



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, Pascal Venet, Alaa Hijazi, Ali Sari, Xuefang Lin-Shi

► To cite this version:

Seïma Shili, Pascal Venet, Alaa Hijazi, Ali Sari, Xuefang Lin-Shi. Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie. Symposium de Génie Electrique (SGE'16), Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361666

HAL Id: hal-01361666

<https://hal.science/hal-01361666>

Submitted on 7 Sep 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.

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^(a), Pascal VENET^(a), Alaa HIJAZI^(b), Ali SARI^(a), Xuefang LIN-SHI^(b)

^(a) Université de Lyon, Lyon, F-69622, France ; Université Claude Bernard, Lyon, F-69622, France ; CNRS, UMR 5005, Laboratoire AMPERE, Villeurbanne, F-69622, France

^(b) Université de Lyon, Lyon, F-69622, France ; INSA de Lyon, Lyon, F-69622, France ; CNRS, UMR 5005, Laboratoire AMPERE, Villeurbanne, F-69622, France

RESUME – Dans cet article, des méthodes originales pour la surveillance et l'amélioration de la durée de vie des systèmes de stockage d'énergie sont présentées. Ces objectifs sont menés à bien grâce au contrôle des circuits d'équilibrage présents sur ces systèmes de stockage. La surveillance proposée est en ligne et sans impact majeur sur le système. Elle se base sur l'estimation d'un paramètre interne, à savoir la Résistance Equivalente Série (ESR). Les travaux présentés sont analysés avec des simulations réalistes de modules de supercondensateurs. Les méthodes utilisées pourraient être aussi adaptées sur des batteries.

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

1. INTRODUCTION

Un système de stockage d'énergie électrique (SSEE), est constitué d'éléments de stockage (cellules) associés en série ou parallèle plus communément appelé module de stockage [1]. Pour des raisons, entre autres de sécurité et de fiabilité, on associe au module de stockage un système de gestion d'énergie, le BMS. Cette appellation provient de l'anglais « Battery Management system ». Le BMS constitue le système de gestion pour les batteries [2]. Pour les supercondensateurs, d'autres appellations existent comme par exemple SCM pour « SuperCapacitor Manager ». Un système de gestion d'énergie classique comprend différentes fonctions dont principalement la surveillance, la détermination des états du système de stockage et l'équilibrage de ses éléments [3]. La surveillance et la détermination des états du système comprend usuellement le suivi de la tension et de la température de chaque cellule afin entre autres de garantir leur maintien dans la bonne plage de fonctionnement. L'équilibrage a pour objectif de corriger la dispersion de tension entre éléments via les circuits d'équilibrage [4][5].

L'article proposé présente de nouvelles stratégies de commande de ces circuits d'équilibrage dans le but d'estimer la durée de vie des supercondensateurs et de l'améliorer. Les circuits d'équilibrage exploités sont des circuits dissipatifs car

ce sont aujourd'hui les plus utilisés. Leur principe consiste à dissiper l'excès d'énergie des cellules les plus chargées dans une résistance d'équilibrage. Ils sont donc habituellement constitués d'une résistance d'équilibrage en série avec un interrupteur, placés aux bornes de chaque élément de stockage (cf. Figure 1).

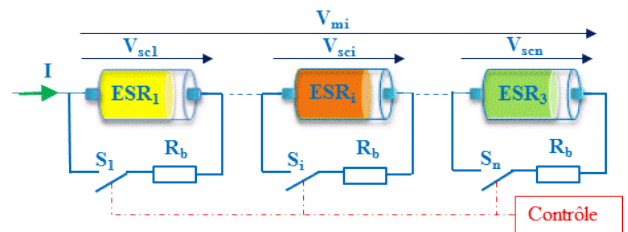


Figure 1. Circuits d'équilibrage dissipatif

La surveillance et l'amélioration de la durée de vie des systèmes de stockage proposées dans cet article sont basées sur des principes simples et ne nécessitent pas de matériel autre que celui déjà présent dans les SSEE. En effet l'estimation de la durée de vie proposée est réalisée en ligne grâce au circuit d'équilibrage existant. Elle est dépourvue d'un modèle mathématique complexe et des erreurs associées et permet la détermination de la résistance équivalente série (ESR). La commande en durée de vie, quant-à-elle se base sur l'estimation de l'ESR proposée. Via une commande prédictive optimale, elle cherche à proportionner le niveau de sollicitation de chaque cellule à son niveau de dégradation. Ceci est réalisé dans le but de maximiser la durée de vie de l'ensemble du système. Cette commande est simple et s'affranchit des algorithmes de calculs longs et complexes. Elle est donc facilement intégrable dans n'importe quel contrôleur de système de gestion d'énergie.

Le travail présenté se divise en quatre parties complémentaires. La première partie, présente un état de l'art des supercondensateurs, en particulier de leurs modes et mécanismes de vieillissement. Cette partie permet d'introduire la problématique du travail présenté et son utilité. La seconde partie, présente l'estimation de l'état de santé des éléments du module de stockage. La troisième partie, porte sur la nouvelle

approche d'amélioration de la durée de vie de ce module. Enfin, dans la dernière partie, les travaux présentés sont traités et analysés grâce à une simulation réalisée sur Matlab/Simulink.

2. SUPERCONDENSATEURS, MODES ET MECANISMES DE VIEILLISSEMENT

Les supercondensateurs, appelés aussi « supercapacités » ou condensateurs à double couche électrique sont des éléments de stockage d'énergie électrique dont la commercialisation est relativement récente [6]. Ils présentent différents avantages dont une faible résistance série, une forte densité de puissance massique et de bonnes performances en basse température comparativement aux batteries. Grâce à ces bonnes caractéristiques, les supercondensateurs sont de plus en plus exploités. On les retrouve dans des applications nécessitant une forte puissance durant une courte durée (quelques secondes) [7]. Ils peuvent aussi constituer avec les batteries par exemple des systèmes de stockage multi-sources. Ils ont alors pour rôle de soutenir le système de stockage électrique primaire. Ils sont capables de répondre seuls aux appels de puissance impulsifs. Ce type de sollicitation existe dans différents domaines tels que dans les transports électriques et hybrides ou les réseaux électriques [8][9][10].

Les bonnes caractéristiques de ces supercondensateurs reposent sur leur phénomène de double couche électrique qui a été découvert au 19^{ème} siècle [7]. Grâce à leur processus de stockage majoritairement électrostatique, ils bénéficient d'une durée de vie importante comparée à celle des batteries. Néanmoins, cette durée de vie reste limitée. Leur vieillissement se traduit par une dégradation de leurs performances au cours du temps jusqu'à atteindre la fin de vie.

Les mécanismes de dégradation des supercondensateurs sont dus essentiellement au charbon actif constituant les électrodes et aux liants [11][12].

Un supercondensateur, comme représenté sur la figure 2, est constitué de deux électrodes en charbon actif isolées par un séparateur poreux qui laisse passer les charges ioniques. Ces électrodes sont imbibées d'un électrolyte qui permet le transfert ionique. Deux collecteurs de courant assurent la liaison des électrodes avec l'extérieur.

Le charbon actif, par son procédé de fabrication peut contenir des groupes fonctionnels de surface comme par exemple une quantité infime d'eau. 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 [13]. Enfin, la dégradation des liants (entre les particules de charbon actif et entre charbon actif et collecteur) au cours du temps peut entraîner aussi la production de particules et une usure du contact électrode/collecteur [14].

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 entraînent 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 entraîner la fuite de l'électrolyte (cf. Figure 2) [16].

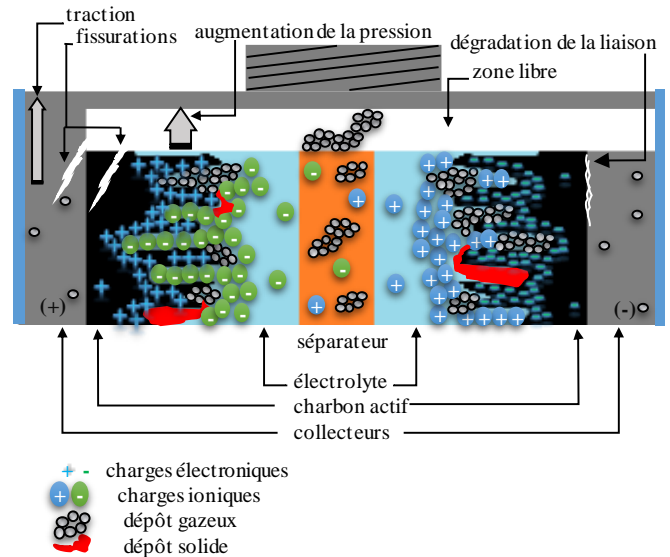


Figure 2. Représentation de la structure et des mécanismes de vieillissement d'un supercondensateur

Les mécanismes de dégradation se manifestent majoritairement au niveau de l'électrode et du séparateur. 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. Au niveau du séparateur, les particules gazeuses qui y sont piégées entraînent un ralentissement du transfert ionique qui augmente la résistance interne de la cellule. Quant à l'altération de la liaison collecteur/électrode, elle entraîne aussi l'augmentation de cette résistance [12]. 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 [17]. La diminution de la capacité se répercute négativement sur l'énergie stockée. L'augmentation de l'ESR entraîne des puissances 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.

La cinétique de dégradation d'un supercondensateur est dépendante principalement de sa température, de sa tension et de son courant [18]. En effet, les réactions pseudo-capacitives non désirées ont une vitesse d'apparition plus importante à fort potentiel et haute température. A titre d'exemple, une augmentation de la tension de la cellule de 0.1 V ou de la température de 10°C peut réduire de moitié la durée de vie du supercondensateur [19]. De récentes études ont démontré aussi l'influence du fort niveau de courant (hors échauffement global intrinsèque) sur l'amplification des réactions parasites pseudo-capacitives. Ce fort courant peut entraîner des échauffements localisés de la cellule ce qui accélère son vieillissement.

Ainsi, au cours du vieillissement, un supercondensateur va voir sa capacité baisser et son ESR augmenter continuellement en fonction de ses niveaux de sollicitations électriques et thermique. Une baisse importante de la capacité entraîne une diminution importante de l'énergie disponible qui peut devenir critique lorsque la cellule ne répond plus aux besoins de l'application en termes d'énergie. Une augmentation importante de la résistance équivalente série entraîne un échauffement qui peut amener la cellule à dépasser ses limitations et causer une défaillance brusque. 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 % et/ou une augmentation de leur résistance équivalente série de 100 % par rapport à leurs valeurs initiales [1].

3. SURVEILLANCE DE L'ETAT DE SANTE DES SUPERCONDENSATEURS

3.1. Principe de surveillance de l'état de santé

La surveillance de l'état de santé des éléments de stockage cible la prévention de la défaillance. Notre objectif final est d'estimer la durée de vie des supercondensateurs constituant le système de stockage d'énergie et de prédire le temps restant avant leur défaillance. Le but est de prévoir le remplacement des éléments défaillants et d'étendre la durée de vie de tout le système.

Afin de suivre l'état de santé des éléments de stockage nous nous sommes intéressés au suivi en ligne d'un paramètre interne, reflet du niveau de dégradation de l'élément, qui est la résistance équivalente série ESR. En effet, le vieillissement de l'élément de stockage est caractérisé par l'évolution de ce paramètre qui part d'une valeur initiale et augmente jusqu'à atteindre le critère de fin de vie (choisi comme le double de la valeur initiale). Ainsi, connaissant la loi de vieillissement de l'ESR en fonction du temps, une estimation de l'ESR à un instant donné comparée à sa valeur initiale peut nous indiquer l'âge actuel de la cellule mais aussi approximer la fin de vie éventuelle pour des conditions d'utilisation définies.

A titre d'exemple, l'état de santé peut être calculé grâce à l'indicateur (SOH_{ESR}) lorsque la surveillance se base sur l'évolution de l'ESR (1).

$$SOH_{ESR}(\%) = \frac{2 \cdot ESR(0) - ESR(t)}{ESR(0)} \cdot 100 \quad (1)$$

$ESR(0)$ correspond à l'ESR initiale de la cellule neuve et $ESR(t)$ correspond à l'ESR à un instant t .

Cet indicateur, SOH_{ESR} , est égal à 100% pour une cellule neuve ($ESR(t) = ESR(0)$) et est égal à zéro lorsque la cellule a atteint son critère de fin de vie ($ESR(t) = 2 \cdot ESR(0)$).

L'évolution de l'ESR au cours du vieillissement peut être assimilée à une croissance linéaire [20][21]. Ainsi l'historique des ESR sauvegardées permet d'approximer la vitesse d'évolution de l'ESR et de prédire le temps restant avant d'atteindre la fin de vie du composant.

L'ESR est un paramètre qui dépend de l'environnement du supercondensateur (température). La comparaison de l'ESR actuelle avec sa valeur initiale dans le but de surveiller son état de santé doit donc être réalisée dans les mêmes circonstances. Si cette condition n'est pas assurée l'ESR initiale ($ESR(0)$), doit être corrigée pour correspondre aux conditions actuelles du supercondensateur. Cette correction nécessite la connaissance de la loi de variation de l'ESR en fonction de la température du supercondensateur.

La figure 3 représente un exemple de variation de l'ESR mais aussi de la capacité pour un supercondensateur de 1800 F/2.5 V en fonction de la température.

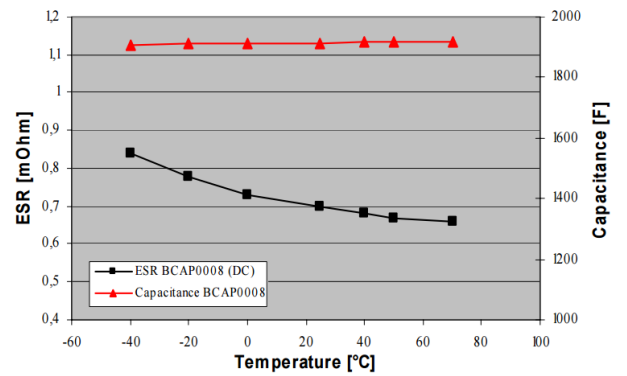


Figure 3. Variation de l'ESR et de la capacité en fonction de la température d'un supercondensateur 1800 F, 2.5 V [22]

Cette correction de l'ESR assure la fiabilité de la surveillance de l'état de santé face aux variations des conditions d'utilisation des supercondensateurs. La loi de variation de l'ESR peut être calculée à partir des données « constructeur » (cf. Figure 3) ou déduite d'une caractérisation initiale, réalisée à différentes températures de fonctionnement.

3.2. Nouvelle approche de commande

L'estimation de l'ESR du supercondensateur nécessite généralement l'utilisation d'un matériel comme un spectromètre d'impédance et l'emploi d'un protocole de caractérisation spécifique [23]. Dans ce cas chaque cellule est caractérisée individuellement et extraite de son environnement.

Nous nous proposons dans cet article d'estimer l'ESR instantanée de l'élément en fonctionnement. L'idée consiste à provoquer avec les circuits d'équilibrage et exploiter une chute de tension image de l'ESR. La chute de tension considérée est celle observée à chaque début ou fin de charge/décharge des cellules.

La suite de cet article est consacrée à la commande des circuits d'équilibrage utilisés. Considérons un système de stockage électrique constitué de n supercondensateurs associés en série. Chaque supercondensateur, SC_i , est représenté par un modèle simple à savoir une capacité C_i en série avec une résistance ESR_i (avec $i \in [1, n]$). Aux bornes de chaque supercondensateur se trouve un circuit d'équilibrage constitué d'une résistance d'équilibrage R_b et d'un interrupteur S_i (avec $i \in [1, n]$). Le système de gestion d'énergie assure la surveillance de la température T_i et de la tension V_{sci} de chaque supercondensateur SC_i , mais aussi de la tension du système, V_{sys} et du courant I traversant le système (cf. Figure 4).

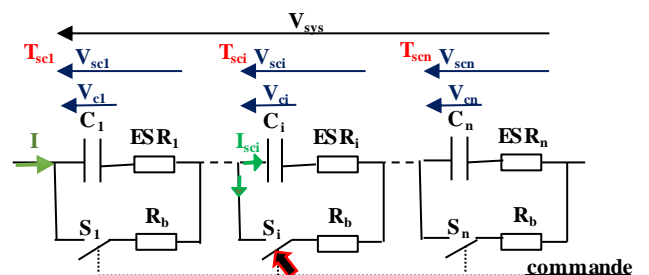


Figure 4. Schéma électrique du SSEE considéré

Le principe consiste à provoquer la chute de tension image de l'ESR d'un élément donné grâce à la commutation de l'interrupteur de son circuit d'équilibrage.

Soit V_{sci}^- la tension du supercondensateur SC_i juste avant la commutation et V_{sci}^+ sa tension juste après la commutation. De même, les différents paramètres notés avec un indice (-),

correspondent à leur état juste avant la commutation et ceux noté (+) juste après la commutation.

Les tensions avant et après commutation peuvent s'exprimer comme suit :

$$V_{sci}^- = V_{ci}^- + ESR_i^- \cdot I^- , \forall i \in [1, n] \quad (2)$$

$$V_{sci}^+ = V_{ci}^+ + ESR_i^+ \cdot \left(I^- - \frac{V_{sci}^+}{R_b} \right), \forall i \in [1, n] \quad (3)$$

Comme la commutation est de courte durée (< 1 seconde), la simplification de certains paramètres est possible. La tension aux bornes du condensateur C_i , V_{ci} est supposée constante durant la commutation. De même, l'ESR dont l'évolution est très lente peut aussi être considéré constant durant la commutation.

La chute de tension, ΔV_{sci} , résultant de la commutation rapide du circuit d'équilibrage est donc exprimée comme suit :

$$\Delta V_{sci} = V_{sci}^- - V_{sci}^+, \forall i \in [1, n] \quad (4)$$

$$\Delta V_{sci} = ESR_i \cdot \left(\frac{V_{sci}^+}{R_b} + (I^- - I^+) \right), \forall i \in [1, n] \quad (5)$$

Si le système de stockage est au repos ou lorsque le courant est constant ou n'évolue pas trop durant la commutation, l'équation (5) peut être encore simplifié. L'ESR de l'élément à caractériser grâce à la commande du circuit d'équilibrage est exprimée par l'équation (6).

$$ESR_i = \Delta V_{sci} \cdot \frac{R_b}{V_{sci}^+}, \forall i \in [1, n] \quad (6)$$

Ainsi la simple commutation rapide du circuit d'équilibrage branché aux bornes du supercondensateur permet d'avoir une estimation réelle de son ESR actuelle (ESR(t)) et de prédire son état de santé.

4. COMMANDE EN DUREE DE VIE DES CIRCUITS D'EQUILIBRAGE

Dans cette partie, on s'intéresse à la commande des circuits d'équilibrage afin de maximiser la durée de vie du SSEE.

4.1. Problématique et notion de maximisation de durée de vie

Comme expliqué dans le deuxième paragraphe de cet article, les paramètres d'un supercondensateur se dégradent au cours du temps jusqu'à atteindre un seuil limite (critère de fin de vie). La vitesse de dégradation du supercondensateur dépend du niveau de sollicitations électriques et thermique. Plus la température et/ou la tension et/ou le courant du supercondensateur sont élevés plus il son seuil de fin de vie est atteint rapidement.

Considérons maintenant un système de stockage d'énergie constitué de plus de deux supercondensateurs associés en série.

Grace aux circuits d'équilibrage, les éléments du système de stockage sont maintenus à un même niveau de tension.

La fin de vie d'un module de stockage est entraînée par l'élément qui aura atteint son critère de fin de vie en premier. A tension et courant entrant identiques, les supercondensateurs constituant le module vont présenter une dispersion des vitesses de dégradation essentiellement due à la dispersion de leur température. Ainsi, la cellule à la température la plus haute vieillie plus rapidement et entraine la défaillance de tout le système. Il a été démontré que selon l'emplacement des supercondensateurs, on pouvait observer plus de 10°C d'écart entre les éléments d'un même système de stockage [24]. Ceci

peut donc réduire de moitié la durée de vie opérationnelle du système.

La figure 5 représente une image thermique d'un module de stockage à base de supercondensateurs (120 supercondensateurs associés en série) surveillé par un SCM classique.

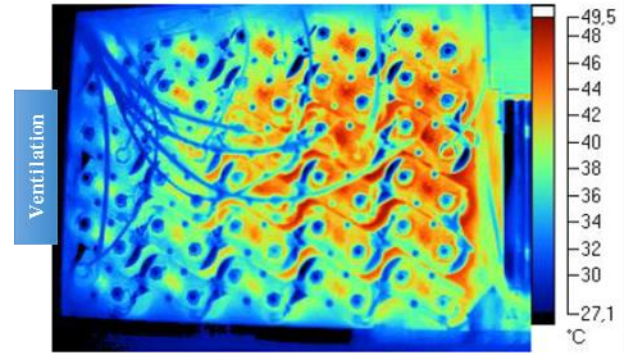


Figure 5. Image thermique d'un module de stockage de 120 supercondensateurs en série [24]

Sur cette figure on observe plus de 20 °C d'écart entre un supercondensateur placé au centre du module et un supercondensateur sur le côté, près de la ventilation.

Ainsi un module de stockage n'est pas utilisé de façon optimale. Il atteint sa fin de vie prématurément, entraîné par l'élément le plus faible bien que les autres éléments ne soient pas au même stade de vieillissement et peuvent être encore exploités.

4.2. Principe de maximisation de durée de vie

L'approche de commande des circuits d'équilibrage proposée est nouvelle. Contrairement à l'égalisation classique de tension, cette stratégie prend en considération la dispersion du niveau de dégradation entre éléments causée par la dispersion des conditions d'utilisation (essentiellement liées à la température). L'objectif de cette commande est d'homogénéiser les vitesses de dégradation des différentes cellules. Ainsi la ou les cellules jugées faibles et risquant d'entraîner la défaillance du système seront, par l'intermédiaire de leur circuit d'équilibrage, moins sollicitées en abaissant leur tension. Réciproquement, les cellules les plus fortes seront plus sollicitées par une tension plus importante. L'égalisation des tensions n'est alors plus assurée par les circuits d'équilibrage, une dispersion de tension est au contraire provoquée avec cette stratégie dans le but de maximiser la durée de vie du système.

Pour ce faire, la nouvelle commande des circuits d'équilibrage a donc besoin de l'information de l'état de santé de chaque élément constituant le système de stockage d'énergie surveillé. Cette nouvelle approche de commande est basée sur un modèle prédictif de l'évolution du paramètre interne surveillé, à savoir dans notre cas l'ESR. La prédiction de l'évolution de ce paramètre en fonction de la commande des circuits d'équilibrage permet alors de surveiller la vitesse de dégradation de chaque cellule.

La commande à modèle prédictif a été choisie pour sa simplicité et du fait qu'elle s'actualise avec les mesures réelles. Notre objectif est de rester simple en termes d'algorithme de commande de façon à ce que la stratégie proposée reste concurrentielle face à la comparaison de tension utilisée dans les commandes conventionnelles. La commande prédictive s'initialise à chaque pas de temps avec les paramètres réels (tension, courant, température), mesurés par le SCM classique mais aussi avec l'ESR estimée. Ainsi, et grâce à ces mesures, le

modèle prédictif d'évolution de l'ESR reste très proche du comportement réel du supercondensateur modélisé et surveillé.

L'objectif de la commande prédictive est d'homogénéiser les vieillissements des supercondensateurs constituant le module de stockage. La prédiction de l'état de santé étant à l'image de la vitesse de dégradation de la cellule surveillée, réduire la dispersion des états de santé prédits assure l'objectif d'homogénéisation. La fonction coût a donc pour rôle de minimiser l'écart de dispersion des vitesses de dégradation. Elle est donc exprimée par l'équation (7) comme suit :

$$J = \min[\max(SOH_{ESR_i}(t + tp)) - \min(SOH_{ESR_i}(t + tp))] \quad (7)$$

Avec J la fonction coût, $SOH_{ESR_i}(t+tp)$ l'état de santé prédit grâce à la prédiction de l'ESR durant le temps de prédiction tp.

La séquence de commande des circuits d'équilibrage choisi permettra donc de réduire l'écart des vitesses de dégradation entre l'élément le plus fort (plus grand état de santé prédit) et l'élément le plus faible.

5. ANALYSE DE LA COMMANDE PAR SIMULATION

5.1. Présentation de la simulation réalisée

Afin de valider cette approche ainsi que le travail qui suit, une simulation sur Matlab/Simulink a été réalisée. Cette simulation correspond à un modèle évolutif d'un système de stockage d'énergie surveillé et contrôlé par un système de gestion d'énergie. Le système de stockage d'énergie est constitué de trois supercondensateurs associés en série. Chaque supercondensateur a des caractéristiques spécifiques et évolue en fonction de ses propres sollicitations électriques et thermique jusqu'à atteindre son critère de fin de vie. Chaque supercondensateur a à ses bornes un circuit d'équilibrage dissipatif contrôlé afin d'estimer et d'améliorer la durée de vie des supercondensateurs.

Une telle modélisation nécessite trois sous-modèles pour chaque supercondensateur :

- Un modèle électrique pour reproduire le comportement électrique du composant (cf. Figure 4).
- Un modèle thermique pour simuler la température du supercondensateur [25].
- Un modèle de durée de vie pour décrire l'évolution temporelle des paramètres internes du supercondensateur [18].

Les trois modèles interagissent entre eux comme représenté sur la figure ci-dessous (cf. Figure 6).

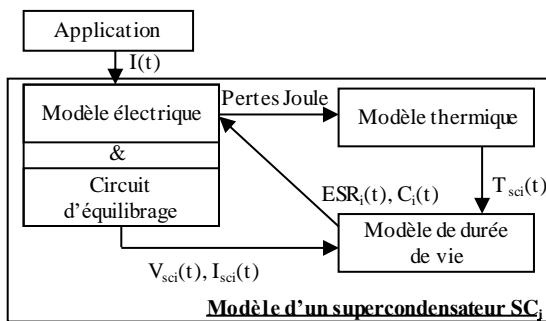


Figure 6. Modélisation d'un supercondensateur sur Matlab/Simulink

Le système de stockage simulé est initialisé afin de créer une dispersion initiale des paramètres internes et une dispersion des températures au cours du fonctionnement.

Les modèles électriques des supercondensateurs sont initialisés comme suit :

Tableau 1. Paramètres initiaux du modèle électrique

| | $V_{sci}(V)$ | $ESR_i(0) (m\Omega)$ | $C_i(0) (F)$ |
|-----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| SC₁ | 2.5 | 0.29 | 3000 |
| SC₂ | 2.5 | 0.33 | 2625 |
| SC₃ | 2.5 | 0.36 | 2250 |

Le modèle thermique a été initialisé afin de simuler une dispersion de température de 10 °C maximale entre les trois supercondensateurs. Ainsi dans le module de stockage on retrouve trois cellules sollicitées différemment. Une cellule est continuellement à plus haute température (SC₃), une cellule est continuellement à une température plus faible (SC₁) et enfin une cellule se trouve à une température intermédiaire (SC₂). L'objectif de cette simulation est d'analyser le comportement de la nouvelle approche de commande face à cette dispersion.

Le modèle de durée de vie étant identique pour les trois composants, il permet d'actualiser les paramètres internes des trois supercondensateurs en fonction de leurs sollicitations électriques et thermique spécifiques.

Le système de stockage est sollicité électriquement par un cycle de puissance, répétitif, correspondant à l'application du nouveau cycle Européen de conduite (NEDC) (cf. Figure 7).

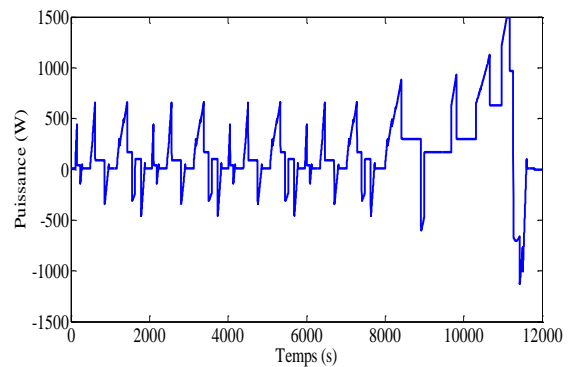


Figure 7. Cycle de puissance NEDC

Ainsi le système de stockage évolue en fonction du temps et de ses sollicitations jusqu'à atteindre sa défaillance entraînée par son ou ses éléments qui auront atteint leur critère de défaillance.

5.2. Résultats de simulation

La première approche théorique de surveillance de l'état de santé provoque des chutes de tension présentées ci-dessous (cf. Figure 8, 9 et 10). L'estimation présentée est réalisée en début de vie du module simulé. On observe bien que ces chutes de tension permettent de remonter aux ESR initiales.

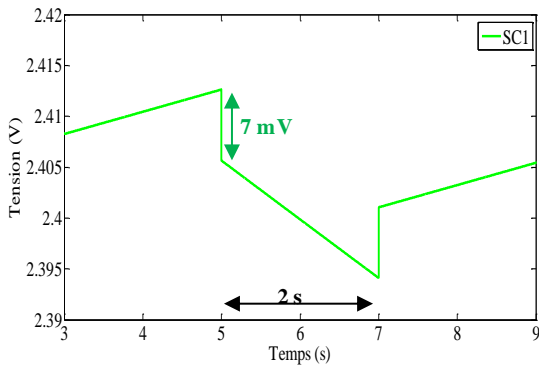


Figure 8. Tension du supercondensateur SC1 lors de l'estimation de l'état de santé

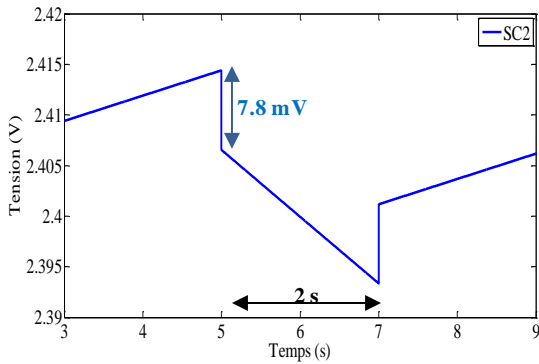


Figure 9. Tension du supercondensateur SC2 lors de l'estimation de l'état de santé

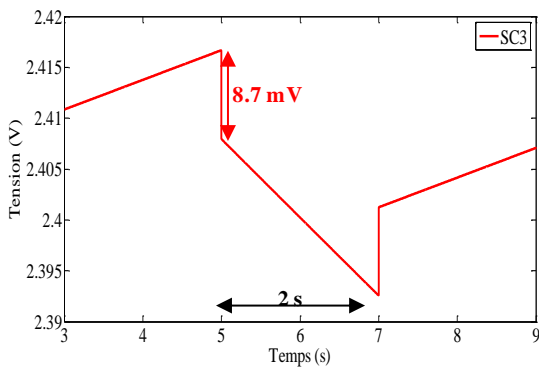


Figure 10. Tension du supercondensateur SC3 lors de l'estimation de l'état de santé

Afin d'analyser la nouvelle approche de maximisation de durée de vie, nous avons appliqué la commande classique et la commande en durée de vie sur un même système de stockage et on a observé l'évolution du système à chaque fois. Les commandes des circuits d'équilibrage, (classique et maximisant la durée de vie), sont appliquées en phase de charge ou de repos et sont actualisées toutes les 0.3 s.

La figure 11 représente les tensions des éléments du système lors d'une commande classique d'égalisation de tension.

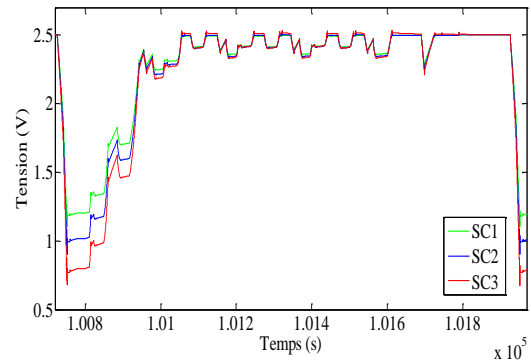


Figure 11. Tensions des éléments du SSE pour un cycle NEDC lors de la commande classique d'égalisation de tension

La figure 12 représente un cas de figure de dispersion créé au sein du système de stockage lors de la nouvelle approche de commande.

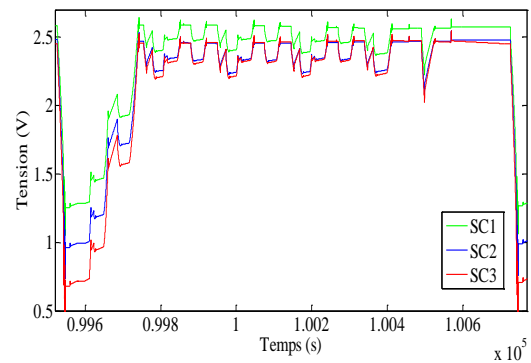


Figure 12. Tensions des éléments du SSE pour un cycle NEDC lors de la commande maximisant la durée de vie

Cette dispersion de tension provoquée a permis de rallonger la durée d'utilisation du module de stockage. La figure 13 représente l'évolution de l'ESR des éléments lors des deux commandes. La durée de vie générale a été réduite d'un facteur 10 pour réduire le temps de simulation.

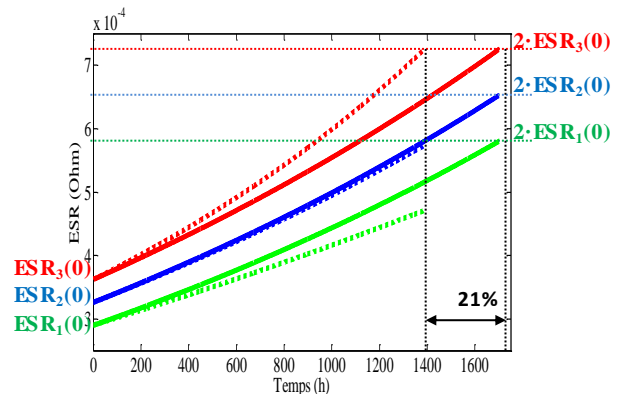


Figure 13. Evolution du système de stockage en fonction de la commande appliquée

Le trait pointillé correspond aux résultats de la commande classique et le trait plein correspond aux résultats de la commande maximisant la durée de vie.

On remarque que pour la commande classique, comme prédit, la défaillance du système est entraînée par le supercondensateur SC₃. Ce dernier, rappelons-le, subit une température plus importante. A tension égale SC₃ vieillit plus rapidement entraînant la défaillance du système, alors que SC₁ est encore à 38 % de sa durée de vie.

Pour la commande maximisant la durée de vie, la défaillance du système arrive 21 % plus tard grâce à la dispersion de tension qu'elle crée. La fin de vie du système est causée par la défaillance de ses trois éléments qui se dégradent à même allure au cours du temps et atteignent leur fin de vie simultanément.

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 d'un matériel existant.

6. CONCLUSIONS

Le travail présenté dans cet article porte sur l'amélioration de la durée de vie des systèmes de stockage d'énergie à travers une nouvelle approche de commande des circuits d'équilibrage du système de gestion d'énergie qui assure la surveillance et la sécurité des SSEE.

Les méthodes proposées exploitent le matériel existant sur le SSEE et ne nécessitent pas une capacité de calcul importante. Elles peuvent être facilement implémentées dans un système de gestion d'énergie et prolonger de façon notable l'utilisation du SSEE.

7. REFERENCES

- [1] Maxwell Technologies, "Application Note: Maxwell Technologies, BOOSTCAP Energy Storage Modules, Life Duration Estimation," 2007.
- [2] 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.
- [3] A. David, *Battery Management Systems for large Lithium-Ion Battery Pack*. Boston, London: Artech House, 2010.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] B. E. Conway, *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*. Kluwer Academic/Plenum, 1999.
- [7] R. Kotz and M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors," *Electrochimica Acta*, vol. 45, no. 15–16, pp. 2483 – 2498, 2000.
- [8] R. Karangia, M. Jadeja, C. Upadhyay, and H. Chandwani, "Battery-supercapacitor hybrid energy storage system used in Electric Vehicle," in *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on*, 2013, pp. 688–691.
- [9] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," *Veh. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, 2010.
- [10] 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.
- [11] P. Azaïs, L. Duclaux, P. Florian, D. Massiot, M.-A. Lillo-Rodenas, A. Linares-Solano, J.-P. Peres, C. Jehoulet, and F. Béguin, "Causes of supercapacitors ageing in organic electrolyte," *J. Power Sources*, vol. 171, no. 2, pp. 1046–1053, Sep. 2007.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] R. Chaari, O. Briat, J. Y. Deletage, E. Woigard, 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] R. German, "Etude du vieillissement calendaire des supercondensateurs et impact des ondulations de courant haute fréquence," Université Claude Bernard, Lyon1, France, 2013.
- [16] R. German, P. Venet, A. Sari, O. Briat, and J. M. Vinassa, "Interpretation of electrochemical double layer capacitors (Supercapacitors) floating ageing by multi-pore model," in *IPEC, 2012 Conference on Power Energy*, 2012, pp. 218–223.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] R. German, A. Sari, P. Venet, O. Briat, and J.-M. Vinassa, "Study on specific effects of high frequency ripple currents and temperature on supercapacitors ageing," *Proc. 26th Eur. Symp. Reliab. Electron Devices Fail. Phys. Anal. ESREF 2015*, vol. 55, no. 9–10, pp. 2027–2031, Aug. 2015.
- [21] M. Ayadi, O. Briat, R. Lallemand, A. Eddahech, R. German, G. Coquery, and J. Vinassa, "Description of supercapacitor performance degradation rate during thermal cycling under constant voltage ageing test," *SI ESREF 2014*, vol. 54, no. 9–10, pp. 1944–1948, Sep. 2014.
- [22] Maxwell Technologies, "Gateway to a New Thinking in Energy Management - Ultracapacitors," San Diego, Jan-2005.
- [23] S. Buller, E. Karden, D. Kok, and R. W. De Doncker, "Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy," *Ind. Appl. IEEE Trans. On*, vol. 38, no. 6, pp. 1622–1626, Dec. 2002.
- [24] 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.
- [25] A. Hijazi, P. Kreczanik, E. Bidaux, P. Venet, G. Clerc, and M. Di Loreto, "Thermal Network Model of Supercapacitors Stack," *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 59, no. 2, pp. 979–987, Feb. 2012.