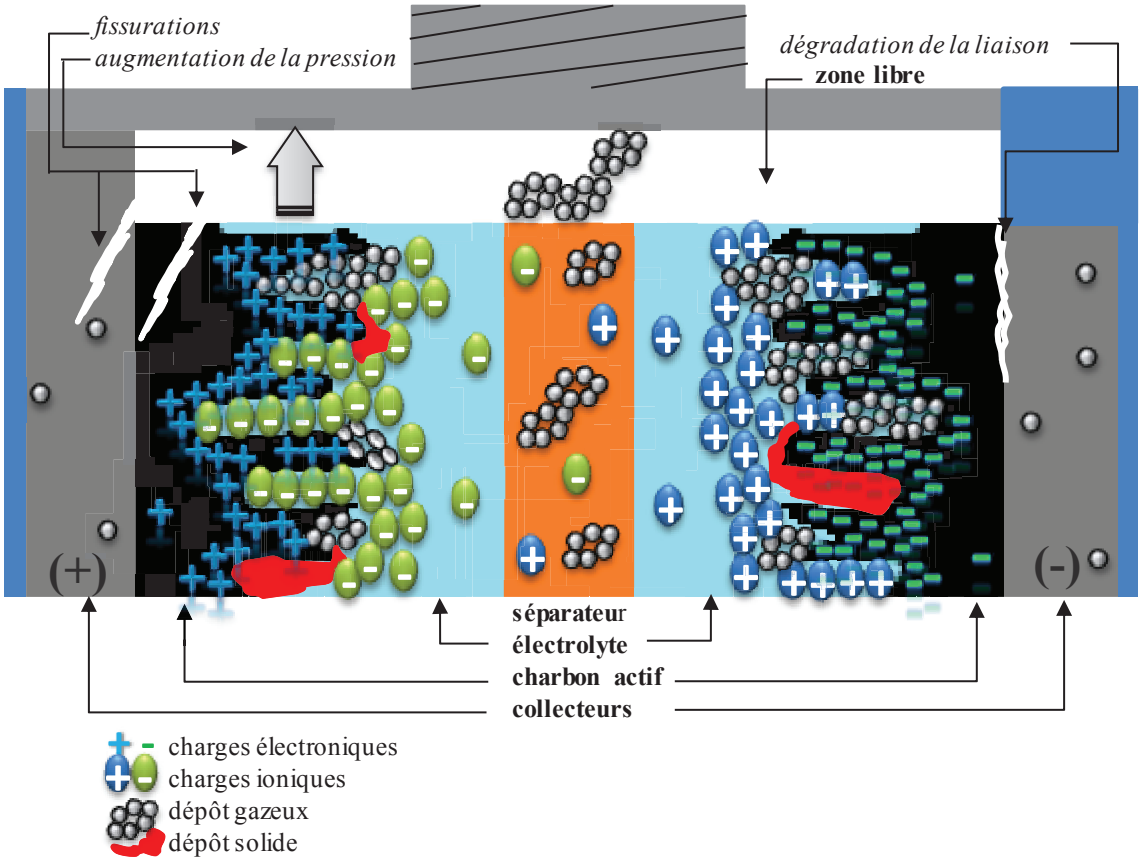


Figure 1.15 Représentation des mécanismes de vieillissement d'un supercondensateur

2.1.8.3 Modes de dégradation

Les modes de dégradation sont les effets par lesquels la dégradation se manifeste. Au niveau de l'électrode, les particules gazeuses et solides entraînent une limitation de la pénétration des ions à l'intérieur des pores et donc une réduction de la surface accessible. Cette réduction de surface diminue la capacité de la cellule [8][27]. Au niveau du séparateur, les particules gazeuses qui y sont piégées entrainent un ralentissement du transfert ionique qui augmente la résistance interne de la cellule. Quant à l'altération de la liaison collecteur/électrode, elle entraine aussi l'augmentation de cette résistance [8][27][31]. Ainsi, les modes de dégradation du supercondensateur sont majoritairement représentés par la baisse de la capacité et l'augmentation de la résistance équivalente série ESR[31] [32].

La figure 1.16 représente l'évolution de ces deux grandeurs caractéristiques à travers le temps (en jours) pour trois supercondensateurs (P07, P08 et P09). Ceux-ci ont subi un test de

vieillissement accéléré à une tension de 2,5 V et une température de 60 °C. On observe bien la chute de la capacité et la hausse de l'ESR en fonction du temps [33].

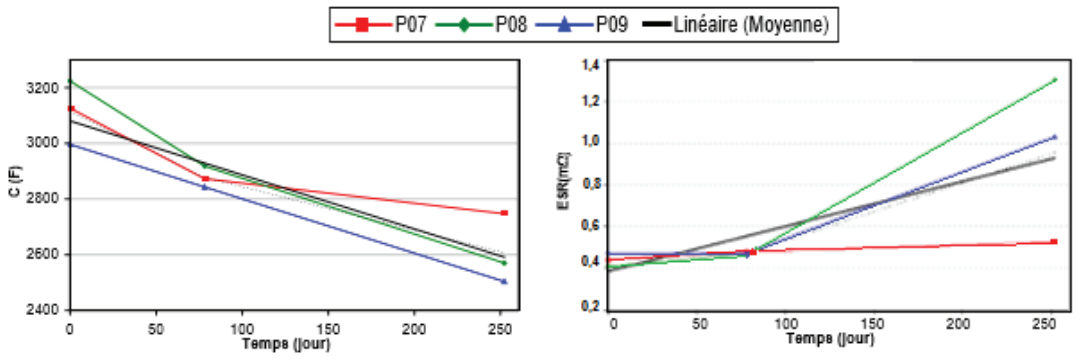


Figure 1.16 Evolution de l'ESR et de la capacité pendant un vieillissement accéléré [33]

Rappelons qu'un vieillissement accéléré est une méthode par laquelle on tente de reproduire et de mesurer les effets du vieillissement naturel ou de l'usure sur une durée limitée plus courte que la normale. Les deux types de vieillissement accéléré existants sont le calendaire et le cyclage. Le test de vieillissement calendaire consiste à maintenir la cellule à un potentiel donné et à une température relativement haute. Le test de vieillissement par cyclage consiste à appliquer un certain profil de cyclage (alternance charge, décharge, repos) de manière répétitive.

La diminution de la capacité se répercute négativement sur l'énergie stockée. Une baisse importante de la capacité peut devenir critique lorsque la cellule ne répond plus aux besoins de l'application en termes d'énergie. L'augmentation de l'ESR entraine des rendements énergétiques plus faibles, des chutes de tension plus importantes à chaque début et fin de charge ou de décharge et un échauffement de la cellule plus fort. Une augmentation importante de la résistance série équivalente entraine un échauffement qui peut amener la cellule à dépasser ses limitations et causer une défaillance brusque.

Or, l'évolution de ces deux paramètres est continue au cours du temps. On peut définir donc un critère de défaillance ou de fin de vie du supercondensateur grâce à l'utilisation d'un seuil de capacité et/ou de résistance au-delà duquel le composant est considéré comme étant inutilisable. Les constructeurs définissent usuellement comme critère fin de vie une baisse de capacité de 20 % de leur valeur initiale et/ou une augmentation de leur résistance équivalente série de 100 % par rapport à leur valeur initiale [16].

Le critère de fin de vie peut être plus restrictif que celui du constructeur suivant les nécessités et le niveau de sécurité de l'application.

2.1.8.4 Contraintes agissant sur le vieillissement

La cinétique de dégradation d'un supercondensateur est dépendante principalement de sa température, de sa tension. En effet, les réactions pseudo-capacitives non désirées ont une vitesse d'apparition plus importante à fort potentiel et haute température.

La figure 1.17 représente la corrélation entre la durée de vie d'un supercondensateur et sa tenue en tension et en température [34].

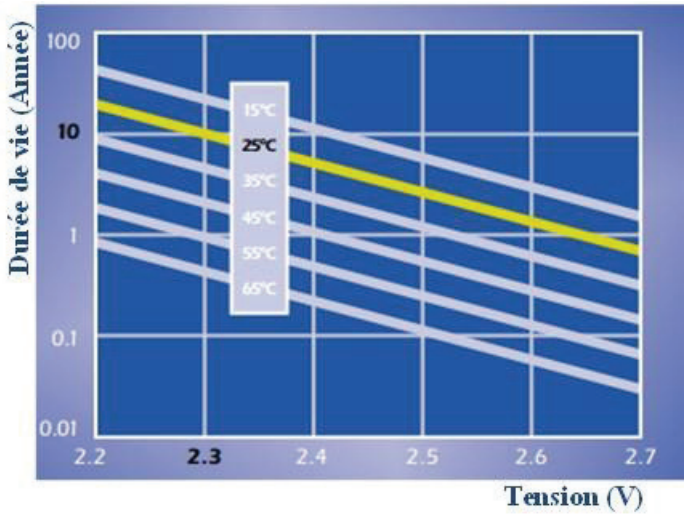


Figure 1.17 Durée de vie d'un supercondensateur en fonction de la tension et de la température [31]

De récentes études se sont intéressées à l'impact du courant sur la durée de vie du supercondensateur. Différents essais de vieillissement accéléré en cyclage ont été réalisés et leurs analyses ont démontré l'influence du niveau de courant (hors échauffement global intrinsèque) sur la cinétique de dégradation du supercondensateur [33][35][36][37][38]. Un fort courant est aussi amplificateur des réactions parasites pseudo-capacitives. Il peut entrainer des échauffements localisés de la cellule ce qui accélère son vieillissement.

2.1.8.5 Estimation de la durée de vie

La durée de vie d'un supercondensateur est le temps durant lequel l'élément est apte à remplir ses fonctions dans ses conditions d'utilisation ou le temps nécessaire pour que la cellule atteigne son critère de fin de vie.

La durée de vie est un paramètre important à estimer. Elle permet entre autres de prévoir et d'organiser les opérations de maintenance et donc de mieux gérer l'arrêt du système et le remplacement de l'élément de stockage en fin de vie et d'éviter aussi les arrêts non contrôlés. Ceci permet d'améliorer la disponibilité du système. Le supercondensateur peut engendrer des problèmes de sécurité car il peut émettre un gaz toxique lors de l'apparition de fuite de l'électrolyte à partir d'un certain niveau de vieillissement. Il peut donc être nécessaire de prédire la fin de vie de l'élément utilisé pour garantir l'absence de danger pour l'utilisateur.

Différentes études se sont intéressées à l'estimation de la durée de vie du supercondensateur et à la définition de lois généralistes qui permettent de prédire la fin de vie de l'élément de stockage en fonction des contraintes qui lui sont appliquées. Nous tenterons dans ce qui suit d'en citer quelques-unes.

2.1.8.5.1 Loi d'Arrhenius

Cette loi permet d'estimer la durée de vie d'un composant en fonction de sa température. A la base la loi d'Arrhenius permet de définir la vitesse d'une réaction chimique en fonction de la température. La vitesse de réaction est exprimée en s^{-1}. Son inverse noté (τ) définira donc la durée de vie de la réaction [5]. Nous avons vu précédemment que la fin de vie du supercondensateur provenait essentiellement de réactions chimiques. Cette loi est donc adaptée pour prédire la fin de vie d'un supercondensateur pour une température d'utilisation connue.

La loi d'Arrhenius est exprimée comme suit :

$$\tau_A(T_{sc}) = \frac{1}{k(T_{sc})} = \frac{1}{A} \cdot e^{\left(\frac{E_a}{R \cdot T_{sc}}\right)} \qquad (1.8)$$

où

- τ_A est la durée de vie du supercondensateur exprimée en s,
- $k(T_{sc})$ est la vitesse de la réaction exprimée en s^{-1},
- A est le facteur d'Arrhenius exprimé en s^{-1},
- E_a est l'énergie d'activation de la réaction exprimée en eV,
- R est la constante de Boltzmann ($8{,}617.10^{-5}$ $eV.K^{-1}$),
- T_{sc} est la température, maintenue constante, du supercondensateur en K.

2.1.8.5.2 Loi d'Eyring

La loi d'Arrhenius prend en considération uniquement la contrainte de température dans la prédiction de la durée de vie. Or la température, comme nous l'avons vue précédemment n'est pas la seule contrainte agissant sur la cinétique de vieillissement du supercondensateur. La loi d'Eyring, très utilisée en fiabilité, généralise la loi d'Arrhenius et permet de prédire la durée de vie d'un élément ou d'un système en incluant plusieurs paramètres. Chacun de ces paramètres est identifié comme accélérateur de la cinétique de dégradation. Grâce à cette loi, les contraintes de températures, de tension et de courant peuvent donc être prises en considération dans l'estimation de la durée de vie.

Une écriture simplifiée de la loi d'Eyring (ne prenant pas en considération l'interdépendance entre paramètres) peut s'exprimer comme suit [33]:

$$\tau_E(T_{sc}, U_{sc}, \dots) = \tau_0 \cdot e^{\left(\frac{-T_{sc}}{T_0}\right)} \cdot e^{\left(\frac{-Usc}{U_0}\right)} \dots \tag{1.9}$$

où

- τ_E est la durée de vie du supercondensateur exprimé en (h, s, …),
- τ_0, T_0 et U_0 sont des constantes exprimées respectivement en (s, h, …), (°C) et (V),
- T_{sc} et U_{sc} sont la température et la tension du supercondensateur exprimées respectivement en (°C) et (V).

2.1.8.5.3 Loi d'Eyring pour des contraintes variables

La loi d'Eyring précédemment définie est valable lorsque la cellule est maintenue avec les mêmes contraintes tout le long de sa durée de vie. Dans le cas où les contraintes sont variables au cours du temps, il est aussi possible d'estimer la durée de vie en estimant la valeur moyenne de la vitesse de dégradation sur un intervalle de temps donné.

Cette estimation de durée de vie a été proposée par Paul Kreczanik dans le cadre de ses travaux de recherche au laboratoire Ampère sur des supercondensateurs de 3000 F, 2.7 V [33][39]. Ces mêmes travaux ont permis aussi d'analyser et de quantifier l'impact du courant efficace appliqué sur la longévité de ces derniers.

La durée de vie proposé est exprimée comme suit :

$$\tau_D\left(T_{sc}(t), U_{sc}(t), I_{eff}(t)\right) = \tau_0 \cdot \frac{(t_f - t_i)}{\int_{t_f}^{t_i} e^{-\left(\left(\frac{-T_{sc}(t)}{T_0}\right)+\left(\frac{-Usc(t)}{U_0}\right)+\left(\frac{-I_{eff}(t)}{I_0}\right)\right)} dt} \tag{1.10}$$

où

- τ_D est la durée de vie du supercondensateur considéré,
- τ_0, T_0, U_0 et I_0 sont des constantes exprimées respectivement en (s, h, …), (°C), (V) et (A),
- t_i et t_f sont le temps initial et final de l'intervalle de temps de l'analyse,
- T_{sc}, U_{sc} et I_{eff} sont respectivement la température, la tension et le courant efficace instantanés du supercondensateur, exprimées en (°C), (V) et (A) respectivement,
- τ_0 (égal à $3{,}85.10^9$ h) est défini comme étant la durée de vie théorique pour un vieillissement maintenue à 0 V et 0 °C [33].

Les tests de vieillissement accélérés réalisés montrent que la durée de vie du supercondensateur est réduite de moitié pour toute augmentation de 10 °C ou 0.2 V ou 30 A. T_0 et U_0 mais aussi I_0 ont été choisi comme suit afin de respecter cette tendance [33].

$$T_0 = \frac{10}{ln(2)} \qquad U_0 = \frac{0.2}{ln(2)} \qquad I_0 = \frac{30}{ln(2)}$$

2.1.8.5.4 Loi d'Eyring pour basse tension

Bien que la loi d'Eyring puisse décrire la durée de vie du supercondensateur en fonction de la tension, de la température et du courant, elle n'estime pas correctement le vieillissement pour des faibles tensions. Afin de pallier ce problème, une amélioration de cette loi a été proposée par Thibaut Kovaltchouk et al. [40] :

$$\tau_V\left(T_{sc}, U_{sc}, I_{eff}\right) = \tau_0 \cdot e^{\left(\frac{-T_{sc}}{T_0}\right)} \cdot \frac{1}{\left[e^{\left(\frac{U_{sc}}{U_0}\right)} + \gamma\right]} \cdot e^{\left(\frac{-I_{eff}}{I_0}\right)} \tag{1.11}$$

où

- τ_V est la durée de vie du supercondensateur exprimé en (s, h, …),
- τ_0, T_0, U_0 et I_0 sont des constantes exprimées respectivement en (s, h, …), (°C), (V) et (A),
- T_{sc}, U_{sc} et I_{eff} sont respectivement la température, la tension et le courant efficace du supercondensateur maintenus constants,
- γ est une constante qui ajuste le terme de tension lorsqu'il est faible.

2.2 Présentation du système de stockage d'énergie électrique par supercondensateur

Un supercondensateur seul souvent ne peut répondre aux besoins d'un grand nombre d'applications qui nécessitent l'utilisation d'un système de stockage d'énergie de type pack ou module. Celui-ci est l'association de plusieurs supercondensateurs (cellules, éléments) identiques.

2.2.1 Mise en série/parallèle des éléments

On considère que le système de stockage d'énergie est l'association série et/ou parallèle de ses éléments.

L'association parallèle égalise les tensions entre tous les supercondensateurs naturellement. Les éléments sont associés sous cette forme afin d'augmenter la capacité de stockage totale du pack (figure 1.18).

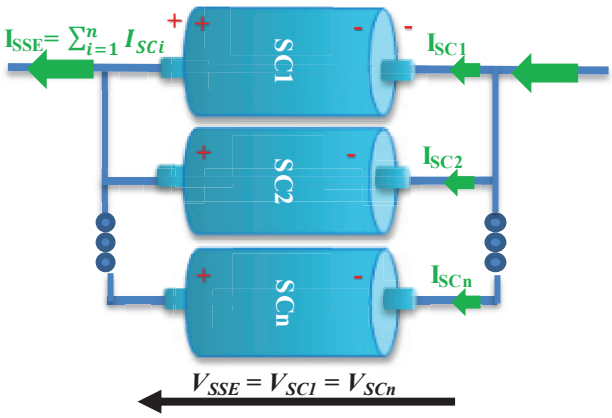


Figure 1.18 Principe de mise en parallèle des supercondensateurs

L'association série égalise le courant traversant tous les supercondensateurs naturellement. Les éléments sont associés en série afin d'augmenter la tension totale du pack (figure 1.19).

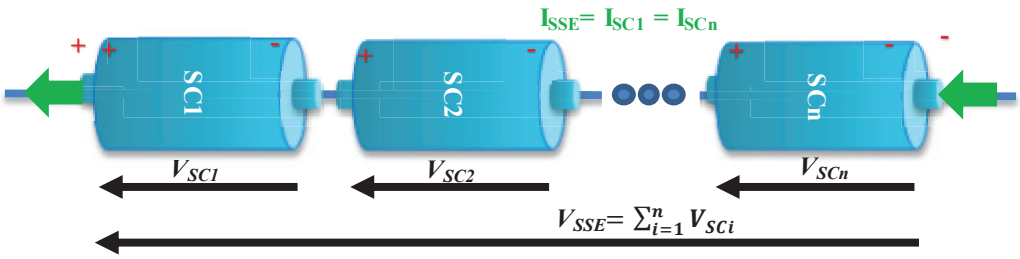


Figure 1.19 Principe de mise en série des supercondensateurs

Les deux associations série/parallèle peuvent coexister suivant le besoin de l'application en puissance et en énergie.

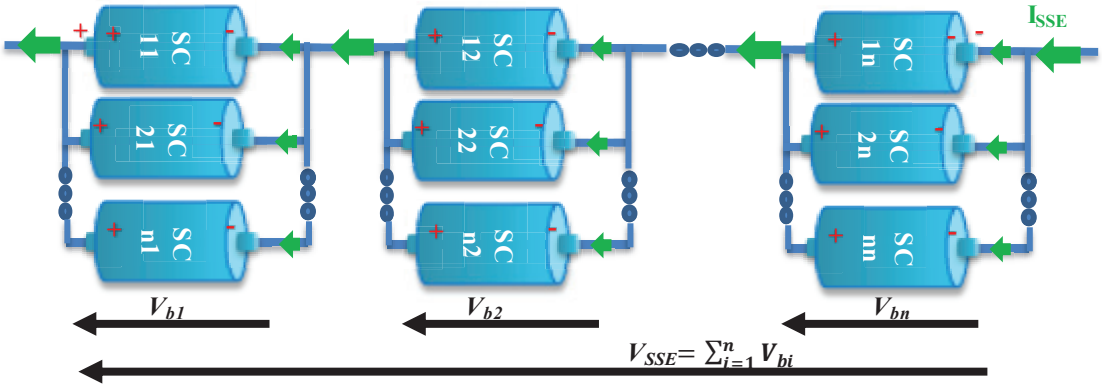


Figure 1.20 Module de supercondensateurs associés en association série parallèle

Un pack désigne plusieurs modules associées en séries et/ou en parallèles (figure 1.21) [41].

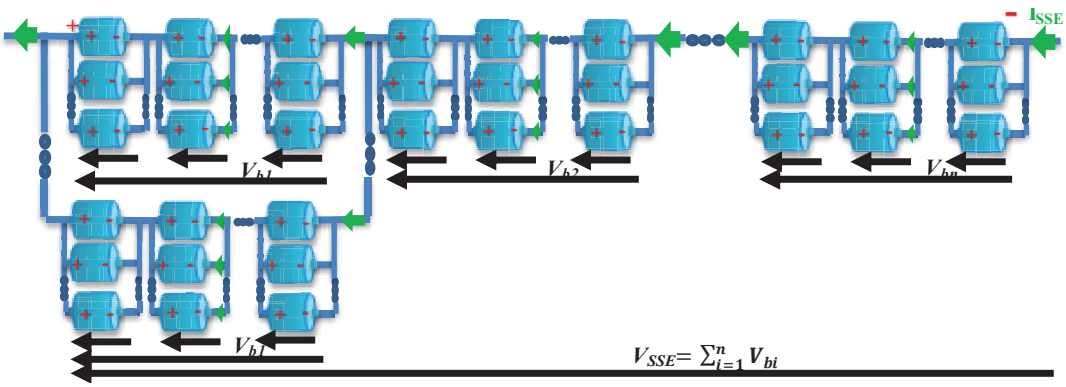


Figure 1.21 Pack de supercondensateurs

Ces différentes configurations peuvent exister mais souvent c'est l'association série d'éléments identiques, nommée module série ou simplement module de stockage, qui est la plus utilisée (figure 1.19).

Les fabricants proposent des modules de supercondensateurs en association série dans un boitier scellé.

La figure 1.22 suivante, représente quelques modules de stockage disponibles sur le marché. La tension maximale des systèmes de stockage présentés varie de 16 V à 160 V.

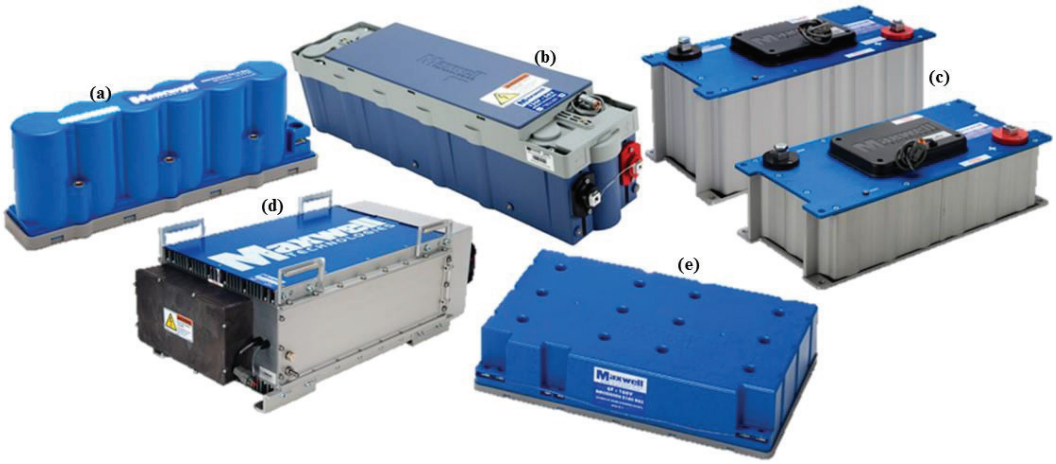


Figure 1.22 Modules de supercondensateurs, (a) (58 F, 16 V) 6 SC série, (b) (130 F, 56 V) 23 SC série, (c) (165 F, 48 V) 18 SC série, (d) (63 F, 125 V) 48 SC série, (e) (5.8 F, 160 V) 60 SC série

2.2.2 Quelques exemples de domaines d'application

Grâce à leurs bonnes caractéristiques, les supercondensateurs sont de plus en plus exploités dans différents domaines. On les retrouve dans des applications nécessitant une forte puissance durant une courte durée (quelques secondes).

Les modules de supercondensateurs peuvent être utilisés dans des systèmes de stockage hybrides. Dans un système de stockage électrique multi-sources, les supercondensateurs soutiennent un système de stockage électrique primaire, tels que des batteries par exemple, en assurant (ou en partageant) les impulsions de puissance. Comme les batteries sont souvent moins performantes dans les applications concernant le démarrage, l'accélération ou la récupération d'énergie d'un véhicule (car disposant d'une densité de puissance relativement plus faible), l'utilisation des supercondensateurs comme source complémentaire permet

d'allonger la durée de vie des batteries et garantit l'amélioration des performances du système de stockage global.

Ils peuvent aussi assurer seuls les impulsions de puissance dans les systèmes de stockage électrique mono-source. On retrouve ce type de sollicitation dans différents domaines tels que celui du transport ou lié aux réseaux électriques [42][43][44][45][46]. Dans le transport, les supercondensateurs peuvent être utilisés pour assurer ou soutenir les phases de démarrage (fonction « Stop and Start »), d'accélération, d'entrainement de charge mécanique de récupération d'énergie de freinage (voitures, bus, trolleys, chariot élévateur,…). Dans les réseaux électriques, les supercondensateurs peuvent être utilisés pour assurer la compensation de la puissance instantanée et lisser la puissance fournie par le réseau (alimentation de secours, soutient du réseau pour alimenter les lignes ferroviaires, …).

Les figures suivantes représentent quelques applications de modules de supercondensateurs.

SMV 4531 TB5 HLT
(Le module de supercondensateurs récupère l'énergie et booste le générateur électrique diesel lorsque la demande de puissance atteint son maximum)

Man Lyon's City hybride
(Le module de supercondensateurs assure le démarrage en tout électrique)

Peugeot 208
(Le module de supercondensateurs assure le Stop and Start)

Toyota TS030 hybride
(Le module de supercondensateurs récupère l'énergie de freinage et booste l'accélération)

Toyota Yaris Hybrid-R
(Le module de supercondensateurs récupère l'énergie de freinage et booste le démarrage)

Figure 1. 23 Exemples d'applications de modules de supercondensateurs

3 Problématique de la gestion d'un système de stockage d'énergie

La gestion d'un supercondensateur seul ne pose guère de problème. Elle consiste juste à maintenir l'élément dans la bonne plage de tension et de température et de le solliciter avec un courant qui ne dépasse pas les limitations du constructeur.

Il est plus difficile de gérer un module de supercondensateurs. L'association en série fait en sorte que tous les éléments voient le même courant de charge et de décharge alors qu'ils ne se comportent pas tous de la même façon. Cette différence de comportement est due essentiellement aux tolérances du procédé de fabrication du supercondensateur et à la dispersion des températures dans un même module.

Dans un même module, on trouvera initialement des éléments ayant des caractéristiques différentes. A même niveau de courant, l'élément qui a la plus faible capacité va se voir charger/décharger plus rapidement que les autres [47].

La figure 1.24 correspondant aux tensions de trois supercondensateurs mis en série lors d'une charge à courant constant (400 A). Comme on peut observer sur cette figure, l'élément possédant une capacité plus faible (2550 F) aura à la fin de sa charge un niveau de tension plus important que les autres.

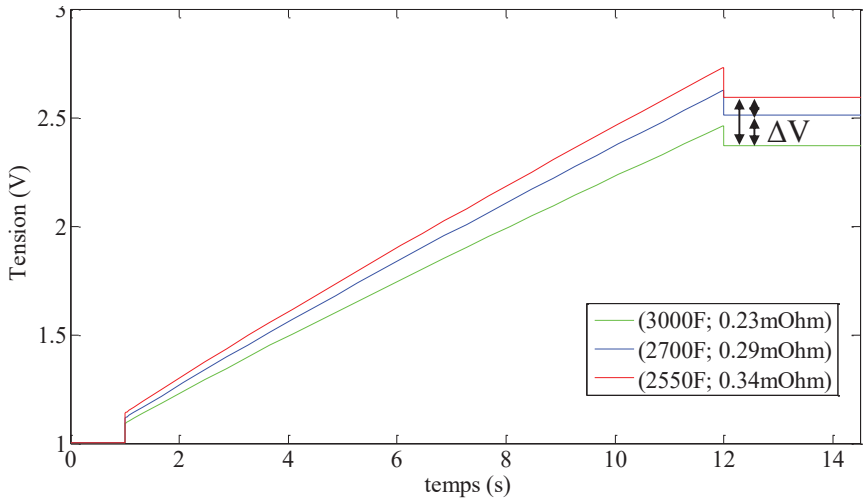


Figure 1.24 Evolution de la tension des cellules lors de la charge (400 A, 10 s) d'un module de trois supercondensateurs en série

La charge/décharge du système de stockage d'énergie est souvent établie en se basant sur la tension totale du pack. On considère que le module est totalement chargé lorsque la tension a ses bornes atteint sa tension maximale et on l'exploite jusqu'à ce qu'il atteigne sa tension minimale.

Lorsqu'on dispose d'éléments ayant des caractéristiques différentes dans un même module, un problème peut donc se poser : en les chargeant, une des cellules peut atteindre sa tension maximale, alors que la tension maximale du pack n'est pas atteinte, ce qui peut entrainer la surcharge de cette cellule (dépassement de la tension maximale autorisée). Lors de la décharge, la cellule risque alors une sur-décharge correspondant ici à un dépassement d'une tension minimale définie par l'utilisateur qui n'est cependant pas critique car le supercondensateur peut se décharger jusqu'à 0 V. La surcharge et la sur-décharge de cette cellule qui est la plus faible du module, va continuellement dégrader ses performances et donc accélérer son vieillissement. La dispersion des paramètres des éléments d'un même module va donc être amplifiée au fur et à mesure des cycles d'utilisation.

La fiabilité R_{SSE} d'un système constitué d'éléments associés en série est le produit de la fiabilité individuelle R_{sci} de ses éléments. Elle est exprimée par l'équation (1.12) comme suit :

$$R_{SSE} = \prod_{i=1}^{n} R_{sci} \qquad (1.12)$$

Ainsi la fiabilité d'un module est dépendante de la fiabilité de l'élément le plus faible qui est en plus le plus sollicité et dont la durée de vie est la plus courte du système.

Dans certaines utilisations de module, la tension individuelle de chacun de ses éléments peut aussi être prise en considération. Le risque de surcharge ou de sur-décharge de l'élément le plus faible ne se pose alors plus car la charge ou la décharge sont arrêtées une fois que l'une des cellules atteint les seuils de tension considérés. Dans ce cas l'énergie fournie ou transmise est donc limitée par l'élément de plus faible capacité.

Une seconde problématique est liée à la dispersion de température entre cellules. La dispersion des paramètres des cellules crée un déséquilibre de température au sein du système. Pour un même courant, les éléments qui ont les ESR les plus importantes vont s'échauffer plus

que les autres supercondensateurs. Par ailleurs pour les systèmes de stockage comprenant un nombre important d'éléments, suivant son emplacement dans le module, les températures environnantes des supercondensateurs peuvent être différentes. Les éléments au centre du pack peuvent donc subir des échauffements importants. Réciproquement, une cellule vers les extrémités du pack en contact avec l'air ambiant aura une température environnante plus faible [48][49]. La température étant une contrainte importante dans l'accélération de la cinétique de vieillissement des supercondensateurs, les éléments les plus chauds vont se dégrader plus rapidement et augmenter la dispersion des paramètres et des durées de vie des cellules.

Comme pour les batteries lithium-ion, l'utilisation d'un système de stockage d'énergie constitué de supercondensateurs nécessite de prendre en compte certains facteurs comme la dispersion de températures et de tensions entre éléments [50]. Des précautions sont à prendre car les supercondensateurs sont très sensibles aux surchauffes et aux surcharges. Un système de gestion d'énergie associé au module de supercondensateurs permet d'éviter ces problèmes.

La fin de ce chapitre est donc dédiée à l'introduction des systèmes de gestion d'énergie.

4 Systèmes de gestion d'énergie

4.1 Définition d'un système de gestion d'énergie

Le système de gestion d'énergie est un système qui permet de sécuriser l'utilisation d'un module de stockage d'énergie en assurant la surveillance et/ou le contrôle des éléments individuels qui le constituent. Ce système possède différentes appellations. L'appellation la plus répandue sur le marché concerne les batteries, on parle alors de BMS (Battery Management System). Dans ce qui suit, nous nous proposons d'utiliser pour le système de gestion d'énergie des supercondensateurs l'abréviation SCM pour (SuperCapacitor Manager).

Les supercondensateurs et les batteries lithium-ion ayant des besoins similaires en termes de paramètres à suivre, contrôler et surveiller, les différentes fonctionnalités et caractéristiques des systèmes de gestion d'énergie présentées dans la suite concernent les supercondensateurs mais peuvent aussi être appliquées aux batteries.

4.2 Topologies

Le système de gestion d'énergie peut être classé suivant sa topologie en quatre grandes familles :

- ***Le système centralisé :*** constitué d'un seul contrôleur qui assure les fonctions du système (figure 1.25). Il est connecté aux cellules par une multitude de connexions électriques. Ces dernières assurent la liaison des tensions individuelles au contrôleur [51]. On peut trouver aussi des thermocouples mesurant les températures.

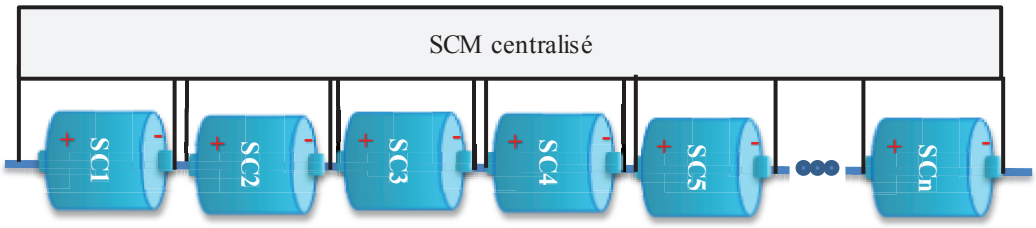


Figure 1.25 Système de gestion d'énergie centralisé

Les avantages de cette topologie sont une installation unique pour tout le système et une liaison simple avec les éléments du module de stockage.

Les inconvénients de cette topologie se présentent dans certaines applications où il est nécessaire d'allouer un emplacement important spécifique à ce système. La centralisation implique aussi une seule source de chaleur lors d'un équilibrage dissipatif centralisé sur une même carte (cf. § 4.4.3.3. « L'équilibrage des tensions »).

- ***Le système modulaire :*** constitué de plusieurs contrôleurs associés en série (figure 1.26). Chacun de ces contrôleurs assure la gestion d'un nombre d'éléments du module de stockage. La gestion du système de stockage globale est assurée par intercommunication entre les contrôleurs.

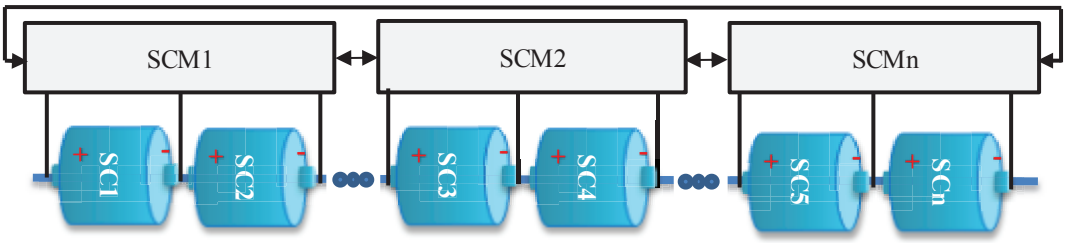


Figure 1.26 Système de gestion d'énergie modulaire

- ***Le système maître-esclave :*** tout comme le système modulaire, il est constitué de plusieurs sous-systèmes associés en série, les esclaves, et d'un contrôleur, le maître (figure 1.27). Les esclaves assurent la surveillance des paramètres des éléments dont ils sont en charge. Ces esclaves communiquent avec le maître qui assure leur contrôle, la compilation des données et la communication avec l'extérieur.

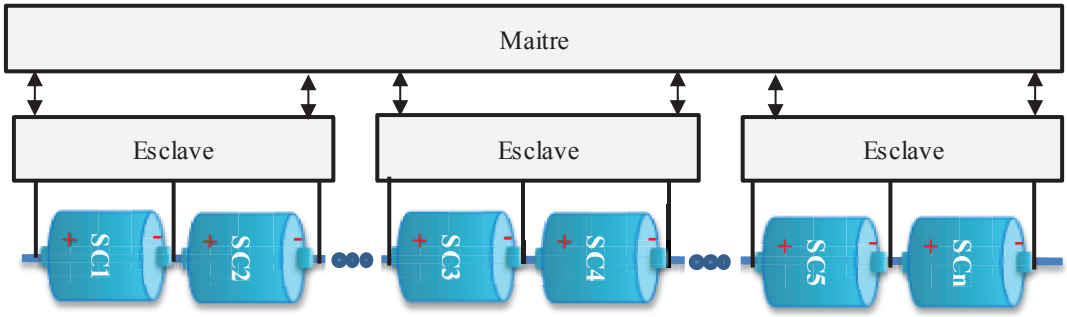


Figure 1.27 Système de gestion d'énergie maitre-esclave

Les topologies, modulaire et maître esclave sont intéressantes lorsqu'on dispose de système de stockage avec un très grand nombre d'éléments. En plus des avantages du système centralisé, le partage de la surveillance et du contrôle assure des temps de calcul et de traitement moins importants. Les opérations de maintenance (diagnostic, dépannage ou remplacement) y sont plus simples. En effet il est plus facile de cibler ces opérations sur un sous-système que sur une carte entière.

L'inconvénient principal de ces typologies est le prix plus élevé que la topologie centralisée. Dans certaines applications, il est aussi difficile de réaliser les communications entre modules ou entre blocs maitre-esclaves.

Les trois topologies précédentes assurent le contrôle et la surveillance des éléments constituants le module de stockage. Selon la topologie, il peut y avoir un SCM (SCM centralisé) ou plusieurs s'ils se partagent la surveillance avec un même niveau hiérarchique (SCM modulaire) ou avec des niveaux hiérarchiques différents (SCM maître-esclave).

A titre d'exemple, la figure 1.28 représente un système de gestion d'énergie centralisé constitué à partir des circuits imprimés « Yosoo 4A-5A PCB BMS Protection ».

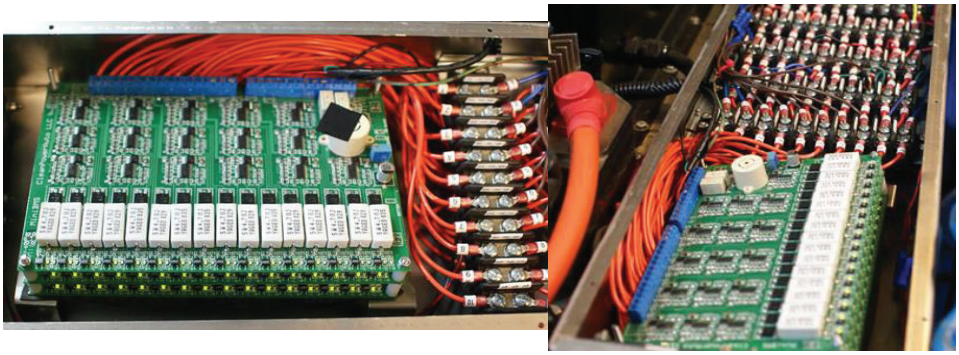


Figure 1.28 BMS centralisé

- ***Le système distribué :*** contrairement aux systèmes précédents, l'électronique d'instrumentation n'est pas rassemblée dans les systèmes de gestion d'énergie, mais contenue sur une carte CMU (Cell Monitoring Unit) en contact direct avec chaque cellule surveillée. Ces cartes communiquent avec un contrôleur qui assure leur contrôle, la compilation des données et la communication avec l'extérieur [51].

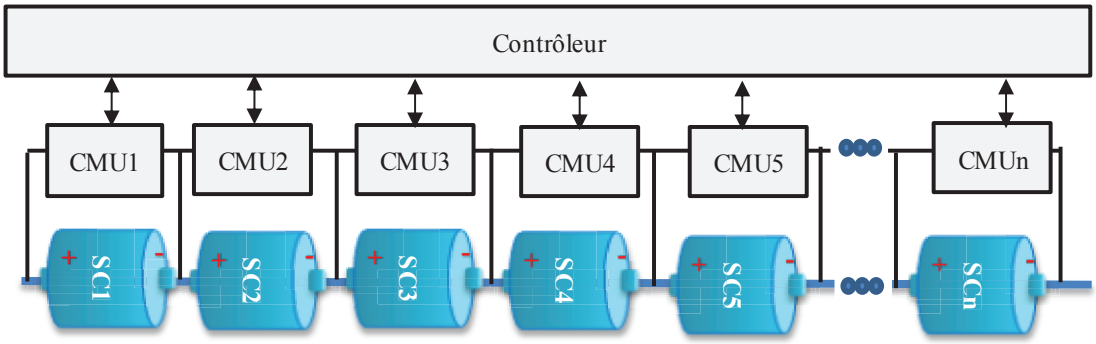


Figure 1.29 Système de gestion d'énergie distribué

La figure 1.30 représente un prototype de CMU placé sur des cellules lithium-ion.

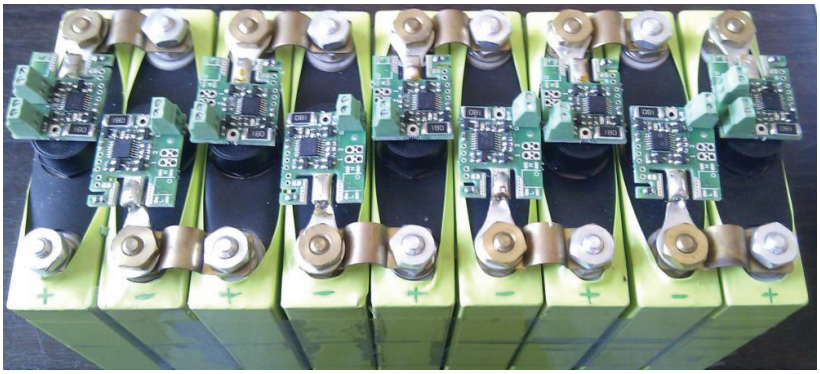


Figure 1.30 Plusieurs CMU placés sur un module de batteries lithium-ion

Les avantages de cette topologie sont une conception assez simple et potentiellement plus fiable que les précédentes. Les cartes individuelles CMU, placées aux plus près des cellules, assurent une meilleure qualité de mesure. Les opérations de maintenance (diagnostic, dépannage ou remplacement) y sont aussi plus simples car ciblées vers la carte défectueuse.

Les inconvénients sont liés au grand nombre de circuits imprimés augmentant le prix de l'ensemble du système et le montage sur certaines cellules peut s'avérer difficile.

4.3 Catégories de système

Les systèmes de gestion d'énergie peuvent être classés suivant leurs fonctionnalités. Ils vont du plus simple qui se limite à une protection passive au plus complexe qui surveille mais aussi contrôle et communique avec d'autres systèmes embarqués. La complexité du système de gestion d'énergie dépend de l'importance du système de stockage et du domaine d'application. En effet, plus riche sera sa fonctionnalité, plus important sera son coût.

Les fonctionnalités présentées ci-dessous permettent de classifier les différents systèmes de gestion d'énergie [52].

- ***Le régulateur de shunt*** : Il assure la protection des éléments du module de stockage contre les surtensions. Un shunt (résistance) est mis en œuvre une fois que la tension maximale autorisée est dépassée.

La figure 1.31 représente un SCM de type régulateur de shunt, le BKIT-MCINT. Il est le produit du fabriquant de supercondensateur Maxwell pour ses supercondensateurs BCAP3000, 2000,1500, 1200 et 650. De type modulaire (deux supercondensateur par système), il assure que chaque cellule surveillée ne dépasse pas sa tension maximale (2,73 V). Si une cellule est surchargée, elle est déchargée dans une résistance, une LED indiquant cette décharge.

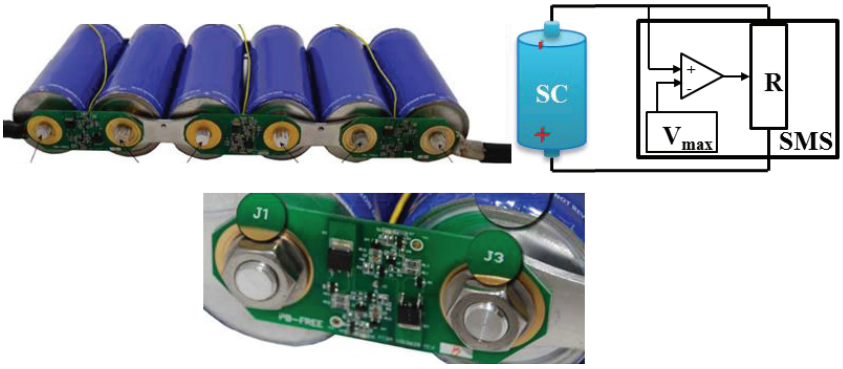


Figure 1.31 Régulateur de shunt Maxwell BKIT-MCINT

- ***Le compteur*** : Il surveille les éléments du module de stockage sans intervention physique [53]. La surveillance porte essentiellement sur la tension individuelle des éléments de stockage mais peut porter aussi sur la température, le courant de charge et/ou décharge, … Il communique les informations à l'utilisateur qui peut alors se charger d'intervenir.
- ***Le surveillant*** : Il surveille les éléments du module de stockage et intervient sur le courant de charge et/ou de décharge lorsque le seuil maximal ou minimal de tension d'une cellule est atteint. Ce système envoie une demande au chargeur ou à la charge afin de réduire ou d'arrêter le courant. Si ceux-ci ne sont pas conçus pour communiquer, le surveillant peut alors contrôler deux contacteurs qui placés entre le chargeur/la charge et le SSE permettent de commander l'arrêt de la charge ou de la décharge. Des exemples de produits sont commercialisés par le fabriquant de circuit intégrées « Linear Technology » tels que le LTC3225, le LTC3226 et le LTC6803. Ces systèmes incluent aussi un chargeur faible/moyen courant dans le SCM.

Ce type de système sécurise l'ensemble des éléments du pack mais le module reste limité énergétiquement par son composant le plus faible (cf. § 3. « Problématique de la gestion d'un système de stockage d'énergie »).

- ***L'égaliseur*** : Il surveille les éléments du module de stockage et permet de résoudre les problèmes de surcharge, sur-décharge et la limitation énergétique grâce aux systèmes d'équilibrage. L'équilibrage est expliqué plus en détail dans la suite du document (cf. § 4.4.3.3. « L'équilibrage des tensions »).

- ***Le protecteur*** : Le protecteur est en fait un égaliseur qui intègre les contrôles de courant de charge et de décharge. Un exemple de protecteur commercialisé par « Linear Technology », le DC1937A.

Le tableau 1.2 récapitule les différentes actions citées ci-dessus des systèmes de gestion d'énergie.

Tableau.1. 2. Comparaison des systèmes de gestion d'énergie

	Surveillance		Communication	Contrôle de courant	Equilibrage	Protection	
	Mesure	Sauvegarde				Surcharge	Sur-décharde
Régulateur			√*			√	
Compteur	√	√*	√				
Surveillant	√	√*	√	√		√	√
Egaliseur	√*	√*	√*		√		
Protecteur	√*	√*	√*	√	√	√	√

* action optionnelle

Certaines actions sont optionnelles dans certains systèmes commercialisés ou nécessitent de rajouter des outils de mesure supplémentaires.

Le système le plus intéressant est complet correspond au protecteur. C'est lui qui est présenté par la suite. Ses fonctions sont introduites ci-dessous

4.4 Fonctions du système de gestion d'énergie protecteur

Dans cette partie, nous présentons les différentes fonctions du système de gestion d'énergie le plus complet, le système protecteur, lorsqu'il dispose de toutes les options. Les fonctions de ce système de gestion d'énergie peuvent être groupées en cinq principales fonctions : la mesure, l'estimation des paramètres, la gestion, la sauvegarde et la communication (figure 1.32) [54].

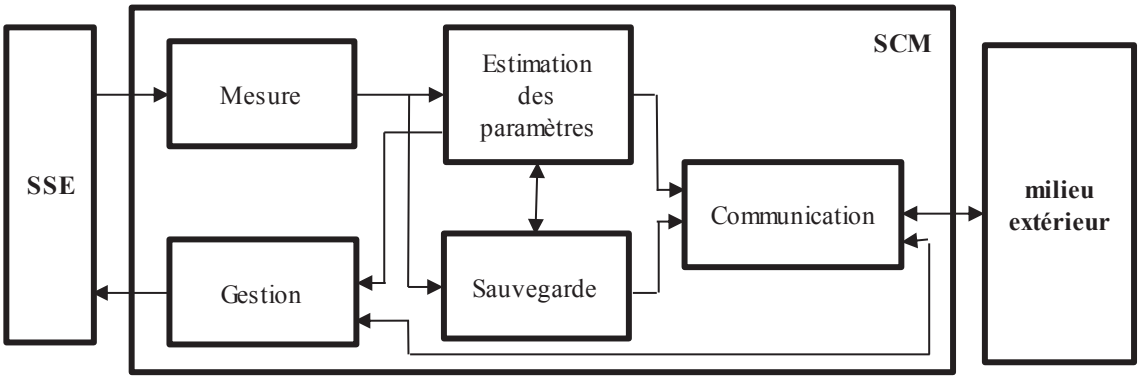


Figure 1.32 Fonctions du système de gestion d'énergie protecteur

4.4.1 Mesure

La première fonction d'un système de gestion d'énergie consiste à avoir les informations sur les éléments qu'il surveille. Les informations concernent la tension, le courant et la température.

4.4.1.1 Mesure de tension

La mesure de tension consiste à déterminer la tension individuelle de tous les éléments en série constituant le module de stockage. La tension totale du système de stockage peut être aussi mesurée ou calculée. Les mesures de tension sont souvent échantillonnées en passant par un multiplexeur analogique suivi d'un convertisseur analogique numérique.

La figure 1.33 suivante représente l'architecture générale du circuit intégré d'un SCM de marque Linear Technology, le LTC6803. On y voit la présence du multiplexeur et du convertisseur analogique numérique présentés.

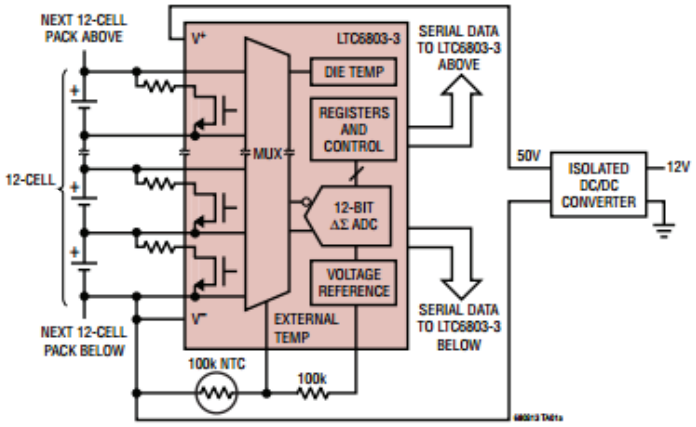


Figure 1.33 Architecture du LTC6803

La tension des supercondensateurs est un paramètre important à surveiller car c'est l'indicateur de leur état de charge mais elle peut être aussi exploitée pour estimer leurs paramètres internes (cf. § 4.4.2. « Estimation des paramètres »). La tension varie rapidement lorsque le supercondensateur est utilisé pour des applications de forte puissance (charge-décharge rapide à fort courant). La précision et la rapidité de mesure de la tension sont donc deux paramètres importants. Actuellement, l'incertitude de mesure est inférieure à 10 mV sur les systèmes de gestion les plus précis du commerce. Quant à la rapidité de mesure, elle est de l'ordre de la milliseconde (1.2 ms) pour une mesure de tension individuelle.

4.4.1.2 Mesure de courant

Il existe deux façons principales de mesurer le courant circulant dans le module de stockage ; soit par l'utilisation d'un shunt soit par l'utilisation d'un capteur à effet Hall.

L'avantage principal du choix de la mesure par shunt de courant est le faible coût de la résistance de mesure comparé à un capteur à effet Hall. Ses inconvénients sont la dépendance de la résistance du shunt avec la température environnante, la dissipation d'énergie lors de la mesure et le manque d'isolation galvanique.

4.4.1.3 Mesure de température

La mesure de température est une fonction moins répandue que les mesures électriques. Dans les SCM distribués, un thermocouple est placé sur chaque cellule surveillée (figure 1.34 (a)). Dans les autres, on peut retrouver un point de mesure pour un module entier (figure 1.34 (c)). On a aussi des cas où on trouve quelques points de mesure mis dans des emplacements stratégiques pour une meilleure vision de la distribution de température dans l'ensemble du module (figure 1.34 (b)). Dans les systèmes conventionnels, la précision de mesure de température est de l'ordre de quelques degrés (<15 %) [55] [56].

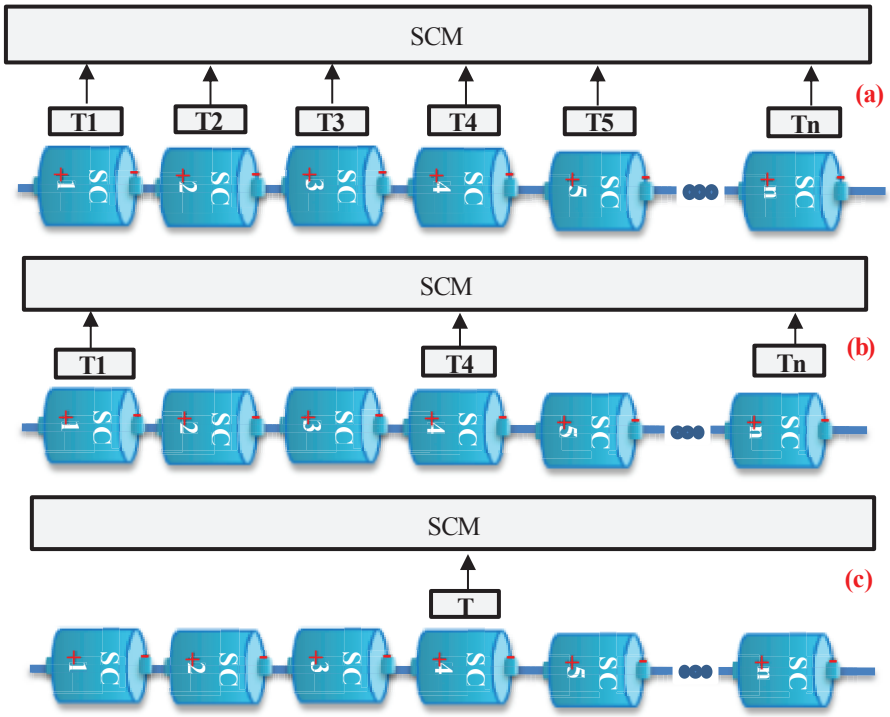


Figure 1.34 Exemple d'implémentation des mesures de température

4.4.2 Estimation des paramètres

A partir de certaines mesures, il est possible d'estimer des signatures non mesurables de l'état des cellules. En effet en analysant et traitant la variation de la tension et du courant lors de phase de charge et/ou décharge, il est possible d'estimer la résistance série équivalente (ESR) et la capacité (C) de la cellule pour une température donnée (cf. § 2.1.6.1. « Modèle constructeur »).

L'estimation de ces deux paramètres nécessite que les mesures des tensions des cellules et des courants soient synchrones. Dans le cas contraire, comme le courant peut varier très rapidement, des erreurs sur les paramètres estimés et surtout sur les valeurs des résistances équivalentes séries peuvent apparaitre.

Grâce à la surveillance des capacités et des résistances équivalentes séries, il est possible d'évaluer l'état de santé des éléments du module de stockage. L'état de santé est le reflet de l'âge de la cellule et permet d'avoir une image de la durée de vie restante avant sa défaillance, pour des conditions d'utilisation données.

L'état de santé ou SOH (State Of Health) peut être défini différemment d'un système de gestion d'énergie à un autre suivant le besoin ou le domaine d'application. Il se base sur

l'estimation des signatures actuelles (ESR(t) et C(t)) et sur de critères de fin de vie (par exemple les critères constructeur 2.ESR(0)et 0.8.C(0))

En se basant sur l'estimation de la capacité, l'état de santé peut être exprimé comme suit :

$$SOH_C(\%) = \frac{C(t) - 0.8 \cdot C(0)}{0.2 \cdot C(0)} \cdot 100 \qquad (1.13)$$

Dans le cas où le SOH se base sur l'évolution de l'ESR il peut être exprimé ainsi :

$$SOH_{ESR}(\%) = \frac{2 \cdot ESR(0) - ESR(t)}{ESR(0)} \cdot 100 \qquad (1.14)$$

Dans ces deux cas, le SOH est égal à 100% pour une cellule neuve ($ESR(t) = ESR(0)$ et $C(t) = C(0)$) et sera égal à zéro lorsque la cellule aura atteint ses critères de fin de vie ($ESR(t) = 2 \cdot ESR(0)$ et $C(t) = 0.8 \cdot C(0)$).

4.4.3 Gestion

La gestion de l'énergie s'articule autour de trois grandes familles : le contrôle de la sécurité, la gestion thermique et l'équilibrage des tensions.

4.4.3.1 Contrôle de la sécurité

Les paramètres mesurés (tension, courant et température) permettent de surveiller l'évolution des supercondensateurs dans leur module de stockage. Le contrôle de sécurité permet de maintenir ces cellules dans leurs bonnes plages de fonctionnement et d'utilisation. Des seuils hauts et bas sont fixés pour chaque paramètre, et si l'un des seuils est atteint ou dépassé le système de gestion intervient (figure 1.35).

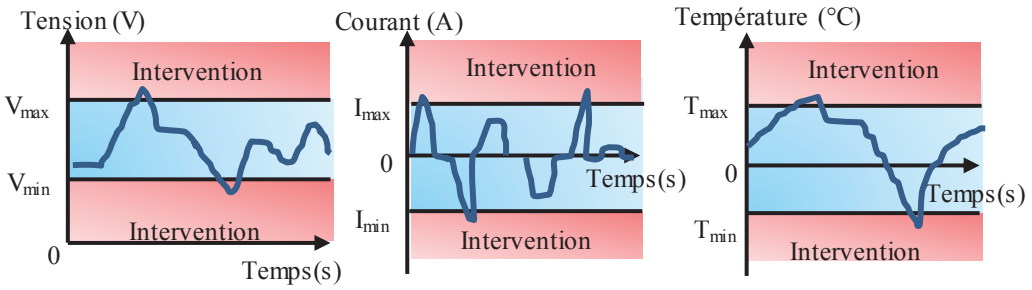


Figure 1.35 Principe de contrôle de sécurité

Suivant sa topologie, l'intervention du SCM est différente. Elle peut être un simple indicateur visuel via l'interface homme-machine (utilisation de code couleur,). Elle peut être aussi l'activation d'une alarme sonore. Le système protecteur peut aussi suggérer la réduction de la charge/décharge ou leur arrêt. Dans le cas d'absence de communication avec le chargeur ou la charge, ce système peut intervenir via les contacteurs de coupure générale du courant [53].

4.4.3.2 Gestion thermique

La plage de température de fonctionnement des supercondensateurs est plus étendue que la plupart des batteries lithium-ion (-40 °C à +65 °C). La surveillance et le contrôle de ce paramètre restent néanmoins importants car la durée de vie et la sécurité des supercondensateurs en dépendent. La gestion thermique consiste à forcer le refroidissement ou l'échauffement des éléments surveillés.

Une solution pour le refroidissement des cellules consiste à activer un ventilateur. Cette solution est très répandue et permet l'homogénéisation de la température entre les éléments d'un même module. Le réchauffement des modules de stockage est rarement utilisé pour les supercondensateurs en raison de leurs bonnes performances en basse température.

4.4.3.3 Equilibrage des tensions

Comme nous l'avons présenté dans la problématique de l'utilisation d'un module de stockage d'énergie, à même courant les éléments constituant le système de stockage d'énergie peuvent être à des états de charge différents. Cette dispersion de tension amène des risques de surcharge ou de sur-décharge et limite la capacité de stockage du système à son élément le plus faible.

La solution réside dans l'équilibrage des tensions qui est une fonction assurée par les circuits d'équilibrage. On retrouve ce circuit placé aux bornes des éléments du module de stockage. Son rôle consiste à faire passer une partie du courant traversant le supercondensateur à travers les circuits d'équilibrage afin d'égaliser les états de charge et ainsi les tensions entre les éléments d'un même module.

Les circuits d'équilibrage peuvent être classés comme dissipatif ou non-dissipatif. L'équilibrage dissipatif dissipe l'excès d'énergie des éléments les plus chargés (figure 1.36). L'équilibrage non-dissipatif, appelé aussi redistributif, transfère l'excès d'énergie des éléments les plus chargés vers les éléments les moins chargés (figure 1.37). Les architectures des circuits d'équilibrage assurant l'équilibrage dissipatif et non-dissipatif sont introduites par la suite.

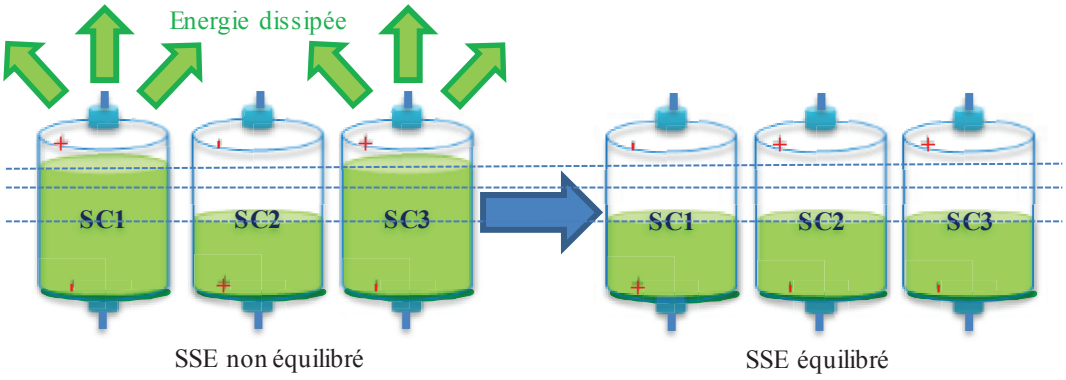


Figure 1.36 Principe de l'équilibrage dissipatif

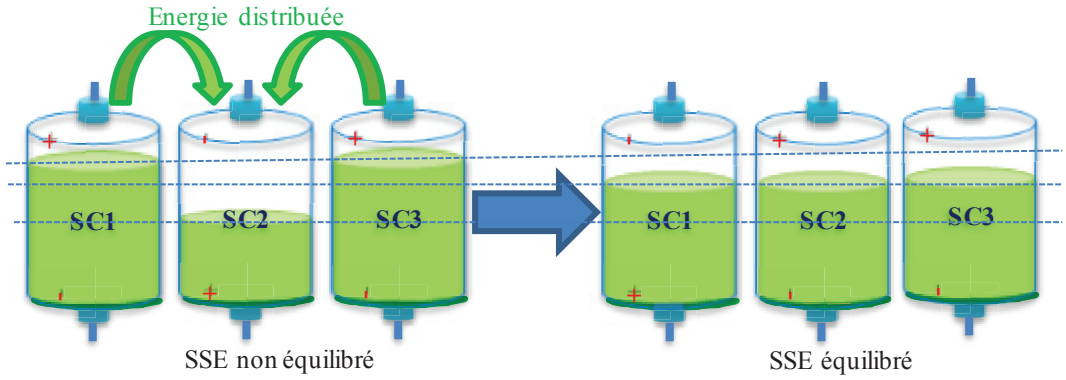


Figure 1.37 Principe de l'équilibrage non dissipatif

4.4.4 Sauvegarde et communication

La sauvegarde de certaines informations dans un registre permet d'avoir une certaine image de l'évolution du système de stockage d'énergie en fonction du temps. Les informations

mémorisées peuvent être : la tension minimale et maximale du module, la tension minimale et maximale des éléments de stockage, le courant minimal et maximal, la température minimale et maximale mesurée, les dernières valeurs des ESR estimés, etc.

La communication dépend de la topologie du système de gestion d'énergie. Elle peut interagir avec l'utilisateur ou être parfaitement autonome.

4.5 Circuits d'équilibrage

L'équilibrage des tensions des cellules est assuré par les circuits d'équilibrage du SCM. Cet équilibrage peut être non dissipatif ou dissipatif [57].

4.5.1 Circuits d'équilibrage dissipatif

Les circuits d'équilibrage dissipatif ont pour objectif la dissipation de l'excès d'énergie, par effet joule, à travers une résistance d'équilibrage.

L'équilibrage dissipatif peut être commandé ou non-commandé. Il est non-commandé lorsqu'une résistance est placée directement aux bornes de chaque cellule [58]. Il est commandé lorsque le circuit d'équilibrage est contrôlé via un interrupteur commandé (usuellement un MOSFET) par le contrôleur du SCM [58][59].

Ce travail de thèse se concentre sur la commande des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie. Nous ne nous attarderons pas plus donc sur l'équilibrage non-commandé.

Les circuits d'équilibrage dissipatif commandés ont une architecture simple et peu coûteuse (figure.1.38). Ces circuits peuvent porter différentes appellations comme « Controlled Shunt Resistor » ou « Switched Resistor ».

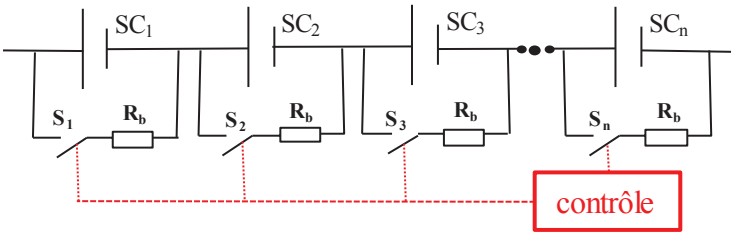


Figure 1.38 Schéma électrique du circuit d'équilibrage dissipatif

Le choix de la résistance d'équilibrage R_b est conditionné principalement par son échauffement et agit sur le rendement de la cellule et le temps d'équilibrage.

Notons ΔT l'échauffement de cette résistance. Elle est exprimée par l'équation 1.15 comme suit :

$$\Delta T = R_{th} \cdot P = R_{th} \cdot \frac{{V_{sc}}^2}{R_b} \qquad (1.15)$$

avec :

- R_{th} la résistance thermique [K/W],
- P la puissance dissipée dans la résistance d'équilibrage [W],

La résistance thermique des résistances d'équilibrage de type Composants Montés en Surface (CMS) généralement utilisées ont une valeur comprise entre 30 et 90 K/W.

Considérons par exemple une valeur de résistance thermique de 60 K/W. Sous une tension maximale du supercondensateur de 2.85 V, une résistance d'équilibrage R_b de 3 Ω voit une élévation de température de plus de 150 °C. Ainsi les valeurs R_b des résistances d'équilibrage sont choisies afin de ne pas dissiper plus que 1W (300 mA de courant de dissipation maximal) [18][60].

4.5.2 Circuits d'équilibrage non dissipatif

Les circuits d'équilibrage non dissipatif ont pour objectif de transférer la charge des éléments les plus chargés vers les éléments les moins chargés.

Sous cette catégorie d'équilibrage, on retrouve trois modes de transfert d'énergie [61] :

- Le transfert de cellule à cellule, « Cell to Cell », où l'énergie est transférée entre cellules adjacentes (figure 1.39 (a)).
- Le transfert de la cellule vers le module, « Cell to Pack », où le transfert de charge se fait de l'élément le plus chargé vers l'ensemble du module de stockage (figure 1.39 (b)).

- Le transfert du module vers la cellule, « Pack to Cell », où le transfert de charge se fait de l'ensemble du module de stockage vers l'élément le moins chargé (figure 1.39 (c)).

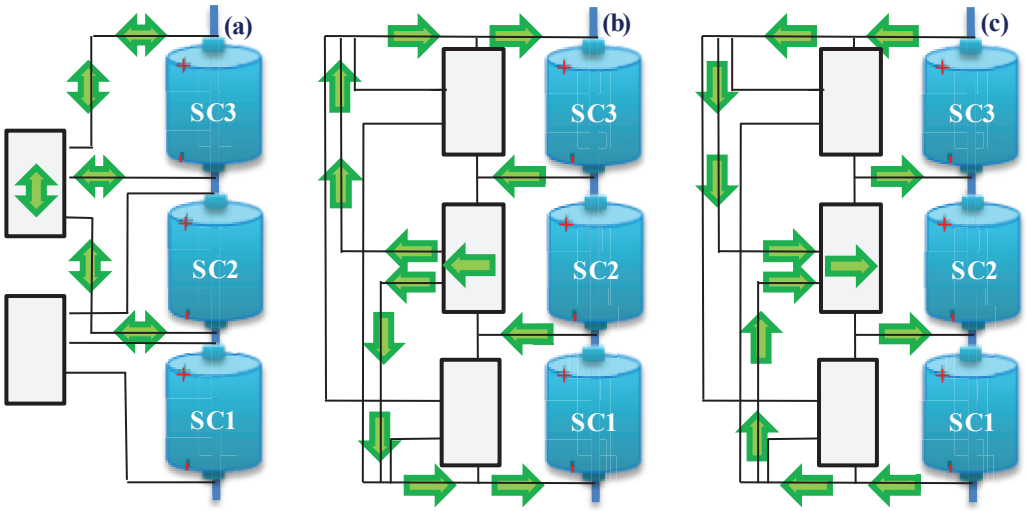


Figure 1.39 Différents principes de transfert d'énergie

Les circuits d'équilibrage non dissipatif sont très variés au niveau de la structure. Mais leur principe reste le même, c'est-à-dire celui de stocker temporairement l'excès d'énergie et de le transférer par la suite vers la cellule la plus faible. La conception de ce type de circuit se base donc sur l'utilisation d'éléments tels que des condensateurs, des inductances et des transformateurs et/ou par l'utilisation de convertisseurs [62][63][59][64]. La figure 1.40 représente un organigramme classant les différents circuits d'équilibrage non dissipatif sur la base de leur structure.

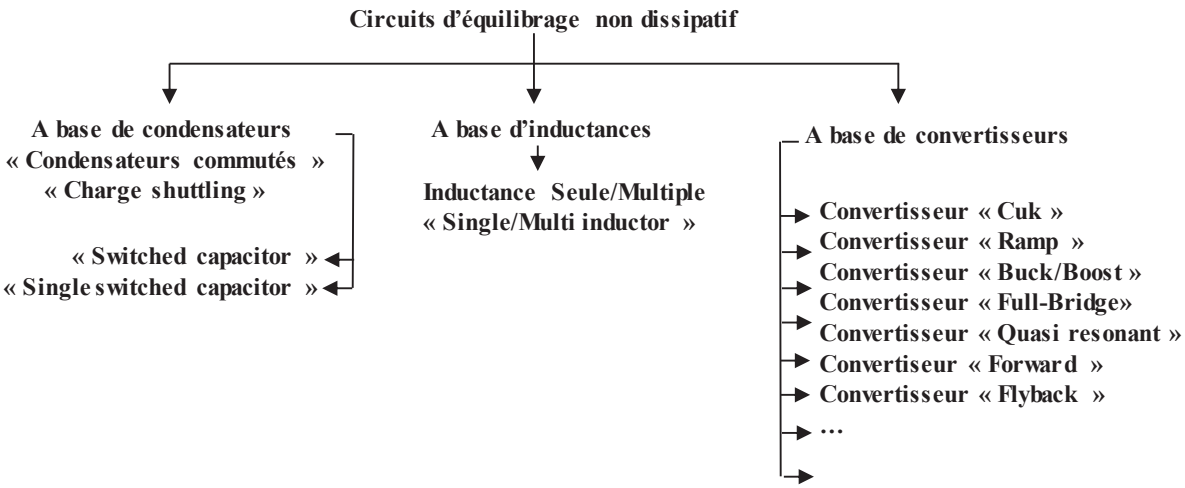


Figure 1.40 Différents types de circuits non dissipatifs

Selon les besoins et les contraintes économiques, une large gamme de produits existe. Voici quelques exemples de schémas de circuits d'équilibrage non dissipatif :

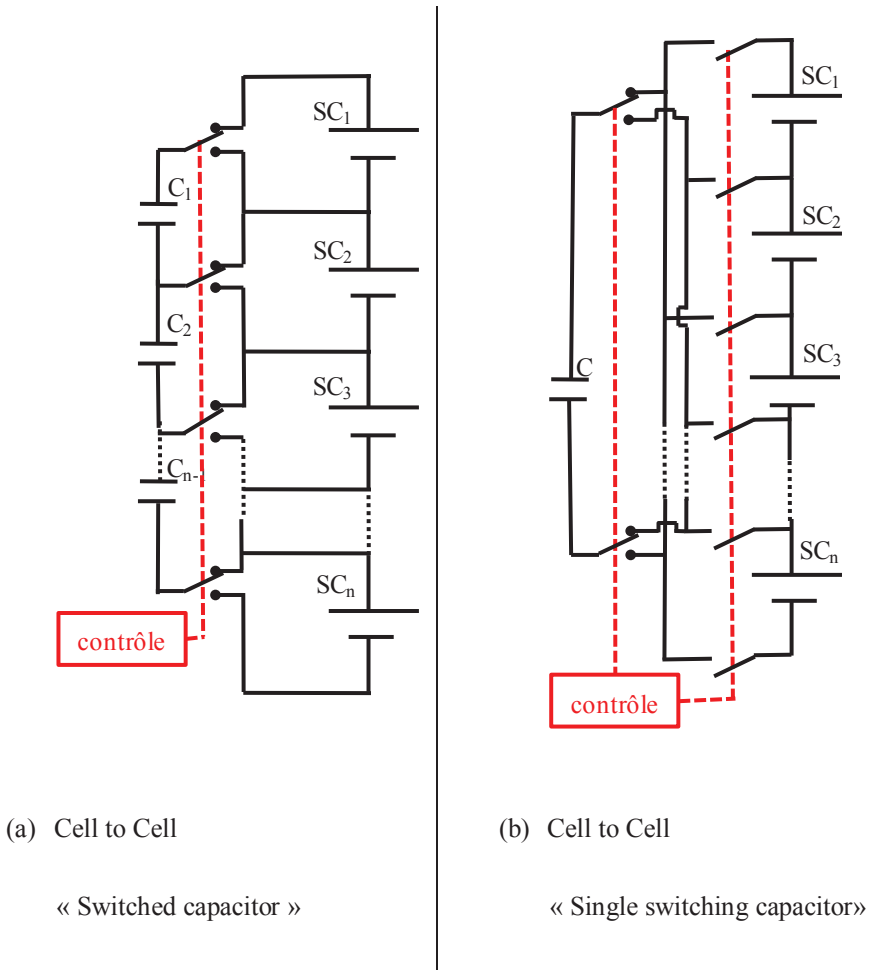


Figure 1.41 Schémas électriques de circuits d'équilibrage à base de condensateurs

Les circuits à base de condensateurs commutés représentés sur les figures 1.41 (a) et 1.41 (b) [65], représentent les circuits les plus simples et les plus répandus en ce qui concerne l'équilibrage non dissipatif. Leur principe consiste à transférer l'énergie de la cellule la plus chargée à la moins chargée via des condensateurs qui sont mis en service à l'aide d'interrupteurs. Le système « Switched capacitor » est constitué d'un condensateur et deux interrupteurs entre chaque paire de supercondensateurs adjacents. Cette configuration assure l'équilibrage sous le mode « Cell to Cell » et la charge est transférée seulement entre deux cellules adjacentes. Le système « Single switched capacitor » se base sur le même principe mais avec un seul condensateur et plusieurs liaisons d'interrupteurs. Cette configuration assure l'équilibrage en mode « Cell to Cell » et la charge circule entre deux cellules quel que soit leur emplacement dans le module.

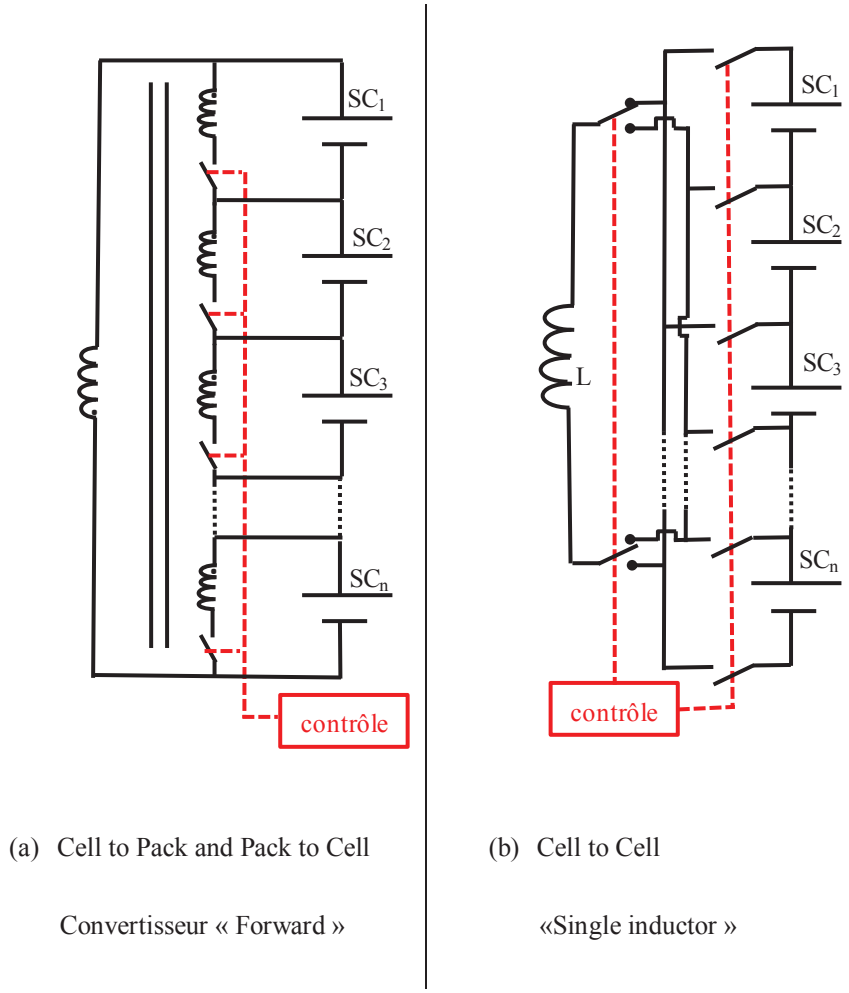


Figure 1.42 Schémas électriques de circuits d'équilibrage à base de d'inductances ou de transformateur et de convertisseurs

La figure 1.42 (a) représente le schéma simplifié d'un circuit d'équilibrage à base de convertisseur « Forward » [66]. Cette configuration, permet d'avoir plusieurs secondaires d'un transformateur reliant individuellement les cellules au module complet. Le transfert d'énergie peut s'effectuer en mode « Cell to pack » en activant l'interrupteur se trouvant aux bornes du supercondensateur choisi. Ce dernier va transférer son excès d'énergie au module. Le transfert d'énergie peut s'effectuer aussi en mode « Pack to cell » par le même procédé. Le module va alors transférer l'énergie stockée vers le supercondensateur déchargé choisi.

La figure 1.42 (b) représente le schéma simplifié d'un circuit d'équilibrage à base de d'une inductance. Le système « Single inductor » se base sur le même principe que le système « Single switched capacitor » pour équilibrer les tensions, l'élément de stockage d'énergie temporaire capacitif étant remplacé par un élément inductif. Cette configuration assure

l'équilibrage en mode « Cell to Cell » et l'énergie est transferée entre deux cellules quel que soit leur emplacement dans le module.

Ce paragraphe décrit les circuits d'équilibrage les plus répandus. On peut retrouver d'autres architectures (de type modulaire par exemple) dans chaque catégorie ou des combinaisons d'architectures afin de rassembler les avantages de chaque topologie [67][68][69][70][71].

4.5.3 Comparaisons des circuits d'équilibrage

Quelques critères sont importants pour choisir les circuits d'équilibrage lors de leur achat ou de leur conception. Ces critères sont le coût, la dimension, la masse, le temps d'équilibrage, la maintenance et le contrôle (tableau 1.3).

Tableau.1. 3. Comparaison des circuits d'équilibrage

	Coût	**Taille et Poids**	**Période d'équilibrage**	**Temps d'équilibrage**	**Perte**	**Maintenance**	**Contrôle**
Dissipatif	Faible	Petit Léger	Charge Repos	Moyen	☹	Simple	Simple
Non dissipatif à base de condensateur(s)	Faible/ Moyen	Petit Léger	Charge Repos Décharge	Moyen /Long*	😐	Simple /Moyenne	Moyen
Non dissipatif à base d'inductance(s)	Elevé	Volumineux Lourd	Charge Repos Décharge	Rapide /Moyen*	☺	Moyenne*	Complexe*
Non dissipatif à base de convertisseur(s)	Elevé	Volumineux Lourd	Charge Repos Décharge	Rapide	☺	Complexe	Complexe

* : dépendant de l'architecture et du type de transfert « Cell to Cell » entre cellules adjacentes ou « Cell to Pack » et « Pack to Cell » [53].

Les circuits d'équilibrage dissipatif et à base de condensateurs présentent l'avantage d'un coût relativement faible car ils ne sont constitués uniquement par des MOSFETs et des

résistances ou des condensateurs peu coûteux. Les autres circuits sont plus chers, plus complexes, ils contiennent plus de composants électroniques ainsi que des inductances.

De même que pour le prix, les circuits dissipatifs et non dissipatifs capacitifs ont l'avantage d'être non encombrants et légers.

Le temps d'équilibrage est le temps nécessaire pour ramener tous les éléments d'un module de stockage d'énergie à un même état de charge. Il est fortement corrélé au niveau de dispersion des paramètres des supercondensateurs (en particulier des capacités) entres les éléments d'un même module de stockage. Pour les mêmes conditions de dispersion, l'équilibrage le plus rapide est celui à base de convertisseurs avec transformateur ou inductances. Les circuits d'équilibrage à base de condensateurs présentent l'inconvénient d'un équilibrage de durée assez longue [72]. Par ailleurs, les circuits d'équilibrage à base de condensateurs ou d'inductances ont un temps d'équilibrage plus long lorsque le mode de transfert d'énergie est entre cellules adjacentes. Ainsi, dans ce dernier cas, plus le module est constitué d'un nombre important d'éléments plus cet équilibrage est lent. Les circuits d'équilibrage dissipatif quant à eux ont un temps d'équilibrage dépendant de la résistance d'équilibrage choisie [58].

Les circuits d'équilibrage dissipatif présentent l'inconvénient de dissiper l'énergie du système de stockage d'énergie pour établir l'égalisation des tensions de ses éléments. Les circuits non dissipatifs dissipent moins d'énergie mais ne sont pas parfaits et la dissipation y existe aussi. Elle est causée par les résistances internes des composants tels que les inductances, les transistors, …

Compte tenu de la simplicité relatives des circuits dissipatifs et non dissipatifs capacitifs, la maintenance est moindre sur ceux-ci.

Le circuit d'équilibrage dissipatif compte tenu de sa simplicité, de sa compacité, d'une maintenance limitée et de son faible coût est le plus populaire et le plus utilisé par les industriels. Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont donc été appliqués sur ce type de circuit. Néanmoins certaines études effectuées sur les circuits d'équilibrage dissipatif peuvent être transposables à des circuits d'équilibrage non-dissipatif.

4.5.4 Quelques exemples de commandes des circuits d'équilibrage

Le contrôle des circuits d'équilibrage consiste en la commande des MOSFETs afin d'organiser le transfert ou la dissipation d'énergie dans le but d'égaliser les états de charge des éléments du module de stockage.

La commande la plus simple est celle du circuit d'équilibrage dissipatif car elle consiste à fermer les interrupteurs lorsque la tension aux bornes des supercondensateurs est supérieure à un seuil de tension défini. Le contrôleur est alors un simple comparateur de tension (figure 1.43).

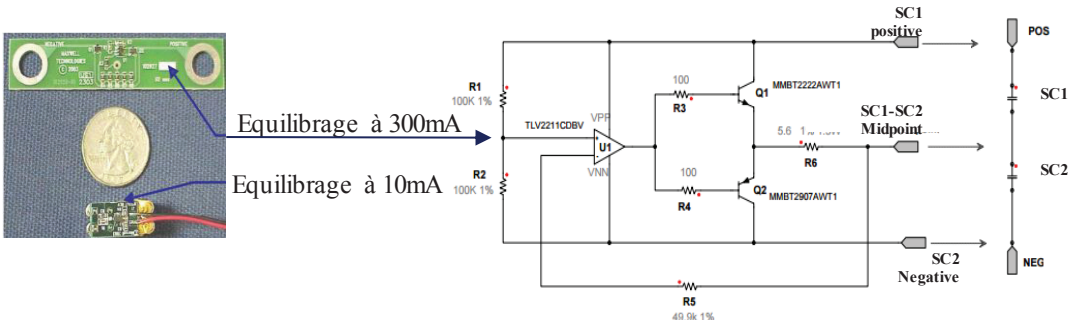


Figure 1.43 Circuit d'équilibrage dissipatif de Marque Maxwell

Pour d'autres cas, la commande est plus développée et consiste à comparer l'ensemble des tensions mesurées, fixer le minimum et à partir d'une commande TOR (Tout Ou Rien), programmée dans le contrôleur du SMC, décider de fermer l'interrupteur des éléments ayant une tension supérieure au seuil choisi. Une tolérance de dispersion ou hystérésis peut être utilisée entre les éléments de stockage en série. Sa valeur correspond en général à l'incertitude sur la mesure de tension (de l'ordre d'une dizaine de mV).

Les stratégies de contrôle des circuits d'équilibrage non dissipatif, programmées dans le contrôleur du SMC, sont plus compliquées et plus l'architecture du système d'équilibrage est complexe plus la commande le devient aussi.

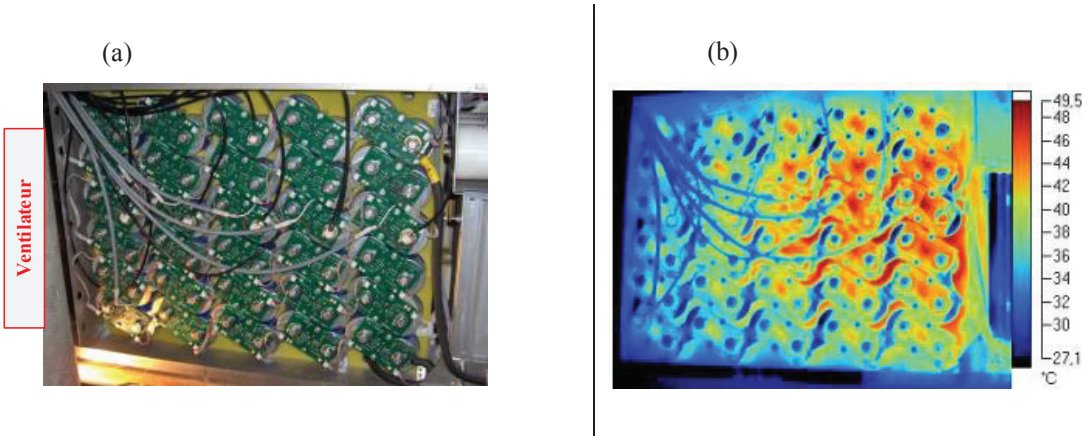
La commande des circuits non dissipatifs utilise le plus souvent la technique MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion), aussi connu sous l'appellation anglophone de PWM (Pulse With Modulation) où les variables à commander sont la fréquence et le rapport cyclique du signal de commande [66][73][74][75].

D'autres commandes sont plus complexes. On parle alors de commande intelligente. Les couples fréquence et rapport cyclique sont alors adaptés pour chaque signal [72], grâce à des outils d'automatique (commande optimale par exemple). Les objectifs sont de contrôler les courants d'équilibrage, d'optimiser le temps nécessaire à l'égalisation des tensions des différentes cellules et de réduire les pertes dues à la commutation. Ce contrôle est efficace car il cible les cellules à charger ou à décharger pour atteindre ses objectifs [76][77][78]. Il reste néanmoins souvent au stade expérimental car il est compliqué et gourmand en termes de temps de calcul. Il nécessite aussi la connaissance du comportement de la cellule surveillée, du courant circulant dans les inductances, etc. Compte tenu de leur complexité, ces stratégies coûteuses et complexes sont en général peu utilisées industriellement.

4.6 Présentation de la problématique et du travail demandé

En plus des problèmes d'équilibrage des tensions, un second problème se pose dans les systèmes de stockage d'énergie associant plusieurs cellules, à savoir la dispersion de température. En effet suivant leur emplacement dans le module de stockage mais aussi leur état de santé, les supercondensateurs sont sollicités différemment en température (cf. § 3. « Problématique de la gestion d'un système de stockage d'énergie »). La dispersion de température peut atteindre plus de 10°C entre éléments d'un même module.

La figure 1.44 ci-dessous représente la distribution de température dans un module de stockage constitué de 120 supercondensateurs en série. Ce dernier a fait l'objet au laboratoire Ampère d'une expérimentation permettant l'étude de l'évolution des caractéristiques des supercondensateurs dans une application de type récupération d'énergie de freinage pour un trolleybus [33].



(a) Photo de la face instrumentée du module de stockage

(b) Photo thermique de la face instrumentée du module de stockage

Figure 1.44 Photo et image thermographique de la face instrumentée du module de stockage d'énergie [33]

On peut observer sur la figure 1.44 (b) une grande disparité thermique entre les cellules.

La température est un facteur très influant sur la durée de vie du supercondensateur. Les actions actuelles des systèmes de gestion d'énergie pour faire face à cette dispersion et hausse de température potentielle sur certaines cellules sont le contrôle de la sécurité et la gestion thermique. Le contrôle consiste à alerter l'utilisateur et/ou à réduire ou interrompre l'utilisation lorsqu'un seuil de température maximal est atteint. La gestion thermique permet par l'activation d'un système de refroidissement (par exemple un ventilateur) de réduire la température des cellules et d'homogénéiser la température du module. Cette dernière action reste néanmoins difficile à réaliser et des écarts de température importants peuvent persistées comme cela est visible sur la figure 1.44 (b).

Les dispersions de tension et de température engendrent une dispersion des états de santé et des durées de vie des différentes cellules. Cette dernière va ramener le module de supercondensateur à une durée de vie limitée par son élément le plus faible (équation 1.12).

On se propose dans ce travail de thèse d'exploiter le système de gestion d'énergie déjà présent afin de résoudre le problème de dispersion d'état de santé des cellules et ainsi de maximiser la durée de vie du système de stockage d'énergie.

Une première approche de commande des circuits d'équilibrage ayant pour but la prolongation de la durée de vie des supercondensateurs a été réalisée au laboratoire AMPERE durant les travaux de thèse de Paul Kreczanik [33]. Les travaux réalisés consistaient à commander les circuits d'équilibrage afin d'égaliser les températures des cellules (en jouant sur leur échauffement) et ainsi les durées de vie.

Cette première approche, prometteuse, a ouvert l'horizon vers de nouveaux objectifs de commande des circuits d'équilibrage. En plus de la maximisation de la capacité de stockage, l'objectif des travaux présentés est la maximisation de la durée de vie des systèmes de stockage surveillés.

Le principe général du travail consiste à commander les circuits d'équilibrage déjà présents dans le système, non pas pour égaliser les tensions entre les éléments, mais pour adapter la sollicitation de chaque supercondensateur à son niveau de dégradation. Ainsi les éléments les plus vieillis seront moins sollicités électriquement et inversement. Cette commande d'équilibrage ne se base plus sur la tension aux bornes des cellules mais prend en considération les sollicitations de toutes les cellules dans le but de prolonger au maximum la durée de vie du module. Pour ce faire, deux étapes sont nécessaires. La première étape consiste à estimer l'état de santé et la durée de vie de chaque élément afin d'évaluer leur vitesse de dégradation. La deuxième étape concerne la commande des circuits d'équilibrage qui a pour objectif l'optimisation de l'état de santé global du module de stockage et ainsi la maximisation de sa durée de vie.

5 Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation de deux principales thématiques de ce travail de thèse, à savoir les systèmes de stockage d'énergie et les systèmes de gestion d'énergie intégrant les circuits d'équilibrage. Nous avons présenté les problématiques qui se posent lors de l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie ainsi que celles qui ont amené à réaliser ce travail de recherche.

Notre travail dans cette thèse a deux objectifs qui sont l'estimation et la maximisation de la durée de vie via la commande des circuits d'équilibrage. Ces deux objectifs et leur réalisation sont présentés dans les chapitres 2 et 3 respectivement. Le dernier chapitre sera consacré à l'étude expérimentale de l'association des deux objectifs à travers une maquette d'essai.

Chapitre 2 : Surveillance de la durée de vie des supercondensateurs par commande de leurs circuits d'équilibrage

1 Introduction

Les supercondensateurs ont une durée de vie finie, durant laquelle leurs paramètres internes se dégradent. L'information sur la vitesse de dégradation est essentielle à toute intervention préventive. Il est donc essentiel de connaître l'état de santé de chaque cellule constituant le module de stockage afin d'estimer sa vitesse de dégradation et d'approximer sa fin de vie.

Ce chapitre est consacré aux méthodes permettant de quantifier l'état de santé du supercondensateur. La première partie est consacrée à l'introduction de quelques méthodes existantes dans la littérature permettant de caractériser la cellule. La deuxième partie est consacrée à la présentation des nouvelles méthodes que nous avons proposées et qui exploitent les systèmes de gestion d'énergie et leurs circuits d'équilibrage. Ces méthodes ont été étudiées développées et validées durant cette thèse afin qu'elles soient intégrées dans la suite du travail qui concerne le contrôle des circuits d'équilibrage pour maximiser la durée de vie du système de stockage d'energie.

2 Exemples de méthodes d'évaluation des états de santé des supercondensateurs

Le vieillissement du supercondensateur est caractérisé essentiellement par une baisse de capacité et une augmentation de la résistance équivalente série (ESR). Ces deux paramètres vont évoluer, durant la vie du supercondensateur, de leur valeur initiale jusqu'à atteindre un critère de fin de vie. L'état de santé du supercondensateur se base donc sur sa capacité et/ou sa résistance équivalente séries (équations 1.13 et 1.14).

Dans cette partie, nous présentons les méthodes existantes permettant de quantifier la capacité et l'ESR actuelles d'un supercondensateur. Selon les phénomènes que l'on désire représenter, ces méthodes permettent aussi de définir d'autres paramètres selon le modèle théorique choisi (cf. chapitre 1 §2.1.6. « Quelques exemples de modélisation du supercondensateur »). Ces méthodes sont classées en deux catégories, hors ligne et en ligne.

2.1 Les méthodes hors ligne

Les méthodes hors ligne sont des méthodes qui nécessitent d'isoler les supercondensateurs de toute sollicitation émanant de l'application afin de les soumettre à une sollicitation électrique bien définie. Elles consistent à exploiter la réponse du supercondensateur à cette dernière. Ces méthodes se séparent en deux grandes familles en fonction du type de sollicitation électrique (alternative ou continue)

2.1.1 La caractérisation temporelle

La caractérisation temporelle consiste à appliquer un profil de charge et/ou de décharge, par exemple à courant constant, au supercondensateur et à analyser sa réponse en tension en se basant sur un modèle défini (modèle constructeur par exemple cf. chapitre 1 §2.1.6.1. « Le modèle constructeur »)

D'autres profils de caractérisation à tension ou a puissance constante existent mais sont moins répandus [3].

Certains systèmes de gestion d'énergie se basent sur la caractérisation temporelle pour estimer l'ESR et la capacité des cellules surveillées.

Un premier exemple, le circuit BQ3310 produit par «Texas Instrument», intègre dans ses fonctions l'estimation de l'ESR et de la capacité grâce au contrôle d'un circuit externe qui délivre un courant constant de 500mA (figure 2.1) [79].

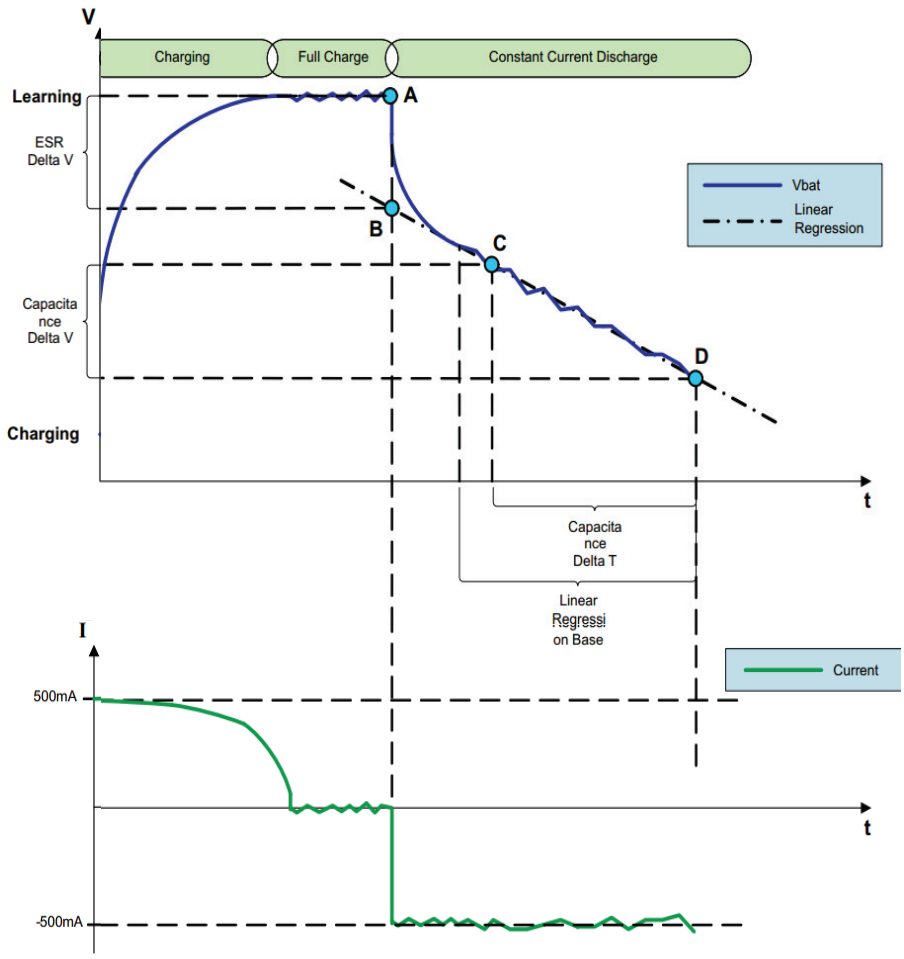


Figure 2.1 Protocole de test du DQ3310 [79]

Les estimations de C et ESR sont réalisées grâce aux formules suivantes :

$$C = I \cdot \frac{t(D) - t(C)}{V(C) - V(D)} \qquad (2.1)$$

$$ESR = \frac{V(A) - V(B)}{I} \qquad (2.2)$$

Un second exemple, le circuit LTC3350 produit par « Linear Technology » intègre aussi dans ses fonctions l'estimation de l'ESR et de la capacité grâce au contrôle de son chargeur intégré. L'estimation de la capacité est réalisée en fin de charge, en déchargeant le supercondensateur de 200 mV avec un courant prédéfini et en mesurant le temps de décharge. L'ESR, quant à elle, est estimée juste après la mesure de la capacité en commutant plusieurs

fois l'interrupteur contrôlant le chargeur intégré. Les variations de tension et de courant mesurées permettent d'estimer cette ESR [80].

Comme la caractérisation de ces deux paramètres est sensible à la mesure, les constructeurs avertissent l'utilisateur de la possibilité d'échec des méthodes. Ils conseillent aussi que ces tests soient exécutés plusieurs fois lors de la première mise sous tension afin d'obtenir une plus grande précision [80].

2.1.2 La caractérisation fréquentielle

La caractérisation fréquentielle est réalisée usuellement avec un spectromètre d'impédance et est connue sous le nom de spectroscopie d'impédance électrochimique, ou d'EIS (Electrochemical Impédance Spectroscopy). Elle permet de mettre en évidence la présence de différentes cinétiques de réactions, modélisées sous forme d'impédance suivant le modèle choisi [5].

Le principe de la caractérisation fréquentielle consiste à injecter un signal sinusoïdal de faible amplitude, soit une tension (mode potentiostatique ou PEIS), soit un courant (mode galvanostatique ou GEIS), à la cellule à caractériser et à analyser l'amplitude et le déphasage de sa réponse. Cette dernière permet de tracer l'impédance du système pour une plage de fréquences donnée.

L'expression de l'impédance d'un système est la suivante :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{sc}(\omega) &= Z_{sc}\exp(j\theta) = Z_{sc}\cdot[\cos(\theta) + j\cdot\sin(\theta)] \\ &= Re\left(\underline{Z}_{sc}(\omega)\right) + j\cdot Im\left(\underline{Z}_{sc}(\omega)\right) \end{aligned} \tag{2.3}$$

avec

- $\underline{Z}_{sc}(\omega)$ l'impédance complexe du système analysé,
- Z_{sc} le module de l'impédance,
- θ la phase de l'impédance.

De cette expression, plusieurs représentations de l'impédance peuvent être établies en utilisant par exemple les diagrammes de Bode ou de Nyquist.

Les figures 2.2 et 2.3 ci-dessous représentent les diagrammes de Bode en module et en phase d'un supercondensateur de 3000 F caractérisé à 25 °C en galvanostatique avec un courant sinusoïdal d'amplitude 5 A et pour une tension de polarisation continue de 2.7 V.

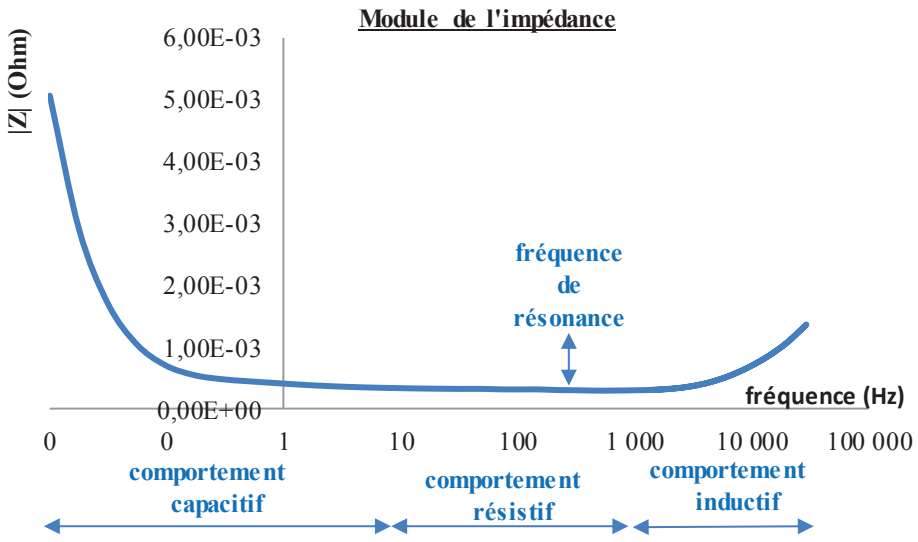


Figure 2.2 Module du diagramme de Bode, caractérisation à 2.7 V et à 25 °C

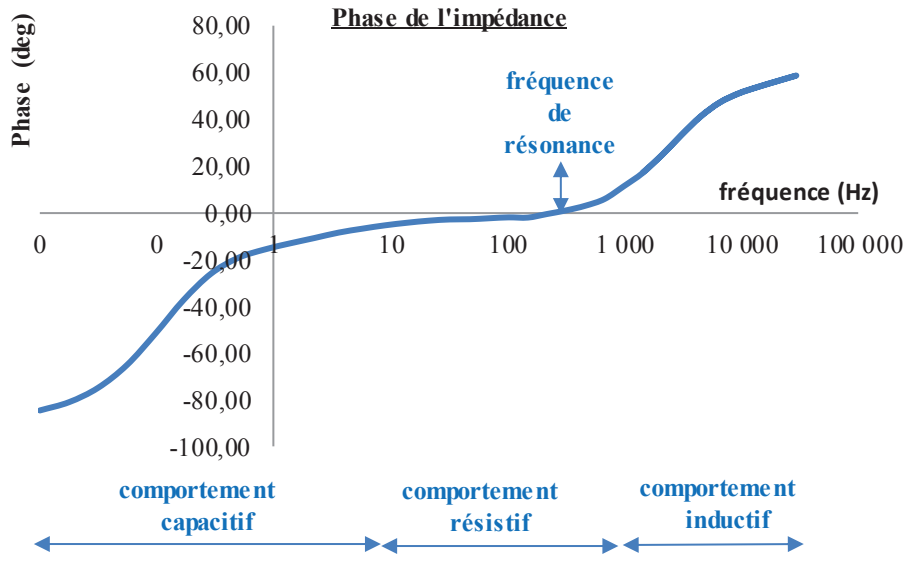


Figure 2.3 Phase du diagramme de Bode, caractérisation à 2.7 V et à 25 °C

On remarque sur les figures 2.2 et 2.3 ci-dessus que le comportement du supercondensateur change suivant la fréquence de sollicitation. On observe trois tendances. La première tendance est capacitive. A faible fréquence, la phase de l'impédance est négative et

l'impédance est majoritairement capacitive. Pour ces faibles fréquences, le supercondensateur a le temps de se charger et de se décharger permettant à la cellule de remplir sa fonction d'élément de stockage. La deuxième tendance est résistive. Pour une fréquence donnée, c'est-à-dire la fréquence de résonance, la phase de l'impédance est presque nulle et l'impédance est alors égale à un réel pur. La troisième tendance est inductive. A haute fréquence, la phase de l'impédance est positive et l'impédance du supercondensateur est majoritairement inductive. A ces fréquences, les charges positives et négatives dans l'électrolyte n'ont pas le temps de se « fixer » sur les électrodes correctement.

A partir des figures 2.2 et 2.3, la détermination de la capacité du supercondensateur est obtenue grâce au module de l'impédance à basse fréquence (par exemple pour $f_c \approx 100$ mHz) (équation 2.4). La détermination de l'ESR est quant à elle obtenue grâce au module de l'impédance à la fréquence de résonance ($f_r \approx 400$ Hz) (équation 2.5).

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot Z_{SC}(f_c)} \qquad (2.4)$$

$$ESR = Z_{SC}(f_r) \qquad (2.5)$$

2.2 Les méthodes en ligne

Les méthodes en ligne ne nécessitent pas l'arrêt de l'application du supercondensateur. Elles analysent et exploitent les réponses électriques de ce dernier lors de son utilisation dans le cadre de l'application.

Ces méthodes se basent généralement sur un modèle électrique dont la réponse doit se rapprocher du comportement réel de l'élément surveillé. Parmi les méthodes exploitant un modèle on retrouve les estimateurs et les reconstructeurs d'état ou observateurs.

2.2.1 L'estimateur

L'estimateur est un système exploitant les entrées du processus réel dont la sortie est une estimation non mesurée de l'état de processus (figure 2.4) [81]. Son objectif est de reconstruire des grandeurs non mesurables qui peuvent être pour notre cas les paramètres

internes du modèle électrique choisi (ESR et capacité par exemple pour un modèle constructeur).

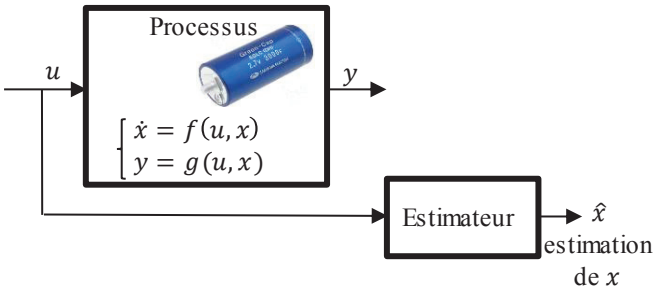


Figure 2.4 Principe d'un estimateur : u entrée du processus, y sortie du processus, x paramètres d'état

2.2.2 L'observateur

L'observateur est un estimateur pour lequel les variables d'état estimées sont corrigées par un terme qui dépend du résidu entre les sorties réelles du processus et celles estimées grâce au modèle théorique (figure 2.5).

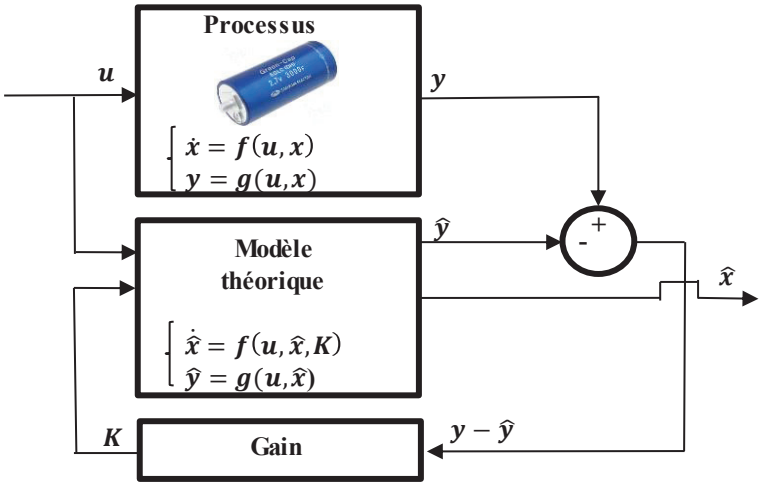


Figure 2.5 Principe d'un observateur : u entrée du processus, y sortie du processus, $\hat{y}$ sortie estimée, x paramètres d'état, K facteur correcteur

De nombreuses recherches se sont intéressées à l'utilisation de différents observateurs afin d'estimer l'état d'éléments de stockage comme les batteries lithium-ion [82][83][84].

Les méthodes en ligne semblent plus opportunes pour les systèmes de gestion d'énergie. Cela permet une caractérisation en ligne sans besoin d'interrompre l'utilisation. Par ailleurs, elles ne nécessitent pas de matériel spécifique (spectromètre d'impédance, source de courant, ...).

Un des inconvénients majeurs des méthodes en ligne est l'impact important du modèle sur la détermination des paramètres. En effet le choix du modèle est limitant car il faut qu'il soit assez simple pour réduire les temps de calcul, et en même temps suffisamment représentatif du comportement étudié. C'est la partie la plus délicate pour ces méthodes car trouver un bon compromis entre simplification de calcul et représentativité du modèle n'est pas toujours aisé. De plus l'estimation des paramètres d'état n'est réalisable que si le processus est observable. L'observabilité d'un processus est la propriété qui permet de dire si les grandeurs d'état peuvent être déterminées uniquement à partir de la connaissance de l'information des entrées et sorties du processus analysé.

Concernant le supercondensateur, ce dernier est considéré comme un composant non-linéaire en raison de la dépendance de ses paramètres internes à son potentiel. L'entrée de son modèle est le courant et sa sortie la tension. Ce système jusqu'à aujourd'hui présente l'inconvénient d'observabilité [85][86]. En effet dans le cas des systèmes non linéaires, la notion d'observabilité est liée aux entrées et aux conditions initiales [87]. Une charge à courant constant, sinusoïdale ou exponentielle ne remplit pas les conditions d'observabilité du processus le rendant inobservable. Une solution consiste à injecter un bruit au signal d'entrée et appliquer un observateur étendu adapté (filtre de Kalman étendu) [85][86] [88].

L'exploitation des observateurs pour estimer et surveiller l'état de santé des supercondensateurs fait partie des perspectives de ce travail de thèse. Notre objectif premier était d'exploiter les circuits d'équilibrage comme première approche pour la surveillance de l'état de santé des supercondensateurs grâce à des lois de commande qui sont simples et pouvant être implémentées aisément sur des contrôleurs.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous proposons donc de présenter une nouvelle méthode simple ayant comme objectif le suivi de l'état de santé du supercondensateur à travers l'estimation de ses paramètres internes instantanés. Par ailleurs, celle-ci utilise un matériel déjà existant, à savoir le système de gestion d'énergie et son système d'équilibrage associé.

3 Principe général de la surveillance de la durée de vie par commande des circuits d'équilibrage

Le principe général de la surveillance de l'état de santé des supercondensateurs est représenté sur la figure 2.6 ci-dessous. L'objectif est d'extraire un indicateur de durée de vie

des supercondensateurs avec le matériel présent dans le système en commandant judicieusement les circuits d'équilibrage.

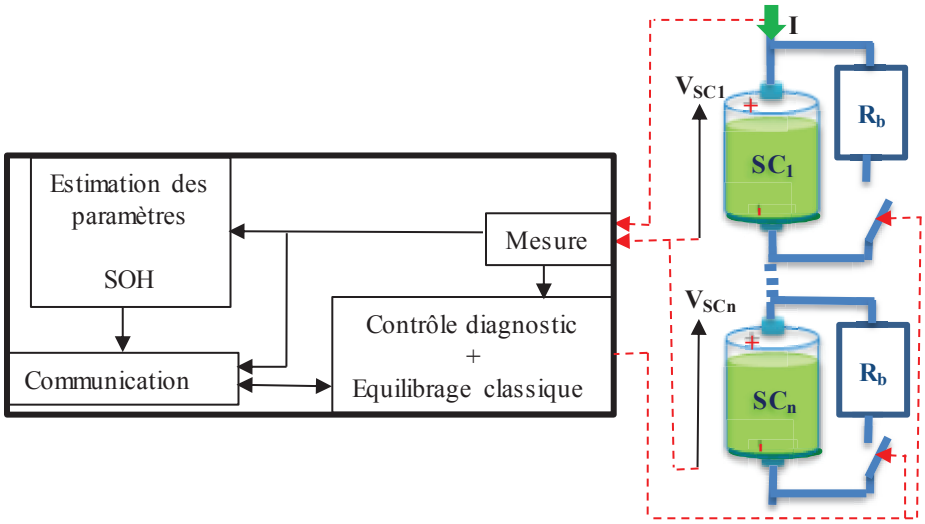


Figure 2.6 Principe de surveillance de la durée de vie des supercondensateurs

Les supercondensateurs bénéficient d'une grande durée de vie durant laquelle les paramètres internes évoluent très lentement. Les stratégies de diagnostic proposées peuvent être rajoutées aux fonctions du SCM et exécutées occasionnellement. Durant l'utilisation du module de stockage, les circuits d'équilibrage continuent donc à assurer leur fonction classique et occasionnellement, à intervalle de temps fixe par exemple ou sous la demande de l'utilisateur, réalisent le diagnostic de l'état de santé des cellules. Ce diagnostic permet alors de prévoir les interventions de maintenance et d'éviter les arrêts intempestifs.

3.1 Choix de l'estimation instantanée de la résistance équivalente série

Les nouvelles approches proposées dans ce mémoire se basent sur le suivi de l'évolution de l'ESR. Ce choix a été effectué car d'une part l'augmentation de l'ESR est quasiment systématique avec le vieillissement et d'autre part pour des raisons de simplicité sachant que sa détermination est plus facilement détectable que celle de la capacité.

Durant le diagnostic, on se propose d'exploiter les circuits d'équilibrage dissipatif ce qui signifie que l'on va contrôler le courant dans les circuits d'équilibrage pour engendrer des signaux utiles à l'identification de l'ESR instantanée ESR(t). L'ESR se manifeste par une chute de tension très brève en début/fin de charge/décharge (détectable en un temps de l'ordre de

10 ms ou d'une fréquence de l'ordre de 100 Hz). La capacité, quant à elle, représente le phénomène de stockage d'énergie et nécessite un intervalle de temps plus important pour être identifiée (de l'ordre d'une dizaine de s ou d'une fréquence de l'ordre de 100 mHz). Comme la détermination de l'ESR nécessite donc un temps nettement plus court que celui de la capacité, la durée de l'estimation peut être brève et l'énergie dissipée dans les résistances d'équilibrage moindre. La surveillance de l'ESR est donc plus économique en termes de pertes énergétiques. Par ailleurs, des recherches réalisées sur le vieillissement du supercondensateur ont montré que pour une sollicitation donnée l'évolution de l'ESR peut être considérée comme linéaire [8][89].

La figure 2.7 suivante représente un exemple d'évolution d'ESR pour trois supercondensateurs de 3000 F qui ont subi un vieillissement calendaire accéléré à contraintes constantes de 50° C et de 2.8 V [8]. Comme nous pouvons le constater, une évolution linéaire de l'ESR, représentée par les droites en pointillé, lors d'un vieillissement, est cohérente.

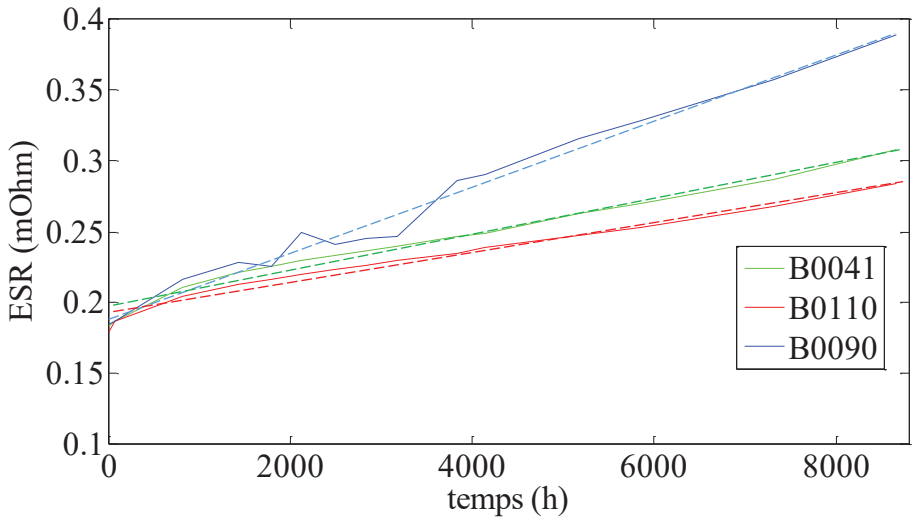


Figure 2.7 Evolution de l'ESR de supercondensateurs au cours du temps pour un vieillissement calendaire [8]

3.2 Définition de la durée de vie prévue

La durée de vie prévue ou ELD (Estimated Life Duration) est un paramètre permettant d'anticiper la défaillance du supercondensateur surveillé. Son calcul nécessite la connaissance de l'ESR initiale (ESR(0)), de l'ESR actuelle estimée à l'instant t (ESR(t)), de l'ESR précédente sauvegardée par le SCM (ESR(t-Δt)) et de la période d'échantillonnage (Δt). En considérant une évolution temporelle linéaire de l'ESR et un critère de fin de vie correspondant à un

doublement de l'ESR initiale, l'ELD est exprimée comme suit (cf. equation.2.6). La figure 2.8 représente le principe de la détermination de l'ELD.

$$ELD = \frac{2 \cdot ESR(0) - ESR(t)}{ESR(t) - ESR(t - \Delta t)} \cdot \Delta t \qquad (2.6)$$

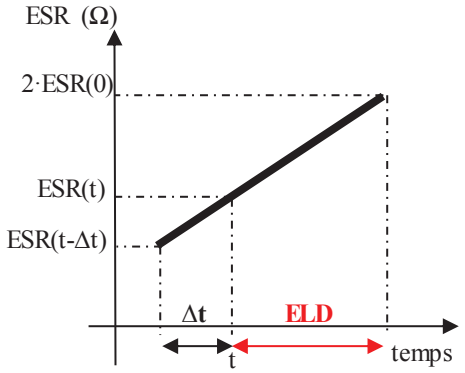


Figure 2.8 Principe d'estimation de la durée de vie prévue

L'estimation de la durée de vie prévue considère uniquement une évolution linéaire à partir de l'ESR précédemment sauvegardée (ESR(t-Δt)) et non de l'ESR initial (ESR(0)). En effet, si au cours du temps, les conditions d'utilisation changent, en devenant par exemple plus contraignantes, la vitesse de dégradation de l'ESR change également. L'ELD en prenant en considération ESR(t-Δt) permet de se rapprocher de l'évolution réelle de l'ESR.

La figure 2.9 représente cette problématique. La droite en pointillé bleu représente la variation de l'ESR en considérant seulement l'ESR initial (ESR(0)) et l'ESR actuel (ESR(t)). Elle permet de déterminer ELD_1. Cette évolution n'est pas représentative de la vraie évolution de l'ESR. En effet, à partir de t_v, on remarque une variation de l'évolution de l'ESR qui peut être due à des sollicitations plus contraignantes. La pente de l'ESR en fonction du temps devient plus importante. La droite en pointillé rouge représente la variation de l'ESR en considérant l'ESR précédemment sauvegardée (ESR(t-Δt)) et l'ESR actuel (ESR(t)). Elle permet de déterminer ELD_2. On observe sur cette représentation que l'estimation de la durée de vie prévue ELD_2 est proche de la réalité puisqu'elle suit pas à pas l'ESR estimée.

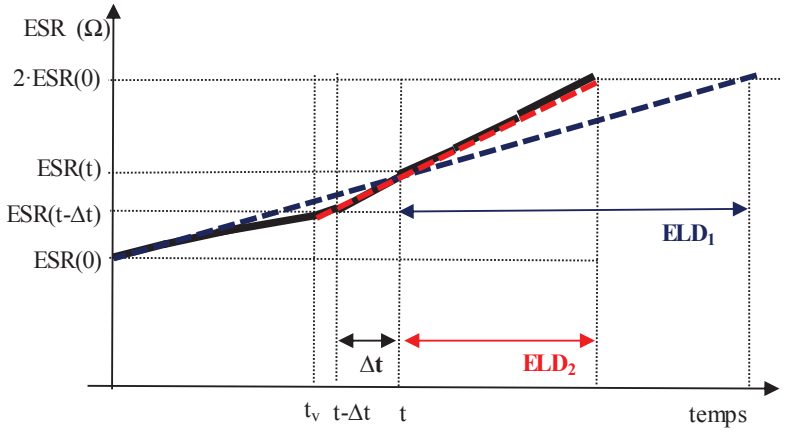


Figure 2.9 Estimation de l'ELD

3.3 Variation de la résistance estimée en fonction des conditions d'utilisation

Cette partie traite de la dépendance de l'ESR instantanée (ESR(t)) avec les conditions d'utilisation du supercondensateur. Les conditions prises en comptes sont la tension et la température de la cellule. Des spectroscopies d'impédance ont été réalisées sur plusieurs supercondensateurs dans des conditions différentes dans le but d'analyser le comportement résistif de ces derniers.

Les différentes caractérisations ont montré une variation de l'ESR mesurée en fonction de la température et de la tension.

La figure 2.10 ci-dessous, représente la variation de l'ESR d'un supercondensateur de 3000 F en fonction des conditions de tension et de température.

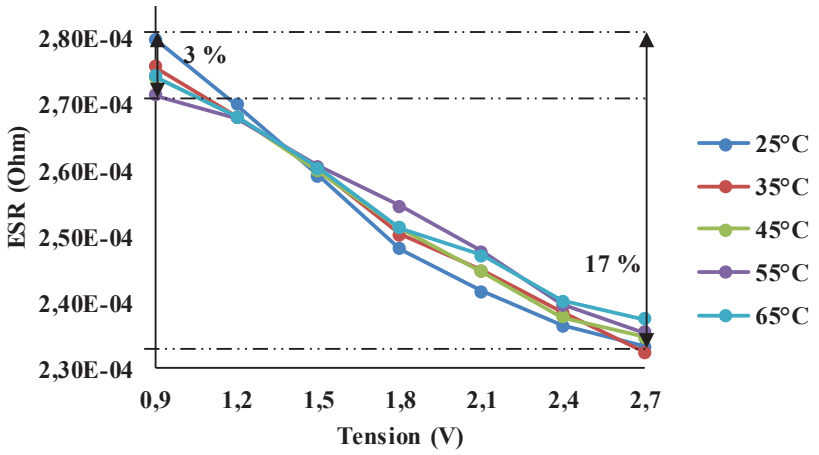


Figure 2.10 Variation de l'ESR en fonction des conditions de température et de tension

On remarque sur cette figure que la variation de l'ESR en fonction de la température (de 3 %) est négligeable par rapport à la variation de l'ESR en fonction de la tension (de 17 %).

Il est donc indispensable de ne pas négliger l'influence de la tension de la cellule lors de l'estimation et le suivi de son ESR. Une première solution consiste à réaliser l'estimation de l'ESR instantanée, chaque fois à un même niveau de tension, par exemple à tension nominale. Si cette condition n'est pas réalisable, une deuxième solution consiste à identifier l'ESR pour une tension (et éventuellement une température) donnée(s) et de comparer sa valeur à celle de la valeur initiale de l'ESR, (ESR(0)), pour cette même tension (et température) (figure 2.11).

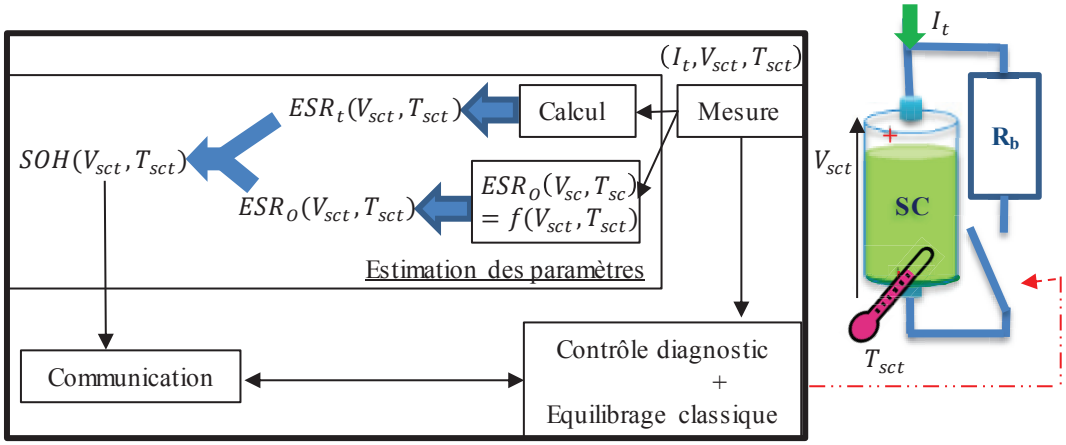


Figure 2.11 Estimation du SOH pour n'importe quelle condition environnementale

Cette correction de l'ESR est inspirée du travail de P. Venet pour le diagnostic intelligent des condensateurs où l'ESR initial du composant est déterminée grâce à sa température [5].

La figure 2.12 suivante représente un exemple de courbe de tendance de l'ESR en fonction de la température et de la tension d'un supercondensateur de 3000 F. Les points en rouge représentent les valeurs expérimentales des ESR obtenues par spectroscopie d'impédance. Le plan de couleur bleue représente le plan théorique de tendance de l'ESR dont l'équation théorique est donnée ci-dessous (équation 2.7).

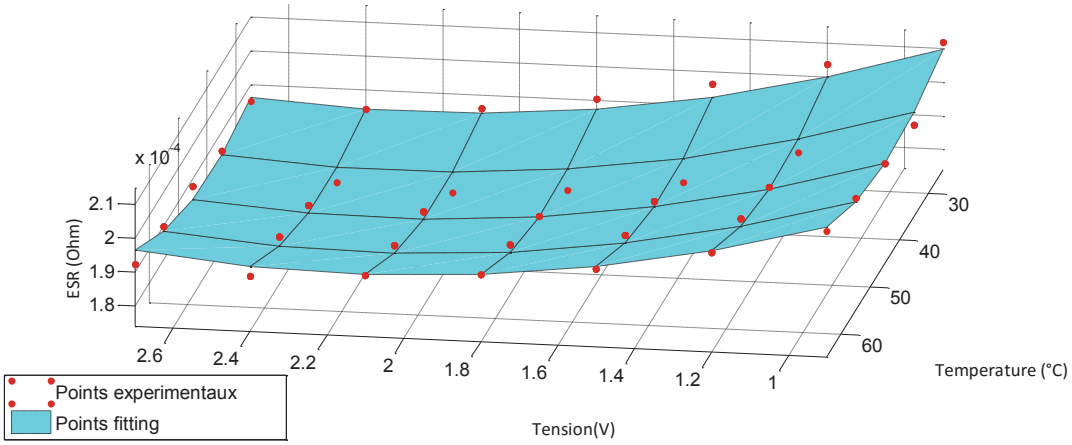


Figure 2.12 Variation de l'ESR en fonction de la température et de la tension

$$ESR(V_{SC}, T_{SC}) = a + b \cdot V_{SC} + c \cdot T_{SC} + d \cdot {V_{SC}}^2 + e \cdot V_{SC} \cdot T_{SC} + f \cdot {T_{SC}}^2 \qquad (2.7)$$

avec :

$a = 2.84 \cdot 10^{-4}\ \Omega$

$b = -6.27 \cdot 10^{-5}$ (Ω/V)

$c = -1.71 \cdot 10^{-6}$ (Ω/(°C))

$d = 1.30 \cdot 10^{-5}$ (Ω/V²)

$e = 1.04 \cdot 10^{-7}$ (Ω/(V·(°C)))

$f = 1.87 \cdot 10^{-8}$ (Ω/(°C)²)

La méthode de correction de l'ESR initial, pour la plage de contraintes considérée, est fiable. En effet, les différents essais réalisés ont montré un écart maximal inférieur à 3 % entre la courbe de tendance et les résultats expérimentaux.

Ainsi, quelques soient les conditions d'utilisation, l'estimation de l'ESR instantanée du supercondensateur (ESR(t)) permet de déduire l'état de santé et de prédire la durée de vie restante. La suite du chapitre présente en détail plusieurs méthodes de détermination de l'ESR(t) en ligne grâce à différentes commandes des circuits d'équilibrage.

4 Estimation de la durée de vie par commutation rapide des interrupteurs des circuits d'équilibrage

Considérons un système de stockage d'énergie composé de n supercondensateurs associés en série surveillés et contrôlés par un SCM. Le système de gestion d'énergie comprend n circuits d'équilibrage dissipatif branchés aux bornes de chaque cellule, n mesures de tension de cellule, une mesure de la tension du module et une mesure du courant entrant (figure 2.13). Le principe de cette méthode s'inspire de celui d'une caractérisation temporelle et de la chute de tension spécifique liée à l'ESR (cf. §2.1.1. « La caractérisation temporelle »). L'idée consiste ici à provoquer et à exploiter les chutes de tension résultantes de la décharge des supercondensateurs durant une commutation rapide des circuits d'équilibrage [90].

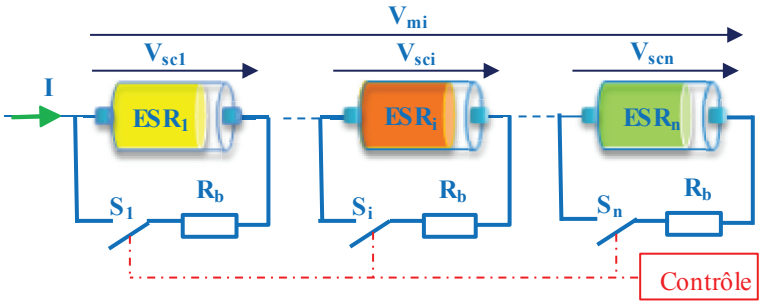


Figure 2.13 Constitution du système de stockage considéré

4.1 Principe de la commutation directe

Considérons un élément de stockage SC_i parmi les n supercondensateurs du module de stockage (avec $i \in [1, n]$). L'objectif est de caractériser cet élément en déterminant $ESR_i(t)$ (nous noterons ESR_i dans la suite pour simplifier les équations). En prenant en compte le modèle constructeur des supercondensateurs, le système de stockage peut être représenté par le schéma de la figure 2.14. L'ESR_i du composant SC_i peut être déterminée lorsque l'interrupteur S_i du circuit d'équilibrage passe de l'état ouvert à l'état fermé ou de l'état fermé à l'état ouvert.

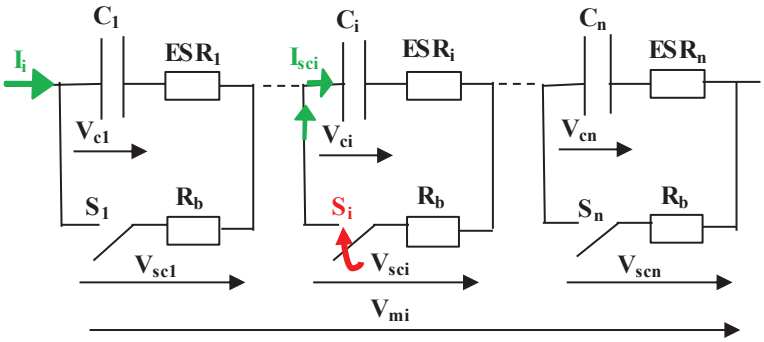


Figure 2.14 Principe de commutation pour estimer ESR_i

Notons avec un exposant (-) les variables juste avant la commutation et par un exposant (+) les variables juste après la commutation.

A t^-, instant juste avant la commutation, tous les interrupteurs du module, S_j avec j∈[1, n], sont considérés ouverts.

La tension aux bornes du module de stockage $V_{mi}{}^-$ est la somme des tensions des n cellules. Elle est exprimée comme suit :

$$V_{mi}{}^- = \sum_{j=1}^{n} V_{SCj}{}^- \qquad (2.8)$$

avec

$$V_{scj}{}^- = V_{cj}{}^- - ESR_j \cdot I_i{}^- \quad ,\forall\, j \in [1,n] \qquad (2.9)$$

où

- V_{mi} est la tension aux bornes du module de stockage,
- V_{scj} est la tension aux bornes du supercondensateur j,
- V_{cj} est la tension aux bornes du condensateur de capacité C_j,
- I_i est le courant traversant le module en série lors de l'identification de ESR_i.

A t^+, l'instant juste après la commutation, tous les interrupteurs S_j avec j ∈ [1, n] et j≠i, sont ouverts, sauf S_i qui est fermé.

La tension aux bornes du module de stockage $V_{mi}{}^+$ est exprimée comme suit :

$$V_{mi}{}^+ = \sum_{j=1}^{n} V_{SCj}{}^+ \qquad (2.10)$$

avec

$$V_{scj}{}^{+} = V_{cj}{}^{+} - ESR_j \cdot I_i{}^{+} \quad \forall j \epsilon [1, n], j \neq i \tag{2.11}$$

$$V_{sci}{}^{+} = V_{ci}{}^{+} - ESR_i \cdot I_{sci}{}^{+} \tag{2.12}$$

$$V_{sci}{}^{+} = V_{ci}{}^{+} - ESR_i \cdot \left(\frac{V_{sci}{}^{+}}{R_b} + I_i{}^{+} \right) \tag{2.13}$$

où

- I_{sci} est le courant traversant le composant SC_i,
- R_b est la résistance d'équilibrage (identique pour tous les circuits d'équilibrage).

La variation de tension aux bornes du module du stockage durant cette commutation est donc exprimée comme suit :

$$\Delta V_{mi} = V_{mi}{}^{-} - V_{mi}{}^{+} \tag{2.14}$$

$$\Delta V_{mi} = \sum_{j=1}^{n} \left(V_{cj}{}^{-} - ESR_j \cdot I_i{}^{-} \right) - \sum_{j=1}^{n} \left(V_{cj}{}^{+} - ESR_j \cdot I_i{}^{+} \right) + ESR_i \cdot \frac{V_{sci}{}^{+}}{R_b} \tag{2.15}$$

Considérons durant cette brève commutation que la tension aux bornes des condensateurs C_j reste constante.

La chute de tension aux bornes du module devient alors :

$$\Delta V_{mi} = ESR_i \cdot \frac{V_{sci}{}^{+}}{R_b} - \sum_{j=1}^{n} ESR_j \cdot \Delta I_i \tag{2.16}$$

avec

$$\Delta I_i = I_i^- - I_i^+ \qquad (2.17)$$

On peut négliger aussi la variation de courant lorsque la commutation est brève.

$$I_i = I_i^- = I_i^+ \qquad (2.18)$$

La chute de tension aux bornes du module peut donc être simplifiée comme suit :

$$\Delta V_{mi} = ESR_i \cdot \frac{V_{sci}^+}{R_b} \qquad (2.19)$$

L'équation 2.19 donne donc une relation directe entre l'ESR du supercondensateur à caractériser et la chute de tension créée aux bornes du module de stockage lorsqu'on commute rapidement l'interrupteur de la cellule à caractériser.

Cette procédure peut être répétée pour les n éléments du module de stockage. On obtient alors n équations avec n valeurs de ESR_i avec $i \epsilon [1, n]$. Les équations peuvent être représentées sous format matriciel comme suit :

$$\Delta V_m = A \cdot ESR \qquad (2.20)$$

avec

$$\Delta V_m = [\Delta V_{m1}, \cdots, \Delta V_{mn}]^T \ \epsilon \mathbb{R}^{n,1} \qquad (2.21)$$

$$ESR = [ESR_1, \cdots, ESR_n]^T \ \epsilon \mathbb{R}^{n,1} \qquad (2.22)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 + b_1 & \cdots & b_1 \\ \vdots & a_i + b_i & \vdots \\ b_n & \dots & a_n + b_n \end{bmatrix} \epsilon \mathbb{R}^{n,n} \qquad (2.23)$$

avec

$$a_i = \frac{{V_{sci}}^+}{R_b}$$

$$b_i = -\Delta I_i \, , i\epsilon[1,n]$$

En négligeant la variation de courant, la matrice A devient :

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & a_i & \vdots \\ 0 & \dots & a_n \end{bmatrix} \epsilon \mathbb{R}^{n,n} \qquad (2.24)$$

Les paramètres ΔV_{mi}, V_{SCi} et ΔI_i peuvent être déduits des mesures effectuées par le système de gestion d'énergie. Une simple inversion de la matrice A nous permet donc d'extraire tous les ESR_i de toutes les cellules constituants le module de stockage.

Cette méthode s'est inspirée de travaux utilisant les circuits d'équilibrage présents pour estimer la tension, le courant, l'état de charge mais aussi la capacité de cellules d'une batterie Li-Ion à partir de la tension du pack et du courant rentrant [91]. Contrairement à la méthode proposée, la commutation est répétée plusieurs fois et un algorithme récursif est appliqué pour extraire les informations recherchées ce qui nécessite un temps de calcul et une place mémoire plus importants.

L'approche présentée ci-dessus et les travaux présentés en [91] sont originaux mais peuvent être critiquables dans leur réalisation expérimentale. En effet comme les supercondensateurs ont l'avantage d'avoir une faible ESR, la chute de tension créée aux bornes du module est donc très faible et ne dépasse pas quelques millivolts. La tension mesurée du module étant de l'ordre des dizaines de volts, il est donc difficile de mesurer cette chute de tension sans utiliser une instrumentation de précision qui peut être coûteuse.

Pour résoudre cette problématique, une nouvelle approche de commutation des interrupteurs a été étudiée.

4.2 Principe de la commutation par méthode complémentaire

L'objectif reste le même, à savoir caractériser le supercondensateur SC_i parmi les n supercondensateurs du module. Le changement proposé porte sur la commutation : au lieu de commuter le circuit aux bornes de la cellule i, nous proposons de commuter l'ensemble des circuits d'équilibrage excepté celui aux bornes de la cellule en question (figure 2.15).

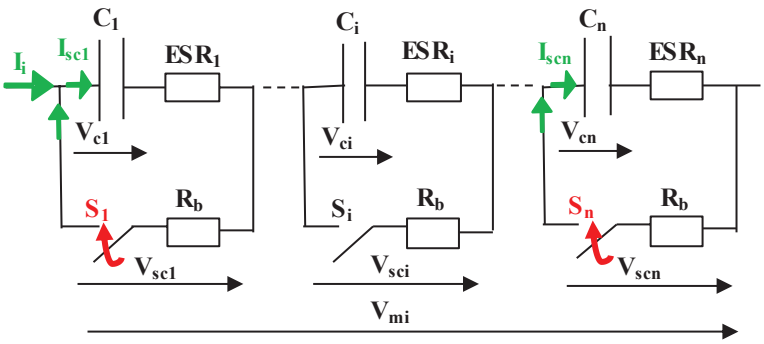


Figure 2.15 Principe de commutation complémentaire pour estimer ESR_i

A t^-, juste avant la commutation, tous les interrupteurs S_j avec $j \in [1,n]$, sont ouverts. La tension aux bornes du module de stockage reste la même que précédemment (équations 2.8 et 2.9).

$$V_{mi}^{-} = \sum_{j=1}^{n} V_{scj}^{-} \qquad (2.8)$$

avec

$$V_{scj}^{-} = V_{cj}^{-} - ESR_j \cdot I_i^{-} \quad ,\forall\, j \in [1,n] \qquad (2.9)$$

A t^+, juste après la commutation, tous les interrupteurs S_j avec $j \in [1, n]$ $j \neq i$, sont fermés, sauf S_i qui est laissé ouvert (cf. figure 2.15).

La tension aux bornes du module de stockage est exprimée par :

$$V_{mi}{}^{+} = \sum_{j=1}^{n} V_{SCj}{}^{+} \qquad (2.10)$$

avec

$$V_{scj}{}^{+} = V_{cj}{}^{+} - ESR_j \cdot I_{scj}{}^{+} \quad \forall j \epsilon [1, n], j \neq i \qquad (2.25)$$

$$V_{scj}{}^{+} = V_{cj}{}^{+} - ESR_j \cdot \left(\frac{V_{scj}{}^{+}}{R_b} + I_i{}^{+} \right) \forall j \epsilon [1, n], j \neq i \qquad (2.26)$$

et

$$V_{sci}{}^{+} = V_{ci}{}^{+} - ESR_i \cdot I_i{}^{+} \qquad (2.27)$$

En considérant les mêmes hypothèses que l'approche précédente, la variation de tension aux bornes du module du stockage durant cette commutation peut donc d'exprimer comme suit :

$$\Delta V_{mi} = V_{mi}{}^{-} - V_{mi}{}^{+} \qquad (2.14)$$

$$\Delta V_{mi} = \sum_{j=1}^{n} ESR_j \cdot \left(\frac{V_{scj}{}^{+}}{R_b} - \Delta I_i \right) - ESR_i \cdot \frac{V_{sci}{}^{+}}{R_b} \qquad (2.28)$$

Cette procédure peut être répétée aussi pour les n éléments du module de stockage. On obtient donc n équations avec n valeurs de ESR_i, iϵ [1, n]. Les équations peuvent aussi être représentées sous format matriciel comme suit :

$$\Delta V_m = A' \cdot ESR \qquad (2.29)$$

avec

$$A' = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & a_{i,i} & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix} \epsilon \mathbb{R}^{n,n} \qquad (2.30)$$

avec

$$a_{k,l} = \frac{{V_{scl}}^{+}}{R_b} - \Delta I_k \, , k \neq l, k, l\epsilon[1,n]$$

$$a_{k,k} = -\Delta I_k \, , k = l, k, l\epsilon[1,n]$$

En négligeant la variation de courant comme précédemment la matrice A' peut-être simplifiée aussi comme suit :

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & 0 & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \epsilon \mathbb{R}^{n,n} \qquad (2.31)$$

Avec cette nouvelle approche, la chute de tension créée aux bornes du module est le résultat du shunt de n-1 supercondensateurs au lieu d'un seul. Ainsi la chute de tension est au minimum n-1 fois plus grande que dans la première approche. Comme la variation de tension est plus importante sa mesure et ainsi moins coûteuse.

4.3 Résultats de la commande par simulations

Les approches théoriques présentées ont été validées par différentes simulations. Ces simulations ont été développées sous Matlab/Simulink pour différents modèles de supercondensateur. Un exemple présenté ci-dessous représente les résultats des deux approches de commande des interrupteurs, appliquées à un module de stockage constitué de trois supercondensateurs en série (SC_1, SC_2 et SC_3) Ils subissent un cyclage avec un profil de puissance correspondant au nouveau cycle européen de conduite, le NEDC (New European Driving Cycle) (figure 2.16).

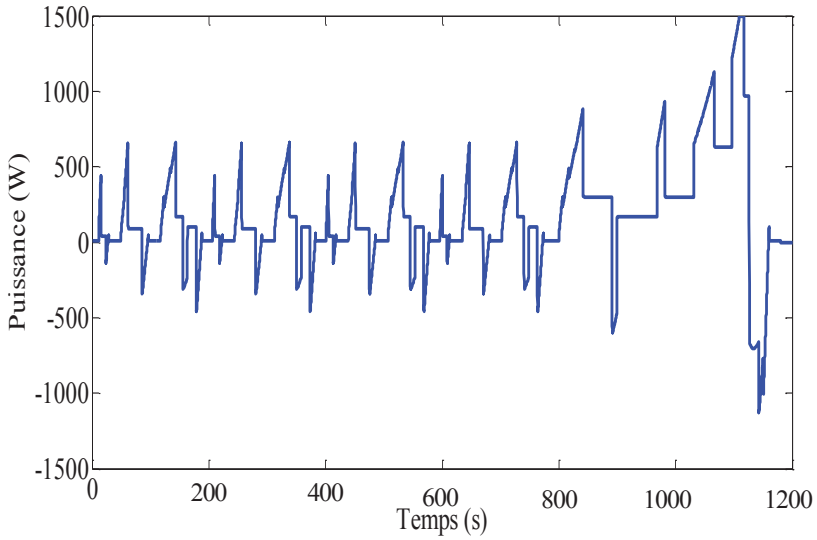


Figure 2.16 Profil de puissance d'un cycle NEDC

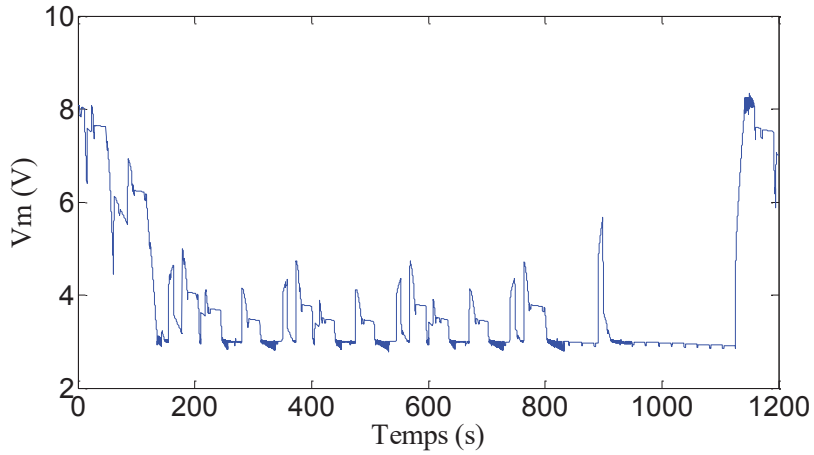


Figure 2.17 Tension aux bornes du module de stockage durant un cycle NEDC

La première et la deuxième approche de commande ont été appliquées au module de stockage afin d'estimer l'ESR_i (avec i∈ [1, 3]) des différentes cellules. La commutation s'est faite lors des différentes phases de charge et de décharge. Le shunt des cellules est d'une durée de 2 secondes et la résistance d'équilibrage d'une valeur de 0.1 Ω.

Les figures 2.18 et 2.19 représentent un agrandissement de la tension aux bornes du module de stockage lors d'une des brèves commutations avec les deux approches de commande. Pour simplifier la représentation, les paramètres internes des trois supercondensateurs ont initialement été considérés comme identiques (3000 F, 0.25 mΩ, 2.7 V).

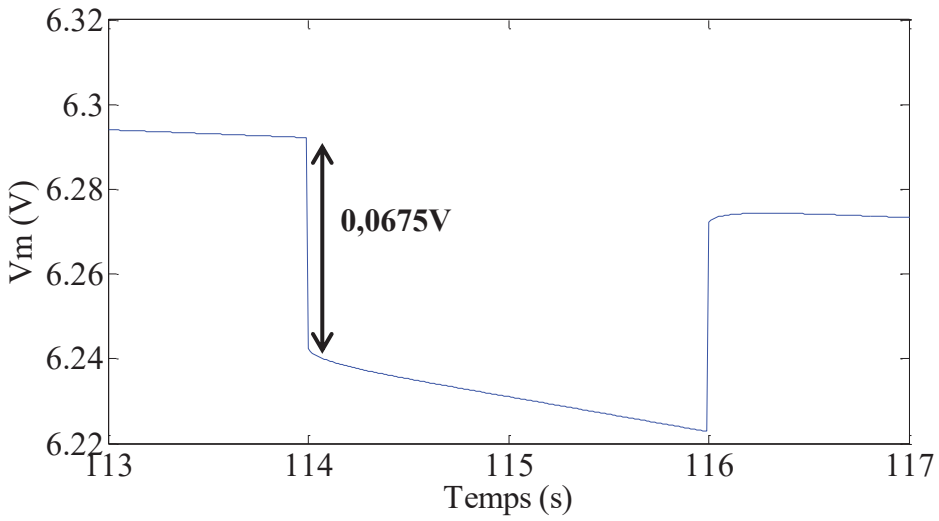


Figure 2.18 Tension aux bornes du module de stockage lors d'une commutation directe

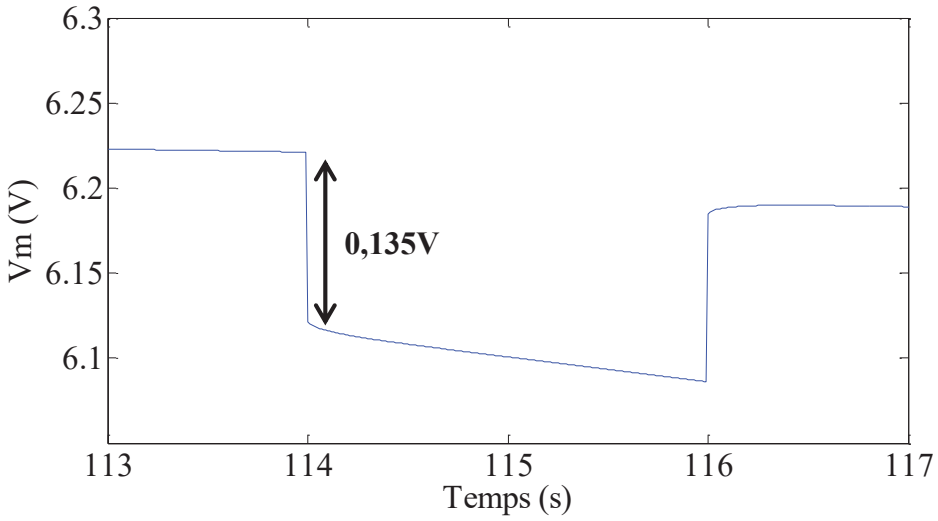


Figure 2.19 Tension aux bornes du module de stockage en lors d'une commutation complémentaire

On observe que pour la méthode complémentaire la chute de tension est (n-1) fois plus importante que pour la commutation directe, c'est-à-dire deux fois plus grande dans notre exemple. Ainsi plus le module est constitué d'éléments en série plus cette chute de tension est facilement mesurable.

Un calcul théorique a été réalisé afin de relier la chute de tension provoquée à la résistance d'équilibrage et au nombre d'éléments constituants le module de stockage. Cette analyse a été appliquée pour des supercondensateurs de 3000 F avec de faibles valeurs d'ESR (0.23 mΩ) et une tension minimale de 1 V (figure 2.20).

Cette analyse peut permettre d'aider au choix de la valeur de la résistance d'équilibrage et de sélectionner une instrumentation de mesure adaptée.

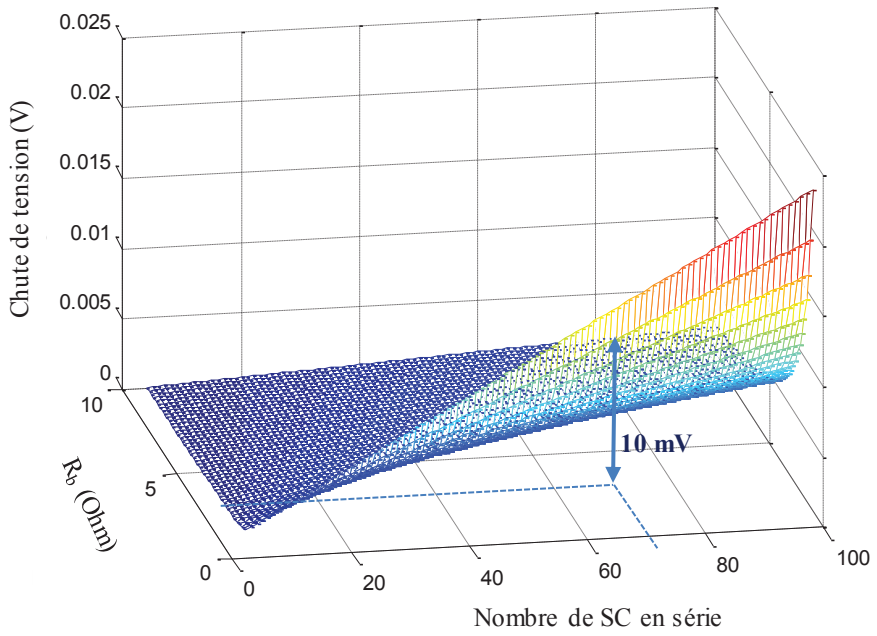


Figure 2.20 Relation entre chute de tension du module de stockage, résistance d'équilibrage et nombre d'éléments en série

4.4 Les limitations de la méthode complémentaire

La première limitation importante est liée à la synchronisation de la commande et des données mesurées. Notre objectif est d'exploiter les données mesurées lors de commutations rapides simultanées de plusieurs interrupteurs. Il est donc essentiel que toutes les commandes et leurs exécutions soient réalisées de façon synchrone. En effet, si le shunt des (n-1) cellules ne se fait pas simultanément, la chute de tension à exploiter ne sera plus représentative des (n-1) ESR. La variation de tension étant mesurée durant une très courte durée (< 1 s) un décalage temporel aura une répercussion sur les valeurs estimées.

La deuxième limitation porte sur la variation de tension à mesurer. Les SCM ont une précision de mesure de tension inférieure à 10 mV (cf. chapitre 1 §4.4.1.1. « La mesure de tension). En se basant sur le calcul théorique précèdent, comme nous pouvons le voir sur la figure 2.20, l'approche par commutation complémentaire devient intéressante lorsque le module de stockage est constitué d'un nombre important de supercondensateurs (plusieurs dizaines de cellules) et que la chute de tension provoquée devient supérieure à la précision de

mesure. A défaut, il faut choisir une valeur de résistance d'équilibrage assez faible pour créer une variation de tension adaptée. Or, en raison de leur échauffement et pour des raisons d'efficacité énergétique, des résistances d'équilibrage de valeur inférieure à 3 Ω ne sont pas conseillées (cf. chapitre 1 §4.5.1. « Les circuits d'équilibrage dissipatif »). La solution finale lorsque le module de stockage contient peu d'éléments consiste alors à rajouter un amplificateur adéquat permettant une mesure de tension suffisamment précise.

Afin de pallier ces limitations, nous nous sommes donc orientés vers une autre approche de caractérisation en ligne exploitant aussi la commutation des circuits d'équilibrage.

5 Estimation de la durée de vie par commutation à la fréquence de résonance des interrupteurs des circuits d'équilibrage

5.1 Le comportement fréquentiel du supercondensateur

L'approche présentée dans cette partie s'inspire de la caractérisation fréquentielle des supercondensateurs. Différentes caractérisations fréquentielles ont été réalisées sur différents supercondensateurs et à différents états afin de valider la méthode proposée.

L'ESR, représentant le comportement résistif du supercondensateur, peut être estimée à des fréquences proches de celle de la résonance (~100 Hz) (cf. 2.1.2. § « La caractérisation fréquentielle »). En observant les courbes de Bode (figures 2.2 et 2.3), on remarque que le module de l'impédance reste constant et égal à l'ESR sur une large bande de fréquence autour de la fréquence de résonance. En effet, sur une bande de fréquence ($\Delta fr = [10\ Hz; 10^3 Hz]$), que nous appellerons bande de résonance, les comportements inductif et capacitif du supercondensateur peuvent être négligés.

Plusieurs caractérisations ont été réalisées sur des supercondensateurs avec différentes valeurs de capacité afin de vérifier l'existence de cette bande de résonance (figures 2.21 et 2.22).

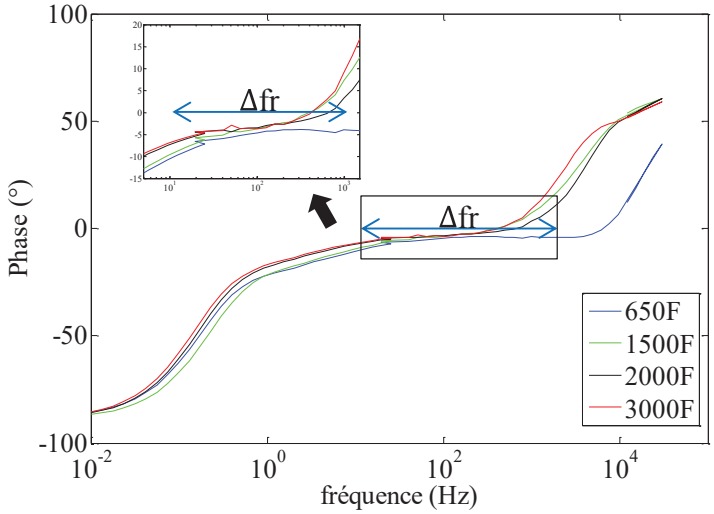


Figure 2.21 Phase de l'impédance sur diagramme de Bode pour différents composants, caractérisation à 2.7V et à 25°C

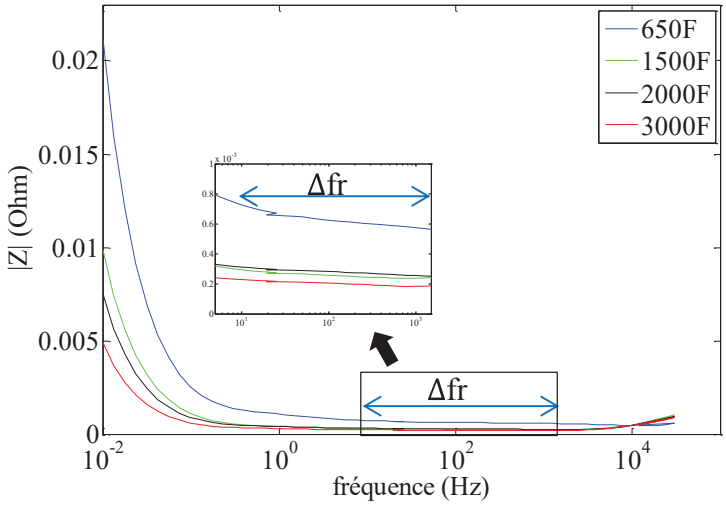


Figure 2.22 Module de l'impédance sur diagramme de Bode pour différents composants, caractérisation à 2.7V et à 25°C

On observe pour les différents supercondensateurs testés que le comportement résistif a lieu pour la même bande de fréquence Δfr.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la variation du comportement résistif du supercondensateur avec son vieillissement. Les figures 2.23 et 2.24 représentent les résultats de différentes caractérisations fréquentielles réalisées sur un supercondensateur de 3000 F à différents stades de son vieillissement. Le supercondensateur considéré a subi un vieillissement accéléré de type calendaire à 2.8 V et 60 °C [8].

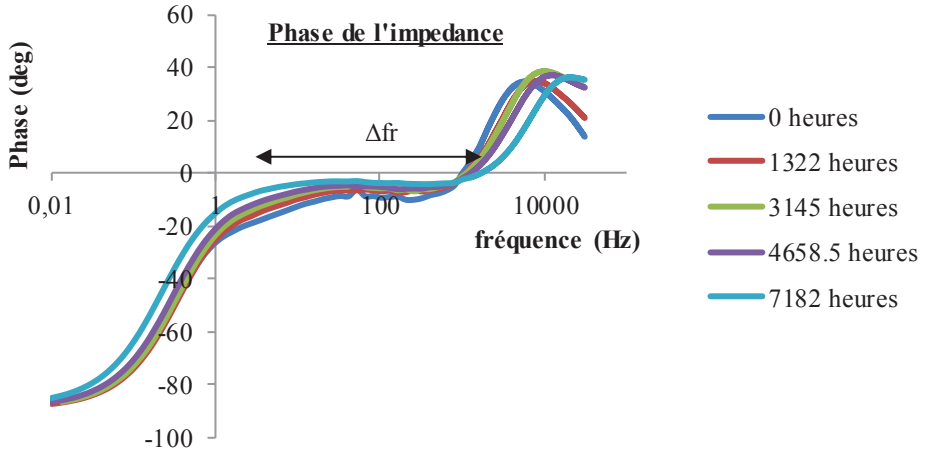


Figure 2.23 Phase de l'impédance du sur diagramme de Bode pour différents vieillissements

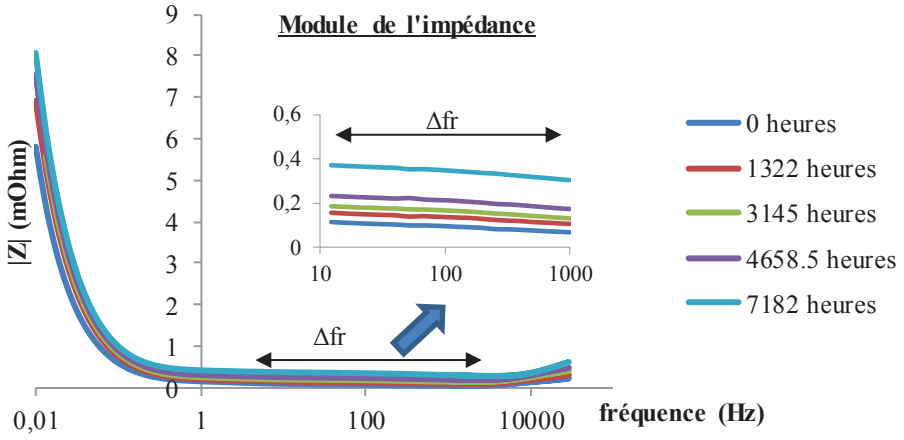


Figure 2.24 Module du de l'impédance sur diagramme de Bode pour différents vieillissements

En vieillissant, on remarque que le module de l'impédance a translaté vers le haut. Cette translation représente l'augmentation de l'ESR avec le vieillissement. On remarque aussi que la bande de résonance reste identique.

Ces résultats montrent que la mesure de l'ESR est possible en considérant l'impédance dans cette bande de résonance et permet de valider la méthode d'estimation présentée ci-dessous.

5.2 Principe de la commutation à la résonance

L'objectif de notre approche consiste à extraire l'ESR présent (ESR(t)) du supercondensateur surveillé grâce à la commande dans la bande de résonance du circuit d'équilibrage présent aux bornes du composant surveillé. L'ESR à un instant donné, représentative de l'état de santé, peut alors être déduite par la mesure de l'impédance pour une des fréquences appartenant à la bande de résonance.

Afin d'extraire cette ESR, on se propose donc de provoquer le comportement résistif du supercondensateur par la commutation des MOSFETs des circuits d'équilibrage. La commutation de ceux-ci à une fréquence f_o comprise dans la bande de résonance Δfr, permet de créer des variations de tension et de courant qui correspondent à l'impédance lors du comportement résistif du composant. Ainsi la division de la tension mesurée par le courant permet de déduire l'ESR instantanée du supercondensateur surveillé, ESR (t).

L'approche théorique proposée nécessite la connaissance du courant mais aussi de la tension de chaque cellule. La mesure de tension des cellules est omniprésente dans les SCM. La mesure du courant total du module est aussi généralement effectuée par les SCM. Quant au courant traversant la cellule, il peut être déduit en soustrayant le courant rentrant dans le module de celui passant dans les circuits d'équilibrage. Les MOSFETs possédant une résistance à l'état passant très faible, le courant des circuits d'équilibrage est déduit de la mesure de tension aux bornes de la résistance d'équilibrage. Pour notre étude, comme la commande est toujours appliquée lorsque le module est au repos, le courant des supercondensateurs est déduit directement de la tension mesurée aux bornes des résistances d'équilibrage.

La figure 2.25 représente le principe de la commutation à la résonance, avec SC_i le supercondensateur à surveiller, R_b et S_i respectivement la résistance et l'interrupteur d'équilibrage placés aux bornes du SC_i, ΔV_{sci} la variation de tension du supercondensateur mesurée lors de la commutation et ΔI_{sci} la variation de courant déduite de la tension mesurée aux bornes de la résistance d'équilibrage. L'exemple présenté concerne la phase de repos du module. La variation de courant est donc obtenue directement en divisant la tension mesurée aux bornes de la résistance d'équilibrage par la valeur de cette dernière.

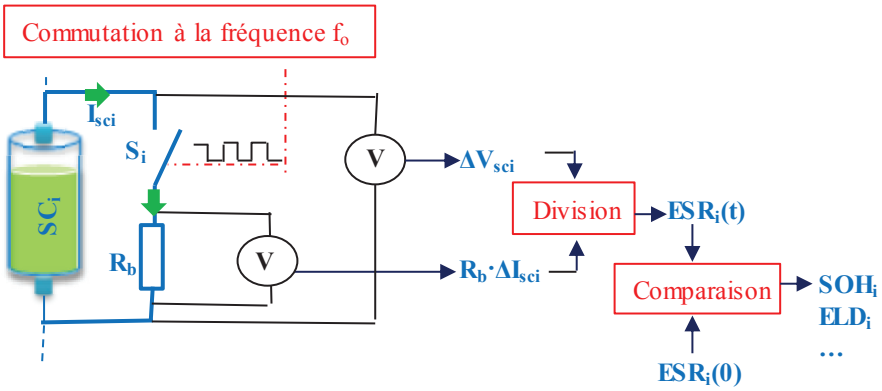


Figure 2.25 Principe de l'estimation d'une cellule au repos

5.3 Résultats par simulation de l'estimation de l'ESR avec la commande proposée

Cette approche théorique a été validée par différentes simulations. Ces simulations ont été développées sous Matlab/Simulink. Un exemple présenté ci-dessous représente les résultats de l'estimation de l'ESR suite à la commande appliquée au circuit d'équilibrage d'un supercondensateur d'un module de stockage. La simulation concerne un module de stockage d'énergie et son SCM associé. La fréquence de commutation de l'interrupteur du circuit d'équilibrage est effectuée à f_o=100 Hz et la résistance d'équilibrage considérée est de 10 Ω. Chaque circuit d'équilibrage est adapté pour assurer l'identification de l'état de santé des cellules et dispose de 3 fonctions. La première continue est la fonction d'égalisation de tension. Les deux autres concernent les mesures des ondulations de tension et de courant nécessaires à l'estimation de l'ESR. Afin d'extraire ces ondulations, un même filtrage a été rajouté à la sortie des deux mesures réalisées. Ce filtrage est de type passe bande de largeur de fréquence Δfr. Le type de filtre à utiliser n'a pas d'influence sur les résultats tant qu'il est identique pour les deux mesures. Concernant la variation de tension sachant que l'ESR de la cellule surveillée est très faible (quelques centaines de micro-Ohm), un amplificateur a été ajouté après le filtrage afin d'amplifier l'ondulation de tension provoquée (figure 2.26).

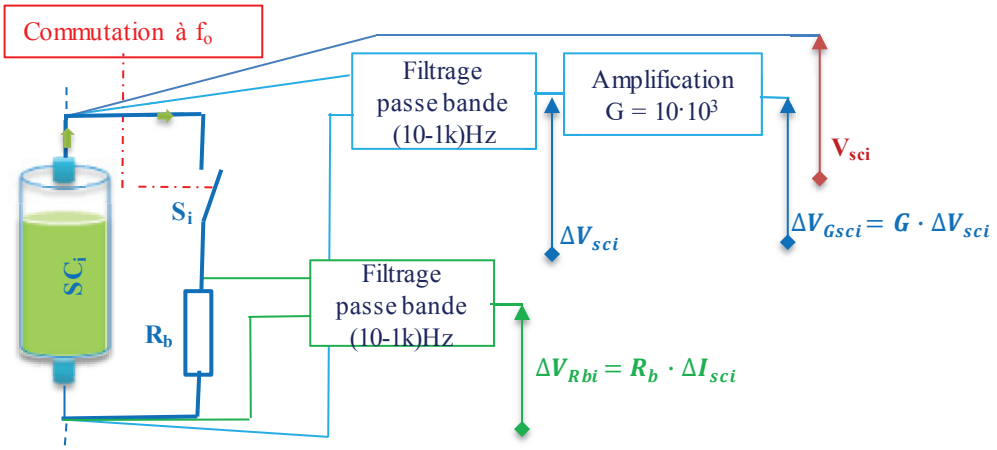


Figure 2.26 Circuit d'équilibrage et principe d'estimation de l'état de santé d'une cellule au repos

L'ESR peut donc être exprimée par la division de a tension sur e courant comme suit:

$$ESR_i(t) = \frac{\Delta V_{Gsci} \cdot R_b}{G \cdot \Delta V_{Rbi}} \qquad (2.32)$$

La figure 2.27 représente les variations de tensions obtenues en sortie lors de la commutation à la résonance. Le supercondensateur est simulé avec les paramètres suivants : C_i=3000 F, ESR_i=2.47 10^{-4} Ω et V_{sci}=1.3 V)

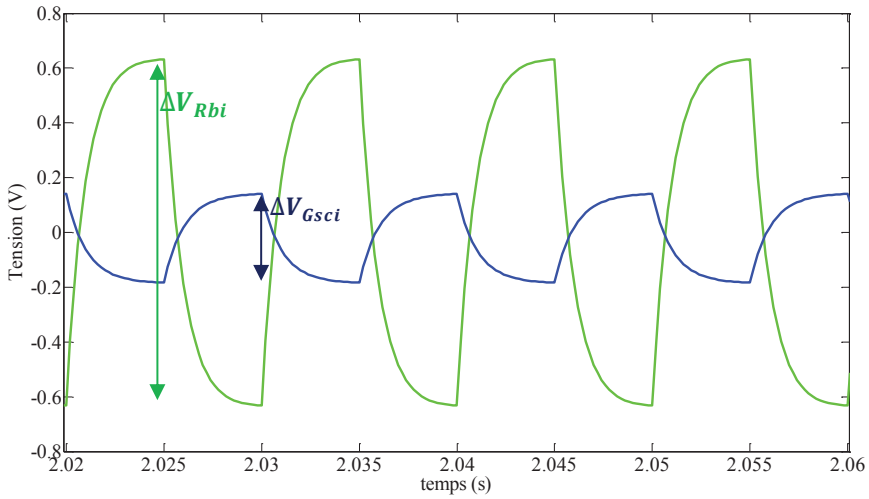


Figure 2.27 Tensions mesurées à la sortie des circuits d'équilibrage (simulation)

5.4 Validation expérimentale

L'approche présentée a été validée expérimentalement avec un prototype de système de gestion d'énergie développé et réalisé au laboratoire Ampère. On se propose dans ce qui suit de décrire la maquette réalisée et les résultats obtenus grâce à l'exploitation de cette maquette.

5.4.1 Description du prototype réalisé

Le banc de test expérimental développé dispose d'une instrumentation pour permettre les mesures des tensions, des courants et des températures, de circuits d'équilibrage dissipatif et d'un contrôleur assurant la commande, le traitement et la communication de l'information. Comme l'instrumentation utilisée pour la mesure du courant total et des températures n'est pas nécessaire dans cette partie, elle est décrite dans les annexes (cf. Annexe A).

La maquette a été conçue pour assurer la surveillance, le contrôle et le diagnostic d'un à six supercondensateurs en série (figure 2.28).

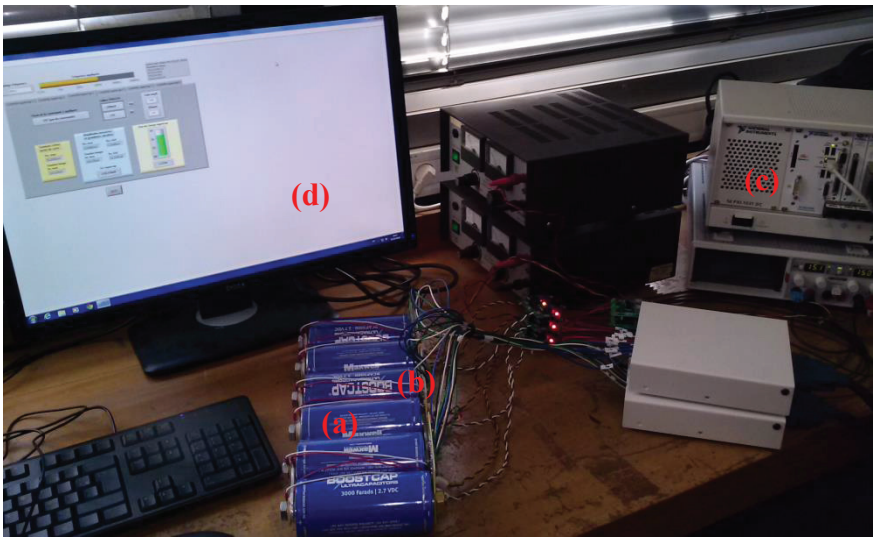


Figure 2.28 Vue globale du banc de test expérimental réalisé. (a) : SSE / (b) : circuits d'équilibrage / (c) : contrôleur / (d) : interface homme machine

5.4.1.1 Les circuits d'équilibrage

Les circuits d'équilibrage réalisés permettent l'équilibrage ainsi que le diagnostic de une à deux cellules (figure 2.29). Le même principe de mesure simulé a été reproduit sur ces circuits d'équilibrage (figure 2.26).

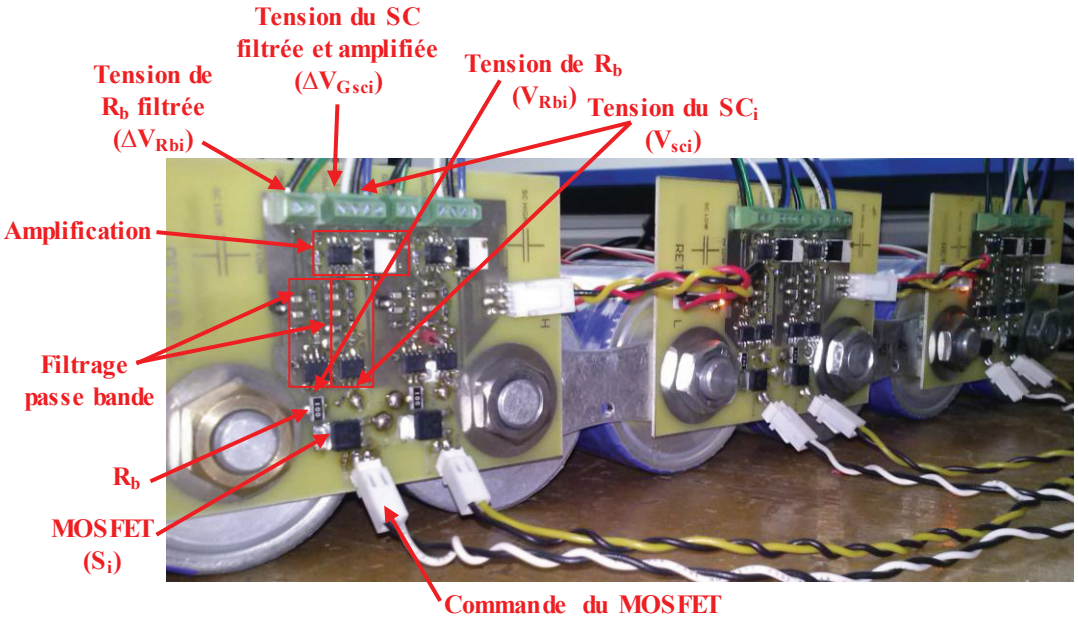


Figure 2.29 Circuits d'équilibrage réalisés

Une résistance d'équilibrage de type CMS de 10 Ω a été choisie afin de ne pas dissiper plus de 300 mA et ne pas subir un échauffement supérieur à 30 °C.

Chaque circuit d'équilibrage peut assurer l'égalisation de tension entre éléments mais aussi l'estimation de l'ESR grâce à la commande de son interrupteur. Chaque MOSFET est commandé donc individuellement par le contrôleur. La première fonction du circuit d'équilibrage, à savoir l'égalisation des tensions, nécessite la connaissance de la tension instantanée (Vsci) de chaque cellule surveillée. La seconde fonction, à savoir l'estimation de l'ESR, nécessite la connaissance des variations de tension et de courant provoquées dans chaque cellule (équation 2.32). Ces ondulations sont obtenues grâce à un même filtrage passe bande, rajouté à la sortie des deux mesures réalisées. La commutation à la résonance, étant appliquée toujours au repos, l'ondulation de courant est déduite directement de la tension mesurée et filtrée aux bornes de la résistance d'équilibrage (ΔVRbi). Comme l'ESR est de très faible valeur, un amplificateur a été ajouté après le filtrage de la tension du supercondensateur comme en simulation pour mesurer ΔVGsci. Chaque circuit d'équilibrage dispose donc de trois sorties de tension, correspondant à la tension continue, l'ondulation de tension du supercondensateur et l'ondulation de tension de la résistance d'équilibrage (figure 2.29).

La figure suivante représente les ondulations de tension obtenues lors de la commutation à 100 Hz d'un des circuits d'équilibrage.

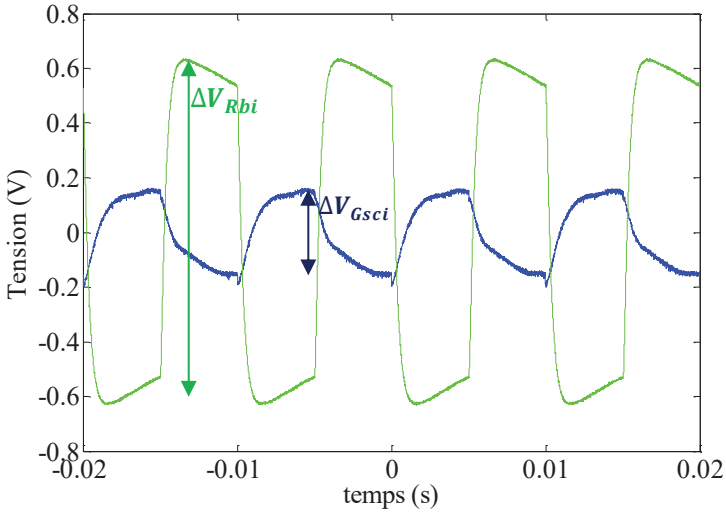


Figure 2.30 Ondulations de tension mesurées à la sortie des circuits d'équilibrage

Pour un même supercondensateur que celui simulé (C_i=3000 F, ESR_i=2.47 10^4 Ω et V_{sci}=1.3 V), on observe les mêmes allures de tension de sortie que la simulation (figure 2.27).

5.4.1.2 L'acquisition des données et le contrôle

Le contrôleur consiste en un équipement National Instrument constitué d'un matériel d'acquisition de donnée (DAQ) permettant de mesurer les différentes tensions et températures et d'un FPGA qui assure le contrôle et le traitement des données (cf. Annexe A).

L'estimation de l'ESR a été réalisée pour différentes valeurs de fréquence appartenant à la bande de résonance. Nous avons adopté une fréquence d'échantillonnage telle qu'elle soit toujours au moins du double (théorème de Shannon) de la fréquence de commutation.

5.4.1.3 L'interface homme-machine

Une interface a été réalisée en utilisant l'environnement de développement Labview. Celle-ci permet à l'utilisateur de visualiser les informations des cellules surveillées (tensions, températures, courant, ESR estimées, …). Elle lui permet aussi d'avoir un contrôle sur les cellules surveillées. L'utilisateur peut choisir le type de commande à appliquer à chaque circuit d'équilibrage indépendamment du reste des circuits. La commande des MOSFET peut être soit la commutation fréquentielle permettant d'estimer l'ESR, soit l'équilibrage de tension. Six

tableaux de bord représentatifs des six cellules surveillées ont donc été réalisés. La figure 2.31 suivante représente un exemple de tableau de bord réalisé.

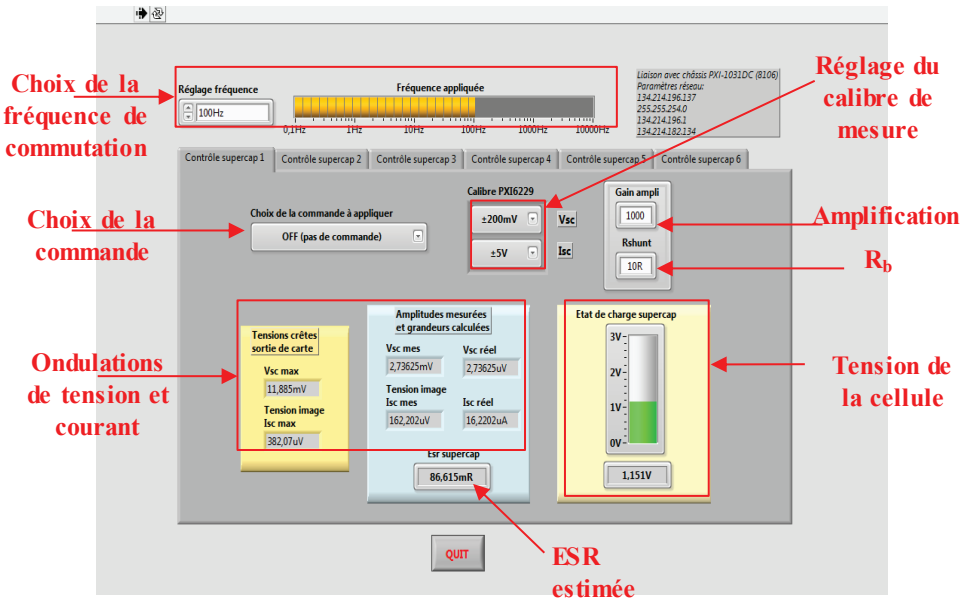


Figure 2.31 Tableau de bord du système de gestion d'énergie

5.4.2 Résultats expérimentaux et interprétations

Afin de valider l'estimation des valeurs des ESR, nous les avons comparées aux résultats d'une spectroscopie d'impédance (EIS) effectuées dans des conditions relativement similaires (spectroscopie de type galvanostatique à courant alternatif d'amplitude 2A).

La cellule est donc caractérisée au même potentiel et à même température par le spectromètre d'impédance et par le système de gestion d'énergie.

Les tests ont été réalisés sur différents supercondensateurs neufs et vieillis.

Les tableaux suivants représentent quelques cas de figure obtenus à 25 °C.

Tableau 2.1 Comparaison sur une cellule neuve des résultats obtenus par notre approche et par spectroscopie d'impédance

Potentiel (V)	Supercondensateur « neuf »		
	ESR(t) (mΩ) SCM	ESR(t) (mΩ) EIS	ΔESR(t) (%)
1.1 V	0.254	0.211	17
2.1 V	0.222	0.200	11
2.7 V	0.189	0.187	0.8

Tableau 2.2 Comparaison sur une cellule moyennement vieillie des résultats obtenus par notre approche et par spectroscopie d'impédance

Potentiel (V)	Supercondensateur « moyennement vieilli »		
	ESR(t) (mΩ) SCM	ESR(t)(mΩ) EIS	ΔESR(t) (%)
1.1 V	0.266	0.261	2.2
2.1 V	0.255	0.247	3.1
2.7 V	0.231	0.238	2.8

Tableau 2.3 Comparaison sur une cellule vieillie des résultats obtenus par notre approche et par spectroscopie d'impédance

Potentiel (V)	Supercondensateur « vieilli »		
	ESR(t) (mΩ) SCM	ESR(t) (mΩ) EIS	ΔESR (t) (%)
1.1V	0.426	0.444	4.1
2.1V	0.377	0.427	12
2.7V	0.376	0.415	9.4

Nous remarquons que les valeurs déterminées par l'approche proposée sont proches des résultats obtenus par spectroscopie d'impédance. Sur l'ensemble des essais réalisés nous avons remarqué un écart maximal inférieur à 20 % entre l'ESR estimée par spectroscopie d'impédance et celui par l'approche de commande proposée. Ce résultat est très satisfaisant puisqu'il ne nécessite aucun ajout de matériel et qu'il est obtenu juste en changeant l'approche de commande des circuits d'équilibrage du SCM présents sur le module de stockage.

Un bilan d'incertitude sur l'estimation de l'ESR est effectué et présenté en détail en annexe B. Il montre que la méthode de détermination est précise puisque l'incertitude finale absolue finale estimée sur l'ESR dans le pire des cas est de quelques μΩ soit une incertitude relative de 1.4 % (cf. Annexe B).

6 Conclusion

Pour des raisons de maintenabilité et de sécurité, il est essentiel de suivre l'état de santé des supercondensateurs constituant le module de stockage. Le but est de prévoir le remplacement des éléments défaillants et d'étendre alors la disponibilité de tout le système.

Le travail présenté dans ce chapitre comporte plusieurs avantages : les résultats d'identifications obtenues sont précis, et la caractérisation de l'état de santé est effectuée en ligne. Par ailleurs, la méthode proposée est simple puisqu'elle utilise une commande basique des interrupteurs, des opérations de calcul élémentaires et avec juste quelques fonctions supplémentaires, permet d'extraire directement l'âge de la cellule surveillée. Ces approches peuvent être donc facilement ajoutées aux fonctions du contrôleur des systèmes de gestion d'énergie. Elles peuvent être exécutées occasionnellement et ne perturbent donc pas la fonction classique d'égalisation de tension. Les méthodes proposées ne dissipent qu'une énergie négligeable lors de l'estimation de l'ESR, celle-ci ayant été estimée à 0.1 % de l'énergie stockée dans les supercondensateurs. Finalement, ces méthodes sont donc économiques et garantissent une estimation fiable des SOH et du temps restant avant la défaillance des supercondensateurs surveillés.

Le chapitre suivant se base sur cette estimation d'état de santé afin de décider du niveau de sollicitation des éléments surveillés. Tout ceci dans le but de prolonger la durée de vie du module de stockage toujours via la commande des circuits d'équilibrage.

.

Chapitre 3 : Maximisation de la durée de vie des systèmes de stockage d'énergie par commande prédictive de leurs circuits d'équilibrage

1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de la nouvelle stratégie de commande des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie dans le but de maximiser leur durée de vie. Cette nouvelle stratégie de commande ne cherche pas à égaliser les tensions entre éléments mais à égaliser les niveaux de dégradation. Le niveau de dégradation est évalué grâce à la cinétique d'évolution des paramètres internes des éléments de stockage. Le chapitre précédent présentant des méthodes d'estimation en ligne des paramètres internes constitue le socle de travail permettant de déterminer le niveau de dégradation de chaque élément de stockage. Ce chapitre s'intéresse donc particulièrement à la stratégie de commande à appliquer aux circuits d'équilibrage sachant que l'information sur les paramètres internes des éléments surveillés est supposée acquise.

Dans ce qui suit, nous présentons plus en détails les outils de commande utilisés, les objectifs de la nouvelle stratégie d'équilibrage et analysons les résultats de commande grâce à une simulation proche du réel. Une comparaison des résultats de simulation est faite entre un équilibrage classique des tensions et la nouvelle stratégie d'équilibrage afin d'analyser et de quantifier l'intérêt de cette nouvelle approche.

2 Description du système et de la commande en durée de vie

On considère un système de stockage d'énergie composé de n supercondensateurs associés en série. Ils sont surveillés et contrôlés par un système de gestion d'énergie. Ce dernier comprend n circuits d'équilibrage dissipatif branchés aux bornes de chaque cellule, n mesures

de tension de cellule, n informations de température de cellule (déduites par mesure ou par estimation) et une mesure du courant (figure 3.1). Les n interrupteurs S_i des circuits d'équilibrage sont commandés afin de permettre la dissipation du surplus d'énergie des supercondensateurs.

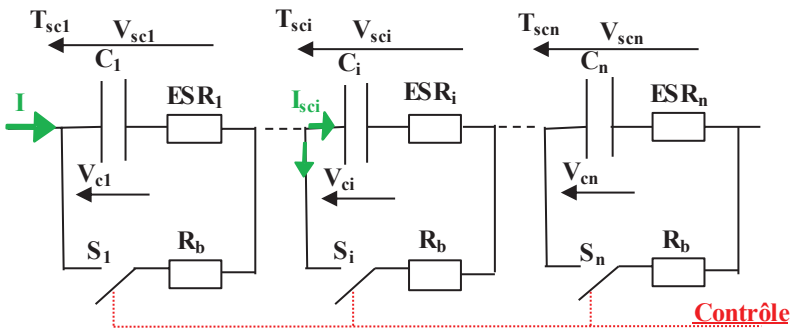


Figure 3.1 Système de stockage d'énergie et son système d'équilibrage

La commande en durée de vie a pour objectif de maximiser la durée de vie du module de stockage d'énergie. Pour un système avec une égalisation classique de tension, à même courant, les éléments associés en série ont la même tension mais peuvent avoir des températures différentes. Cette dispersion de température fait que les éléments du même module ne subissent pas les mêmes sollicitations. Ainsi les éléments les plus sollicités en température vieillissent plus rapidement et se sont eux qui entrainent la fin de vie du système.

L'objectif global de la commande maximisant la durée de vie est de corriger la dispersion du niveau de dégradation grâce à la dispersion de tension. On ne cherche plus à égaliser la tension entre éléments mais à ralentir la dégradation des éléments jugés faibles (se dégradant plus rapidement car à une température plus élevée) en les sollicitant moins en tension.

3 Présentation de la commande prédictive

3.1 Généralités sur la commande optimale prédictive

La commande prédictive, MPC (Model Predictive Control), est un outil de commande qui se base sur un modèle de prédiction. Ce dernier prédit le comportement du système et permet de choisir la décision de commande qui permettra de minimiser ou maximiser une fonction coût tout en respectant les contraintes.

Historiquement, la commande prédictive a vu sa première application au début des années soixante [92][93]. Par la suite, cette commande a connu une grande popularité dans le secteur industriel. On la retrouve dans différents domaines tels que le raffinage, la chimie, l'alimentaire, le service, … [4][94][96][97]. En effet la commande prédictive présente de nombreux avantages : elle est simple à réaliser, rapide à l'exécution, stable, applicable sur différents systèmes (non linéaires, MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), …), … Le seul point délicat est la dépendance de la commande au modèle prédictif qui se doit d'être assez représentatif du comportement réel du système.

3.2 Principe général de la commande prédictive

Le principe général de la commande prédictive consiste à chercher la trajectoire optimale qui permet d'aller de l'état actuel à un état désiré tout en satisfaisant les contraintes imposées [98]. A chaque itération, le modèle prédictif est initialisé avec l'état actuel du système et les contraintes sont définies. Par la suite, la séquence de commande future garantissant la convergence optimale du modèle vers les objectifs désirés sous les contraintes définies est sélectionnée. Cette séquence est appliquée au système durant le temps d'échantillonnage prédéfini et la procédure répétée au prochain pas de calcul. Cette stratégie se base sur le principe de l'horizon fuyant (figure 3.2).

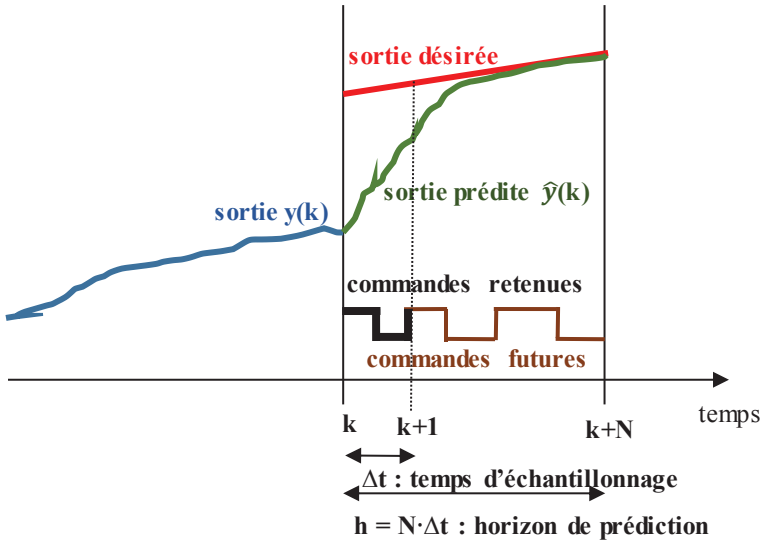


Figure 3.2 Principe général de la commande prédictive

3.3 Eléments de la commande prédictive

Utiliser la connaissance issue du modèle pour envisager divers scénarii de fonctionnement du procédé dans le futur et choisir le meilleur en fonction des objectifs à atteindre, telle est l'idée de base de la commande prédictive [99]. Pour ce faire, la stratégie de commande prédictive s'articule généralement autour de trois points : l'objectif de fonctionnement désiré, le modèle pour réaliser les prédictions et la fonction coût pour choisir la commande future [99][100]. La figure 3.3 modélise les relations entre ces éléments.

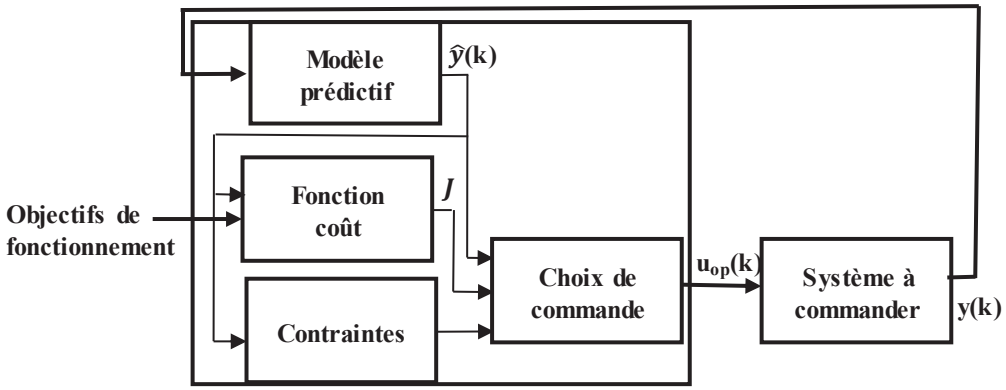


Figure 3.3 Stratégie de la commande prédictive ; $\hat{y}(k)$ sortie prédite du modèle, J fonction coût, $u_{op}(k)$ commande optimale sélectionnée, y(k) sortie réelle du processus commandé

3.3.1 Objectifs de fonctionnement

L'objectif de fonctionnement correspond au comportement désiré du système. Afin de définir ce dernier, il est nécessaire d'établir la problématique à partir du cahier des charges et d'en déduire celle de commande associée. Suivant le système, les objectifs de fonctionnement peuvent correspondre à une amélioration d'un critère représentatif de la qualité du système (augmentation du rendement, diminution des pertes, …) ou assurer la poursuite d'une trajectoire de référence par rapport à la consigne (la régulation de vitesse, régulation thermique,) [99][101].

3.3.2 Modèle prédictif

Le modèle prédictif correspond au descripteur le plus proche du comportement futur du système. Il est la base de la commande prédictive. La modélisation du système peut se faire selon deux méthodes : la modélisation phénoménologique et la modélisation de comportement global entrée-sortie [99][102].

La modélisation phénoménologique se base sur la connaissance du système. Elle décrit les phénomènes physiques mis en jeux lors du fonctionnement du système. Cette modélisation donne lieu à des équations dynamiques, souvent non-linéaires, voire à des équations aux dérivées partielles dès lors que les évolutions spatio-temporelles pour des variables du procédé sont prises en compte en considérant la variable temps comme indépendante. Plus les exigences de fidélité de la description sont grandes plus le modèle est complexe.

La modélisation de comportement global entrée-sortie ne nécessite pas la connaissance des phénomènes mis en jeux. On parle de modèle purement mathématique de type « boite noire » estimant les paramètres représentatifs de la dynamique du système en fonction des données expérimentales d'entrée-sortie. Cette modélisation est préférable lorsqu'il est difficile, voire impossible, de mettre en équation le comportement de certains systèmes, ou bien lorsque l'on manque de précision sur les phénomènes physiques engendrés. Cette représentation mathématique (fonction de transfert, réseaux de neurones,…) peut être plus simple que la modélisation phénoménologique, mais dans certains cas elle peut être très difficile voire impossible à mettre en œuvre (exemple des processus MIMO, Multi Input Multi Output)[102].

Le choix de la modélisation dépend donc de la connaissance du système et des informations disponibles.

3.3.3 Fonction coût

Comme toutes les commandes optimales, la commande prédictive cherche, sous les contraintes de fonctionnement, à optimiser (minimiser ou maximiser) une fonction mathématique **J**, image des objectifs de contrôle du système. Cette fonction **J** représente le critère de performance et est appelée aussi fonction coût. La modélisation de la fonction coût peut prendre en considération la commande u(t), les grandeurs du système x(t) et ses sorties y(t). Le choix de la commande à appliquer au système est tel que la fonction **J** est maximale ou minimale pour que le fonctionnement se rapproche le plus des objectifs de fonctionnement désirés.

3.3.4 Contraintes

Les systèmes commandables peuvent être sujets à des restrictions qui doivent être prises en compte lors du choix de la commande à appliquer. Ces restrictions sont spécifiques à chaque système. Les contraintes peuvent concerner les variables de commande, les variables régulées

et les variables d'état. La commande prédictive permet d'anticiper la violation des restrictions grâce au modèle prédictif. Les restrictions peuvent porter sur l'amplitude du signal de commande, sur l'amplitude de la sortie, sur les oscillations permises de la sortie du système ou sur l'état final atteint [100][103]. A titre d'exemple les actionneurs, leur bon fonctionnement nécessite des restrictions sur l'amplitude des variables d'entrée car ils sont limités en vitesse et en accélération.

3.3.5 Commande prédictive à ensemble de commande fini

La commande prédictive à ensemble de commande fini FCS-MPC (Finite Control Set Model Predictive Control) est appliquée lorsque le système de contrôle possède un nombre fini de commande prédéfinie. Répandue dans la commande des convertisseurs [104][105][106], ces derniers ont l'avantage d'avoir un nombre fini d'états de leurs commutateurs et donc un nombre fini de séquences de commande. La résolution du problème d'optimisation dans ce cas de commande prédictive est simple. Tout d'abord, de l'ensemble des commandes prédéfinies, les séquences de commande répondant aux restrictions des contraintes sur la commande, si elles existent, sont sélectionnées. Ensuite, grâce au modèle prédictif, pour chaque séquence de commande sélectionnée, la sortie du processus est prédite durant un temps prédéfini. Cette modélisation permet une deuxième sélection des séquences de commande lorsque des contraintes sur les variables de sortie sont imposées. Pour les séquences restantes et grâce au modèle prédictif une fonction coût correspondante est définie. La commande retenue et optimale sera donc la commande minimisant ou maximisant cette fonction coût selon les objectifs désirés.

Le contrôle des circuits d'équilibrage porte sur la commande de leurs interrupteurs. La FCS-MPC a été choisie et appliquée pour simplifier les algorithmes de commande optimale. En effet, l'interrupteur du circuit d'équilibrage dispose de deux états. Lorsqu'il est activé (interrupteur fermé, état « On »), il permet le transfert du courant de la cellule (lors des phases de repos) ou d'une partie du courant de la cellule (lors des phases de charge) dans la résistance d'équilibrage et le surplus d'énergie est donc dissipé. Lorsque le circuit d'équilibrage n'est pas activé (interrupteur ouvert, état « Off »), la totalité du courant I est transmise à la cellule sans dérivation par le circuit d'équilibrage.

Pour un système de stockage constitué de n supercondensateurs, nous disposons donc d'un nombre fini (2^n) de séquences de commande. Dans ce qui suit, les différents éléments de

la commande prédictive à ensemble de commande fini sont détaillés dans le but d'expliquer l'approche maximisant la durée de vie.

4 Modèle prédictif du système commandé

L'objectif de ce modèle est de prédire le vieillissement du système de stockage d'énergie. La modélisation cherche donc à représenter la relation liant la commande du circuit d'équilibrage et le vieillissement du supercondensateur à ses bornes. Le modèle final passe par des sous-modèles prédictifs car aucune relation directe ne relie une prédiction du vieillissement d'un supercondensateur à une commande d'interrupteur de circuit d'équilibrage.

La commande du circuit d'équilibrage entraine la réduction du courant dans le supercondensateur. La mesure des tensions présentes aux bornes des cellules nous permet une prédiction de celle-ci par l'utilisation d'un premier sous-modèle de prédiction. Par la suite, nous proposons de présenter les étapes de modélisation.

Chaque élément de stockage est représenté par le modèle série C, ESR (figure 3.1). Même si ce modèle est simple, il est suffisamment représentatif des phénomènes de vieillissement pour réaliser une commande en fonction de la durée de vie.

La tension aux bornes du supercondensateur SC_i, $i \in [1, n]$, peut être exprimée par l'équation 3.1 ci-dessous :

$$V_{sci}(t) = V_{c0i} + \frac{1}{C_i(t)} \int_0^t I_{sci}(t)dt + ESR_i(t) \cdot I_{sci}(t) \qquad (3.1)$$

avec :

- V_{c0i} : la tension initiale de la cellule SC_i,
- $C_i(t)$: la capacité de SC_i,
- $ESR_i(t)$: la résistance équivalente série de SC_i,
- $I_{sci}(t)$: le courant traversant SC_i,
- I(t) : le courant d'entrée du module de stockage,

En considérant des résistances d'équilibrage R_b identiques, le courant traversant SC_i peut être exprimé par l'équation 3.2 :

$$I_{sci}(t) = I(t) - (S_i(t) \cdot \frac{V_{sci}(t)}{R_b}) \qquad (3.2)$$

avec :

- I(t) : le courant d'entrée du module de stockage,
- $S_i(t)$ l'état de l'interrupteur avec $S_i = 0$ pour l'état « Off » et $S_i = 1$ pour l'état « On »,

La tension aux bornes de SC_i devient alors :

$$V_{sci}(t) = V_{c0i} + \frac{1}{C_i(t)} \int \left(I(t) - (S_i(t) \cdot \frac{V_{sci}(t)}{R_b}) \right) dt + ESR_i(t) \cdot \left(I(t) - (S_i(t) \cdot \frac{V_{sci}(t)}{R_b}) \right) \qquad (3.3)$$

La dérivée de la tension en fonction du temps est exprimée par (3.4) comme suit :

$$\frac{dV_{sci}(t)}{dt} = \frac{V_{sci}(t + dt) - V_{sci}(t)}{dt} \qquad (3.4)$$

avec

$$\frac{dV_{sci}(t)}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{C_i(t)} \int \left(I(t) - (S_i(t) \cdot \frac{V_{sci}(t)}{R_b}) \right) \Delta t \right)}{dt} + \frac{d\left(ESR_i(t) \cdot I(t)\right)}{dt} - \frac{d\left(ESR_i(t) \cdot (S_i(t) \cdot \frac{V_{sci}(t)}{R_b}) \right)}{dt} \qquad (3.5)$$

On suppose $C_i(t)$, $ESR_i(t)$, $S_i(t)$ et I(t) constantes durant dt ainsi l'équation précédente devient :

$$\frac{dV_{sci}(t)}{dt} = \frac{1}{C_i} \cdot \left(I - \left(S_i \cdot \frac{V_{sci}(t)}{R_b} \right) \right) - ESR_i \cdot \frac{S_i}{R_b} \frac{dV_{sci}(t)}{dt} \tag{3.6}$$

Ainsi,

$$V_{sci}(t + dt) = \frac{R_b}{C_i \cdot (R_b + ESR_i \cdot S_i)} \cdot I \cdot dt + V_{sci}(t) \cdot \left[1 - \frac{S_i}{C_i \cdot (R_b + ESR_i \cdot S_i)} \cdot dt \right] \tag{3.7}$$

La représentation discrète de cette dynamique de tension de la cellule SC_i est exprimée par :

$$V_{sci}(k + 1) = \frac{R_b}{C_i \cdot (R_b + ESR_i \cdot S_i)} \cdot I \cdot ts + V_{sci}(k) \cdot \left[1 - \frac{S_i}{C_i \cdot (R_b + ESR_i \cdot S_i)} \cdot ts \right] \tag{3.8}$$

- k représente le pas de temps discret,
- ts représente le temps d'échantillonnage,
- S_i correspond à l'état de commande de l'interrupteur i durant ts.

La seconde étape de prédiction consiste à prédire la durée de vie du supercondensateur en utilisant le modèle de prédiction de tension (équation 3.8). L'estimation de la durée de vie par l'exploitation de la loi d'Eyring pour des contraintes variables [33], donne le modèle de durée de vie suivant (cf. chapitre 1 § 2.1.8.5.3. « Loi d'Eyring pour des contraintes variables ») :

$$\tau_{Di}(k) = \tau_0 \cdot \frac{\alpha}{\sum_{j=k-\alpha}^{j=k} e^{-\left[\left(\frac{-T_{sci}(j)}{T_0}\right) + \left(\frac{-V_{sci}(j)}{U_0}\right) + \left(\frac{-I_{effi}(j)}{I_0}\right)\right]}} \tag{3.9}$$

tel que $\tau_{Di}(k)$ l'expression discrète de la durée de vie en considérant une moyenne glissante d'estimation de durée de vie avec la tension V_{sci}, la température T_{sci}, le

courant efficace I_{effi} du supercondensateur SC_i durant un intervalle de temps $(\Delta t_w = \alpha \cdot ts), \alpha \in \mathbb{N}$.

Ainsi la prédiction de la durée de vie intégrant le modèle de prédiction de tension (équation 3.8) et ainsi l'état de la commande est exprimée par l'équation (3.10).

$$\tau_{Di}(k+1) = \tau_0 \cdot \frac{\alpha}{\sum_{j=k+1-\alpha}^{j=k+1} e^{-\left[\left(\frac{-T_{sci}(j)}{T_0}\right)+\left(\frac{-V_{sci}(j)}{U_0}\right)+\left(\frac{-I_{effi}(j)}{I_0}\right)\right]}} \qquad (3.10)$$

Pour cette prédiction de durée de vie, on considère que la température, paramètre qui évolue lentement, reste constante durant le temps Δt_w ce qui permet d'écrire l'équation 3.11 durant cet intervalle. Ainsi, la prédiction de la durée de vie (équation 3.10) est dépendante seulement de la prédiction de tension (équation 3.8).

$$T_{sci}(k+1) = T_{sci}(k) \qquad (3.11)$$

La troisième étape de prédiction porte sur le comportement de la cellule avec le vieillissement. Comme expliqué précédemment, les mécanismes de vieillissement affectent principalement la capacité et l'ESR de la cellule. Ainsi la prédiction de l'évolution d'un de ces deux paramètres en fonction de la commande des circuits d'équilibrage permet de surveiller le niveau de dégradation de chaque cellule. La méthode proposée dans ce mémoire repose sur la prédiction de l'ESR en fonction des sollicitations de la cellule. Le choix s'est porté sur la prédiction de l'ESR et non sur celle de la capacité car celle-ci est simple à réaliser (cf. chapitre 2 § 3.1. « Choix de l'estimation instantanée de la résistance équivalente série »). Le modèle prédictif de l'ESR peut être renseigné à chaque pas de temps par les valeurs estimées grâce aux méthodes proposées au chapitre précèdent.

Le principe régissant le modèle prédictif de l'évolution de l'ESR est représenté grâce à la figure 3.4. L'$ESR_i(k+1)$ est déduit de l'ESR actuel $ESR_i(k)$ après le pas de temps ts. Il peut être admis que l'ESR évolue linéairement lors de sollicitations constantes (cf. chapitre 2 § 3.1. « Choix de l'estimation instantanée de la résistance équivalente série »). Ainsi durant l'intervalle Δt_w, les informations sur les valeurs de la température, de la tension et du courant efficace de la cellule permettent de calculer sa durée, τ_{Di} grâce à l'équation 3.9 ou 3.10. Cette

durée de vie correspond au temps nécessaire pour que l'ESR atteigne sa valeur critique de deux fois l'ESR initiale (2·ESR$_i$(0)). Ainsi ESR$_i$(k) atteint ESR$_i$(k+1) durant ts à la même vitesse que ESR$_i$(0) atteint (2·ESR$_i$(0)) durant $\tau_{Di}(k)$. De même ESR$_i$(k+1) atteint ESR$_i$(k+2) durant ts à la même vitesse que ESR$_i$(0) atteint (2·ESR$_i$(0)) durant $\tau_{Di}(k+1)$. Cette évolution identique est représentée par des droites parallèles de même pente (figure 3.4).

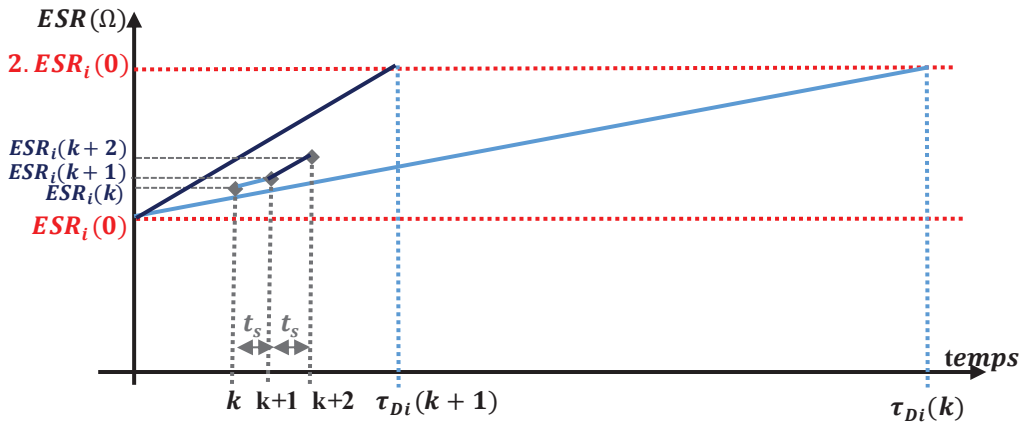


Figure 3.4 Principe du modèle prédictif d'ESR

La description précédente est exprimée par le modèle prédictif ci-dessous :

$$ESR_i(k+1) = ESR_i(k) + \left[\frac{ESR_i(0)}{\tau_{Di}(k)} \cdot ts\right] \qquad (3.12)$$

Cherchant à intégrer la commande des circuits d'équilibrage à la modélisation de la cinétique de vieillissement de la cellule. Il est donc nécessaire d'introduire la durée de vie prédite $\tau_{Di}(k+1)$ (équation 3.10), intégrant la tension prédite $V_{sci}(k+1)$ (équation 3.8), dans la prédiction de l'ESR. Ainsi la prédiction de l'ESR intégrant le modèle de prédiction de durée de vie est exprimée par ESR$_i$(k+2). Elle correspond à l'ESR prédite après deux pas de temps ts (équation 3.13) :

$$ESR_i(k+2) = ESR_i(k+1) + \left[\frac{ESR_i(0)}{\tau_{Di}(k+1)} \cdot ts\right] \qquad (3.13)$$

$$ESR_i(k+2) = ESR_i(k) + \left[\frac{ESR_i(0)}{\tau_{Di}(k)} \cdot ts\right] + \left[\frac{ESR_i(0)}{\tau_{Di}(k+1)} \cdot ts\right] \quad (3.14)$$

La modélisation finale porte sur la prédiction de l'état de santé qui est une image directe de la vitesse de dégradation de la cellule. Le modèle prédictif de l'état de santé peut être exprimé selon l'équation 1.14 par l'équation 3.15 comme suit :

$$SOH_i(k+2)\,\% = \frac{2 \cdot ESR_i(0) - ESR_i(k+2)}{ESR_i(0)} \cdot 100 \quad (3.15)$$

Ainsi la prédiction du niveau de dégradation du supercondensateur est modélisée en fonction des sollicitations et de l'état de la commande du circuit d'équilibrage présent à ses bornes. Ce SOH prédit constitue la base de la nouvelle approche de commande en durée de vie.

5 Commande des circuits d'équilibrage

Pour un système constitué de n circuits d'équilibrage, la commande porte sur son interrupteur Si, i∈[1,n]. Le MOSFET S_i a seulement deux états (« On » et « Off »), représentés par les valeurs (« 1 » et « 0 ») respectivement. On dispose donc de 2^n séquences de commande des circuits. Ces 2^n séquences possibles sont désignées par u_i (avec i∈ $[1, 2^n]$), comme représenté dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Tableau 3.1 Récapitulatif des séquences de commande possibles du système

	S_1	S_2	…	S_n
u_1	Off	Off	…	Off
u_2	On	Off	…	Off
u_3	Off	On	…	Off
…	…	…	…	…
u_{2^n}	On	On	…	On

La dernière séquence u_{2^n}, où tous les interrupteurs sont à l'état « On » a été retirée des séquences définies de commande. En effet cette séquence où on déchargerait toutes les cellules n'a pas vraiment d'intérêt pour la fonction d'équilibrage. La commande réduisant la tension de

toutes les cellules a donc été volontairement enlevée. Ainsi nous disposons de 2^n-1 séquences de commandes possibles.

L'objectif de la nouvelle approche de commande est donc de choisir une séquence parmi ces 2^n-1 séquences permettant de répondre à l'objectif de maximisation de la durée de vie du système de stockage d'énergie expliqué ci-dessous.

Tout comme l'équilibrage classique, la nouvelle approche d'équilibrage est exécutée durant les phases de charge et/ou de repos des cellules afin de ne pas dissiper l'énergie lorsqu'elle est transmise à l'application.

6 Contraintes

Les restrictions d'un tel système de stockage d'énergie concernent essentiellement la tension de la cellule qui ne doit pas être au-dessus de 2.7V et en dessous de 0V.

Le choix de l'état de commande des interrupteurs doit satisfaire la contrainte suivante :

$$u = [u_1; \dots; u_{2^n-1}] \in M_{(2^n-1,n)}([0,1]) \qquad (3.16)$$

u représentant l'ensemble des séquences de commande possible des interrupteurs des circuits d'équilibrage. Il est représenté par le tableau 3.1.

La séquence de commande optimale retenue, $u_{op}(k)$, devra donc satisfaire les contraintes définis ; $u_{op}(k) \in U$ à n'importe quel k tel que :

$$U = \{u \in M_{(2^n-1,n)}([0,1]) / \forall i \in [1,n],\ 0 \leq V_{sci}(k+1) \leq 2.7\} \qquad (3.17)$$

7 Objectifs de commande en durée de vie

Les objectifs de la commande en durée de vie se basent sur la prédiction du SOH qui est une représentation directe du niveau de dégradation de chaque cellule.

La première étape est donc d'identifier les éléments les plus faibles et ensuite d'assurer que la commande retenue ralentisse leur niveau de dégradation.

Soit SOH(u_i) la prédiction des SOH_i de chaque cellule (équation 3.15) en fonction de la séquence de commande $u_i \in U$ (avec $i \in [1, 2^n-1]$) :

$$SOH(u_i) = [SOH_1(u_i), \dots, SOH_n(u_i)\ ] \epsilon\ M_{(1,n)}(\mathbb{R}) \qquad (3.18)$$

L'ensemble des matrices à n lignes et p colonnes à coefficient dans $\mathbb{R}$ est noté $M_{(n,p)}(\mathbb{R})$.

F rassemble les éléments ayant les SOH prédits les plus faibles du module pour chaque séquence de commande. Il est exprimé comme suit :

$$F = [F_1, \dots, F_n\ ] \epsilon\ M_{(1,2\mathrm{n}-1)}(\mathbb{R}), \qquad (3.19)$$

avec

$$F_i = \min\big(SOH(u_i)\big) \epsilon\ \mathbb{R}\ (avec\ i\epsilon[1, 2^n - 1]) \qquad (3.20)$$

La séquence de commande retenue, $u_{op}(k) \in U$, sera donc celle assurant que les éléments les plus faibles aient un niveau de dégradation prédit minimal et donc un état de santé prédit maximal. La séquence optimale assurant la maximisation de la durée de vie est donc celle assurant la fonction coût J suivante :

$$J = \max(F)\ \epsilon\ \mathbb{R} \qquad (3.21)$$

Pour récapituler, l'objectif de cette loi de commande est de choisir une séquence de commande parmi les séquences de l'espace U, permettant que les éléments jugés ayant une durée de vie la plus faible aient un niveau de dégradation minimum. Ceci assure la minimisation de la dégradation du module de stockage et la maximisation de sa durée de vie.

8 Validation de la commande par simulation

8.1 Principe de simulation

Afin d'analyser cette nouvelle approche de commande et de quantifier son influence sur la durée de vie du module, une simulation d'un module de stockage à base de supercondensateurs a été réalisée. Ce dernier subit des sollicitations thermiques et électriques et est surveillé par un système de gestion d'énergie. La simulation réalisée est évolutive dans le temps ; elle reproduit le vieillissement des supercondensateurs en fonction de leurs sollicitations thermiques et électriques. Une comparaison entre les résultats de simulation d'un équilibrage classique d'égalisation de tension et de la nouvelle approche d'équilibrage dans les mêmes conditions est étudiée afin d'analyser et de quantifier l'intérêt de chaque approche.

8.2 Description de la simulation réalisée

8.2.1 Description générale

La simulation considère le modèle d'un module de stockage constitué de trois supercondensateurs associés en série. On associe à ce module de stockage un système de gestion d'énergie qui surveille le courant total, la tension du module et la tension, la température et l'ESR de chaque cellule. Ce système comprend aussi des circuits d'équilibrage dissipatif commandables branchés aux bornes de chaque cellule. Chaque supercondensateur évolue dans le temps en fonction de ses sollicitations propres. Ainsi le module de stockage va se dégrader au cours du temps jusqu'à sa défaillance entrainée par l'élément qui aura atteint un de ses critères de fin de vie.

Nous cherchons à reproduire par simulation les dispersions entre composants existantes dans la réalité. Chaque élément du module de stockage subit donc des sollicitations électriques et thermiques. Les sollicitations électriques correspondent à un appel de puissance correspondant à celui que l'on peut trouver pour un cycle NEDC (New European Driving Cycle) répétitif (figure 3.5). Celui-ci est dimensionné pour que la tension du module soit maintenue entre 7.5 V (2.5 V × 3 cellules) et 3 V (1 V× 3 cellules).

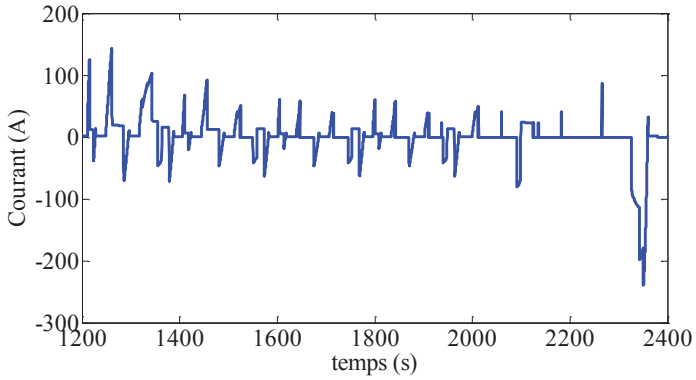


Figure 3.5 Cycle NEDC en courant considéré

Les sollicitations thermiques sont spécifiques à l'échauffement et à l'emplacement des différentes cellules dans le module de stockage.

Une telle modélisation nécessite la considération de trois sous modèles pour chaque supercondensateur :

- un modèle électrique pour reproduire le comportement électrique du composant,
- un modèle thermique pour simuler le comportement thermique et déduire ainsi la température de la cellule,
- un modèle de durée de vie pour décrire l'évolution temporelle des paramètres internes du supercondensateur.

Les trois modèles interagissent entre eux comme représenté sur la figure 3.6 ci-dessous.

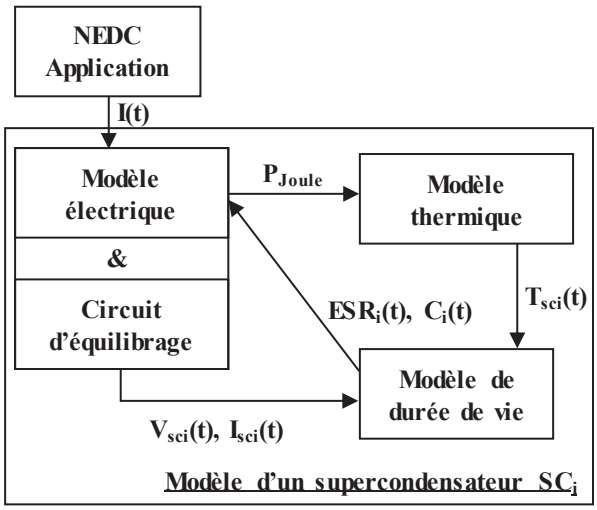


Figure 3.6 Modélisation d'un élément de stockage

8.2.1.1 Modèle électrique du supercondensateur

Le modèle électrique choisi est le modèle « constructeur ». Le choix s'est porté sur celui-ci parce qu'il est simple, il comprend les paramètres internes représentatifs de l'état de santé du supercondensateur et reproduit bien son comportement électrique pour la sollicitation considérée. Par exemple, dans notre cas d'utilisation, il n'est pas nécessaire d'ajouter une résistance de fuite au modèle puisqu'avec le cycle répétitif retenu les temps de repos sont très courts (quelques secondes) et il n'y a donc pas de phénomène d'autodécharge.

8.2.1.2 Modèle thermique du supercondensateur

Le modèle thermique d'un supercondensateur SC_i, représenté par la figure 3.7, est inspiré des travaux de recherche de Alaa Hijazi [48]. Il permet de simuler la température de la borne du supercondensateur qui est représentative de la température au cœur du composant. Ce modèle prend en considération le phénomène de conduction entre le cœur de la cellule et son boitier avec la résistance de conduction (R_{condi}), le phénomène de convection (boitier-air ambiant) avec la résistance de convection (R_{convi}), la capacité thermique ($C_{TH\text{-}SCi}$) modélisant la dynamique thermique de la cellule et enfin le flux thermique correspond aux pertes joules.

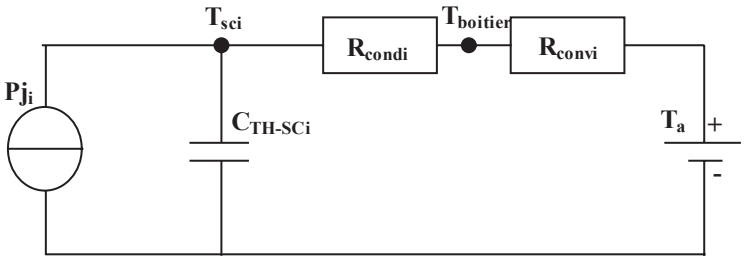


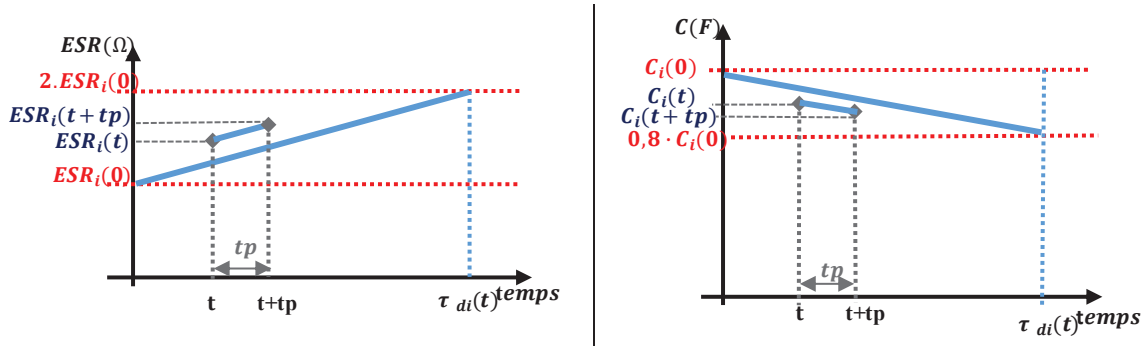
Figure 3.7 Modèle thermique du supercondensateur [108]

Ainsi avec un tel modèle, la température de la cellule (T_{sci}) est dépendante des pertes joules (Pj_i), de la température ambiante T_a et des phénomènes de conduction et de convection.

8.2.1.3 Modèle de durée de vie du supercondensateur

Le modèle de durée de vie du supercondensateur permet de représenter l'évolution de ses paramètres internes en fonction du temps et des sollicitations thermiques et électriques. La capacité et l'ESR actuelles, lentement variables, évoluent linéairement durant le temps tp d'échantillonnage de la simulation. Cette évolution linéaire est dépendante de la sollicitation moyenne en courant, tension et température et définit la durée de vie τ_{Di}(t). La durée de vie

correspond, dans ce cas, au temps nécessaire pour que l'ESR initiale croit linéairement jusqu'au double de sa valeur initiale. Nous considérons donc que durant le temps d'échantillonnage tp, l'ESR actuelle croit linéairement à même vitesse que l'ESR initiale pour atteindre sa valeur critique durant $\tau_{Di}(t)$. La capacité quant à elle est associée à l'ESR. Son évolution est réalisée afin que sa valeur critique (80% de la capacité initiale) soit atteinte simultanément avec le doublement de l'ESR initiale. Les principes de modélisation de l'évolution de l'ESR et de la capacité sont résumés sur la figure 3.8.



$$ESR_i(t+tp) = ESR_i(t) + \left[\frac{ESR_i(0)}{\tau_{Di}(t)} \cdot tp\right] \quad (3.20)$$

$$C_i(t+tp) = C_i(t) - \left[\frac{0.2 \cdot C_i(0)}{\tau_{Di}(t)} \cdot tp\right] \quad (3.21)$$

Figure 3.8 Modèles de durée de vie d'un supercondensateur

8.3 Analyse et interprétations de l'approche d'équilibrage en durée de vie

On se propose dans cette partie d'analyser les résultats de commande des circuits d'équilibrage pour quelques cas de simulation. Ces configurations permettent d'analyser le comportement de la nouvelle approche par rapport à des situations qui peuvent se présenter dans les applications réelles. Pour chaque configuration, on applique la commande classique et la commande en durée de vie et l'évolution du système est observée.

Afin de réduire le temps de simulation, la durée de vie initiale a été réduite d'un facteur 10 pour l'ensemble des supercondensateurs.

8.3.1 Analyse des commandes lors de dispersion de température

8.3.1.1 Description du scénario

Ce scénario reproduit la dispersion de température causée principalement par l'emplacement de chaque cellule dans le module de stockage. On considère des cellules initialement identiques. Ces cellules sont supposées placées dans des endroits tels que la convection ne soit pas la même. Tous les paramètres initiaux sont donc considérés identiques sauf la résistance de convection du modèle thermique de chaque supercondensateur. La configuration permet donc d'avoir trois composants subissant chacun l'effet d'une température différente.

Les paramètres initiaux de la simulation sont donnés dans le tableau 3.2 suivant :

Tableau 3.2 Paramètres initiaux de simulation

	SC1	**SC2**	**SC3**
$C_i(0)$ (F)	3000	3000	3000
$ESR_i(0)$ (mΩ)	0.232	0.232	0.232
V_i (0) (V)	2.500	2.500	2.500
Ta (°C)	25	25	25
R_{condi} (K/W)	0.627	0.627	0.627
$C_{TH\text{-}SCi}$ (J/K)	700	700	700
R_{convi} (kK/W)	0.057	0.067	0.076

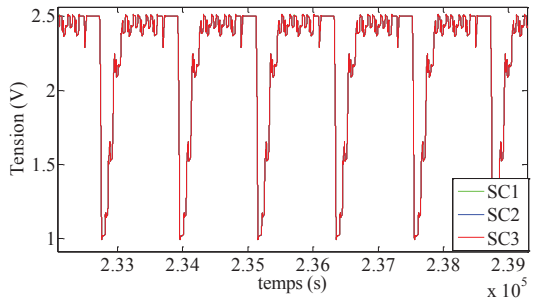
La résistance de convection (R_{convi}) de chaque composant SC_i a été dimensionnée afin que les cellules atteignent 55 °C, 60 °C et 65 °C en fin de vie.

8.3.1.2 Influence des commandes

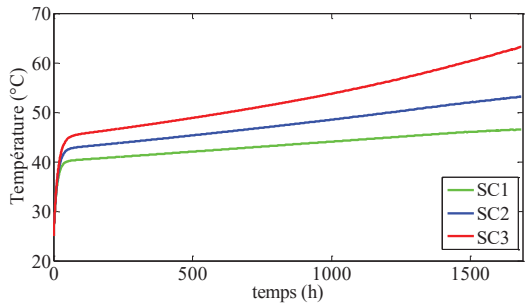
La commande classique a pour objectif d'égaliser les tensions. Ainsi durant toute la durée de vie du module de stockage les trois cellules voient des tensions égales (figure 3.9 (a)).

La commande en durée de vie a pour objectif d'égaliser les sollicitations entre éléments. Dans notre cas de figure avec des ESR_i initiales égales, égaliser les durées de vie revient à maintenir cette égalité. Seule la température des cellules est donc à prendre en considération pour évaluer le niveau de dégradation des supercondensateurs.

Ainsi, en raison de la commande en durée de vie, la cellule avec la plus haute température se voit appliquer une tension plus faible sur tout le long de la simulation tandis que la cellule avec la plus faible température voit une tension plus forte. La cellule avec la température moyenne subit donc une tension de valeur intermédiaire (figure 3.10).

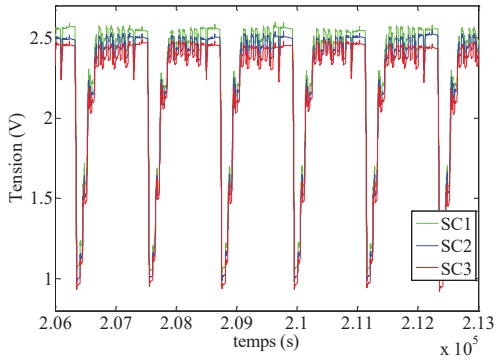


(a) Tension des cellules pour quelques cycles

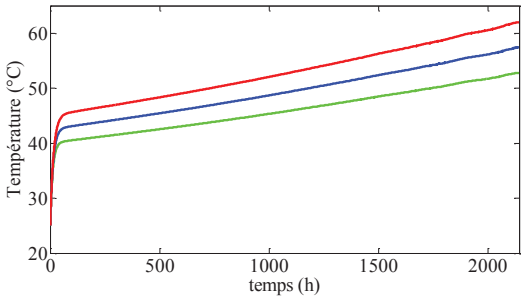


(b) Evolution de la température des cellules au cours du vieillissement

Figure 3.9 Evolution de la température et de la tension pour un équilibrage classique



(c) Tension des cellules pour quelques cycles



(d) Evolution de la température des cellules au cours du vieillissement

Figure 3.10 Evolution de la tension et de la température pour un équilibrage en durée de vie

Les figures 3.11 et 3.12 représentent l'évolution des paramètres internes avec les deux approches de commande des circuits d'équilibrage.

Les courbes en trait plein correspondent aux résultats de la commande en durée de vie et celles en pointillés aux résultats de la commande classique.

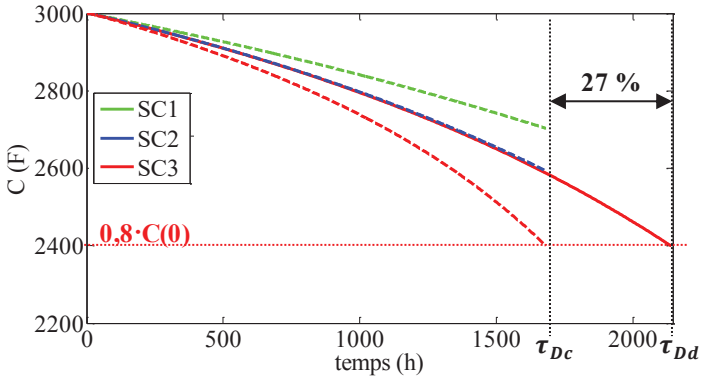


Figure 3.11 Evolution de la capacité pour les deux approches de commande ; τ_{Dc} : durée de vie du système avec l'équilibrage classique, τ_{Dd} : durée de vie du système avec l'équilibrage en durée de vie

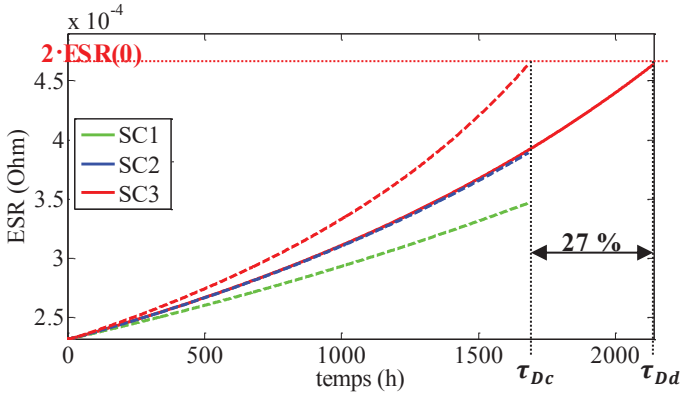


Figure 3.12 Evolution de l'ESR pour les deux approches de commande ; τ_{Dc} : durée de vie du système avec l'équilibrage classique, τ_{Dd} : durée de vie du système avec l'équilibrage en durée de vie

Les courbes en trait plein qui correspondent aux résultats de la commande en durée de vie sont superposées. Equilibrer les durées de vie pour des paramètres initiaux égaux correspond bien au maintien de cette égalité qui permet donc d'obtenir la durée de vie maximale du module.

Avec la commande classique comme expliqué précédemment, à même tension, la cellule SC_3 a la plus haute température et donc va subir une dégradation plus rapide. Elle entraine donc la fin de vie du module de stockage en atteignant son critère de fin de vie alors que les cellules SC_1 et SC_2 ont encore des SOH respectivement de 50% et 32% (figure 3.13).

La commande en durée de vie égalise les SOH en compensant la haute température par une faible tension et inversement. Ainsi les trois éléments atteignent leur fin de vie simultanément. Dans ce cas, la longévité du système est rallongée de 27% (figure 3.13).

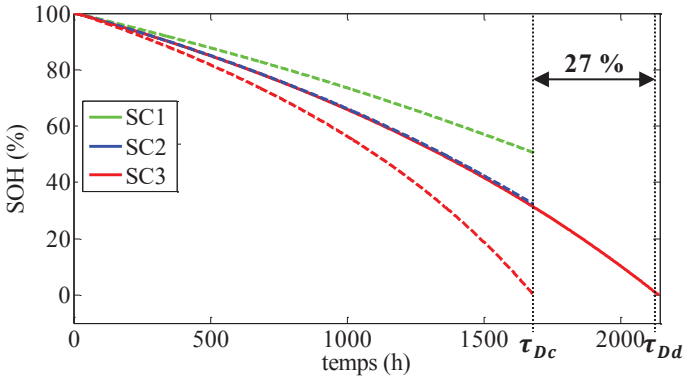


Figure 3.13. Evolution du SOH des cellules pour les deux approches de commande ; τDc : durée de vie du système avec l'équilibrage classique, τDd : dure de vie du système avec l'équilibrage en dure de vie

8.3.2 Analyse des commandes lors de dispersion de la résistance équivalente série

8.3.2.1 Description du scénario

Cette configuration de simulation reproduit un cas de dispersion de paramètres internes des cellules constituant le module de stockage. On considère donc des cellules avec une dispersion initiale de l'ESR de ±11.5%. Tous les autres paramètres initiaux des supercondensateurs sont considérés identiques.

Les paramètres initiaux de la simulation sont donnés dans le tableau 3.3 suivant.

Tableau 3.3 Paramètres initiaux de simulation

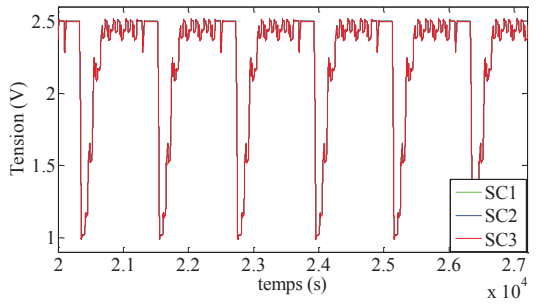
	SC1	SC2	SC3
$C_i(0)$ (F)	3000	3000	3000
$ESR_i(0)$ (mΩ)	0.232	0.261	0.290
V_i (0) (V)	2.500	2.500	2.500
Ta (°C)	25	25	25
$Rcond_i$ (K/W)	0.627	0.627	0.627
$C_{TH\text{-}SCi}$ (J/K)	700	700	700
R_{convi} (kK/W)	0.061	0.061	0.061

La résistance de convection a été dimensionnée afin que la cellule SC_3 atteigne au maximum une température de 65 °C en fin de vie.

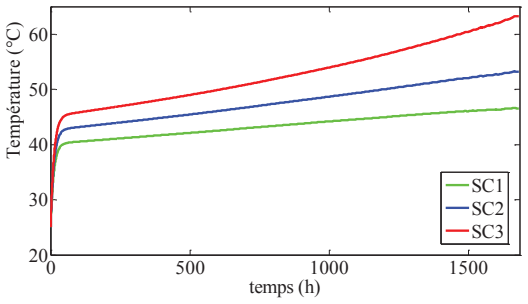
8.3.2.2 Influence des commandes

Pour ce cas de figure où les paramètres thermiques sont identiques et les ESR_i des cellules différentes, l'échauffement de chacune de celles-ci est donc diffèrent. Cela revient donc à un modèle proche de l'exemple précèdent où l'élément avec la plus forte valeur d'ESR a continuellement la plus haute température et inversement.

Les objectifs de commande sont les mêmes pour la commande classique (figure 3.14). Pour des capacités initialement égales et des ESR_i différentes, la principale cause d'accélération du vieillissement est la température provenant de l'échauffement interne de la cellule. Ainsi, avec la nouvelle approche de commande, plus la température de la cellule est élevée moins la tension appliquée à la cellule sera importante (figure 3.15).

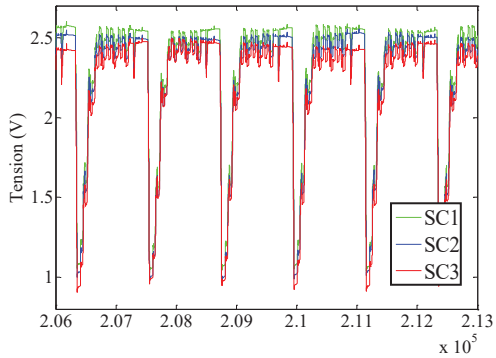


(a) Tension des cellules pour quelques cycles

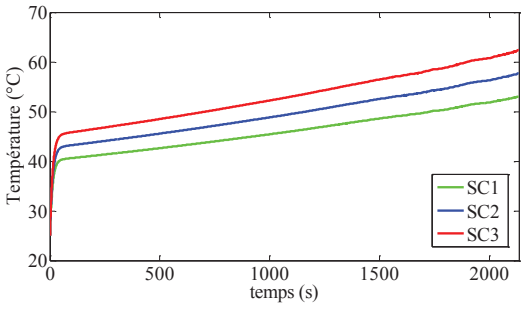


(b) Evolution de la température des cellules au cours du vieillissement

Figure 3.14 Evolution de la température et de la tension pour un équilibrage classique



(a). Tension des cellules pour quelques cycles



(b) Evolution de la température des cellules au cours du vieillissement

Figure 3.15 Evolution de la tension et de la température pour un équilibrage en durée de vie

Les figures 3.16 et 3.17 représentent l'évolution des paramètres internes avec les deux approches de commande des circuits d'équilibrage. Les courbes en trait plein correspondent aux résultats de la commande en durée de vie et celles en pointillés aux résultats de la commande classique.

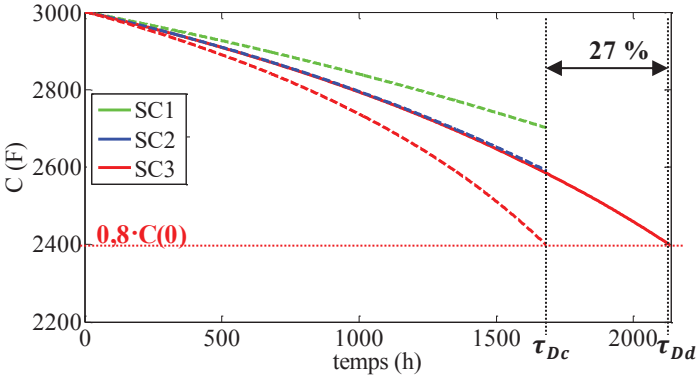


Figure 3.16 Evolution de la capacité pour les deux approches de commande ; τ_{Dc} durée de vie du système avec l'équilibrage classique, τ_{Dd} : durée de vie du système avec l'équilibrage en durée de vie

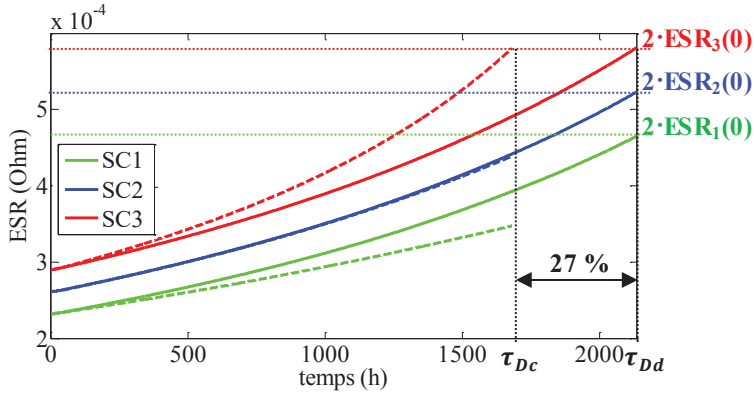


Figure 3.17 Evolution de l'ESR pour les deux approches de commande ; τ_{Dc} durée de vie du système avec l'équilibrage classique, τ_{Dd} : durée de vie du système avec l'équilibrage en durée de vie

La commande en durée de vie égalise bien les vitesses de dégradations. Ainsi on remarque la superposition des courbes en trait plein pour la capacité, car les valeurs initiales sont identiques. Les ESR_i ne sont pas initialement égales, mais elles évoluent avec la même allure avec cette nouvelle approche. Contrairement à la commande en durée de vie, à cause de la dispersion de température, les paramètres internes des supercondensateurs lors d'une commande classique, n'évoluent pas avec la même vitesse. La fin de vie du système est entrainée aussi, pour la commande classique, par la cellule SC_3 qui a la plus forte valeur d'ESR et par conséquent la plus haute température.

La cellule SC_3 atteint son critère de fin de vie alors que les cellules SC_1 et SC_2 ont encore respectivement des SOH de 50% et 32% (figure 3.18).

La commande en durée de vie égalise bien les SOH et non les ESR_i et les trois éléments atteignent leur fin de vie simultanément. Ceci augmente la longévité du système de 27% (figure 3.18)

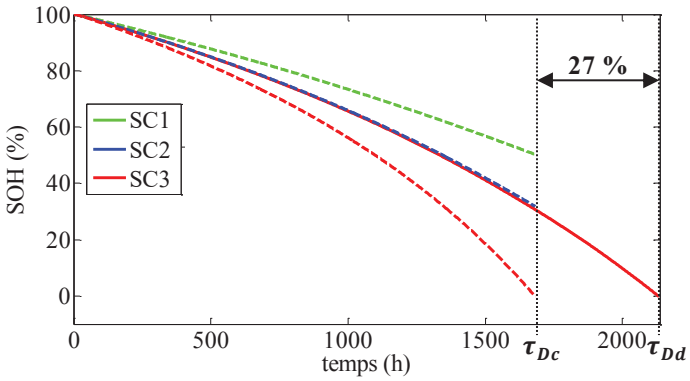


Figure 3.18 Evolution du SOH des cellules pour les deux approches de commande ; τ_{Dc} durée de vie du système avec l'équilibrage classique, τ_{Dd} : durée de vie du système avec l'équilibrage en durée de vie

8.3.3 Analyses des commandes lors de dispersion de tous les paramètres

8.3.3.1 Description du scénario

Cette simulation prend en compte la dispersion de température causée principalement par l'emplacement de chaque cellule et la dispersion des paramètres internes initialement existante entre les cellules du module de stockage. On considère donc des cellules avec une dispersion initiale de moyenne ± 11,5 % sur leur ESR_i et de ± 15 % en moyenne sur leur capacité C_i. Ces cellules sont supposées être disposées dans le module de telle sorte que les échanges thermiques avec le milieu ambiant ne soient pas les mêmes. La résistance de convection du modèle thermique diffère entre composants pour simuler un bon, un moyen et un mauvais échange thermique avec l'air ambiant. Les autres paramètres initiaux sont considérés identiques.

Les paramètres initiaux sont donnés dans le tableau 3.4 ci-dessous.

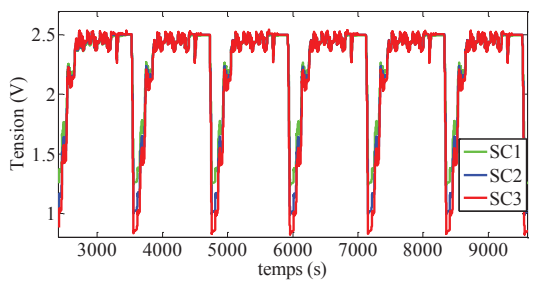
Tableau 3.4 Paramètres initiaux de simulation

	SC1	SC2	SC3
$C_i(0)$ (F)	3600	3000	2700
$ESR_i(0)$ (mΩ)	0.232	0.261	0.290
V_i (0) (V)	2.500	2.500	2.500
Ta (°C)	25	25	25
R_{condi} (K/W)	0.627	0.627	0.627
$C_{TH\text{-}SCi}$ (J/K)	700	700	700
R_{convi} (kK/W)	0.057	0.059	0.061

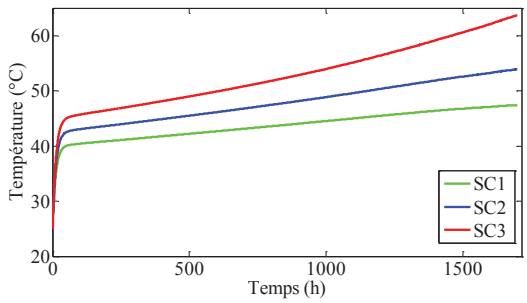
SC_1 est la cellule comportant les meilleurs paramètres (capacité C, ESR et résistance de convection R_{conv}), SC_2 est la cellule avec des paramètres intermédiaires et SC_3 la cellule avec les pires paramètres initiaux.

8.3.3.2 Influence des commandes

Les objectifs de commande sont les mêmes pour la commande classique (figure 3.19). Ralentir le vieillissement revient à diminuer, pour la commande en durée de vie, grâce à l'équilibrage la tension des cellules jugée comme ayant la cinétique de dégradation la plus rapide. Ainsi, durant le cycle de vie du module de stockage, on observe différents cas de dispersion de tension. Cette dispersion dépend de l'état de santé à un instant donné des éléments de stockage (figure. 3.20).

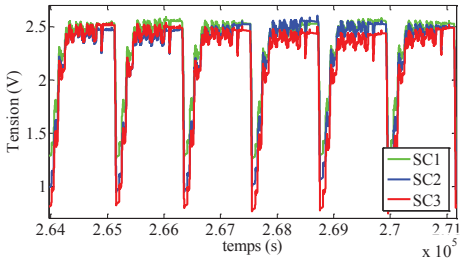


(a) Tension des cellules pour quelques cycles

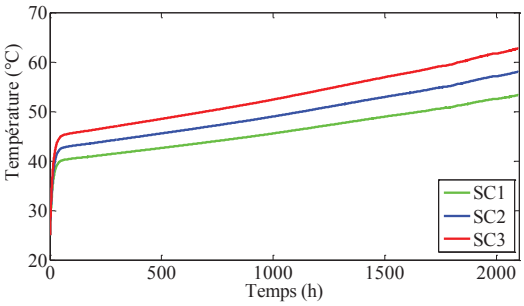


(b) Evolution de la température des cellules au cours du vieillissement

Figure 3.19 Evolution de la température et de la tension pour un équilibrage classique



(a) Tension des cellules pour quelques cycles



(b) Evolution de la température des cellules au cours du vieillissement

Figure 3.20 Evolution de la tension et de la température pour un équilibrage en durée de vie

Les figures 3.21 et 3.22 représentent quelques exemples de dispersion de tension qui apparaissent durant un cycle du module de stockage. On observe que la dispersion de tension crée est proportionnelle à la dispersion des états de santé. L'objectif étant que grâce à la dispersion de tension on arrive à homogénéiser les vitesses de dégradation.

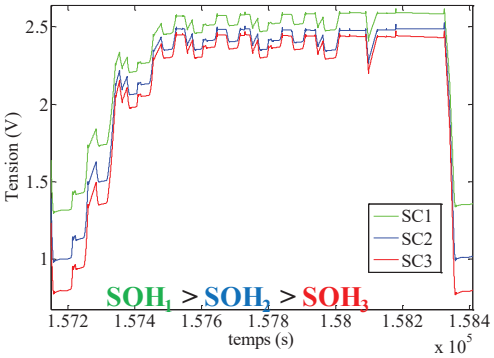


Figure 3.21 Exemple des tensions des cellules pour un cycle (commande en durée de vie)

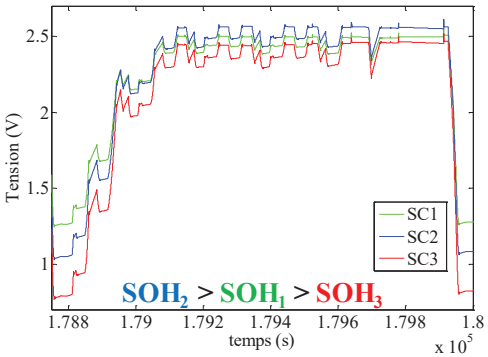


Figure 3.22 Exemple des tensions des cellules pour un cycle (commande en durée de vie)

Cet objectif est bien atteint. En effet les figures 3.23 et 3.24 représentent l'évolution des paramètres internes pour les deux approches de commande.

Les courbes en trait plein correspondent aux résultats de la commande en durée de vie et celles en pointillés aux résultats de la commande classique.

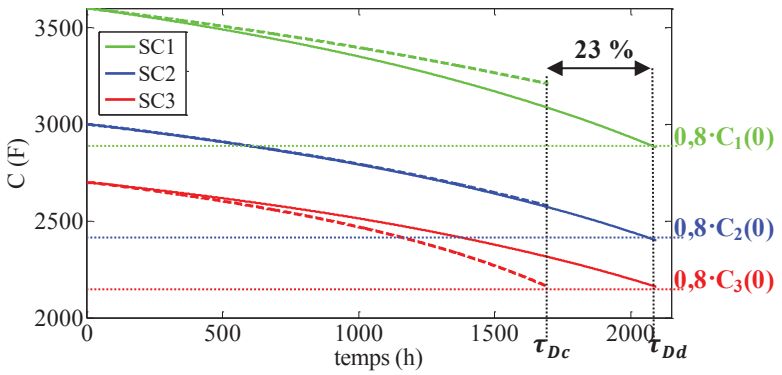


Figure 3.23 Evolution de la capacité pour les deux approches de commande ; τDc durée de vie du système avec l'équilibrage classique, τDd : durée de vie du système avec l'équilibrage en durée de vie

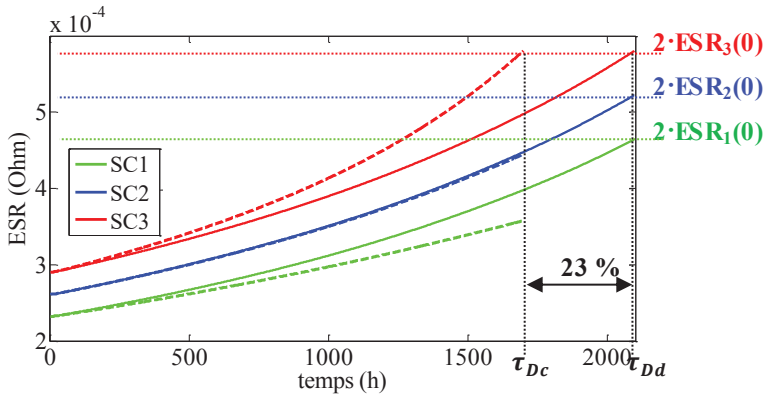


Figure 3.24 Evolution de l'ESR pour les deux approches de commande ; τDc durée de vie du système avec l'équilibrage classique, τDd : durée de vie du système avec l'équilibrage en durée de vie

Avec la nouvelle approche d'équilibrage, on observe une évolution similaire des paramètres internes. Ces paramètres évoluent de leur valeur initiale à leur critère de fin de vie simultanément comme représenté sur la figure 3.23 et 2.24 en trait plein.

Avec l'équilibrage classique, pour chaque configuration, on observe une dispersion de l'évolution des paramètres internes. L'élément le plus faible SC_3 vieillit plus rapidement que les autres. Cet élément entraine donc la fin de vie du module de stockage en atteignant son critère de fin de vie alors que les cellules SC_1 et SC_2 ont encore respectivement des SOH de 46% et 30% (figure 3.25).

La commande en durée de vie égalise toujours les SOH en alternant les sollicitations sur les cellules. Ainsi les trois éléments atteignent leur fin de vie simultanément. Ceci prolonge de 23% la longévité du système en comparaison avec un équilibrage classique (figure 3.25).

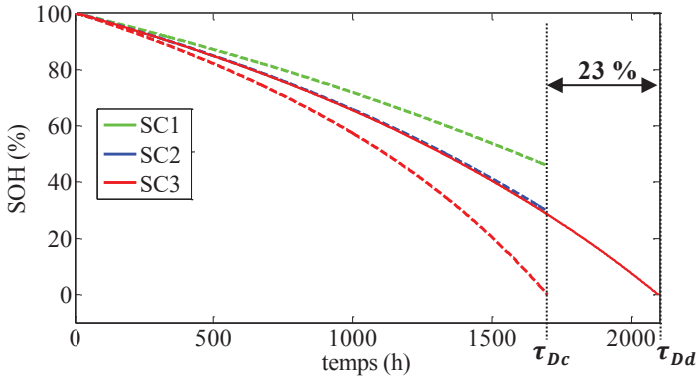


Figure 3.25 Evolution du SOH des cellules pour les deux approches de commande ; τ_{Dc} durée de vie du système avec l'équilibrage classique, τ_{Dd} : durée de vie du système avec l'équilibrage en durée de vie

8.4 Récapitulatif

Les simulations analysées représentent quelques cas de figure de dispersion de paramètres et des conditions environnementales qui peuvent survenir dans une application réelle.

L'égalisation classique de tension permet de maintenir les cellules dans une bonne plage de tension et d'assurer la sécurité du module de stockage et de son utilisateur. Mais avec cette égalisation de tension les cellules ne vieillissent pas à la même vitesse. La fin de vie du module est à chaque fois entrainée par l'élément le plus faible qui vieillit plus rapidement que les autres éléments.

L'équilibrage en durée de vie prend en compte l'ensemble des paramètres qui sont en lien directe avec la durée de vie des éléments de stockage (tension, température, paramètres internes). Cette approche grâce au modèle prédictif, approxime le niveau de dégradation de chaque cellule dans ses conditions d'utilisation. L'objectif est de ralentir le vieillissement des éléments jugés comme se dégradant le plus rapidement en réduisant leur tension d'utilisation. Ainsi, on observe que les paramètres internes des éléments de stockage évoluent toujours de façon similaire. La fin de vie du module pour ce type d'équilibrage est donc entrainée par la fin de vie simultanée de l'ensemble des éléments.

Maximiser la durée de vie des éléments de stockage n'amène pas les SOH des cellules à évoluer comme l'élément avec le SOH le plus élevé de l'équilibrage classique (courbes vertes des figures 3.13, 3.18 et 3.25) mais comme l'élément moyen (courbes bleues des figures 3.13, 3.18 et 3.25). En effet comme les éléments sont associés en série, la réduction des contraintes

électrique de certaines cellules, se répercute par l'augmentation des contraintes sur les autres cellules. Il est donc impossible de minimiser toutes les contraintes de toutes les cellules. Maximiser la durée de vie du module de stockage revient donc à égaliser les contraintes entre éléments par rapport à une moyenne.

9 Commande en durée de vie et coût sur cycle de vie du système de stockage d'énergie

9.1 Rendement énergétique du processus d'équilibrage

Le rendement énergétique est un critère qui permet d'évaluer les performances d'un système d'équilibrage. Celui-ci peut être exprimé pour un module de stockage constitué de n éléments comme suit [108] :

$$\eta(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_{sci} - \sum_{i=1}^{n} W_{eqi}}{\sum_{i=1}^{n} W_{sci}} \cdot 100 \qquad (3.22)$$

avec,

- W_{sci} l'énergie utile stockée dans la cellule SC_i (correspondant à l'énergie emmagasinée dans la capacité C_i du composant (figure 3.1)),
- W_{eqi} l'énergie dissipée dans le circuit d'équilibrage placé aux bornes de la cellule SC_i..

Le tableau 3.5 suivant compare les différents résultats de rendement énergétique pour chaque simulation.

Tableau 3.5 Comparaison du rendement énergétique pour les deux approches d'équilibrage

	Equilibrage classique $\eta_c(\%)$	**Equilibrage en durée de vie** $\eta_d(\%)$
Dispersion de la température	99.7	97.9
Dispersion des ESRs	98.8	97.9
Dispersion de tous les paramètres	98.8	97.9

La commande en durée de vie dissipe toujours un peu plus que la commande classique. En effet, la commande classique cherche continuellement à égaliser les tensions entre éléments. Ainsi, après un certain temps, l'équilibrage est établi et les dissipations visant l'égalisation de tensions sont réduites (figures 3.10 (a), 3.14 (a) et 3.19 (a)). Contrairement à l'approche classique d'équilibrage, la commande en durée de vie cherche à créer continuellement une dispersion de tensions qui correspond à la dispersion des états de santé entre les éléments du module de stockage. Cette dispersion a pour objectif d'égaliser les sollicitations entre les supercondensateurs (figures 3.21 et 3.22). Ainsi, l'équilibrage en durée de vie n'est jamais établi et le niveau de sollicitation des circuits d'équilibrage n'est pas réduit. Néanmoins, la différence de rendement énergétique ne dépasse pas les 2 %. On peut donc considérer que l'efficacité énergétique suivant l'approche de commande des circuits d'équilibrage n'est pas trop affectée. Même si l'énergie dissipée est légèrement supérieure lors de l'équilibrage en durée de vie, cette dissipation est faible comparée à l'énergie stockée dans les systèmes de stockage. A titre d'exemple, pour une résistance d'équilibrage de 10 Ω, le courant maximal dissipé est de 0.27 A (correspondant à une puissance dissipée de moins de 1W) ce qui est très faible comparé aux centaines d'Ampère traversant la cellule lors des applications à forte puissance (supérieures à plusieurs kW).

9.2 Coût sur cycle de vie du système de stockage d'énergie

La nouvelle approche d'équilibrage assure la prolongation de la durée d'utilisation du module de stockage d'une vingtaine de pourcents. Elle garantit aussi une efficacité énergétique du module de stockage assez proche de celle de l'équilibrage classique. Cette section se propose de quantifier le bénéfice budgétaire de cette nouvelle approche.

Partons d'un même système de stockage d'énergie avec son système de gestion d'énergie (SCM) et considérons seulement l'approche de commande différente. Lors de la fin de vie du module de stockage, celui-ci doit être remplacé par un nouveau. Nous supposons que le SCM reste fonctionnel, sa fiabilité n'est donc pas considérée dans notre étude, tout comme son prix d'investissement. Comme le matériel utilisé dans les SCM est identique et étant donné que la durée de vie de ses constituants est bien supérieure à celle des éléments de stockage, nous négligeons leurs impacts sur le coût de l'ensemble.

L'amortissement Am peut être utilisé comme un outil afin de comparer le prix du système sur cycle de vie avec les deux approches d'équilibrage. Il est exprimé par l'équation 3.23 comme suit :

$$Am = \frac{P_m}{\tau_D} \qquad [€/jours] \quad (3.23)$$

P_m est le coût du module de stockage constitué de n supercondensateurs et $\boldsymbol{\tau}_D$ sa durée de vie. De plus :

$$P_m = n \cdot P_{SC} \qquad [€] \quad (3.24)$$

P_{SC} étant le prix initial d'un supercondensateur. Un coût de 10 €/kF peut être aujourd'hui considéré.

La prolongation de la durée de vie avec la nouvelle approche d'équilibrage apporte un gain sur le prix d'investissement pouvant être exprimé par l'équation (3.25) comme suit :

$$g_{Am} = Am \cdot \left(\tau_{D_d} - \tau_{D_c}\right) = \frac{P_m}{\tau_{D_c}} \cdot \left(\tau_{D_d} - \tau_{D_c}\right) \qquad [€] \quad (3.25)$$

τ_{D_d} la fin de vie du module de stockage avec un équilibrage en durée de vie,

$\tau_{D_{dc}}$ la fin de vie du module de stockage avec un équilibrage classique,

Les résultats des différentes configurations avec les deux approches d'équilibrage sont récapitulés dans le tableau 3.6 suivant :

Tableau 3.6 Comparaison des gains sur l'amortissement résultants de l'utilisation de l'équilibrage en durée de vie

	g_{Am}(€)
Dispersion de la température	0.27·Pm
Dispersion de l'ESR	0.27·Pm
Dispersion de tous les paramètres	0.23·Pm

L'équilibrage en durée de vie utilise un matériel identique que l'équilibrage classique, et dans les mêmes conditions, arrive à prolonger l'utilisation du module de stockage et diminuer ainsi son amortissement d'une vingtaine de pourcent. Dans les applications à haute puissance, le module de stockage est constitué de dizaines voire de centaines d'éléments. Par exemple, dans le cas du projet Hybus (concernant un projet de récupération de l'énergie de freinage d'un trolley bus) [33], le module de stockage est constitué de 120 supercondensateurs de 3000 F/2.7 V ce qui correspond à un coût d'investissement proche de 3600 €. Le gain sur l'amortissement avec un équilibrage en durée de vie peut donc être estimé à 828 €. Ainsi gagner 20% sur l'investissement initial sans ajout de matériel et sans modification majeure de l'efficacité du système peut être considéré comme un résultat très satisfaisant.

10 Conclusion

Ce chapitre présente une nouvelle approche de commande des circuits d'équilibrage dissipatif qui permet de rallonger la durée de vie du module de stockage. Contrairement à l'égalisation conventionnelle de tension, elle adapte le niveau de sollicitation de chaque cellule à son état de santé afin de ralentir au maximum le vieillissement de l'ensemble. Cette nouvelle stratégie de contrôle a été validée grâce à une simulation d'un système de stockage d'énergie à base de supercondensateurs. La simulation considère un système de stockage d'énergie contrôlé par un système de gestion d'énergie et ses circuits d'équilibrage. Ce système de stockage évolue dans le temps en fonction des sollicitations qu'il subit jusqu'à sa défaillance. Pour différents cas critiques de dispersion de paramètres (internes et environnementales), la comparaison entre les résultats d'un équilibrage classique de tension et la nouvelle approche d'équilibrage a été présentée et a montré l'intérêt de la nouvelle approche d'équilibrage. En effet une amélioration de la durée de vie d'une vingtaine de pourcent avec cette nouvelle stratégie de commande a été observée. Par ailleurs, l'efficacité du module de stockage n'est quasiment pas impactée. Cela permet de gagner une vingtaine de pourcent sur le prix d'investissement initial.

Cette nouvelle approche d'équilibrage présente donc différents avantages. Elle utilise un matériel déjà existant et peut être implémentée facilement d'un point de vue logiciel dans un système de gestion d'énergie à circuits d'équilibrage dissipatif et remplacer l'équilibrage conventionnel existant. L'étude expérimentale de cette nouvelle stratégie d'équilibrage est présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 : Etude expérimentale de la commande des circuits d'équilibrage en vue d'estimer et d'améliorer la durée du système de stockage d'énergie

1 Introduction

Ce mémoire a deux principaux objectifs : l'estimation et l'amélioration de la durée de vie des supercondensateurs en utilisant une commande originale de leurs circuits d'équilibrage. Le travail a consisté à développer de nouvelles approches de commande permettant d'atteindre ces objectifs qui sont décrits dans les chapitres 2 et 3.

Celles-ci permettent d'estimer la durée de vie d'un supercondensateur via la commande de son circuit d'équilibrage (cf. chapitre 2). La méthodologie de commande visant la maximisation de la durée de vie d'un module de supercondensateur (cf. chapitre 3) a donné des résultats probants lors de simulations représentatives.

Ce chapitre met en œuvre les travaux développés dans les deux précédents chapitres et a pour objectif de valider expérimentalement les travaux déjà présentés.

2 Objectifs de l'étude expérimentale

L'objectif est d'analyser expérimentalement la maximisation de la durée de vie d'un module de stockage d'énergie constitué de supercondensateurs associés en série.

La notion de maximisation ou d'amélioration d'un paramètre nécessite sa comparaison à une référence. La référence dans cette analyse considère une commande classique des circuits d'équilibrage. Nous avons donc reproduit les mêmes conditions expérimentales pour deux modules de stockage identiques, l'un subissant une égalisation classique de tension par ces circuits d'équilibrage et l'autre une commande en durée de vie. L'objectif est d'analyser la nouvelle approche de commande en durée de vie dans des circonstances réelles et de la comparer à la commande classique.

3 Description de la maquette

La maquette est constituée de deux modules de stockage identiques (SSE1 dont les cellules sont dénommées SC1, SC2, SC3 et SSE2 dont les cellules sont dénommées SC4, SC5 et SC6. Les éléments de ces modules sont choisis et agencés afin de reproduire les dispersions de paramètres et de températures existantes lors de l'utilisation de ce type de module de stockage. Le nombre de cellules a été limité à 3 pour des raisons évidentes de mise en œuvre et afin de simplifier l'analyse et l'interprétation des résultats. Nous avons volontairement créé une dispersion critique entre les paramètres internes et les températures des 3 cellules. Cette dispersion permet d'analyser et d'interpréter le fonctionnement de la nouvelle approche de commande. Les résultats obtenus pourront être interpolés par la suite sur un plus grand nombre d'éléments.

Nous avons tenté de faire subir le même type de vieillissement accéléré aux deux modules de stockage. Les supercondensateurs de chaque module endurent, de manière symétrique, les mêmes sollicitations électriques et thermiques. Les sollicitations électriques correspondent à un cyclage répétitif appliqué durant toute la durée du vieillissement. Les sollicitations thermiques consistent à générer une dispersion de température entre les éléments d'un même module de stockage.

Ces modules sont surveillés et contrôlés durant leurs sollicitations par un système de gestion d'énergie. Ce dernier assure la surveillance et le contrôle de chaque module de stockage.

La figure 4.1 représente le principe de la maquette expérimental réalisée.

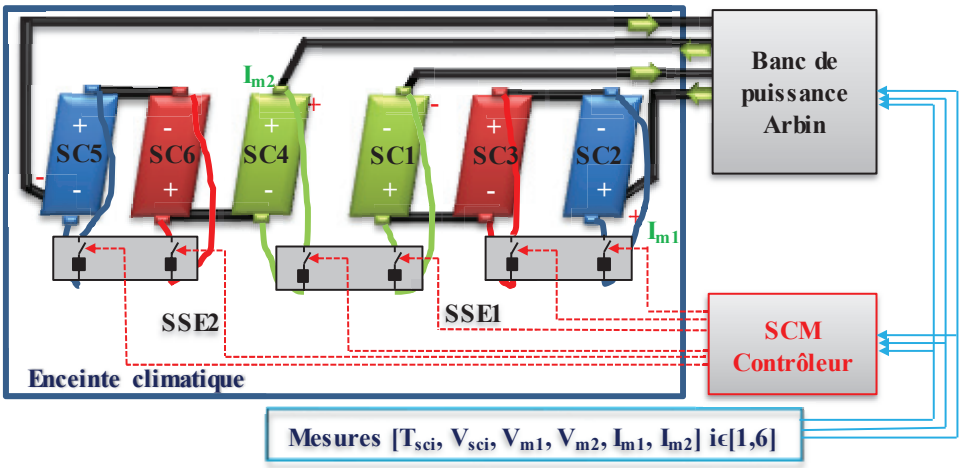


Figure 4.1 Principe de la maquette expérimentale

La figure 4.2 montre une photo de la maquette des deux modules de stockage (3 cellules de SSE1 à droite et 3 cellules de SSE2 à gauche) placés de façon symétrique dans l'enceinte climatique.

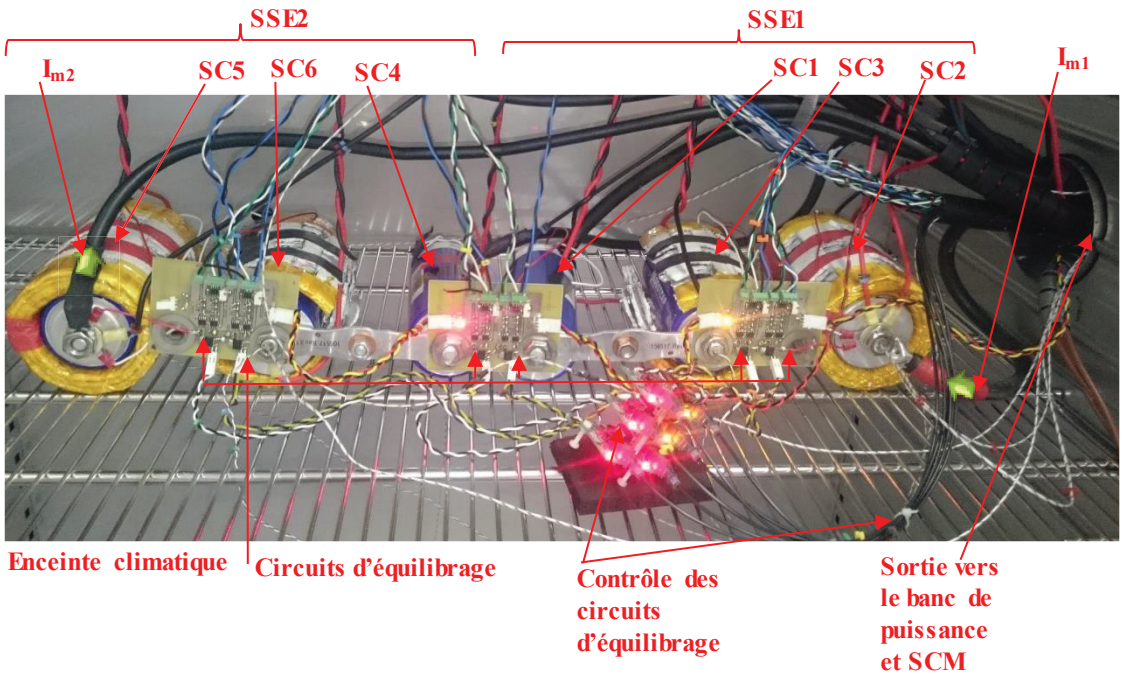


Figure 4.2 Maquette expérimentale

Dans ce qui suit, cette réalisation est présentée plus en détail.

3.1 Système de gestion d'énergie

La commande des circuits d'équilibrage est assurée par le contrôleur du système de gestion d'énergie. Les deux méthodologies de commande sont donc introduites dans le même contrôleur qui assure la surveillance et l'égalisation des tensions pour le module SSE1 et la surveillance et la maximisation de la durée de vie pour le module SSE2.

Le système de gestion d'énergie est constitué d'une partie matérielle et d'une partie logicielle. Après analyse des différentes topologies de réalisation, notre choix s'est porté sur la réalisation d'un système de catégorie protecteur distribué complet (cf. chapitre 1 §. 4. Systèmes de gestions d'énergie). Ce système assure toutes les fonctions présentées au chapitre 1 qui sont résumées ci-dessous et qui seront détaillées dans la suite :

a. Mesures
   - Mesure de la tension individuelle de chaque supercondensateur
   - Mesure de la température individuelle de chaque supercondensateur
   - Mesure du courant rentrant dans chaque module
   - Mesure de la tension aux bornes de chaque module

b. Estimations des paramètres
   - Cette fonction est assurée grâce à la commande des circuits d'équilibrage et aux mesures existantes. Elle permet l'estimation de la durée de vie du supercondensateur branché aux bornes du circuit d'équilibrage (cf. chapitre 2 §. 5. Estimation de la durée de vie par commutation à la fréquence de résonnance des interrupteurs des circuits d'équilibrage). Cette estimation est réalisée grâce à l'estimation de l'ESR actuelle et sa comparaison à sa valeur initiale. La commande permettant cette estimation est activée occasionnellement (toutes les heures durant 15 secondes), cette dernière est actualisée et sauvegardée par le contrôleur.

c. Gestion
   - Le contrôle de la sécurité consiste à maintenir les cellules dans leurs bonnes plages de fonctionnement durant leur utilisation. Une commande de sécurité arrête la manipulation (appel de puissance et équilibrage) lorsque l'une des plages de fonctionnement ci-dessous n'est pas respectée.
     - Température individuelle $T_{sci} \leq 70$ °C, $i \in [1, 6]$
     - Tension individuelle $V_{sci} \in [0.7\ V, 2.7\ V]$, $i \in [1, 6]$
     - Courant entrant $I_{mj} \in [-150A, 150A]$, $j \in [1, 2]$
     - Tension module $U_{mj} \in [2.9\ V, 7.6V]$, $j \in [1, 2]$

Concernant les tensions, nous avons défini une tension de module qui varie entre 2.9 V et 7.6 V qui correspond à une variation entre 1 V et 2.5 V par cellule, plus ou moins la précision de mesure de 0.1 V. Néanmoins, la plage de bon fonctionnement défini pour la cellule individuelle est plus large que celle du module de stockage avec un seuil bas à 0,7 V ((0.7 V × 3 < 2.9 V) et un seuil haut à 2,7 V (2.7 V× 3 > 7.6 V)). La tension minimale que nous avons autorisée pour la cellule n'est pas de 1V ± 0.1V mais de 0.7 V afin de tenir compte de la dispersion de tension créée lors de l'équilibrage en durée de vie. En effet, comme présenté au chapitre précédent, l'égalisation des contraintes en vue de maximiser la durée de vie peut amener certaines cellules du module de stockage en dehors de la plage de tension définie pour le module (figure 3.10 (a)). Ainsi quelle que soit l'approche d'équilibrage utilisée, la tension

du supercondensateur ne doit pas dépasser la tension maximale autorisée (2.7 V) mais une tolérance est accordée pour le seuil minimal de tension utile (1 V).

- L'équilibrage est assuré par les circuits d'équilibrage dissipatif branchés aux bornes de chaque supercondensateur.

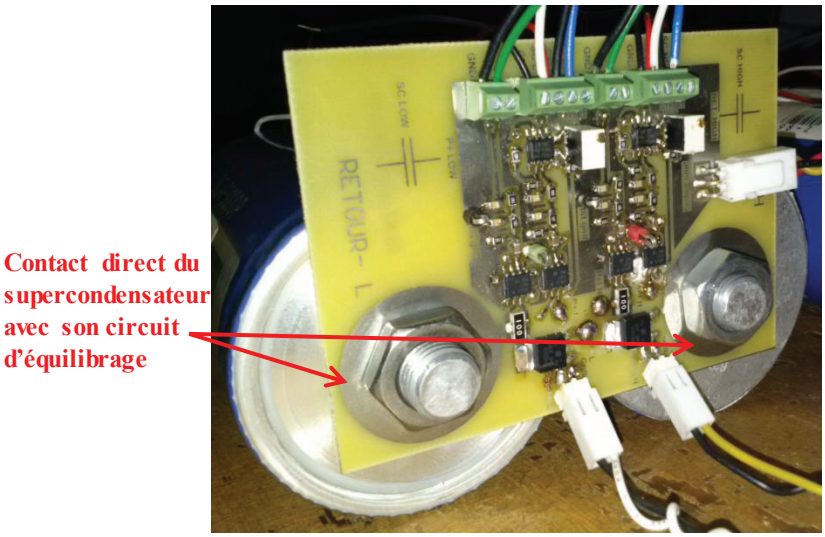


Figure 4.3 Circuits d'équilibrage réalisés

3.2 Banc de cyclage

La sollicitation électrique est assurée par un banc de puissance Arbin (BT2000- 10V-150A-2Ch) (Voir Annexe D) représenté sur la figure 4.4. Ce dernier dispose de deux voies et permet de reproduire un appel de puissance identique sur chaque voie. Il dispose d'une interface programmable permettant de réaliser différents types et profils de sollicitations électriques (charge, décharge en puissance, courant ou tension). Il dispose aussi d'un dispositif de sécurité interne qui arrête l'application si le système sollicité ou l'un de ses éléments n'est pas dans la plage de fonctionnement prédéfinie (tension, courant et température). Il comprend donc des entrées/sorties utilisées comme suit :

- Deux voies de puissance branchées chacune aux bornes d'un module de stockage.
- Deux entrées de mesure de tension connectées aux bornes de chaque module de stockage.
- Six entrées de mesure de tension pour mesurer les tensions des six supercondensateurs.
- Huit entrées/sorties numériques dont une sortie utilisée pour communiquer avec le contrôleur du SCM.

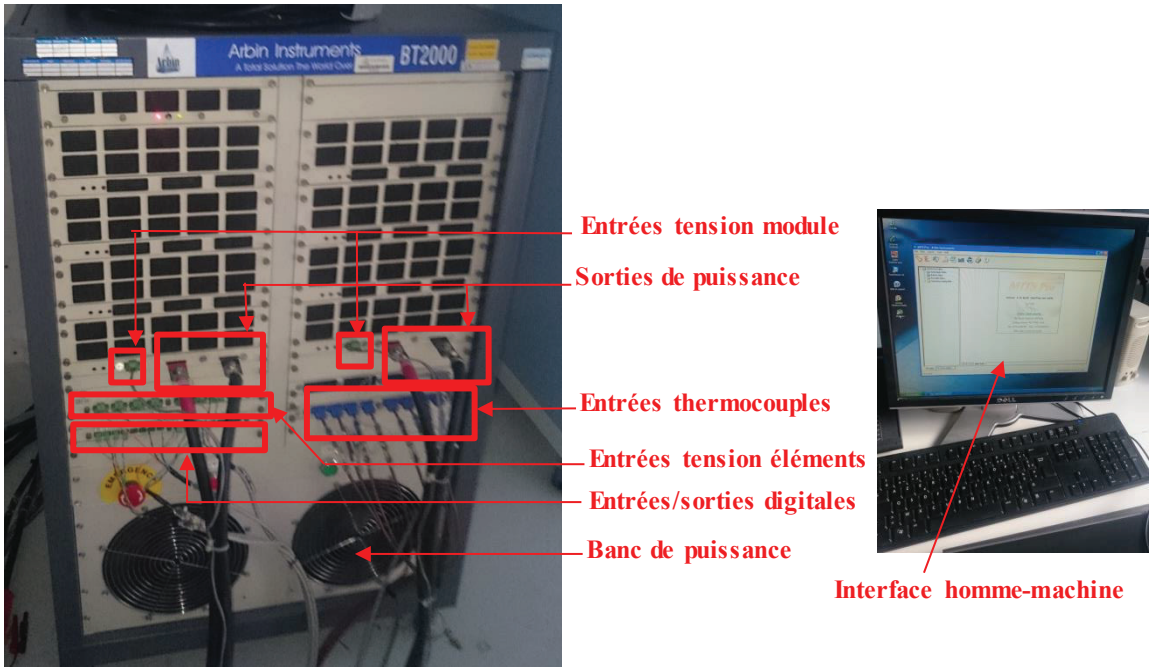


Figure 4.4 Présentation du banc de cyclage Arbin

3.3 Instrumentation

Les mesures portent sur la tension individuelle et la température de chaque supercondensateur ainsi que la tension et courant de chaque module de stockage.

La mesure de tension individuelle est redondante. Elle est assurée par les circuits d'équilibrage et par le banc de cyclage. Chaque circuit d'équilibrage dispose d'entrées de mesure de tension (cf. chapitre 2. §. 5.4.1.1. Circuits d'équilibrage). Ces mesures sont nécessaires au système de gestion d'énergie. Le banc de cyclage dispose aussi d'entrées de mesure de tensions individuelles qui permettent de suivre et de contrôler le système et d'interrompre le fonctionnement si la tension d'un des supercondensateurs est en dehors des seuils prédéfinis.

La mesure de température est assurée par des thermocouples branchés de façon identique sur chaque élément de stockage afin de garantir la similitude de la mesure. En effet, selon l'emplacement du thermocouple sur la cellule, la température mesurée est différente. La raison est liée aux phénomènes de conduction et de convection du film isolant recouvrant le supercondensateur avec l'environnement extérieur [33]. Après différents essais, nous avons choisi de placer le thermocouple au centre de la cellule, sous le film isolant comme présenté sur

la figure 4.5 ci-dessous. La température du boîtier mesurée est considérée comme identique à la température interne de l'élément de stockage.

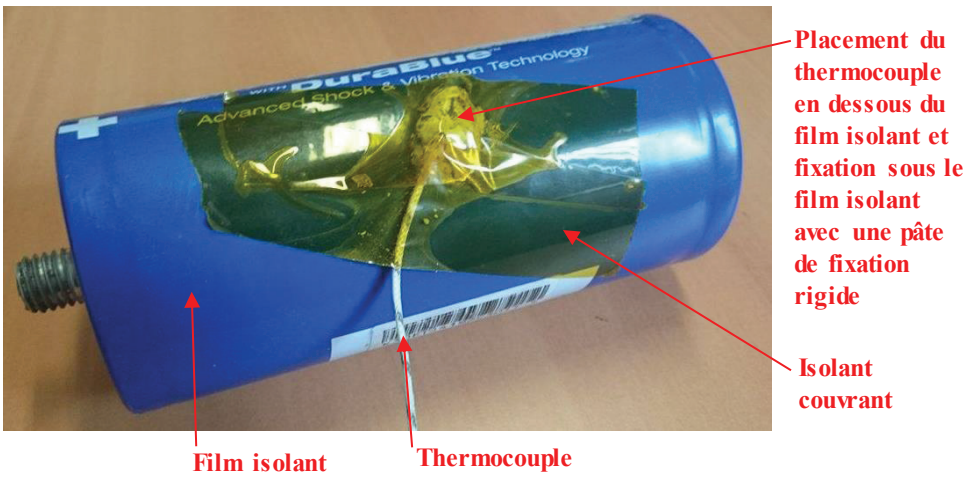


Figure 4.5 Placement du thermocouple

La mesure du courant est redondante, elle est assurée pour chaque module par un capteur de courant (cf. Annexe A.3) et par le banc de cyclage. La mesure par les capteurs est nécessaire au contrôleur du système de gestion d'énergie. La mesure effectuée par le banc de cyclage est nécessaire afin que ce dernier régule le cycle de puissance créé.

La mesure de la tension aux bornes de chaque module est assurée par le banc de cyclage afin qu'il régule le cycle de puissance.

3.4 Interface homme-machine

On dispose de deux interfaces homme-machine, l'interface du banc de cyclage et l'interface de contrôle du système de gestion d'énergie. Celle du banc de cyclage est une interface propre au banc. Elle permet la programmation des sollicitations électriques pour les deux voies du banc, la visualisation et la sauvegarde des paramètres électriques et thermiques des deux modules et de leurs éléments.

L'interface de contrôle du système de gestion d'énergie a été réalisée grâce au logiciel de développement « Labview ». Celle-ci est divisée en deux sous sous-ensembles, une par module. Pour chaque interface, on dispose donc d'un tableau de bord qui permet de visualiser la tension de chaque supercondensateur, le courant rentrant dans le module et la dernière valeur d'ESR estimée pour chaque composant. Il permet aussi, pour l'estimation de l'ESR, de

paramétrer la commande (fréquence de commutation, durée de l'estimation, …). La figure 4.6 représente une des interfaces réalisées du système de gestion d'énergie réalisée.

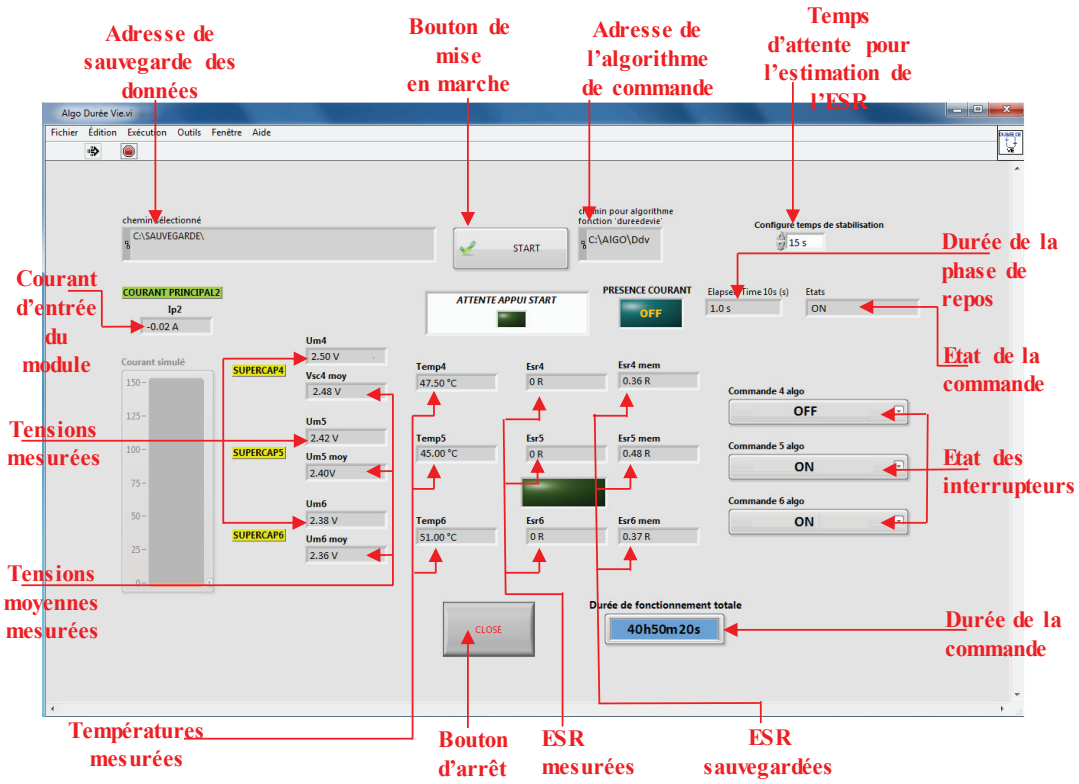


Figure 4.6 Interface homme-machine du système de gestion d'énergie

3.5 Systèmes de stockage d'énergie expérimentés

Les systèmes de stockage utilisés dans cette expérimentation sont deux modules identiques, SSE1 constitué des cellules SC1, SC2 et SC3 et SSE2 constitué des cellules SC4, SC5 et SC6.

Les supercondensateurs sont choisis en fonction de leurs caractéristiques initiales. Ainsi les cellules SC1 et SC4 ont des caractéristiques électriques initiales assez similaires et subissent les mêmes sollicitations thermiques. Il en est de même pour SC2 et SC5 et enfin SC3 et SC6. Seule la commande des circuits d'équilibrage diffère entre le module SSE1 et le module SSE2.

3.5.1 Choix des supercondensateurs

Les modules de stockage SSE1 et SSE2 sont constitués de trois supercondensateurs de 3000F/2.7V (cf. Annexe C). Le tableau 4.1 suivant indique les paramètres initiaux des

supercondensateurs. Ces paramètres proviennent des caractérisations temporelles initiales réalisées.

Tableau 4.1 Caractéristiques initiales des supercondensateurs

	Caractérisation temporelle (40°C)	
	ESR_{DC} (mΩ)	C (F)
SC1	0.61	2869
SC4	0.60	2915
SC2	0.59	2907
SC5	0.59	2879
SC3	0.63	2728
SC6	0.62	2721
SSE1 (SC1, SC2, SC3)	1.83	944
SSE2 (SC4, SC5, SC6)	1.81	945

3.5.2 Sollicitation thermique

Nous remarquons que les ESR initiales des cellules sont toutes très proches. L'échauffement des supercondensateurs sera donc assez proche initialement. Placés dans une enceinte thermique et avec un même niveau de courant, les six éléments auront donc une même température similaire. Afin de créer une dispersion de température entre cellules dans les modules, nous avons modifié le coefficient de convection de certaines avec l'air ambiant en insérant une couche thermique isolante. Ainsi, comme représenté sur la figure 4.7, chaque paire de supercondensateurs (un par module) dispose d'une isolation spécifique et d'un niveau d'échauffement ainsi diffèrent des autres éléments.

Figure 4.7 Différentes isolations thermiques utilisées

Les deux modules de stockage sont disposés de façon symétrique dans l'enceinte thermique. Ce placement symétrique (figure 4.1) permet d'avoir une symétrie du niveau d'échauffement entre les deux modules. La consigne de température appliquée est de 40°C. Grâce aux différentes isolations réalisées, l'échauffement maximal des supercondensateurs est estimé à environ 10°C en début de vie. Cet échauffement initial double lorsque l'ESR du supercondensateur est multiplié par un facteur 2 en fin de vie. Avec la consigne de température maximale fixée on garantit que la cellule qui s'échauffe le plus (isolation type 3 (figure 4.7) ne dépasse pas une température maximale de 65°C en fin de vie.

3.6 Vieillissement accéléré

Les deux modules de stockage subissent le même type de vieillissement accéléré. Un vieillissement accéléré, comme son nom l'indique, est une méthode où l'on tente de reproduire et de mesurer les mécanismes de dégradation d'un système sur une période de temps, plus courte. Pour se faire, on doit agir sur les facteurs accélérant le vieillissement des supercondensateurs qui sont la tension, la température et le courant.

3.6.1 Cyclage proposé

Un cycle répétitif comportant des phases de charge, de décharge à puissance constante et de repos est appliqué aux deux modules. Ce cycle est programmé dans le banc de cyclage et est appliqué de manière continue tout au long du vieillissement accéléré. Il est présenté sur la figure 4.8 ci-dessous.

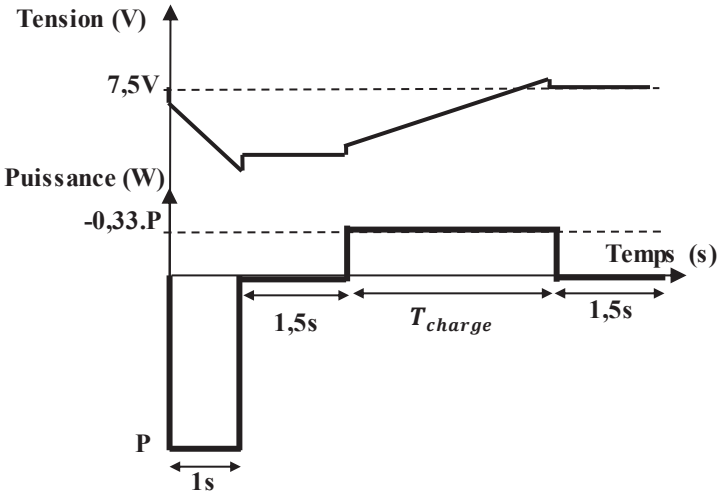


Figure 4.8 Cycle de puissance appliqué et tension du module correspondante

La décharge est à forte puissance (P) et de courte durée (1 seconde) pour correspondre à l'utilisation des supercondensateurs. La charge est à puissance 1/3 plus faible que la décharge pour se rapprocher d'un cycle de conduite de type NEDC.

La puissance de décharge P a été dimensionnée avec comme objectif d'atteindre, en fin de vie du supercondensateur, une limite de courant maximal de décharge. En considérant un supercondensateur neuf, ce dernier peut être modélisé par le modèle constructeur simple représenté sur la figure 4.9.

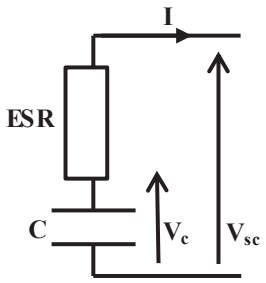


Figure 4.9 Modèle électrique considéré du supercondensateur

Considérons les paramètres suivants :

- Tension aux bornes du supercondensateur V_{sc}
- Tension aux bornes de la capacité équivalente C, V_c
- Capacité initiale C(0) ; capacité actuelle C(t) ; capacité finale C(f) = 80%·C(0)
- ESR initiale ESR(0) ; ESR actuelle ESR(t) ; ESR finale ESR(f)= 2·ESR(0)

La phase de décharge étant de durée très courte (Δt = 1 seconde), elle peut être assimilée à une phase à courant constant. Ce courant I peut être exprimé par l'équation 4.1 comme suit :

$$I = C(t) \cdot \frac{\Delta V_c}{\Delta t} \quad (4.1)$$

$$I = C(t) \cdot \frac{V_c(t) - V_c(t+\Delta t)}{\Delta t} = C(t) \cdot \frac{(V_{sc}(t) + ESR(t) \cdot I) - (V_{sc}(t+\Delta t) ESR(t+\Delta t) \cdot I)}{\Delta t} \quad (4.2)$$

Comme l'évolution de l'ESR est lente au cours du temps, on considère donc que $(ESR(t) = ESR(t + \Delta t))$. L'équation 4.2 peut donc être simplifiée comme suit, par l'équation 4.3 :

$$I = C(t) \cdot \frac{(V_{sc}(t)) - (V_{sc}(t+\Delta t))}{\Delta t} = C(t) \cdot \frac{\Delta V_{sc}}{\Delta t} \quad (4.3)$$

En vieillissant, la capacité de l'élément baisse. Pour un même courant et pour la même durée de décharge, la chute de tension ΔV_{sc} sera donc de plus en plus importante. Cette chute de tension est donc maximale en fin de vie du supercondensateur ($\Delta V_{sc} = \Delta V_{scmax}$). En fin de vie du supercondensateur, le courant de décharge peut être exprimé par l'équation (4.4).

$$I = 0.8 \cdot C(0) \cdot \frac{\Delta V_{scmax}}{\Delta t} = 0.8 \cdot C(0) \cdot \frac{V_{scmax}(t) - V_{scmax}(t+\Delta t)}{\Delta t} \quad (4.4)$$

La tension de début de décharge maximale $V_{scmax}(t)$, en fin de vie du supercondensateur, dans ces conditions, est exprimée par l'équation (4.5) :

$$V_{scmax}(t + \Delta t) = V_{scmax}(t) - \frac{I \cdot \Delta t}{(0.8 \cdot C(0))} \quad (4.5)$$

Ainsi, la puissance maximale P pouvant être appliquée au module et permettant la réalisation de cette décharge avec un courant maximal I_{max}, en fin de vie du supercondensateur, peut être exprimée par l'équation (4.6) :

$$P = V_{scmax}(t + \Delta t) \cdot I_{max} = \left(V_{scmax}(t) - \frac{I_{max} \cdot \Delta t}{(0.8 \cdot C(0))}\right) \cdot I_{max} \quad (4.6)$$

La tension maximale en début de décharge considérée ($V_{scmax}(t)$), pour la détermination de P, est de 2.5 V par supercondensateur et non de 2.7 V, la tension nominale, pour des raisons de sécurité. En effet, pour la même tension de module, la tension des supercondensateurs varie selon l'approche d'équilibrage appliquée. Pour le module SSE1 subissant l'égalisation de tension classique, les éléments ont des valeurs de tension identiques. Ainsi, pour une tension de module maximale de 7.5 V, tous les éléments sont maintenus à 2.5 V au maximum. Par contre, les cellules du module SSE2 contrôlées par la nouvelle approche de commande ont des niveaux de tension différents. Nous nous sommes donc laissés volontairement une marge de 0.2 V par supercondensateur afin de garantir que la cellule la moins sollicitée par les circuits d'équilibrage ne dépasse pas la tension de 2.7 V au cours du vieillissement.

Ainsi, les modules de stockage, de capacité initiale équivalente C(0) = 945 F, pour une tension à leurs bornes $V_{scmax}(t) = 7.5\ V$ et pour le courant maximal de décharge supporté par le banc de cyclage (I_{max} = 150 A) subissent donc un cyclage avec une puissance de décharge P = 1095 W.

Le temps de charge T_{charge} (cf. Figure 4.8) correspond au temps durant lequel le module revient à sa tension initiale avant la décharge, c'est-à-dire $V_{scmax}(t) = 7.5\ V$.

3.7 Circuits d'équilibrage et Commande

Les circuits d'équilibrage utilisés (figure 4.3) sont les mêmes que ceux réalisés pour l'estimation de la durée de vie des supercondensateurs (cf. chapitre 2. §. 5.4.1.1. Circuits d'équilibrage).

Le cycle de puissance appliquée (figure 4.8), étant assez rapide (quelques secondes), le temps d'échantillonnage de la commande est fixé à 0.1 s.

Les équilibrages « classique » ou « en durée de vie » sont exécutés lors des phases de repos et de charge des modules.

3.8 Estimation des paramètres et vieillissement accéléré

Le système de gestion d'énergie assure l'estimation de la durée de vie des supercondensateurs qu'il surveille. Cette estimation est réalisée grâce à la commutation, à des fréquences spécifiques, des circuits d'équilibrage (cf. chapitre 2. §. 5.4.1.1. Les circuits d'équilibrage). Les résultats de cette estimation permettent à l'utilisateur de surveiller l'évolution de ses éléments mais aussi constituent une information primordiale pour la nouvelle stratégie de commande. Afin que les mesures sur les deux modules soient comparables, elles sont réalisées simultanément et avec un même intervalle de temps sur l'ensemble des cellules.

Toutes les heures (3600 secondes ≈ 514 cycles) une phase de repos de 40 secondes est imposée au cyclage pour permettre la mesure de l'ESR grâce aux circuits d'équilibrage. Durant cette phase de repos, les circuits d'équilibrage sont commutés à une fréquence proche de la résonance pour estimer la durée de vie des cellules. Afin de garantir la stabilité et la répétabilité de la mesure et suite au bilan d'incertitude réalisé (cf. Annexe B), l'estimation des ESR est effectuée durant 30 secondes et les valeurs mesurées sont moyennées grâce à une moyenne glissante de même durée. En plus de ces 30 secondes de repos, 10 secondes ont été rajoutée, au bout desquelles, le contrôleur estime que la phase de repos pour l'estimation des ESR est présente et la commande pour l'estimation des ESR actionnée. Ainsi, afin de garantir la parfaite synchronisation entre cette estimation et l'état au repos des supercondensateurs, la commande des circuits d'équilibrage a été organisée comme suit sur l'organigramme de la figure 4.10.

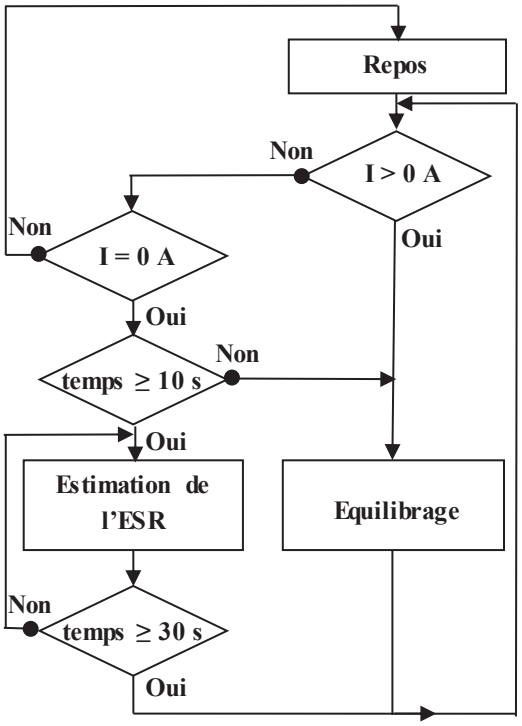


Figure 4.10 Organigramme de l'algorithme de commande des circuits d'équilibrage

L'estimation des ESR des cellules est ainsi toujours réalisée en phase de repos. Néanmoins la comparabilité des mesures n'est pas toujours garantie, surtout pour le module SSE2 subissant l'équilibrage en durée de vie. En effet, contrairement au module SSE1, le module SSE2 ne comporte pas forcement des éléments à même niveaux de tension lors de l'estimation de leur ESR. Un recalibrage des ESR à une même référence de tension est donc nécessaire à chaque estimation (cf. chapitre 2. §. 3.3 Variation de la résistance instantanée estimée en fonction des conditions d'utilisation).

4 Résultats expérimentaux et interprétations

L'objectif de cette partie est d'analyser les deux méthodologies de commande lors de conditions expérimentales réelles.

Les conditions d'essais ont été différentes de ce qui avait été prévu par les simulations. En effet, différents imprévus et incidents se sont produits durant le vieillissement, arrêtant la manipulation à plusieurs reprises (pannes sur le banc de cyclage, bugs des logiciels, maintenance sur les cartes d'équilibrage, …). Après chaque arrêt et reprise du vieillissement, les conditions avant arrêt étaient rarement reproductibles. En effet, après les arrêts, nous avons remarqué que l'évolution des températures des supercondensateurs mais aussi les ESR estimées

pouvaient dériver. La raison principale est liée au démontage et au remontage des modules de stockage après chaque panne. Il était difficile de reproduire de façon identique la réalisation initiale ou précèdent l'arrêt en raison des modifications engendrée lors de l'ouverture des boites isolantes, lors du serrage des circuits d'équilibrage, lors du serrage des liaisons série de chaque module, etc. Un phénomène de régénération a aussi été remarqué après les longues phases d'arrêt [33]. Le niveau de régénération n'était pas similaire mais bien diffèrent pour chaque supercondensateur.

La dérive des paramètres ne nous a donc pas permis de comparer la durée de vie des modules et de quantifier l'amélioration de la durée de vie. En effet, la similitude des conditions et des sollicitations n'a pu être parfaite et donc reste critiquable. Néanmoins, l'analyse des approches d'équilibrage et l'étude des états des éléments de chaque module de stockage durant les cycles est possible.

4.1 Analyse de la commande d'égalisation des tensions.

La commande conventionnelle des circuits d'équilibrage ou commande classique, a pour objectif de réduire la dispersion de tension pouvant exister entre les éléments associés en série lors de leur utilisation.

Les tableaux suivants récapitulent les états des supercondensateurs durant le cycle répétitif présenté sur la figure 4.8. Les figures suivantes représentent les tensions aux bornes des éléments lors de ce cyclage.

Après 1029 h de vieillissement, on a les données suivantes :

Tableau 4.2 Paramètres des supercondensateurs de SSE1 durant un cycle après 1029 heures de vieillissement accéléré

	$ESR_{1V}(0)$ (mΩ)	**$ESR_{1V}(t)$ (mΩ)**	**$SOH_{1V}(t)$ (%)**	**Température (°C)**
SC1	0.291	0.301	96.5	42
SC2	0.288	0.376	69.5	49
SC3	0.281	0.442	42.9	52

L'indice « 1V » des paramètres du tableau désigne les valeurs obtenues pour un potentiel de cellule égal à 1V. La comparaison des états de santé considère cette tension comme référence. Les valeurs des ESR estimées sont donc corrigées en fonction de la tension grâce à l'équation théorique de variation de l'ESR (cf. chapitre 2. §. 3.3 Variation de la résistance estimée en fonction des conditions d'utilisation).

Les tensions des supercondensateurs sur un cycle sont représentées sur la figure 4.11.

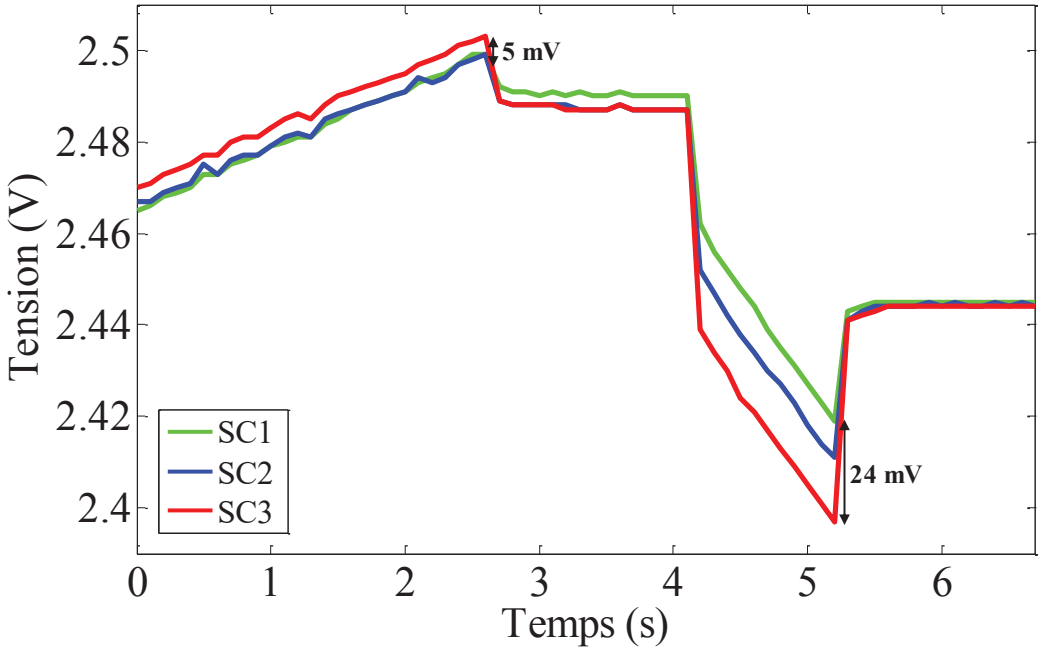


Figure 4.11 Tensions des supercondensateurs de SSE1 au bout de 1029 heures de vieillissement accéléré

Ces allures de tension sont observées tout le long du vieillissement du module SSE1. L'équilibrage classique réduit bien la dispersion de tension durant les phases de charge et de repos. En effet, on observe une dispersion maximale (ou hystérésis) de 5 mV qui est due entre autres aux incertitudes de l'instrumentation (cf. chapitre 1. §. 4.4.1.1. La mesure de tension).

On remarque que le supercondensateur SC3 est l'élément le plus faible, car il a le plus faible SOH. A tension égale, cet élément, plus sollicité en température, vieilli plus rapidement que les autres supercondensateurs et entrainera donc la défaillance du module SSE1.

On observe qu'après ce temps de vieillissement l'écart d'état de santé entre la cellule la moins sollicitée en température, SC1, et la plus sollicitée en température, SC3, est assez significatif (à 1029 h, on a 43% de SOH pour SC3 contre 96% pour SC1). Les résultats

expérimentaux valident les résultats de simulation du chapitre 3 (cf. chapitre 3. §. 8.3.1.1. Résultats de commande).

4.2 Analyse de la commande pour maximiser la durée de vie.

La nouvelle approche de commande des circuits d'équilibrage dit commande en durée de vie a pour objectif de maximiser la durée de vie du module de stockage en ralentissant le vieillissement des éléments les plus faibles entrainant la fin de vie du module.

Le nombre de choix de combinaison de commande possible sur les trois cellules associées en série est de 2^3-1 ; soit 7 combinaisons différentes (cf. chapitre 3. §. 5. Commande des circuits d'équilibrage). Le tableau 4.3 représente les différentes séquences de commande possibles des interrupteurs commandables S_4, S_5 et S_6 du module SSE2.

Tableau 4.3 Séquences de commande possibles des interrupteurs des circuits d'équilibrage du module SSE2

	S_4	S_5	S_6
u_1	0	0	0
u_2	0	0	1
u_3	0	1	0
u_4	0	1	1
u_5	1	0	0
u_6	1	0	1
u_7	1	1	0

La commande adoptée après chaque pas est donc une séquence, c'est-à-dire une ligne parmi les sept de ce tableau. Les valeurs « 0 » et « 1 » correspondent respectivement aux états « On » et « Off » de l'interrupteur S_i aux bornes du supercondensateur (SC_i, $i \in [4, 6]$).

Après 1226 h de vieillissement, on obtient les données suivantes :

Tableau 4.4 Paramètres des supercondensateurs de SSE2 durant un cycle au bout de 1226 heures de vieillissement accéléré

	$ESR_{1V}(0)$ (mΩ)	$ESR_{1V}(t)$ (mΩ)	$SOH_{1V}(t)$ (%)	Température (°C)
SC4	0.291	0.408	59.8	44
SC5	0.269	0.385	56.9	47
SC6	0.273	0.406	51.3	52

L'analyse des états de santé, SOH_{1V}, au même potentiel (1V), permet de classer le niveau de dégradation des éléments du module qui sont par ordre décroissant SC4 puis SC5 et enfin SC6 (tableau 4.4). A même tension, avec un équilibrage classique, la vitesse d'accélération du vieillissement est dépendante de la température de chaque élément. Avec cette nouvelle approche, il faut prendre en considération les deux paramètres (tension et température) pour comparer les vitesses de dégradation des éléments du module.

Les tensions des supercondensateurs sur un cycle sont représentées sur la figure 4.12.

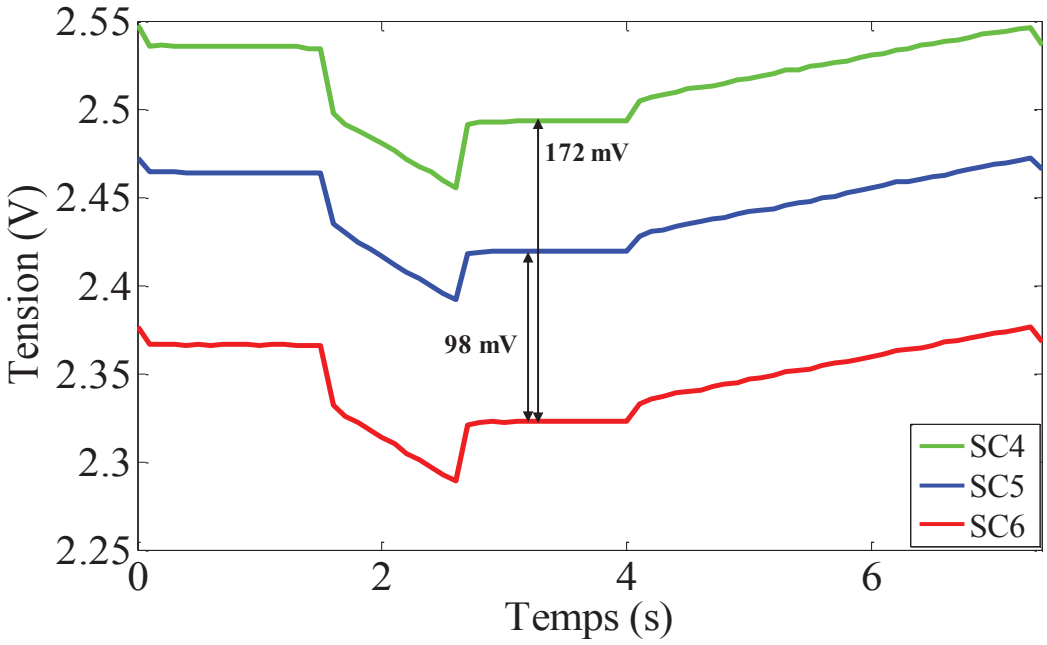


Figure 4.12.Tensions des supercondensateurs de SSE2 sur un cycle au bout de 1226 heures de vieillissement accéléré

Durant ce cycle, un écart de tension (proche de 170 mV en moyenne) entre la cellule SC4 qui a le plus haut niveau de tension et SC6 qui a le plus bas niveau est observé.

La sollicitation sur la cellule SC6 est allégée puisqu'elle présente à l'instant considéré la vitesse de dégradation la plus importante. La cellule SC4 se retrouve avec la tension la plus haute car c'est elle qui a la vitesse de dégradation la moins importante. Enfin, la cellule SC5 est moyennement sollicitée. Afin de valider ce choix de commande analysons les résultats de la prédiction de l'état de santé.

A t = 4 s du cycle présenté sur la figure 4.12, comme le module est au repos (I = 0 A), la commande des circuits d'équilibrage est active.

Avec la même démarche de prédiction que celle présentée au chapitre précèdent (cf. chapitre 3. §. 4. Modèle prédictif du système commandé), le modèle de prédiction d'état de santé, $SOH_i(k+2)$ (avec $i \in [4, 6]$) (équation 3.15) donne pour ce cas de figure, suivant les différentes séquences de commande, le tableau 4.5 suivant :

Tableau 4.5 Estimation obtenue par le modèle prédictif des états de santé à t =4 s

	SOH_4 (%)	SOH_5 (%)	SOH_6 (%)
u_1	**59**.793800498**168**	**56**.877309960**576**	**51**.282037395**777**
u_2	**59**.793800498**168**	**56**.877309960**576**	**51**.282037395**779**
u_3	**59**.793800498**168**	**56**.877309960**578**	**51**.282037395**777**
$\underline{u_4}$	**59**.793800498**168**	**56**.877309960**578**	**51**.282037395**779**
u_5	**59**.793800498**170**	**56**.877309960**576**	**51**.282037395**777**
u_6	**59**.793800498**170**	**56**.877309960**576**	**51**.282037395**779**
u_7	**59**.793800498**170**	**56**.877309960**578**	**51**.282037395**777**

La nouvelle approche cherche à ralentir la dégradation des éléments les plus faibles. Ces derniers sont identifiés grâce à la comparaison des SOH_i prédits (comparaison des colonnes). Les éléments les plus faibles sont respectivement SC6 et SC5 (car $SOH_6 < SOH_5 < SOH_4$). La séquence de commande finale choisie (comparaison des lignes) sera celle ou les éléments SC6 et SC5 auront un état de santé prédit le plus grand et donc une durée de vie la plus longue pour un même temps de prédiction. La séquence de commande retenue sera donc u_4 correspondant aux états des interrupteurs S_4 « Off », S_5 « On » et S_6 « On ».

Sachant que l'évolution de l'ESR et de la température de chaque cellule est lente et même pratiquement constante durant un cycle, et que l'écart de tension créé est long à engendrer (temps d'équilibrage long), la commande sera majoritairement la même durant tout le cycle.

Ainsi, les éléments les plus critiques sont identifiés grâce à la comparaison de leurs états de santé prédits. La réduction de la tension sur la cellule la plus faible permet de prolonger sa durée de vie en ralentissant l'évolution de son ESR.

Les résultats de la nouvelle commande des circuits d'équilibrage sont similaires à ceux obtenus par simulation au chapitre précèdent. On remarque un rapprochement des états de santé pour cette approche d'équilibrage et une dispersion des états de santé pour une commande classique.

La précision des modèles de prédiction utilisés, basés sur une loi d'Eyring améliorée, pourrait être encore perfectionnée en utilisant d'autres lois telle que celle citée dans [40]. De même, la prédiction de l'ESR s'inspirant d'une croissance linéaire [14][39] ne correspond pas à un modèle parfait. Néanmoins, ceci ne remet pas en cause l'efficacité de l'approche de commande. En effet, cette dernière se base sur une comparaison des paramètres prédits pour identifier les cellules les plus critiques. Sachant que les prédictions résultent à chaque fois d'une même loi, le niveau de précision de celle-ci n'a qu'un impact limité puisque c'est une loi identique qui est utilisée pour tous les éléments du module.

5 Améliorations possibles de la réalisation

La réalisation de la maquette expérimentale a permis de voir certains points que la simple simulation aussi proche du réel soit-elle ne permettait pas de montrer. Ces points peuvent être considérés comme des perspectives des travaux. Ils sont liés à l'optimisation de la réalisation des circuits d'équilibrage et de l'algorithme de commande maximisant la durée de vie.

Le prototype de circuit d'équilibrage réalisé est très satisfaisant. Il permet, avec un rajout de quelques composants électroniques peu coûteux (résistances, condensateurs et amplificateurs opérationnels) de réaliser l'équilibrage demandé mais aussi d'estimer la durée de vie du supercondensateur se trouvant à ses bornes. Afin d'optimiser la mesure de l'ESR, les cartes d'équilibrage ont été connectées directement entre les bornes du supercondensateur

(figure 4.3), l'objectif étant d'être au plus près de la cellule et de réduire les interférences de mesure au maximum. Or, ce type de conception nécessite de démonter à chaque intervention de maintenance les liaisons et ne garantit pas une remise en place à l'identique des éléments sous test. Comme l'ESR est de valeur très faible, elle est très sensible à la qualité du contact. Or comme cette valeur est essentielle à la commande en durée de vie, il est préférable de ne pas modifier la liaison directe entre circuit d'équilibrage et supercondensateurs. Au final, il serait donc préférable de réunir tous les circuits d'équilibrage sur la même carte en prévoyant des connectiques extérieures vers les supercondensateurs par l'intermédiaire de fils de liaison. Ainsi toute intervention nécessiterait simplement d'enlever les liaisons filaires côté carte d'équilibrage sans toucher au module de stockage et à ses connexions (figures 1.25 et 1.28).

Le deuxième point à améliorer dans le prototype d'équilibrage réalisé concerne la condition d'estimation des ESR surveillées réalisée lorsque le supercondensateur est au repos. Ce choix a été effectué pour des considérations de simplicité (cf. chapitre 2. 5.2. Principe de la commutation à la résonance). L'estimation se doit d'être optimale et fonctionnelle quel que soit l'état du supercondensateur. Des essais validant l'estimation en prenant en considération le courant dans le module, déjà mesuré par le capteur de courant du SMC seraient à réaliser.

Le dernier point à améliorer dans la réalisation concerne l'algorithme de commande. L'approche utilisée est efficace et permet d'homogénéiser les vitesses de dégradation des supercondensateurs du module de stockage surveillé. Elle se base principalement sur la surveillance de l'évolution d'un paramètre, à savoir l'ESR, pour estimer le niveau de vieillissement. Le choix de ce paramètre est souvent jugé satisfaisant, car c'est une donnée du constructeur pour définir l'un des deux critères de fin de vie. Bien que les travaux de recherche sur le vieillissement des supercondensateurs aient souvent montré des évolutions simultanées de l'ESR et de la capacité au cours du temps [8][14][18][33], l'algorithme de commande sera plus optimal s'il prédit l'état de santé des supercondensateurs par l'intermédiaire de leur ESR et de leur capacité. Cette approche permettrait de calculer à chaque fois le SOH futur des supercondensateurs en se basant sur l'estimation de la capacité (équation 1.13) et de l'ESR (équation 1.14) où les deux grandeurs seraient analysées en fonction du cahier des charges de l'application afin de trouver l'optimum au sens de Pareto. Comme la fin de vie du supercondensateur est dépendante de l'un ou de l'autre de ces deux paramètres, cette amélioration de notre approche garantirait le suivi de leur vieillissement quelles que soient l'application et l'évolution des paramètres des supercondensateurs. Comme cette approche de

commande se baserait aussi sur la prédiction de capacité, celle-ci serait estimée par exemple grâce à l'utilisation d'un observateur.

6 Conclusion

Ce chapitre qui porte principalement sur le travail expérimental a pour objectif de valider les travaux de recherche réalisés dans le but d'estimer et d'améliorer la durée de vie des modules de supercondensateurs à travers la commande de leurs circuits d'équilibrage.

Une maquette expérimentale a été conçue dans le but d'étudier la nouvelle approche de commande proposée. Cette maquette constituée de deux modules de stockage identiques subissant les mêmes sollicitations électriques et thermiques et est surveillée et contrôlée par un même système de gestion d'énergie. Sur un premier module, la commande appliquée consiste en une égalisation classique de tension qui est notre référence d'étude alors que sur le second module, la commande appliquée consiste en la nouvelle approche de maximisation de durée de vie. L'objectif est de comparer les deux approches de commande face au vieillissement.

En raison de défaillances techniques, le vieillissement accéléré n'a pu être continu et les différents arrêts engendrés ont dispersé la symétrie des sollicitations au cours du vieillissement. Ainsi les deux modules n'ont pas subi des contraintes thermiques identiques comme prévue. La comparaison des durées de vie n'était plus possible comme dans le chapitre précèdent car fortement critiquable car les conditions expérimentales n'étaient plus similaires. Néanmoins, l'analyse des approches de commande face aux circonstances réelles a démontré la similitude avec l'analyse par simulation. En effet, la commande classique s'est limitée à égaliser les tensions entre les éléments de son module sans prendre en considération la dispersion des températures et ainsi des états de santé. La commande en durée de vie, quant à elle, a comme prévue créé différentes dispersions de tension afin de remédier à la dispersion des états de santé.

Ainsi la commande en durée de vie, grâce à ces dispersions de tension qu'elle engendre, remédie à la dispersion des vitesses de dégradation des éléments du module qu'elle surveille et ainsi prolonge la durée de vie du module

Conclusion générale

Les travaux entrepris durant cette thèse s'inscrivent dans une démarche visant à améliorer la longévité des systèmes de stockage d'énergie. L'objectif est de prolonger la durée de vie d'un module de stockage constitué de supercondensateurs associés en série. Cette extension de la durée de vie est effectuée grâce à une commande innovante des circuits d'équilibrage, éléments du système de gestion d'énergie, dont le rôle principal est d'assurer la sécurité du module de stockage.

Une étude bibliographique sur les mécanismes et modes de dégradation des supercondensateurs a montré une corrélation entre le niveau de vieillissement du composant et ses conditions environnementales et d'utilisation. Les 3 facteurs principaux à considérer sont sa tension, sa température et son courant. Le vieillissement du supercondensateur se traduit par une dégradation irréversible de sa résistance équivalente série (ESR) et de sa capacité. Ces dernières évoluent jusqu'à atteindre des seuils considérés comme marqueurs de défaillance, à savoir 80% de la capacité initiale et 200 % de la résistance équivalente série initiale selon le constructeur. La surveillance de l'évolution d'au moins un de ces deux paramètres permet donc de quantifier le niveau de dégradation du supercondensateur. Nous avons ainsi proposé une nouvelle approche de commande des circuits d'équilibrage dissipatif en vue d'estimer en ligne un de ces paramètres, c'est-à-dire la résistance équivalente série. La méthode proposée est simple, entraine une dissipation d'énergie négligeable et a été validée expérimentalement. Ainsi, par la simple modification de l'approche de commande des circuits d'équilibrage dissipatif, on peut surveiller le niveau de dégradation des supercondensateurs avec le matériel déjà présent sur le système.

Les systèmes de gestion d'énergie, contrôlant les systèmes de stockage, présentent des limitations dans leur fonction d'égalisation de tension, assurée par les circuits d'équilibrage. En effet, à même niveau de tension et pour un même courant, les supercondensateurs associés en série subissent souvent des contraintes thermiques différentes qui les font vieillir différemment. Le module de stockage est alors limité par son composant le plus faible et/ou le plus fortement sollicité en température qui peut donc atteindre sa fin de vie prématurément. La nouvelle commande des circuits d'équilibrage que nous proposons a pour objectif de maximiser la durée

de vie des systèmes de stockage d'énergie. Cette approche, usant d'une commande optimale simple (la commande prédictive), a pour objectif d'homogénéiser les contraintes entre éléments afin de maximiser la durée de vie totale du module de stockage. Elle se base sur les mesures prises par le système de gestion d'énergie et sur l'estimation de l'ESR en tant qu'indicateur du niveau de dégradation. L'équilibrage proposé, contrairement à l'équilibrage classique qui égalise les tensions entre éléments, crée une dispersion de tension afin de remédier à la dispersion de leurs vitesses de dégradation. Afin d'analyser le bien fondé de notre approche, une comparaison de l'évolution d'un module de stockage a été réalisée sous simulation pour différents scénarii d'utilisation, avec une commande classique des circuits d'équilibrage puis avec une commande en durée de vie. Ces différents cas ont démontré la supériorité de l'approche de commande proposée qui rallonge à chaque fois de plus de 20 % la durée de vie du module de stockage. Ce résultat est très satisfaisant vu qu'il ne nécessite pas ou peu de modification des systèmes existants.

Enfin, deux modules de stockage associés à un système de gestion ont été réalisés et l'analyse expérimentale du comportement des commandes face à des conditions propres d'utilisation a validé les simulations. Cela permet donc de montrer l'intérêt de notre approche de commande qui peut prolonger significativement la durée de vie des modules de stockage.

Le travail réalisé a été appliqué sur des circuits d'équilibrage dissipatif en raison de leur simplicité, leur faible coût et donc leur popularité sur le marché. Il reste, cependant des travaux de recherche et d'ingénierie à accomplir à moyen terme. Notamment, il serait souhaitable :

- d'optimiser la conception du prototype de circuit d'équilibrage, afin qu'il soit plus robuste aux conditions réelles d'utilisation (bruits, vibrations, interventions humaines, …),
- d'améliorer l'approche d'identification afin que l'estimation de l'ESR à la fréquence de résonance puisse être aussi réalisée en phase de charge,
- d'améliorer l'approche de commande en durée de vie optimale en prenant en considération l'évolution de la capacité comme paramètre supplémentaire d'estimation du niveau de dégradation des supercondensateurs surveillés. Cette amélioration nécessite donc l'estimation en ligne de la capacité des supercondensateurs, fonction qui viendra s'ajouter aux fonctions du SMC. L'utilisation d'un observateur d'état pour estimer la capacité est une première piste de travail.

Les perspectives de travaux à long terme découlant des résultats présentés dans ce mémoire concernent la généralisation et l'adaptation de tout ce qui a été développé aux autres types de stockage électrique tels que les batteries lithium-ion, par exemple, et aux circuits d'équilibrage non-dissipatifs.

Références bibliographiques

[1] B. E. Conway, *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*. Kluwer Academic/Plenum, 1999.

[2] Cantecsystems, “A brief history of supercapacitors,” Cantecsystems, Sep. 2007.

[3] Y. Diab, “Etude et modélisation des supercondensateur s: Applications aux systémes de puissance.,” Mémoire de thèse, Université Claude Bernard, Lyon1, 2009.

[4] E. H. El Brouji, “Prise en compte du vieillissement dans la modélisation des supercondensateurs,” Mémoire de thèse, Universite Bordeaux 1, France, 2009.

[5] P. Venet, “Amélioration de la sureté de fonctionnement des dispositifs de stockage d’´energie,” Mémoire d’Habilitation à Diriger les Recherches, Université Claude Bernard, Lyon 1, 2007.

[6] A. Burke, “Ultracapacitors: why, how, and where is the technology,” *J. Power Sources*, vol. 91, no. 1, pp. 37–50, Nov. 2000.

[7] A. Hammar, “Modélisation du supercondensateur et étude de son vieillissement. Utilisation dans les applications de transport ferroviaire,” Mémoire de thèse, Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2006.

[8] R. German, “Etude du vieillissement calendaire des supercondensateurs et impact des ondulations de courant haute fréquence,” Mémoire de thèse, Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2013.

[9] R. Kotz, and M. Carlen, “Principles and applications of electrochemical capacitors,” *Electrochimica Acta*, vol. 45, no. 15–16, pp. 2483 – 2498, 2000.

[10] N. Rizoug, “Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d’un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance,” Mémoire de thèse, Ecole Centrale de Lille, France, 2006.

[11] T. Morimoto, K. Hiratsuka, Y. Sanada, and K. Kurihara, “Electric double-layer capacitor using organic electrolyte,” *J. Power Sources*, vol. 60, no. 2, pp. 239–247, Jun. 1996.

[12] Y. Zhang, H. Feng, X. Wu, L. Wang, A. Zhang, T. Xia, H. Dong, X. Li, and L. Zhang, “Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review,” *2nd Int. Workshop Hydrog. Int. Workshop Hydrog.*, vol. 34, no. 11, pp. 4889–4899, Jun. 2009.

[13] T. Funaki, “Evaluating Energy Storage Efficiency by Modeling the Voltage and Temperature Dependency in EDLC Electrical Characteristics,” *Power Electron. IEEE Trans. On*, vol. 25, pp. 1231 – 1239, 2010.

[14] R. Chaari, O. Briat, J. Y. Deletage, E. Woirgard, and J.-M. Vinassa, “How supercapacitors reach end of life criteria during calendar life and power cycling tests,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 51, no. 911, pp. 1976 – 1979, 2011.

[15] C. Portet, P. L. Taberna, P. Simon, E. Flahaut, and C. Laberty-Robert, “High power density electrodes for Carbon supercapacitor applications,” *Electrochimica Acta*, vol. 50, no. 20, pp. 4174–4181, Jul. 2005.

[16] Maxwell Technologies, “Application Note: Maxwell Technologies, BOOSTCAP Energy Storage Modules, Life Duration Estimation,” 2007.

[17] N. Rizoug, “Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : Application au cyclage d’un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance,” Mémoire de thèse, Ecole Centrale de Lille, France, 2006.

[18] Maxwell Technologies, “Gateway to a New Thinking in Energy Management - Ultracapacitors,” San Diego, Jan-2005.

[19] N. Stryzhakova, “Deliverable D1.1 ; Testing methodology manual,” 13-Mar-2012.

[20] L. Zubieta and R. Bonert, “Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 01, pp. 199–205, Feb. 2000.

[21] F. Belhachemi, “Modélisation et caractérisation des super-condensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance,” Mémoire de thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2001.

[22] R. D. Levie, “Electrochemical response of porous and rough electrodes, Advances in electrochemistry and Electrochemical Engineering,” *Wiley Intersci.*, vol. 6, pp. 329–397, 1967.

[23] A. Hammar, P. Venet, R. Lallemand, G. Coquery, and G. Rojat, “Study of Accelerated Aging of Supercapacitors for Transport Applications,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 57, no. 12, pp. 3972 – 3979, Dec. 2010.

[24] S. Knoth and Linear Technology, “Supercaps can be a good choice over batteries for backup applications,” *EE Times*.

[25] J. P Lee, “How-to: Extending battery life in transportation and mobile applications with supercapacitors,” *EDN Network*, 11-Dec-2013.

[26] R. German, P. Venet, A. Sari, O. Briat, and J.-M. Vinassa, “Improved Supercapacitor Floating Ageing Interpretation Through Multipore Impedance Model Parameters Evolution,” *Power Electron. IEEE Trans. On*, vol. 29, no. 7, pp. 3669–3678, Jul. 2014.

[27] P. Azais, L. Duclaux, P. Florian, and D. Massiot, “Causes of supercapacitors ageing in organic electrolyte,” *J. Power Sources*, vol. 171, pp. 1046–1053, 2007.

[28] V. Ruiz, C. Blanco, M. Granda, R. Menéndez, and R. Santamaría, “Effect of the thermal treatment of carbon-based electrodes on the electrochemical performance of supercapacitors,” *J. Electroanal. Chem.*, vol. 618, no. 1–2, pp. 17–23, Jul. 2008.

[29] M. Hahn, R. Kötz, R. Gallay, and A. Siggel, “Pressure evolution in propylene carbonate based electrochemical double layer capacitors,” *Electrochem. ENERGY Convers. STORAGE - ISE Meet. 2005Selection Pap. 56th Annu. Meet. Int. Soc. Electrochem.-30 Sept. 2005 Busan Korea*, vol. 52, no. 4, pp. 1709–1712, Dec. 2006.

[30] M. Hahn, A. Würsig, R. Gallay, P. Novák, and R. Kötz, “Gas evolution in activated carbon/propylene carbonate based double-layer capacitors,” *Electrochem. Commun.*, vol. 7, no. 9, pp. 925–930, Sep. 2005.

[31] R. Kotz, P. W. Ruch, and D. Cericola, “Aging and failure mode of electrochemical double layer capacitors during accelerated constant load tests,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 3, pp. 923 – 928, 2010.

[32] R. German, O. Briat, A. Sari, P. Venet, M. Ayadi, Y. Zitouni, and J. M. Vinassa, “Impact of high frequency current ripple on supercapacitors ageing through floating ageing tests,” *Eur. Symp. Reliab. Electron Devices Fail. Phys. Anal.*, vol. 53, no. 9–11, pp. 1643–1647, Sep. 2013.

[33] P. Kreczanik, “Etude de la fiabilité et du vieillissement d’un système de stockage par supercondensateurs pour l’alimentation partielle et ponctuelle d’un trolleybus grâce à la récupération de l’énergie de freinage. Approche du composant au système de stockage,” Mémoire de thèse, Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2011.

[34] EPCOS, “UltraCapTM double layer capacitors - A new energy storage device for peak power applications.” 2001.

[35] O. Briat, W. Lajnef, J.-M. Vinassa, and E. Woirgard, “Power cycling tests for accelerated ageing of ultracapacitors,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 46, no. 9–11, pp. 1445 – 1450, 2006.

[36] H. el Brouji, “Ageing quantification of ultracapacitors during calendar life and power cycling tests using a physically-based impedance model,” *Conf Escap 08*, 2008.

[37] M. Uno and K. Tanaka, “Accelerated Charge, Discharge Cycling Test and Cycle Life Prediction Model for Supercapacitors in Alternative Battery Applications,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 59, no. 12, pp. 4704 –4712, Dec. 2012.

[38] K. Paul, M. Christian, V. Pascal, C. Guy, R. Gerard, and Z. Younes, “Constant power cycling for accelerated ageing of supercapacitors,” in *Power Electronics and Applications, 2009. EPE ’09. 13th European Conference on*, 2009, pp. 1–10.

[39] P. Kreczanik, P. Venet, A. Hijazi, and G. Clerc, “Study of Supercapacitor Aging and Lifetime Estimation According to Voltage, Temperature, and RMS Current,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 61, no. 9, pp. 4895–4902, Sep. 2014.

[40] T. Kovaltchouk, B. Multon, H. Ben Ahmed, J. Aubry, and P. Venet, “Enhanced aging model for supercapacitors taking into account power cycling: Application to the sizing of an Energy Storage System in a Direct Wave Energy Converter,” in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on*, 2014, pp. 1–10.

[41] Zhang Enhui, Qi Zhiping, and Wei Tongzhen, “Research on combination of series and parallel with supercapacitor module,” in *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010 2nd IEEE International Symposium on*, 2010, pp. 685–690.

[42] A.-L. Allegre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, and S. El-Fassi, “Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 57, no. 12, pp. 4001–4012, Dec.

[43] P. Weissler, “Mazda introduces supercapacitor-type regenerative braking,” *Automot. Int. Eng. Online*, vol. 1, 2013.

[44] B. Vulturescu, R. Trigui, R. Lallemand, and G. Coquery, “Implementation and test of a hybrid storage system on an electric urban bus,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 30, no. 0, pp. 55–66, May 2013.

[45] J. Dixon, I. Nakashima, E. F. Arcos, and M. Ortuzar, “Electric Vehicle Using a Combination of Ultracapacitors and ZEBRA Battery,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 57, no. 3, pp. 943 –949, Mar. 2010.

[46] P. Barrade and A. Rufer, “Supercapacitors as energy buffers: a solution for elevators and for electric busses supply,” in *Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the*, 2002, vol. 3, pp. 1160–1165 vol.3.

[47] N. Rizoug, P. Bartholomeus, B. Vulturescu, P. Le Moigne, and X. Pierre, “Voltage sharing in supercapacitor modules : experimental study,” in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, vol. 1, pp. 690–696 Vol.1.

[48] A. Hijazi, “Modélisation électrothermique, commande et dimensionnement d’un système de stockage d’énergie par supercondensateurs avec prise en compte de son vieillissement : application à la récupération de l’énergie de freinage d’un trolleybus,” Mémoire de thèse, Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2010.

[49] A. Hijazi, E. Bideaux, P. Venet, W. Marquis Favre, P. Kreczanik, G. Clerc, and J. P. Simon, “Sizing of supercapacitors stack: Application to the braking energy recovery of electrical bus,” in *4th European Symposium on Super Capacitors & Applications, ESSCAP*, 2010.

[50] William Joel Schmidt III, “Lithium-based Battery System Management and Balancing,” Mémoire de thèse, Purdue University, Indiana, United States, 2011.

[51] K. Cermak and M. Bartl, “Decentralized Battery Management System,” in *Electric Power Engineering (EPE), Proccedings of the 2014 15th International Scientific Conference on*, 2014, pp. 599–603.

[52] A. David, *Battery Management Systems for large Lithium-Ion Battery Pack*. Boston, London: Artech House, 2010.

[53] M. Brandl, H. Gall, M. Wenger, V. Lorentz, M. Giegerich, F. Baronti, G. Fantechi, L. Fanucci, R. Roncella, R. Saletti, S. Saponara, A. Thaler, M. Cifrain, and W. Prochazka, “Batteries and battery management systems for electric vehicles,” in *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2012*, 2012, pp. 971–976.

[54] S. Buller, E. Karden, A. Lohner, and R. W. De Doncker, “LabView-based universal battery monitoring and management system,” in *Telecommunications Energy Conference, 1998. INTELEC. Twentieth International*, 1998, pp. 630–635.

[55] “http://3ppower.com/Brochures/C&D/06C&D-BatteryMonitoringSystemCDM.pdf.” .

[56] “EquaLink Battery Management System datasheet, www.sbsbattery.com/products-services/by-product/battery-test-equipment-1/equalink-battery-monitoring-system-bms.html.”.

[57] Y. Qu, J. Zhu, J. Hu, and B. Holliday, “Overview of supercapacitor cell voltage balancing methods for an electric vehicle,” in *ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE*, 2013, pp. 810–814.

[58] D. Linzen, S. Buller, E. Karden, and R. W. De Doncker, “Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems,” *Ind. Appl. IEEE Trans. On*, vol. 41, no. 5, pp. 1135 – 1141, Oct. 2005.

[59] P. Kulsangcharoen, C. Klumpner, M. Rashed, and G. Asher, “Evaluation of a flyback regenerative voltage equalisation circuit for series-connected supercapacitor stacks,” in *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, 2011, pp. 1–12.

[60] D. Y. Jung, Y. H. Kim, S. W. Kim, and S.-H. Lee, “Development of ultracapacitor modules for 42-V automotive electrical systems,” *J. Power Sources*, vol. 114, no. 2, pp. 366–373, Mar. 2003.

[61] Moon-Young Kim, Jun-Ho Kim, and Gun-Woo Moon, “Center-Cell Concentration Structure of a Cell-to-Cell Balancing Circuit With a Reduced Number of Switches,” *Power Electron. IEEE Trans. On*, vol. 29, no. 10, pp. 5285–5297, Oct. 2014.

[62] F. Baronti, C. Bernardeschi, L. Cassano, A. Domenici, R. Roncella, and R. Saletti, “Design and Safety Verification of a Distributed Charge Equalizer for Modular Li-Ion Batteries,” *Ind. Inform. IEEE Trans. On*, vol. 10, no. 2, pp. 1003–1011, May 2014.

[63] J. Cao, N. Schofield, and A. Emadi, “Battery balancing methods: A comprehensive review,” in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC ’08. IEEE*, 2008, pp. 1–6.

[64] Rengui Lu, Chunbo Zhu, Likun Tian, and Qi Wang, “Super-Capacitor Stacks Management System With Dynamic Equalization Techniques,” *Magn. IEEE Trans. On*, vol. 43, no. 1, pp. 254–258, Jan. 2007.

[65] S. W. Moore and P. J. Schneider, “A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems,” *SAE Technical Paper 2001-01-0959*, 2001.

[66] Seonwoo Jeon, Jae-Jung Yun, and Sungwoo Bae, “Active cell balancing circuit for series-connected battery cells,” in *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015 9th International Conference on*, 2015, pp. 1182–1187.

[67] N. H. Kutkut, “A modular nondissipative current diverter for EV battery charge equalization,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC ’98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual*, 1998, vol. 2, pp. 686–690 vol.2.

[68] A. C. Baughman and M. Ferdowsi, “Double-Tiered Switched-Capacitor Battery Charge Equalization Technique,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2277–2285, Jun. 2008.

[69] A. Xu, S. Xie, and X. Liu, “Dynamic Voltage Equalization for Series-Connected Ultracapacitors in EV/HEV Applications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3981–3987, Oct. 2009.

[70] A. Xu, X. Liu, and S. Xie, “Research on dynamic voltage equalization circuit for series connected ultracapacitors,” in *Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1–6.

[71] A. Baughman and M. Ferdowsi, “Evaluation of the New Sensorless Approach in Energy Storage Charge Balancing,” in *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2006, pp. 1–5.

[72] M. Daoud, M. Antoine, N. Omar, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, “Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements,” *Energies 2013*, p. no. 4: 2149–2174, 18-Apr-2013.

[73] Y. S. Lee and G. T. Cheng, “Quasi-Resonant Zero-Current-Switching Bidirectional Converter for Battery Equalization Applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1213–1224, Sep. 2006.

[74] C. S. Moo, Y. C. Hsieh, and I. S. Tsai, “Charge equalization for series-connected batteries,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 39, no. 2, pp. 704–710, Apr. 2003.

[75] Chunhe Chang, Rong Wang, Zhongni Zhu, and Haibo Xu, “Research of Supercapacitor Voltage Equalization Strategy on Rubber-Tyred Gantry Crane Energy Saving System,” in *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, 2009, pp. 1–4.

[76] F. Mestrallet, “Architectures intégrées pour la gestion et la fiabilisation du stockage électrochimique à grande échelle,” Mémoire de thèse, Université de Grenoble, France, 2006.

[77] Jong-Won Shin, Gab-Su Seo, Chang-Yoon Chun, and Bo-Hyung Cho, “Selective flyback balancing circuit with improved balancing speed for series connected Lithium-ion batteries,” in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, 2010, pp. 1180–1184.

[78] M. F. Samadi and M. Saif, “Nonlinear model predictive control for cell balancing in Li-ion battery packs,” in *American Control Conference (ACC), 2014*, 2014, pp. 2924–2929.

[79] I. Texas, “bq33100 Super Capacitor Manager,” Mar-2011.

[80] Linear Technology, “LTC3350 High Current Supercapacitor Backup Controller and System Monitor.”

[81] P. borne and all, *Commande et Optimisation des Processus*, TECHNIP, France, 1990.

[82] Il-Song Kim, “A Technique for Estimating the State of Health of Lithium Batteries Through a Dual-Sliding-Mode Observer,” *Power Electron. IEEE Trans. On*, vol. 25, no. 4, pp. 1013–1022, Apr. 2010.

[83] R. Klein, N. A. Chaturvedi, J. Christensen, J. Ahmed, R. Findeisen, and A. Kojic, “Electrochemical Model Based Observer Design for a Lithium-Ion Battery,” *Control Syst. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 21, no. 2, pp. 289–301, Mar. 2013.

[84] A. Lièvre, “Développement d’un systeme de gestion de batterie lithium-ion à destination de véhicules ‘mild hybrid’. détermination des indicateurs d’état (SoC, SoH, et SoF),” Mémoire de thèse, Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2015.

[85] R. Drummond and S. R. Duncan, “On observer performance for an electrochemical supercapacitor model,” in *2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, 2015, pp. 1260–1265.

[86] Z. Shi, F. Auger, E. Schaeffer, P. Guillemet, and L. Loron, “Interconnected Observers for online supercapacitor ageing monitoring,” in *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, 2013, pp. 6746–6751.

[87] A. Zemouche, “Sur l’observation de l’état des systèmes dynamiques non linéaires,” Mémoire de thèse, Université Louis Pasteur Strasbourg I, France, 2007.

[88] A. El Mejdoubi, A. Oukaour, H. Chaoui, Y. Slamani, J. Sabor, and H. Gualous, “Online Supercapacitor Diagnosis for Electric Vehicle Applications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2015.

[89] R. Chaari, “Evaluation et modélisation du vieillissement des supercondensateurs pour des applications véhicules hybrides,” Mémoire de thèse, Universite Bordeaux 1, France, 2013.

[90] S. Shili, A. Hijazi, P. Venet, A. Sari, Xuefang Lin-Shi, and H. Razik, “Balancing circuit control for supercapacitor state estimation,” in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2015 Tenth International Conference on*, 2015, pp. 1–7.

[91] Le Yi Wang, M. P. Polis, G. G. Yin, Wen Chen, Yuhong Fu, and C. C. Mi, “Battery Cell Identification and SOC Estimation Using String Terminal Voltage Measurements,” *Veh. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 61, no. 7, pp. 2925–2935, Sep. 2012.

[92] A. Propoi, “Use of linear programming methods for synthesizing sampled-data automatic systems,” *Remote Control*, pp. 837–844, 1963.

[93] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud, and J. Papon, “Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes,” *Automatica*, vol. 14, no. 5, pp. 413–428, Sep. 1978.

[94] M. Prett D and D. Gilette R, “Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit.,” presented at the In Proc. of the Joint Automatic Control Conference, volume 1, 1980.

[95] F. Paul M, *Advances in Control, Highlights of ECC 99*, Springer. 1999.

[96] J. Q. by S and T. A. Badgwell, “An Overview Of Industrial Model Predictive Control Technology,” presented at the In Fifth International Conference on Chemical Process Contro, American Institute of Chem, Eng, 1996, pp. 232–256.

[97] C. M. Dafermos and M. Slemrod, “Asymptotic behavior of nonlinear contraction semigroups,” *J. Funct. Anal.*, vol. 13, no. 1, pp. 97–106, May 1973.

[98] N. Petit, “Commande prédictive,” Ecole Centrale de Paris, 2006-2005.

[99] P. Dufour, “Contribution à la commande prédictive des systèmes à paramètres répartis non linéaires,” Mémoire de thèse, Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2000.

[100] E. GRANADO MIGLIORE, “Commande predictive a base de programmation semi definie,” Mémoire de thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 2004.

[101] J. Richalet, G. Lavielle, and J. Mallet, *La commande prédictive, Mise en oeuvre et applications industrielles*, Eyrolles. Eyrolles, 2004.

[102] S. Flila, “Identification optimale et commande prédictive : applications en génie des procédés,” Mémoire de thèse, Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2010.

[103] S. Olaru, “Contribution à l’étude de la commande predictive sous contraint par approche géométrique,” Mémoire de thèse, UFR scientifique d’Orsay, France, 2005.

[104] S. M. Muslem Uddin, S. Mekhilef, M. Rivera, and J. Rodriguez, “A FCS-MPC of an induction motor fed by indirect matrix converter with unity power factor control,” in *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2013, pp. 1769–1774.

[105] J. Rodriguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortes, and U. Ammann, “Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 495–503, Feb. 2007.

[106] S. Muller, U. Ammann, and S. Rees, “New time-discrete modulation scheme for matrix converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 6, pp. 1607–1615, Dec. 2005.

[108] Diab and all, “Comparison of the Different Circuits Used for Balancing the Voltage of Supercapacitors: Studying Performance and Lifetime of Supercapacitors,” presented at the ESSCAP, Lausanne, Suisse, 2006.

Annexes

Annexe A. Constitution du système de gestion d'énergie

Annexe A.1 Contrôleur

Le contrôleur du système de gestion d'énergie assure l'acquisition des données (températures, courant et tensions), leur traitement et la commande des circuits d'équilibrage en fonction de l'algorithme programmé.

Pour constituer ce contrôleur, du matériel « National Instrument » est utilisé. Le choix s'est porté sur ce type de matériel en raison de sa précision de mesure, sa rapidité de communication et sa simplicité d'interfaçage grâce à Labview. Néanmoins, la réalisation du contrôleur pourrait être réalisée avec un microcontrôleur simple comme dans les véritables systèmes de gestion d'énergie.

Le matériel utilisé est constitué de deux châssis communiquant par port USB.

Le châssis principal du contrôleur est le NI-PXI-1031DC. Il est présenté sur la figure ci-dessous. Il comprend trois emplacements utilisés.

Figure. Annexe A.1. Châssis principal du contrôleur du système de gestion d'énergie

Figure. Annexe A.2. Présentation du module NI PXI-7841 R

Module RIO multifonction de la Série R avec FPGA LX30 Virtex-5.

Le module RIO (E/S reconfigurables) multifonction NI PXI-7841R intègre un FPGA programmable par l'utilisateur pour le traitement embarqué et pour un fonctionnement flexible des E/S.

Général	
Famille de produits	DAQ multifonction
Type de mesure	Encodeur en quadrature Filtres Fréquence LVDT RVDT Tension
Form Factor	PXI / PXI Express
Type de bus PXI	Compatible avec le PXI hybride
Système d'exploitation / Cible	FPGA Windows
Largeur du module	1
Conforme à la directive RoHS	Oui
Entrée analogique	
Voies asymétriques	8
Voies différentielles	8
Résolution d'entrée analogique	16 bits
Gamme maximum de tension	
Gamme	-10 V - 10 V
Précision	3.97 mV
Sensibilité	0.305 mV
Gamme minimum de tension	
Gamme	-10 V - 10 V
Précision	3.97 mV
Sensibilité	0.305 mV
Nombre de gammes	1
Échantillonnage simultané	Yes
Mémoire embarquée	192 Ko
Conditionnement du signal	Filtre Deglitch Filtre passe-bas

Sortie analogique	
Nombre de voies	8
Résolution	16 bits
Gamme maximum de tension	
Gamme	-10 V - 10 V
Précision	5.88 mV
Sensibilité	0.305 mV
Gamme minimum de tension	
Gamme	-10 V - 10 V
Précision	5.88 mV
Sensibilité	0.305 mV
Taux de rafraîchissement	1 Méch. / s
Courant fourni une voie	2.5 mA
Courant fourni total	20 mA
E / S numériques	
Voies bidirectionnelles	96
Voies d'entrée uniquement	0
Voies de sortie uniquement	0
Cadencement	Matériel
Fréquence d'horloge maximum	40 MHz
Niveaux de logique	3,3 V 5 V LVTTL TTL
Filtres d'entrée programmables	Oui
Supporte des états de démarrage programmables ?	Oui
Entrée numérique	
Type d'entrée	Courant absor Courant fourni
Gamme maximum de tension	0 V - 5 V

Sortie numérique	
Type de sortie	Courant absorbé Courant fourni
Courant fourni une voie	4 mA
Courant fourni total	384 mA
Gamme maximum de tension	0 V - 3.3 V
Compteurs / timers	
Timer chien de garde	Oui
Compteurs	96
Nombre de voies DMA	3
Opérations bufférisées	Oui
Debouncing / Glitch Removal	Oui
Source de fréquence max	40 MHz
Génération d'impulsions	Oui
Encombrement	64 bits
Stabilité base de temps	100 ppm
Niveaux de logique	3,3 V 5 V LVTTL TTL
Cadencement / déclenchement / synchronisation	
Déclenchement	Analogique Numérique
Bus de synchronisation (RTSI)	Yes
Spécifications physiques	
Longueur	16 cm
Largeur	10 cm
Connecteur d'E / S	VHDCI 68 broches femelle

Figure. Annexe A.3. Présentation du NI PXI-6229

Le NI PXI-6229 est un module d'acquisition de données multifonction faible coût (cf. figure.Annexe A.3).

Général	
Famille de produits	DAQ multifonction
Type de mesure	Encodeur en quadrature Fréquence Numérique Tension
Form Factor	PXI / PXI Express
Type de bus PXI	Compatible avec le PXI hybride
Système d'exploitation / Cible	Linux Mac OS Windows
Largeur du module	1
Conforme à la directive RoHS	Oui
Type d'isolation	None
Entrée analogique	
Voies asymétriques	32
Voies différentielles	16
Résolution d'entrée analogique	16 bits
Gamme maximum de tension	
Gamme	-10 V - 10 V
Précision	3100 µV
Sensibilité	97.6 µV
Gamme minimum de tension	
Gamme	-200 mV - 200 mV
Précision	112 µV
Sensibilité	5.2 µV
Nombre de gammes	4
Échantillonnage simultané	No
Mémoire embarquée	4095 échantillons

Sortie analogique	
Nombre de voies	4
Résolution	16 bits
Gamme maximum de tension	
Gamme	-10 V - 10 V
Précision	3230 µV
Gamme minimum de tension	
Gamme	-10 V - 10 V
Précision	3230 µV
Taux de rafraîchissement	833 kéch. / s
Courant fourni une voie	5 mA
E / S numériques	
Voies bidirectionnelles	48
Voies d'entrée uniquement	0
Voies de sortie uniquement	0
Cadencement	Logiciels Matériel
Lignes cadencées	32
Fréquence d'horloge maximum	1 MHz
Niveaux de logique	TTL
Filtres d'entrée programmables	Oui
Supporte des états de démarrage programmables ?	Oui
Entrée numérique	
Type d'entrée	Courant absorbé Courant fourni
Gamme maximum de tension	0 V - 5 V

Sortie numérique	
Type de sortie	Courant absorbé Courant fourni
Courant fourni une voie	24 mA
Courant fourni total	1 A
Gamme maximum de tension	0 V - 5 V
Compteurs / timers	
Timer chien de garde	Non
Compteurs	2
Nombre de voies DMA	2
Opérations bufférisées	Oui
Debouncing / Glitch Removal	Oui
Source de fréquence max	80 MHz
Génération d'impulsions	Oui
Encombrement	32 bits
Stabilité base de temps	50 ppm
Niveaux de logique	TTL
Cadencement / déclenchement / synchronisation	
Déclenchement	Numérique
Bus de synchronisation (RTSI)	Yes
Spécifications physiques	
Longueur	16 cm
Largeur	10 cm
Connecteur d'E / S	VHDCI 68 broches femelle

Figure. Annexe A.4. NI PXI-8106 RT

Le contrôleur temps réel embarqué PXI-8106 RT de NI est une plate-forme haute performance idéale pour les applications de test et de contrôle temps réel (cf. figure Annexe A.4).

Specifications

Specifications subject to change without notice.

Features

Processor	Intel Core 2 Duo Processor T7400 (2.16 GHz)
Chipset	Mobile Intel 945GM Express chipset
Ethernet	10/100/1000BASE-TX, RJ45 connector
Video	Intel GMA 950 graphics media accelerator, DVI-I connector
Serial	1 (RS232)
GPIB	PCI-GPIB/TNT, micro D25 connector IEEE 488 and HS488 transfers (adapter cable not included)
USB ports	4
RAM	2 SO-DIMM sockets, DDR2 SDRAM, PC2 5400, dual channel 512 MB (1 x 512 DIMM) standard, 2 GB (2 x 1 GB DIMMs) maximum
Hard drive	
Base	60 GB minimum, internal 2.5 in., 9.5 mm Serial ATA 1.0 interface
Extended temperature and 24/7 operation option	40 GB minimum, internal 2.5 in., 9.5 mm Fast Ultra ATA100 interface
V (I/O) keying	Chassis V (I/O) = +5 VDC (blue key)

Power Requirements

Voltage (V)	Current (A)	
	Typical	Maximum
+3.3	3.60	3.75
+5	7.50	8.50
+12	0.005	0.005
-12	0	0

Physical

Board dimensions	4-slot 3U PXI module
Slot requirements	1 system slot plus 3 controller expansion slots
Compatibility	Fully compatible with PXI Specification 2.0
Weight	0.94 kg (2.1 lb), typical

Environment

Maximum altitude	2,000 m (800 mbar) (at 25 °C ambient temperature)
Pollution degree	2

For indoor use only.

Operating Environment

Ambient temperature[1]	
NI PXI-8106 RT	
Base	5 to 50 °C[2] (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Extended temperature	0 to 55 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity	10 to 90% noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

[1]For chassis that are not available in the online catalog at ni.com, please contact National Instruments for supported operating temperatures.
[2]5 to 40 °C for the PXI-8106 RT in the PXI-1000B DC.

Annexe A. Constitution du Système de gestion d'énergie

Annexe A.2 La mesure de températures

Le châssis secondaire du contrôleur est le NI compactDAQ cDAQ-9174 (cf. figure Annexe A.5). Il est présenté sur la figure ci-dessous. Il comprend quatre emplacements, dont deux sont utilisés pour la mesure de température. Chaque emplacement utilisé comprend un module NI911 d'entrée 4 voies pour thermocouple.

Les deux systèmes, principal et secondaire, communiquent par liaison directe USB.

Figure.Annexe A.5. Châssis secondaire pour la mesure de température

Figure.Annexe A.6. Représentation du module NI9211

Les données constructeur du module NI911 représenté sur a figure Annexe.A.6 sont représentés ci-dessous :

Résumé des spécifications

Général	
Famille de produits	Industrial I / O
Type de mesure	Temperature Tension Thermocouple
Form Factor	CompactDAQ CompactRIO
Système d'exploitation / Cible	Windows
Conforme à la directive RoH S	Oui
Type d'isolation	Isolation terre-voie
Entrée analogique	
Voies asymétriques	0
Voies différentielles	4
Résolution d'entrée analogique	24 bits
Gamme maximum de tension	-80 mV - 80 mV
Gamme minimum de tension	-80 mV - 80 mV
Échantillonnage simultané	No
Conditionnement du signal	Compensation de soudure froide
Sortie analogique	
Nombre de voies	0
E / S numériques	
Voies bidirectionnelles	0
Voies d'entrée uniquement	0
Voies de sortie uniquement	0
Compteurs / timers	
Compteurs	0
Spécifications physiques	
Longueur	9 cm
Largeur	2.3 cm
Connecteur d'E / S	Barriers à vis
Température de fonctionnement	-40 °C - 70 °C

Annexe A. Constitution du système de gestion d'énergie

Annexe A.3 Mesure de courant

Le système de gestion d'énergie a besoin du courant traversant dans chaque module de stockage dont il assure la surveillance. Ce courant est mesuré grâce à un capteur LEM dont les caractéristiques sont ci-dessous (cf. figure Annexe A.7).

Figure.Annexe A.7. Capteur de courant utilisé

LEM

Current Transducer LF 205-S/SP3

I_{PN} = 100 A

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic separation between the primary circuit and the secondary circuit.

Electrical data

I_{PN}	Primary nominal rms current			100			A
I_{PM}	Primary current, measuring range			0 .. ± 200			A
R_M	Measuring resistance @		T_A = 70 °C		T_A = 85 °C		
			$R_{M\,min}$	$R_{M\,max}$	$R_{M\,min}$	$R_{M\,max}$	
	with ± 12 V	@ ± 100 A_{max}	0	95	15	94	Ω
		@ ± 200 A_{max}	0	40	15	39	Ω
	with ± 15 V	@ ± 100 A_{max}	16	123	47	122	Ω
		@ ± 200 A_{max}	16	55	47	54	Ω
I_{SN}	Secondary nominal rms current			100			mA
K_N	Conversion ratio			1 : 1000			
U_C	Supply voltage (± 5 %)			± 12 .. 15			V
I_C	Current consumption @ ± 15 V			17 + I_S			mA

Accuracy - Dynamic performance data

X_G	Overall accuracy @ I_{PN}, T_A = 25 °C		± 0.5	%
ε_L	Linearity error		< 0.1	%
			Typ	Max
I_O	Offset current @ I_P = 0, T_A = 25 °C			± 0.2	mA
I_{OM}	Magnetic offset current [1] @ I_P = 0 and specified R_M, after an overload of 3 x I_{PN}			± 0.1	mA
I_{OT}	Temperature variation of I_O	- 40 °C .. + 85 °C	± 0.25	± 0.65	mA
t_{ra}	Reaction time to 10 % of I_{PN} step		< 500		ns
t_r	Step response time [2] to 90 % of I_{PN}		< 1		µs
di/dt	di/dt accurately followed		> 100		A/µs
BW	Frequency bandwidth (- 3 dB)		DC .. 100		kHz

General data

T_A	Ambient operating temperature		- 40 .. + 85	°C
T_S	Ambient storage temperature		- 40 .. + 90	°C
R_S	Secondary coil resistance	@ T_A = 70 °C	10	Ω
		@ T_A = 85 °C	11	Ω
m	Mass		78	g
	Standard		EN 50178: 1997	

Notes: [1] The result of the coercive force (Hc) of the magnetic circuit
[2] With a di/dt of 100 A/µs.

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Insulating plastic case recognized according to UL 94-V0.

Special features

- I_{PN} = 100 A
- I_{PM} = 0 .. ± 200 A
- K_N = 1 : 1000.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without prior notice

LEM

Current Transducer LF 205-S/SP3

Isolation characteristics

U_d	Rms voltage for AC insulation test, 50/60 Hz, 1 min	3.5	kV
$\hat{U}_w$	Impulse withstand voltage 1.2/50 µs	8.8	kV
U_e	Partial discharge extinction voltage rms @ 10 pC	> 2	kV
		Min	
d_{Cp}	Creepage distance	11	mm
d_{Cl}	Clearance	10.2	mm
CTI	Comparative Tracking Index (group IIIa)	175	

Applications examples

According to EN 50178 and IEC 61010-1 standards and following conditions:

- Over voltage category OV 3
- Pollution degree PD2
- Non-uniform field

	EN 50178	IEC 61010-1
d_{Cp}, d_{Cl}, $\hat{U}_W$	Rated insulation voltage	Nominal voltage
Basic insulation	500 V	500 V
Reinforced insulation	250 V	250 V

Safety

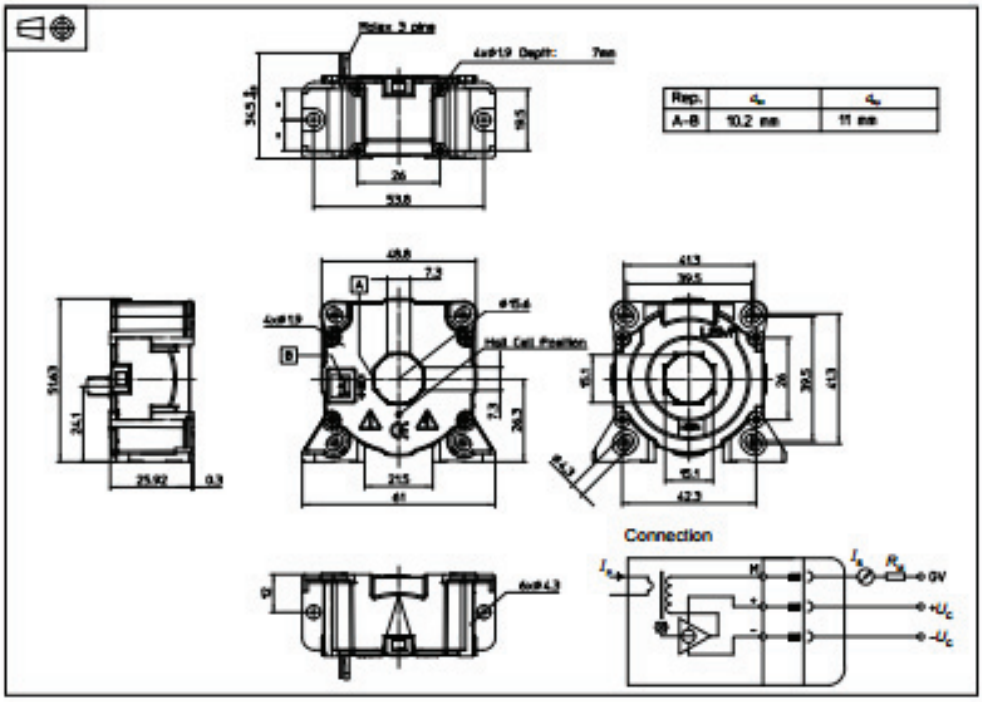
This transducer must be used in limited-energy secondary circuits according to IEC 61010-1.

This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the manufacturer's operating instructions.

Caution, risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply).
Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage.
This transducer is a build-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation.
A protective housing or additional shield could be used.
Main supply must be able to be disconnected.

Dimensions LF 205-S/SP3 (in mm)



Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Transducer fastening
  Vertical position 2 holes Ø 4.3 mm
  2 steel screws M4
  Recommended fastening torque 2.3 N-m
  Or 4 holes Ø 1.9 mm
  depth: 7 mm
  4 screws PTKA 25
  length: 6 mm
- Transducer fastening
  Horizontal position 4 holes Ø 4.3 mm
  4 steel screws M4
  Recommended fastening torque 3.2 N-m
  Or 4 holes Ø 1.9 mm
  4 screws PTKA 25
  min length: 11.5 mm with thickness of fixed plate
  Recommended fastening torque 0.7 N-m
- Primary through-hole Ø 15.5 mm
- Connection of secondary Molex 6410
  3 Tin plated pins

Remarks

- I_s is positive when I_p flows in the direction of the arrow.
- Temperature of the primary conductor should not exceed 100 °C.
- Dynamic performances (di/dt and response time) are best with a single bar completely filling the primary hole.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without prior notice

Annexe B : Bilan d'incertitude de la mesure

Grâce à la comparaison avec une méthode de caractérisation fiable, la spectroscopie d'impédance, nous avons démontré que la nouvelle approche de commande des circuits d'équilibrage permet bien de mesurer l'ESR du supercondensateur surveillé par le SCM. La seconde étape consiste à déterminer l'incertitude de cette nouvelle méthode de mesure.

Dans cette partie, on se propose de faire un travail de métrologie qui consiste à réaliser le bilan d'incertitude de la mesure d'ESR proposé.

Comme toute mesure, la question que l'on peut se poser est quelle confiance peut-on avoir en ces résultats. Dans cette partie, on se propose de faire un bilan d'incertitude [75] dans le but de chiffrer cette confiance.

Certaines définitions sont nécessaires pour la compréhension de la démarche proposée.

- Le mesurage est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur.
- Le mesurande est la grandeur soumise au mesurage.
- La valeur-vraie est la valeur obtenue par un mesurage parfait.

Une confusion existe et est répandue entre le terme erreur et incertitude de mesure.

L'erreur de mesure est définie comme la différence entre la valeur annoncée et la valeur-vraie. Cette dernière étant inconnue, l'erreur est en réalité impossible à définir. La correction de mesure est donc une estimation de l'erreur de mesure.

L'incertitude de mesure, quant à elle, exprime le manque de connaissance exacte de la valeur d'une grandeur. Elle est exprimée sous forme d'un écart type et caractérise la dispersion des mesurages autour d'une valeur moyenne (figure Annexe 1). Il est essentiel d'indiquer une incertitude avec un résultat de mesure car elle permet de donner une indication quantitative sur la qualité du résultat. Ensuite, sans incertitude donnée, les résultats de mesure ne peuvent plus

être comparés soit entre eux, soit par rapport à une valeur indiquée par un autre moyen de mesure.

L'objectif du bilan d'incertitude est de définir l'intervalle de dispersion des mesurages qui doit être le plus étroit possible et dont on espère que la valeur-vraie du mesurande y soit incluse.

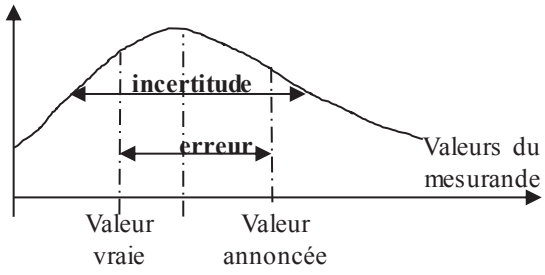


Figure Annexe B.1 Définition de l'erreur et de l'incertitude de mesure

Un bilan d'incertitude nécessite une analyse approfondie du processus de mesurage afin identifier toutes les sources possibles d'incertitude. Le bilan d'incertitude permet de modéliser le processus de mesurage. La première modélisation correspond au modèle mathématique. Le procédé de mesure pour l'approche proposée est indirect car la grandeur ESR est liée à la tension et au courant du supercondensateur surveillé. Le courant est aussi une grandeur provenant d'un mesurage indirecte déterminé à partir de la tension aux bornes de la résistance d'équilibrage (cf. équation 2.32).

Une deuxième modélisation, la modélisation 5M, ou diagramme Ishikawa, permet de représenter de manière synthétique les différentes sources possibles d'erreur afin qu'elles soient réduites. Le diagramme correspondant au processus de mesure d'ESR est représenté sur la figure Annexe 2 ci-dessous.

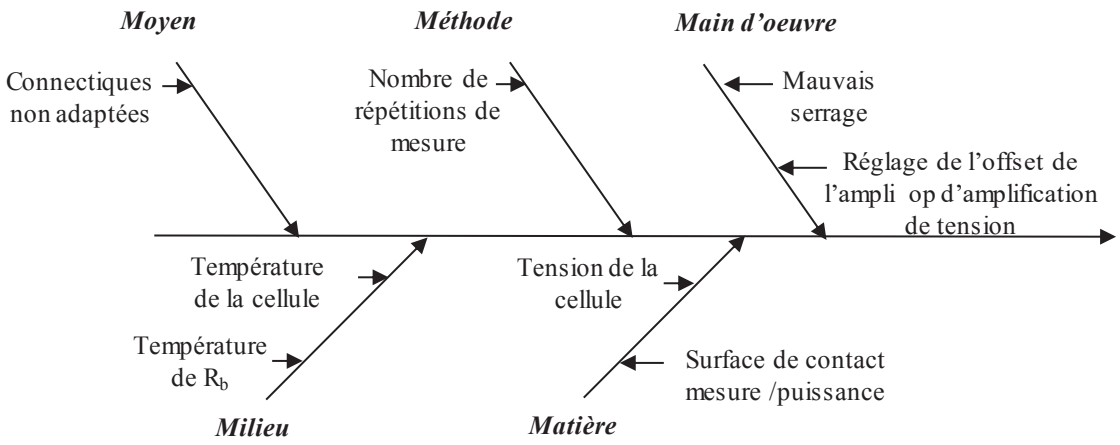


Figure Annexe B.2 Diagramme de 5M du processus de mesure de l'ESR

Les causes d'erreurs présentées ont été réduites par différentes solutions. Concernant la méthode, un nombre de répétitions fixe de mesure a été appliqué au système afin d'assurer la répétabilité de la mesure. Concernant la température, le choix de la résistance d'équilibrage de 10 Ω garantit un assez faible échauffement de la résistance d'équilibrage qui impactera peu sa valeur. La courbe de tendance théorique de la variation de l'ESR avec la température et la tension résout l'incertitude provenant de la température de la cellule et de sa tension. La principale cause d'erreur à prendre avec précaution par l'utilisateur est liée à la connectique et à la surface de contact entre le supercondensateur et le circuit d'équilibrage. En effet, la réalisation expérimentale a démontré que l'ESR estimée, de très faible valeur était fortement impactée par la résistance de la connectique qui lie le supercondensateur au circuit d'équilibrage ou aux autres supercondensateurs associés en série. La solution à cette problématique consiste à isoler la mesure de la puissance par une mesure en quatre points. Néanmoins, la surface de contact avec le circuit d'équilibrage étant faible, le niveau de serrage de la cellule, le mauvais choix de connectique ou n'importe quelles causes dégradant le contact ont une forte influence sur l'ESR estimée. La seconde étape, après analyse et modélisation du mesurage, consiste à estimer les incertitudes.

Soit un processus de mesure de mesurande y qui est fonction de différentes grandeurs x_i, $i \in N$.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \tag{A.1}$$

L'incertitude $u_c(y)$ composée sur le mesurande y est exprimée par :

$$u_c{}^2(y) = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{k-1}\sum_{j=i+1}^{k} \left(\frac{df}{dx_i}\right) \cdot \left(\frac{df}{dx_j}\right) \cdot u(x_i, x_j) \qquad \text{(A.2)}$$

avec

$u(x_i)$ la variance de la grandeur x_i

$u(x_i, x_j)$ la covariance entre les grandeurs x_i et x_j

La covariance est exprimée par

$$u(x_i, x_j) = r \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \qquad \text{(A.3)}$$

tel que r est une valeur comprise entre -1 et 1. La procédure générale, appliquée lorsque les grandeurs sont corrélées, est de calculer l'incertitude composée en appliquant successivement r = 0, r = -1 et r = 1 et de retenir la valeur de $u_c{}^2(y)$ la plus grande.

L'incertitude élargie U est exprimée par :

$$U = k \cdot u_c(y) \qquad \text{(A.4)}$$

avec k le facteur d'élargissement pris égal à deux (k=2) pour un niveau de confiance de 95 %.

L'incertitude finale U_f est donc exprimée par :

$$U_f = \mp U = \mp k \cdot u_c(y) \qquad \text{(A.5)}$$

L'étape cruciale de calcul d'incertitude est donc d'évaluer les incertitudes $u(x_i)$ de chaque grandeur x_i. Deux méthodes peuvent être utilisées : la méthode de type A et la méthode de type B. La méthode d'évaluation de type A se base sur un formalisme probabiliste. La méthode de type B se fonde sur l'expérience de l'opérateur, les spécifications du

constructeur, les facteurs d'influence et autres paramètres non statistiques. L'approche A étant plus facile, elle a été adoptée. Elle consiste à réaliser une série de n mesurage des grandeurs x_i et de calculer l'écart type résultant (cf. équation.A.6).

$$u(x_i) = S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n}(x_i(k) - \bar{x_i})^2}{n-1}} \qquad \text{(A.6)}$$

Appliquons cette démarche métrologique sur le mesurande ESR qui est dépendant des deux grandeurs, la tension de cellule ΔV_{sc} et la tension aux bornes de la résistance d'équilibrage ΔV_{Rb}. On obtient alors :

$$U_f = \mp 2 \cdot \frac{R_b}{G}\left[\sqrt{\left((\frac{1}{\Delta V_{Rb}})^2 \cdot u(\Delta V_{sc})^2\right) + \left((\frac{\Delta V_{sc}}{\Delta V_{Rb}{}^2})^2 \cdot u(V\Delta_{Rb})^2\right) + 2 \cdot \left((\frac{\Delta V_{sc}}{\Delta V_{Rb}{}^3})\right) \cdot u(V\Delta_{Rb}) \cdot u(\Delta V_{sc})}\right] \qquad \text{(A.7)}$$

avec :

l'incertitude sur la mesure de la tension de la cellule $u(\Delta V_{sc}) = 4.58\ mV$;

l'incertitude sur la mesure de la tension de la résistance d'équilibrage $u(\Delta V_{Rb}) = 4.37\ mV$.

Ces incertitudes sont le résultat de plusieurs mesures (> 70) réalisées sur un supercondensateur de 3000 F à 39 °C et à 2 V.

L'incertitude est à chaque fois dépendante des ondulations de tension annoncées. Afin de généraliser cette valeur, nous avons automatisé l'opération de division des tensions. L'ESR est en conséquent devenue une mesurande directe. Ainsi, en réalisant la même démarche métrologique, l'incertitude finale sur la mesure de l'ESR est de ∓3.5 µΩ. Cette valeur est le résultat de 90 mesures identiques de l'ESR d'un supercondensateur de 3000 F à 2.2 V et à 39 °C (cas critique cf. figure Annexe B.7). Ceci correspond à une incertitude relative de 1.4 % sachant que le supercondensateur avait 0.255 mΩ d'ESR en moyenne.

Annexe C. Supercondensateurs utilisés

Les supercondensateurs utilisés pour cette expérimentation ont les caractéristiques suivantes.

DATASHEET
K2 SERIES 650 F - 3,000 F ULTRACAPACITORS

Maxwell TECHNOLOGIES

BCAP0650 P270
BCAP1200 P270
BCAP1500 P270
BCAP2000 P270
BCAP3000 P270

FEATURES AND BENEFITS
- Ultra-low internal resistance
- Highest power performance available
- Lowest RC time constant
- 2.7 V operating voltage
- Over 1,000,000 duty cycles
- Proprietary material science and packaging technology
- Threaded terminal or weldable post versions

APPLICATIONS
- Automotive subsystems
- Back-up power
- Grid stabilization
- Hybrid drive trains
- Rail system power
- Transportation
- Utility vehicles

PRODUCT SPECIFICATIONS

CAPACITANCE	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
Nominal capacitance	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Tolerance capacitance	-0% / +20%	-0% / +20%	-0% / +20%	-0% / +20%	-0% / +20%
VOLTAGE					
Rated voltage	2.7 V DC	2.7 V DC	2.7 V DC	2.7 V DC	2.7 V DC
Surge voltage	2.85 V DC	2.85 V DC	2.85 V DC	2.85 V DC	2.85 V DC
Maximum operating voltage			N/A		
RESISTANCE					
ESR, DC Max., room temperature	0.8 mΩ	0.58 mΩ	0.47 mΩ	0.35 mΩ	0.29 mΩ
ESR, 1khz (Max.)	0.6 mΩ	0.44 mΩ	0.35 mΩ	0.26 mΩ	0.24 mΩ
TEMPERATURE					
Operating temperature range Stored uncharged	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C
Storage temperature range Cell case temperature	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C
POWER					
Pd	6,800 W/kg	5,800 W/kg	6,600 W/kg	6,900 W/kg	5,900 W/kg
Pmax	18,900 W/kg	15,900 W/kg	18,500 W/kg	19,400 W/kg	14,800 W/kg
ENERGY					
Emax	4.11 Wh/kg	4.67 Wh/kg	5.42 Wh/kg	5.63 Wh/kg	5.96 Wh/kg

BCAP0650 P270
BCAP1200 P270
BCAP1500 P270
BCAP2000 P270
BCAP3000 P270

PRODUCT SPECIFICATIONS (cont.)

DC LIFESPAN	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
Endurance At rated voltage and 65°C.	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours	1,500 hours
Capacitance change % of rated value	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%
Internal resistance change % of rated value	≤60%	≤60%	≤60%	≤60%	≤60%
Life test At rated voltage and 25°C.	10 years	10 years	10 years	10 years	10 years
Capacitance change % of rated value	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%
Internal resistance change % of rated value	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%
CYCLE LIFE					
Cycles Between specified voltage and half rated voltage under constant current at 25°C.	1 million	1 million	1 million	1 million	1 million
Capacitance change % of rated value	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%	≤20%
Internal resistance change % of rated value	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%	≤100%
SHELF LIFE					
Shelf Life Uncharged over storage temperature	2 years	2 years	2 years	2 years	2 years
Capacitance change % of rated value	10% decrease	10% decrease	10% decrease	10% decrease	10% decrease
ESR change % of rated value	50% increase	50% increase	50% increase	50% increase	50% increase
CURRENT					
Maximum continuous current	62 A	81 A	97 A	123 A	147 A
Maximum peak current, 1 sec	575 A	955 A	1,185 A	1,585 A	2,165 A
Leakage current, I_{LC} After 72 hours. Initial leakage current can be higher.	1.5 mA	2.7 mA	3.0 mA	4.2 mA	5.2 mA
CONNECTION					
Terminal	Threaded or Weldable				
SIZE					
Dimensions (L x W x H) (mm)	See drawings				
Weight	0.16kg	0.26kg	0.28kg	0.36kg	0.51kg

DATASHEET
K2 SERIES 650 F - 3,000 F ULTRACAPACITORS

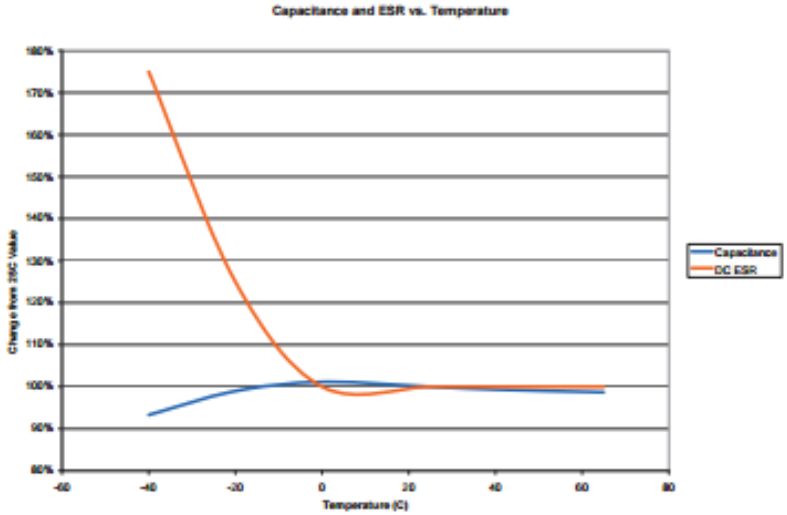
BCAP0650 P270
BCAP1200 P270
BCAP1500 P270
BCAP2000 P270
BCAP3000 P270

PRODUCT SPECIFICATIONS (cont.)

RATINGS AND SAFETY					
Vibration resistance	For all: ISO 16750, SAE J2380				
Short circuit current (Isc) **CAUTION:** Current possible with short circuit from rated voltage Do not use as an operating current.	3,350 A	4,650 A	5,700 A	7,700 A	9,300 A

TYPICAL CHARACTERISTICS

THERMAL CHARACTERISTICS					
Thermal resistance (Rth)	6.5°C/W	5.3°C/W	4.5°C/W	3.8°C/W	3.2°C/W



ADDITIONAL TECHNICAL INFORMATION

Capacitance and ESR, DC measured per document no. 1007239, available at www.maxwell.com.
Unless specified, all specifications are at 25°C

I_c = leakage current after 72 hours at 25°C

Isc (short circuit current) = $\frac{V_{RATED}}{ESR}$

R_{th} = thermal resistance

$$E_{max} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3{,}600 \times mass}$$

$$P_{max} = \frac{\frac{V^2}{4R\,(1khz)}}{mass}$$

$$P_d = \frac{\frac{0.12V^2}{R\,(DC)}}{mass}$$

$$\text{Maximum Peak Current (1 sec)} = \frac{\frac{1}{2} V}{ESR(DC) + \frac{1}{C}}$$

BCAP0650 P270
BCAP1200 P270
BCAP1500 P270
BCAP2000 P270
BCAP3000 P270

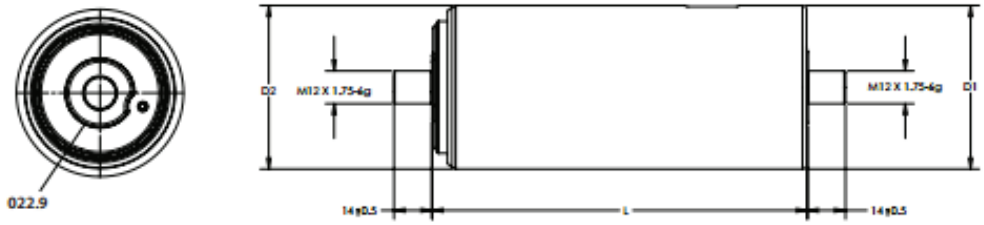
MOUNTING RECOMMENDATIONS

Do not reverse polarity.
Maximum torque for M12 screw terminals is 14Nm.
Cells are designed to be connected into series or parallel strings.
Clean terminals before mounting.

MARKINGS

Capacitors are marked with the following information - Rated capacitance and rated voltage as well as energy/ power type indication in the product naming. Serial number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking.

DIMENSIONS

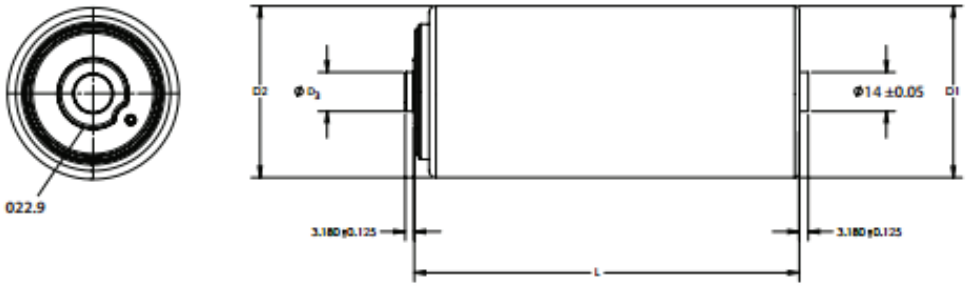


Part Number	Volume	L (±0.3mm)	D_1 (±0.2mm)	D_2 (±0.7mm)
BCAP0650 P270 K04 02	0.211 L	51.5 mm (±0.5mm)	60.4mm	60.7mm
BCAP1200 P270 K04 02	0.294 L	74 mm	60.4mm	60.7mm
BCAP1500 P270 K04 02	0.325 L	85 mm	60.4mm	60.7mm
BCAP2000 P270 K04 02	0.373 L	102 mm	60.4mm	60.7mm
BCAP3000 P270 K04 02	0.475 L	138 mm	60.4mm	60.7mm

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.

BCAP0650 P270
BCAP1200 P270
BCAP1500 P270
BCAP2000 P270
BCAP3000 P270

DIMENSIONS (cont.)



Part Number	Volume	L (±0.3mm)	D_1 (±0.2mm)	D_2 (±0.7mm)	D_3 (±0.05mm)
BCAP0650 P270 K05 02	0.15 L	51.5 mm (±0.5mm)	60.4mm	60.7mm	14mm
BCAP1200 P270 K05 02	0.233 L	74 mm	60.4mm	60.7mm	14mm
BCAP1500 P270 K05 02	0.264 L	85 mm	60.4mm	60.7mm	14mm
BCAP2000 P270 K05 02	0.312 L	102 mm	60.4mm	60.7mm	14mm
BCAP3000 P270 K05 02	0.414 L	138 mm	60.4mm	60.7mm	14mm

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.

Maxwell Technologies, Inc.
Worldwide Headquarters
9244 Balboa Avenue
San Diego, CA 92123
USA
Tel: +1 858 503 3300
US Free Call: +1 877 511 4324
Fax: +1 858 503 3301

Maxwell Technologies SA
CH-1728 Rossens
Switzerland
Tel: +41 (0)26 411 85 00
Fax: +41 (0)26 411 85 05

Maxwell Technologies, GmbH
Brucker Strasse 21
D-82205 Gilching
Germany
T: +49 (0)8105 24 16 10
F: +49 (0)8105 24 16 19

Maxwell Technologies, Inc.
Shanghai Representative Office
#13, CR Times Square
500 Zhangyang Road, Pudong
Shanghai 200122, P.R. China
Tel: +86 21 5836 5733
Fax: +86 21 5836 5620

Online: www.maxwell.com • Email: info@maxwell.com

Annexe D. Banc de puissance Arbin

Le banc de puissance utilisé pour cette expérimentation est le banc Arbin BT2000 a deux voies dont les caractéristiques sont les suivantes.

Arbin INSTRUMENTS

www.arbin.com

762 Peach Creek Cut Off Road,
College Station, TX 77845, USA
Phone: (979) 690-2751
Fax: (979) 690-2761
Email: info@arbin.com

BT2000

Multi-Channel Battery Testing System

Arbin's **BT2000** is a multi-channel battery testing system designed for research and development of energy storage and electrochemical devices, such as batteries, supercapacitors, and fuel cells. Each channel operates independently of one another enabling users to run tests on multiple cells at a time. The BT2000's Safety Features and Modular design ensure reliability and easy maintenance.

The BT2000 features Arbin's MITS Pro Control Software. MITS Pro unleashes the full potential of the BT2000 by providing several built-in control types as well as many user-defined control mechanisms. MITS Pro also includes a built-in data macro which allows users to import and manipulate their data in Microsoft Excel. Arbin's BT2000 bundled with MITS Pro is one of the most comprehensive testing solutions available.

- Battery Testing, Life Cycling
- Material Research
- Electrode Study
- Multiple Current Ranges
- Multiple Independent Channels
- PST/GST Functionality
- Pulse Functions
- Plug & Play Structure
- Advanced Testing Software

(ES) Equipements Scientifiques SA - Département Tests Energie Mesures - 127 rue de Buzenval BP 26 - 92380 Garches
Tél. 01 47 95 99 45 - Fax. 01 47 01 16 22 - e-mail: tem@es-france.com - Site Web: www.es-france.com

Main Features

- **Programmable control** of current, voltage, load and power; providing constant, linear ramp, staircase and other control profiles, generated by specified formula.
- **Independent control** for each channel.
- **High accuracy.** 0.02 to 0.1% FSR control and reading accuracy for current and voltage on linear circuitry and 0.15% FSR accuracy on PWM circuitry.
- **Fast current rise time** from 50μs to 2ms on linear circuitry; 10~100ms on PWM circuitry.
- **High and slow speed pulse with synchronized DAQ (optional).** Depending on current/ voltage range, MITS Pro's built-in pulse function can generate high speed (sub-millisecond) bipolar pulses as fast as 500μs and synchronized data sampling on linear circuitry or slow speed (sub-second) pulses on both linear and PWM circuitries.
- **PST/GST functionality** enables each channel to run broad electrochemistry studies. Arbin's testing system is capable of performing potentio-dynamic and galvano-dynamic tests such as cyclic voltammetry (CV) through voltage ramping, as well as multi-electrode tests..

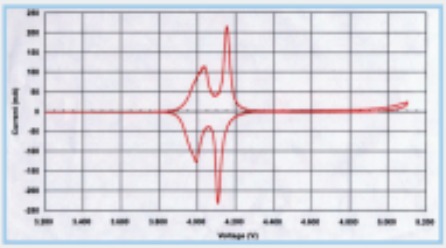


Figure 1. CV of a lithium battery electrode at 50 μV/second.

- **Fast data acquisition** up to 100 points/s/PC.

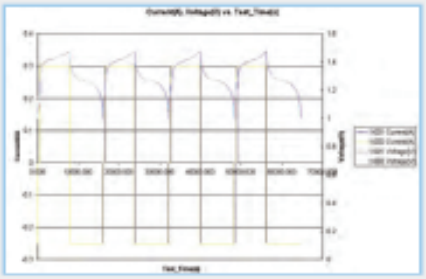


Figure 2. Test Results of Charge-discharge cycling

- **Plug and play modules** for easy maintenance and expansion.
- **Channel paralleling (optional)** allows users to parallel several I/V channels to increase current output.

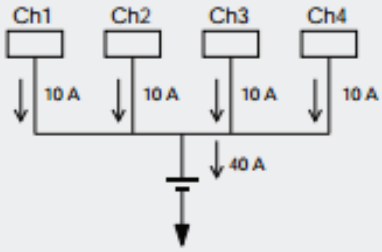
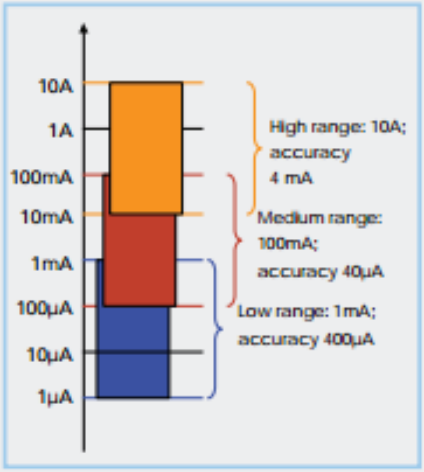


Figure 3. Block diagram for parallel output.

- **Multiple Current Ranges** provide accurate control and measurement over broader range of current value.



- **Dual-voltage ranges (optional)** provide accurate voltage control and measurement over a broader range of voltage values.

Optional Auxiliaries

There are many options provided for the BT2000 that enhance the functionality and capability of the system. They are briefly listed as follows:

- **Auxiliary voltage input:** Standard ±10V range with 10GΩ input impedance, either earth grounded or floating with high common mode voltage (CMV).
- **Thermocouple input:** Type T, K, J, or E thermocouple inputs can be used.
- **Thermistor input:** Provides activation signal for the thermistor. Different thermistor types can be specified.
- **Pressure input:** Provides complete circuitry to the pressure transducer. Can match with a variety of sensors.
- **pH meter:** A BNC connector is provided for input from the pH sensor. The input impedance is 1015Ω.
- **External charge/load adapter:** This option is to test a battery under an external charger/load or to inspect that charger/load. Current, voltage, and other auxiliary measurements are functional for step limit control.
- **Smart battery:** The BT2000 reads content of the registers in the smart battery and controls the testing on the smart battery accordingly.
- **Flow rate** reading and control for the gas or liquid flow meter or controller.
- **Programmable digital input/output control.** TTL or relay signal is selectable for input/output signal. testing procedure can be controlled by external signal through the input(s), while the output(s) may trigger external devices such as valves or alarm at programmable manner.

Safety Features

The BT2000 has many built- in safety features to ensure system reliability and safety for both the system and the device on test.

- **Current limiting circuitry** prevents current from exceeding maximum current range even when the loaded device short circuits.
- **Watchdog** turns off the system in case of a major hardware or communication failure.
- **Fuses** prevent damage from unexpected shortage or over current.
- **Thermoswitches** prevent overheating from an long-term over-current or breakdown of cooling fans.
- **UPS** (uninterruptible power supplier) prevent data loss during power outage (optional).
- **Software safety limits.** In each schedule, there are safety limits for current, voltage, and temperature for the entire test.
- **Software step limits.** For each step, there are limits available for almost every variable or meta-variables that can be set for termination of the step or the test.
- **Optional safety measure for lithium batteries:** Temperature Cutoff (for systems equipped with temperature input)-may apply on the channel mapped with temperature sensor(s). It cuts off cell current immediately when cell temperature passes a designated value.
- **Voltage clamp:** hardware voltage clamp is a standard feature to provide smooth constant current to constant voltage transition.

BT2000 Typical Products

5V/2A/8CH

Charge/Discharge V Range	0 – 5V
Charge/Discharge I Range	± 2A
Three current ranges	± 2A/0.1A/0.01A

5V/2A/16CH

Charge/Discharge V Range	0 – 5V
Charge/Discharge I Range	± 2A
Three current ranges	± 2A/0.1A/0.01A

5V/10A/64CH

Charge/Discharge V Range	0 – 5V
Charge/Discharge I Range	± 10A
Three current ranges	± 10A/1A/0.01A

BT2000 Typical System

BT2000 Model	BT2000-5V-2A-8Ch	BT2000-5V-2A-16Ch	BT2000-5V-10A-64Ch	BT2000-5V-50A-8Ch	BT2000-5V-100A-4Ch
Accuracy of V control	± 0.02%FSR	± 0.02%FSR	± 0.02%FSR	± 0.02%FSR	± 0.02%FSR
Resolution of V	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR
Three current ranges	± 2A/0.1A/0.01A	± 2A/0.1A/0.01A	± 10A/1A/0.01A	± 50A/5A/0.1A	± 100A/10A/1A
Accuracy of I control	± 0.02%FSR	± 0.02%FSR	± 0.02%FSR	± 0.02%FSR	± 0.02%FSR
Max. continuous power per channel	10W	10W	50W	250W	500W
Resolution of I	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR
Aux. voltage input channel	optional				
Aux. temperature input/control channel	optional				
Aux. pressure input channel	optional				
Current Rising Time	(± 2A): 50 µs	(± 2A): 50 µs	(± 10A): 50 µs	(± 50A): < 2ms	(± 100A): < 2ms
The fastest data login speed	~100 points/s/PC				
Charge/Discharge Min Pulse Width	0.5ms			<20 ms	

BT2000 Model	BT2000-5V-200A-2Ch	BT2000-50V-50A-4Ch	BT2000-50V-100A-4Ch	BT2000-50V-200A-2Ch	BT2000-50V-400A-1Ch
Accuracy of V control	± 0.02%FSR	± 0.05%FSR	± 0.05%FSR	± 0.05%FSR	± 0.05%FSR
Resolution of V	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR
Three current ranges	± 200A/20A/1A	± 50A/5A/0.1A	± 100A/10A/1A	± 200A/20A/1A	± 400A/50A/5A
Accuracy of I control	± 0.02%FSR	± 0.05%FSR	± 0.05%FSR	± 0.05%FSR	± 0.05%FSR
Max. continuous power per channel	1000W	2500W	5000W	10000W	20000W
Resolution of I	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR	± 0.01%FSR
Aux. voltage input channel	optional				
Aux. temperature input/control channel	optional				
Aux. pressure input channel	optional				
Current Rising Time	(± 200A): 2ms	(± 50A): 5ms	(± 100A): 5ms	(± 200A): 5ms	(± 400A):10ms
the fastest data login speed	~100 points/s/PC				
Charge/Discharge Min Pulse Width	20ms	50ms	50ms	50ms	100ms

Custom-Designed Multi-Channel Battery Testing System

TECHNOLOGY	LINEAR	PWM-IGBT
Current Range	0 – 2000 A	≤ 500A
Voltage Range	0 – 72 V	≤ 500V
Power Range	≤ 40 kW	≤ 250 kW
Max.Number of Current Ranges	3	2 or 3 up to hardware construction
Current Rising Time	20µs – 2ms	10 – 100 ms
Accuracy	0.02% FSR for Vs 24V	0.2% FSR
the fastest data login speed	~ 100 points/s/PC	> 50 points/s/PC
Special Features	• Low to high current and power. • Low noise. • Fast rise time.	• High current, power and voltage. • Lower cost per watt. • Regenerative power

(ES) Equipements Scientifiques SA - Département Tests Energie Mesures - 127 rue de Buzenval BP 26 - 92380 Garches
Tél. 01 47 95 99 45 - Fax. 01 47 01 16 22 - e-mail: tem@es-france.com - Site Web: www.es-france.com