

Diagnostic en ligne d'un état de vieillissement d'un EDLC

Asmae ELMEJDOUBI¹, Amrane OUKAOUR², Hamid GUALOUS², Jalal SABOR¹

¹ENSAM, Université Moulay Ismaïl, Marjane II, BP 4042, Beni M'hammed, 50050, Meknès, Maroc

²LUSAC, Université de CAEN-Basse Normandie, rue Louis Aragon, BP. 78, 50130, Cherbourg, France

amrane.oukaour@unicaen.fr, asmae.elmejdoubi@unicaen.fr

RESUME – Les paramètres indicateurs de vieillissement d'un EDLC sont la capacité équivalente et la résistance équivalente en série. Une simple lecture de la valeur de l'un de ces paramètres permet de savoir l'état de santé du composant. Pourtant ces indicateurs sont des grandeurs non mesurables en temps réel, d'où vient la nécessité d'un système de diagnostic par des techniques d'estimation. Dans ce sens, plusieurs méthodes d'identification expérimentales ont été élaborées pour répondre à ce besoin. Cependant, aucune d'entre elles ne peut être embarquée pour fonctionner en temps réel.

Notre étude a porté sur la mise en œuvre d'une nouvelle méthode d'estimation des paramètres indicateurs de vieillissement d'un EDLC. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir être embarquée et s'appuie sur l'algorithme des moindres carrés et la méthode de Runge-Kutta pour estimer les valeurs de ces paramètres, à partir des données de mesure des entrées/sorties représentées par le courant de charge/décharge et la tension aux bornes du EDLC.

MOTS-CLES – EDLC, Diagnostic, Indicateurs de vieillissement, Estimation des paramètres.

1 Introduction

Les supercondensateurs sont utilisés principalement pour « épauler » une source d'énergie principale, les supercondensateurs, au stade actuel de la recherche, offrent des performances séduisantes pour un usage en source de puissance crête [1]. Un autre gros avantage est l'amélioration du rendement des véhicules (trolleybus,...) en permettant la récupération de l'énergie du freinage qui est relativement importante en raison de l'énergie cinétique de ces véhicules [2][3].

Malgré ces nombreux avantages, des freins à l'intégration des supercondensateurs dans les véhicules hybrides électriques subsistent. En effet, ces composants peuvent contenir de l'acétonitrile qui est un gaz inflammable et explosif et ont l'inconvénient de présenter un comportement non linéaire. Enfin, la tension par élément est limitée à 3V, ce qui rend nécessaire la mise en série d'un grand nombre de composants dans le cas où il y aurait besoin d'une grande tension [1]. Cette mise en série cause un déséquilibre entre les tensions aux bornes de chaque composant. Ce qui a pour conséquence d'accélérer le vieillissement des supercondensateurs donc de réduire la durée de vie de l'ensemble [1][4].

Pourtant, la durée de vie des supercondensateurs est un élément essentiel pour la diffusion des véhicules propres dans des conditions de coûts acceptables [5]. Deux paramètres essentiels influent sur la durée de vie [6]:

- la tension d'utilisation du supercondensateur ;
- la température de fonctionnement du composant.

L'application simultanée de ces deux contraintes, à savoir la tension de polarisation et une température élevée proche de la température d'ébullition de l'électrolyte (à pression atmosphérique) contribue à la dégradation des performances du composant [7]. Cette dégradation se manifeste par une élévation de la valeur de la résistance équivalente série (ESR) et une baisse de sa capacité [8]. Ces deux derniers paramètres constituent les indicateurs de vieillissement caractérisant l'état physique et la bonne santé du composant.

Les constructeurs automobiles considèrent qu'un supercondensateur est dit « vieux » ou « dégradé » lorsque sa capacité chute de 20% de sa valeur initiale et/ou lorsque sa résistance série se voit doubler de valeur [8][9]. Ainsi le suivi et la surveillance de ces deux paramètres permet de se prononcer sur l'état de santé du

supercondensateur. Dans notre cas, les données accessibles à la mesure sont représentées par le courant de charge ou de décharge qui fait l'objet de l'entrée du système. La sortie de celui-ci est représentée par la tension à ses bornes. Les indicateurs de vieillissement cités précédemment sont des paramètres non mesurables [9]. A cet effet, nous devons donc utiliser un système capable d'estimer en temps réel la valeur de chacun en se basant sur les données de mesure.

Pour parvenir à cet objectif, nous allons implémenter un algorithme basé sur les techniques des moindres carrés et la méthode de Runge-Kutta permettant à partir des Entrées/Sorties d'estimer en temps réel et de suivre l'évolution des indicateurs de vieillissement pendant toute la durée de vie du composant. Cet artifice nous permet indirectement de connaître l'état de santé du composant et ainsi d'éviter des dégradations intempestives pouvant aller jusqu'à endommager le système.

Il est important de souligner que cette méthode de diagnostic basée sur l'estimation des paramètres physiques n'a jamais été utilisée auparavant. Son importance réside aussi dans son utilisation en temps réel. Elle est facilement implantable sur le calculateur de bord dans véhicule électrique.

2 Modèle proposé

En se basant sur les références [10], [11], [12], [13], Le supercondensateur peut être modélisé par le circuit électrique équivalent de la figure 1.

- R_s : résistance série due à la conductivité électronique et ionique.
- Z_p : impédance du circuit électrique équivalent de la structure poreuse. C_0 est la capacité de la structure poreuse. R_1 ou R_2 appelée résistance de l'électrolyte. Les circuits équivalents parallèles (R_1 and C_1) et (R_2 and C_2) caractérisent la difficulté de pénétration profonde des charges dans les pores avec l'augmentation de la fréquence.

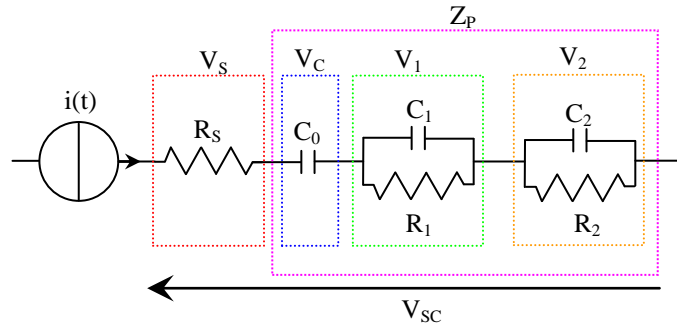


Figure 1 : circuit électrique équivalent du supercondensateur.

Le modèle d'état de ce circuit est donné par :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = \begin{bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \dot{X}_2(t) \\ \dot{X}_3(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_1 \cdot C_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_2 \cdot C_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot i(t) \\ y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ C_0 & C_1 & C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_3(t) \end{bmatrix} + R_s \cdot i(t) \end{cases} \quad (1)$$

Ce dernier peut être réécrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot i(t) \\ y(t) = C \cdot X(t) + D \cdot i(t) \end{cases} \quad (2)$$

où : $X_1(t) = C_0 \cdot V_c$; $X_2(t) = C_1 \cdot V_1$; $X_3(t) = C_2 \cdot V_2$; $y(t) = V_{sc}$;

Toujours en se basant sur les résultats donnés dans [10], [11], [12], [13], les matrices A, B, C et D peuvent être données sous leur forme la plus simple:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\pi}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\pi}{2} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; C = \frac{1}{C_{sc}} \cdot [1 \quad 2 \quad 2]; D = R_s \quad (3)$$

3 Algorithme d'estimation

3.1 Méthode de Runge-Kutta

Comme les valeurs des variables du vecteur d'état sont non mesurables, et pour exploiter notre modèle correctement, nous avons besoin de restaurer le vecteur d'état du système X en faisant appel à la résolution des systèmes linéaires par la méthode de Runge-Kutta. Cet algorithme se base seulement sur la mesure du courant comme entrée et de la tension comme sortie du système pour calculer le vecteur d'état. En minimisant l'écart entre la variable de sortie y et la tension mesurée à l'aide de l'algorithme des moindres carrés, nous pouvons estimer les valeurs de la capacité équivalente C_{sc} et la résistance en série R_s .

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = f(t, X(t), i(t)) \\ X(0) = X_0 \end{cases} \quad (4)$$

Les notations suivantes vont être utilisées pour calculer les variables non mesurables du système.

$$t_k = k \cdot \Delta T, \quad X_k = X(t_k), \quad i_k = i(t_k)$$

La méthode de Runge-Kutta nécessite plusieurs évaluations entre les instants t_k et t_{k+1} . Dans ce cas, nous avons utilisé la méthode au 4^{ème} ordre pour résoudre l'équation d'état. Sa formulation est la suivante:

$$X_{k+1} = X_k + \frac{\Delta T}{6} \cdot (Q_1 + 2Q_2 + 2Q_3 + Q_4) \quad (5)$$

3.2 Optimisation

La méthode de Runge-Kutta nous permet seulement de calculer le vecteur d'état X à chaque instant, et non pas les paramètres R_s et C_{sc} . L'optimisation par la méthode de moindre carrée a été établie afin de déterminer la valeur de la capacité équivalente et la résistance en série en minimisant l'erreur quadratique comme suit :

$$J = \frac{1}{2} \cdot \left[y_r - \frac{1}{C_{sc}} \cdot [1 \quad 2 \quad 2] \cdot X_{estimated} - R_s \cdot i_r \right]^2 \quad (6)$$

A partir de l'équation (2), nous avons :

$$V_{estimated} = \frac{1}{C_{sc}} \cdot [1 \quad 2 \quad 2] \cdot X_{estimated} - R_s \cdot i_r \quad (7)$$

Avec: y_r et i_r sont la tension de sortie et le courant de charge.

Le critère J minimise l'erreur quadratique moyenne entre la tension mesurée et la tension estimée à partir de l'état calculé pour obtenir les valeurs de C_{sc} et R_s . Comme on est bien conscient que le modèle est valide pour un point de calcul considéré, on a recalculé ces paramètres pour toute la durée de mesure en utilisant un profil de courant en escalier et la tension de sortie résultante de ce profil.

Les résultats de l'estimation sont visibles sur

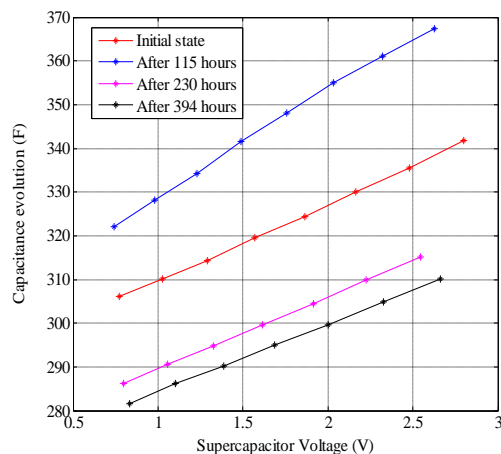


Fig. 2. C_{sn} estimée en fonction de la tension de polarisation de l'EDLC

3.3 Conclusion

Cette méthode d'estimation des indicateurs de vieillissement en temps réel nous a permis de valider le phénomène de la dégradation de la capacité équivalente pendant la durée de vie du composant. Cela se traduit par une forte diminution de son pouvoir de stockage, des pertes qui augmentent et par un rendement énergétique qui se détériore. L'algorithme d'estimation a validé aussi la variation linéaire de la capacité équivalente en fonction de la tension de polarisation.

4 Références

- [1] 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 ", Université de Claude Bernard, Lyon 1, France, Avril 2011, ch. 2.
- [2] H. Gualous, R. Gallay, "Applications des supercondensateurs", Techniques de l'Ingénieur, D3335, 17/09/2008.
- [3] Linzen, S. Buller, E. Karden, R.W. De Doncker, "Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems", IEEE Transactions on Industry Applications, V. 41, Issue 5, pp. 1135 – 1141, Sept.-Oct. 2005.
- [4] A. Hammar, P. Venet, R. Lallemand, G. Coquery, G. Rojat, "Study of Accelerated Aging of Supercapacitors for Transport Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, V. 57, Issue 12, pp. 3972 – 3979, Dec. 2010.
- [5] Oukaour, B. Tala-Ighil, M. AlSakka, H. Gualous, R. Gallay, B. Boudart, " Calendar ageing and health diagnosis of supercapacitor ", Electric Power Systems Research, V. 95, pp. 330-338, Oct. 2012.
- [6] H. Gualous, H. Louahlia, R. Gallay, "Supercapacitor Characterization and Thermal Modelling With Reversible and Irreversible Heat Effect", IEEE Transactions on Power Electronics, V. 26, issue 11, pp. 3402 – 3409, 2011.
- [7] M. Al Sakka, H. Gualous, J. Van Mierlo, H. Culcu, "Thermal modeling and heat management of supercapacitor modules for vehicle applications", Journal of Power Sources 194 (2), pp. 581–587, 2009.
- [8] 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 ", Ecole Centrale de Lille, Lille, Février 2006, ch. 3.
- [9] V. Musolino, L. Piegari, E. Tironi, "New Full-Frequency-Range Supercapacitor Model With Easy Identification Procedure", IEEE Transactions on Industrial Electronics, V. 60, Issue 1, pp. 112 - 120, Jan. 2013.
- [10] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, A. Berthon "Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling" J. of Power Sources, Vol.°165 Issue 2, pp. 928-934, 2007.

- [11] Buller, S.; Karden, E.; Kok, D.; De Donker, RW.; “Modeling the dynamic behaviour of supercapacitors using impedance spectroscopy”, in Proc. IEEE Industry Applications conf. (IAS), Chicago, 2001, vol. 4, pp. 2500-2504.
- [12] C.H. Wu, Y.H. Hung, C.W. Hong On-line supercapacitor dynamic models for energy conversion and management. Energy Conversion and Management 2012; 53:337-345.
- [13] Rizoug, N. ;Bartholomeus, P. ; Le moigne, P. ; “Modeling and ChracterizingSupercapacitors Using an Online Method”, IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 57, pp. 3980 – 3990, Dec 2010.