

Modélisation électrique et thermique des condensateurs électrolytiques en vue de l'analyse de leur vieillissement dans un contexte de traction électrique

Nicolas Patin¹, Romain Cousseau¹, Eric Monmasson², Lahoucine Idkhajine², Christophe Forgez¹

¹Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne, UTC (nicolas.patin@utc.fr, romain.cousseau@utc.fr, christophe.forgez@utc.fr)

²SATIE, Université de Cergy- Pontoise (eric.monmasson@u-cergy.fr, lahoucine.idkhajine@u-cergy.fr)

RESUME – Dans cet article, nous présentons la modélisation électrique et thermique de condensateurs électrolytiques dédiés au découplage de convertisseurs électroniques de puissances utilisés dans l'automobile pour la traction tout électrique ou hybride. Dans un tel contexte, le stress thermique peut s'avérer très différent de celui rencontré dans une alimentation à découpage (variations importantes de températures dans le contexte d'une utilisation urbaine) et il convient d'établir un modèle électrique le plus fin possible du condensateur tout en le corrélant à son modèle thermique afin de pouvoir analyser son vieillissement. Le modèle électrique utilisé dans cette étude est dérivé de celui utilisé classiquement dans les batteries et nous présenterons en particulier un élément caractéristique d'un phénomène de diffusion permettant d'obtenir un modèle très proche des résultats expérimentaux obtenus par impédancemétrie. Le protocole expérimental de vieillissement et de mesures sera présenté et des résultats de vieillissement seront donnés dans l'article final sur une durée de test de plus de 3000h.

MOTS-CLES – Véhicules électriques, véhicules hybrides, Onduleur, Bus continu, Condensateur électrolytique, Modélisations électrique et thermique, vieillissement, impédancemétrie.

1. Introduction

Le contexte de cette étude est un projet ANR¹ intitulé COPTON (pour Commande OPTimale d'ONDuleur) qui vise à établir des stratégies de modulation de largeurs d'impulsions (MLI) optimales pour des onduleurs de traction pour véhicules électriques et/ou hybrides du point de vue de la durée de vie des composants. Or, dans le cas d'un convertisseur électronique de puissance, les condensateurs électrolytiques sont connus comme étant parmi les éléments les plus fragiles [réf. ajoutée dans l'article final]. En outre, ces composants sont volumineux [1] et coûteux et constituent de ce fait une problématique majeure pour les équipementiers automobiles [réf. ajoutée dans l'article final]. A l'heure actuelle, ils constituent donc encore un thème de recherche très actif [2].

Dans le cadre de cette étude, les sollicitations électriques des condensateurs dépendent non seulement de la stratégie de modulation mais aussi du point de fonctionnement de l'onduleur de traction [réf. ajoutée dans l'article final]. Or, les véhicules électriques étant dédiés tout particulièrement à une utilisation urbaine, le stress électrique des composants peut subir de fortes variations dans le temps. Il est bien connu que le vieillissement des condensateurs est directement impacté par leur température de fonctionnement [réf. ajoutée dans l'article final] mais les analyses de vieillissement que l'on peut trouver dans la littérature [réf. ajoutées dans l'article final] s'attachent surtout à des cas statiques (d'un point de vue thermique) qui sont sensiblement différents du cadre de fonctionnement envisagé ici. Il convient donc de proposer un protocole d'étude permettant d'évaluer d'éventuelles différences de vieillissement entre des condensateurs cyclés thermiquement par rapport à des condensateurs maintenus à une température quasi constante. En effet, nous savons que nous disposons d'une palette de stratégies MLI [réf. ajoutée dans l'article final] permettant de « régler » le courant efficace dans les condensateurs sur une plage de valeurs données pour un point de fonctionnement donné. On pourra donc proposer, si nécessaire, de maintenir le courant efficace dans les condensateurs à une valeur constante pour une large plage de points de fonctionnement d'un onduleur de traction ou, à l'inverse, induire des variations cycliques

¹ Programme Jeunes Chercheurs Jeunes Chercheuses – JCJC (démarrage en oct. 2012).

de ce courant (avec un impact minime sur la charge alimentée par l'onduleur) s'il s'avère que ce traitement est bénéfique pour la durée de vie des composants.

Dans ce contexte, le travail présenté ici s'inscrit dans la première phase du projet : à savoir la modélisation des condensateurs d'un point de vue électrique et thermique (couplage et modèle thermique traité dans [3]) afin d'évaluer au mieux leur état de santé. L'apport de cet article porte sur l'utilisation d'un modèle diffusif dérivé de la modélisation des batteries [4] pour assurer une bonne corrélation entre le modèle électrique du condensateur et les mesures obtenus avec un impédancemètre. Ces points sont traités à la section 2. La modélisation électrique d'un condensateur (en particulier la résistance série équivalente ou ESR pour Equivalent Series Resistance dans les documentations techniques) est fortement impactée par la température. Un modèle thermique du composant est donc indispensable et dans notre cas d'étude, l'aspect dynamique étant très important, il est nécessaire de prendre en compte les capacités thermiques. Ceci fait l'objet de la section 3. Une présentation du banc d'essai et du protocole de vieillissement des condensateurs est ensuite présentée à la section 4. **Les résultats d'impédancemétrie obtenus sur environ 3000 heures d'essais seront présentés dans l'article final.** Une conclusion clôture cet article et dresse un bilan des résultats obtenus et met en évidence les perspectives de ce travail.

2. Modélisation Electrique

Une modélisation classique d'un condensateur électrolytique consiste en un circuit du type de celui de la figure 1.

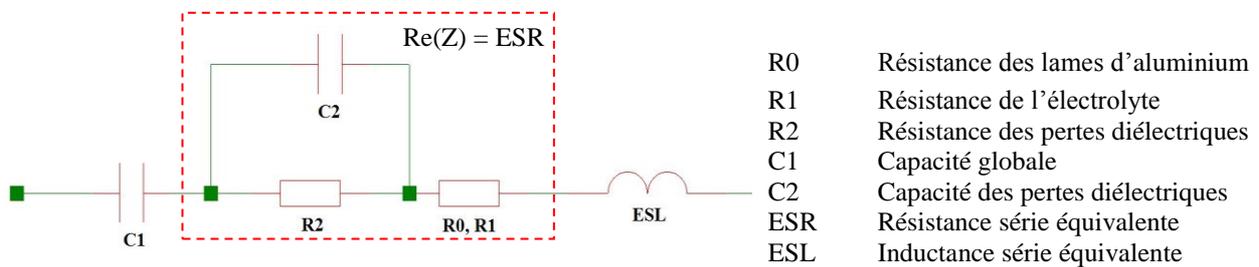


Figure 1 : Modélisation classique d'un condensateur électrolytique

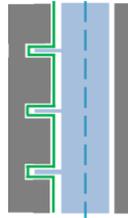


Figure 2 : Structure d'un condensateur électrolytique (anode à gauche, cathode à droite, couche d'oxyde en vert sur l'anode gravée et papier imbibé d'électrolyte en bleu)

A ces éléments, nous ajoutons (pour une meilleure corrélation avec les résultats expérimentaux) une impédance Z_{ano} en série avec le circuit de la figure 1 et qui est représentative d'une diffusion anormale (pour « anomalie ») [réf. ajoutée dans l'article final] qui peut être induite par la gravure [5] de l'anode du condensateur lors de sa fabrication afin d'augmenter la surface d'électrode et donc la capacité.

Cette impédance a pour origine la résolution des équations de Fick qui rendent compte des phénomènes de diffusion. La première loi décrit le lien de proportionnalité entre le flux de matière $J_0(x, t)$ (que nous assimilons au courant dans notre cas) au gradient de concentration de l'élément à la surface de l'électrode $\frac{\partial C_0(x, t)}{\partial x}$ (que nous assimilons à un gradient de tension). Elle est la suivante [6]:

$$J_0(x, t) = -D_0 \frac{\partial C_0(x, t)}{\partial x} \quad (1)$$

Avec D_0 le coefficient de diffusivité. On peut également introduire la seconde loi de Fick qui décrit l'évolution spatio-temporelle de la concentration de l'élément considéré. Cette loi découle de la première et, dans le cas d'une diffusion linéaire, s'exprime de la façon suivante [ref9/12 - Laurent / Bard] :

$$\frac{\partial C_0(x, t)}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C_0(x, t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

La problématique de la résolution de cette équation tient au fait qu'elle dépend grandement des conditions initiales et limites. La diffusion qui nous concerne se fait en regard d'un élément isolant et représente donc un milieu imperméable par rapport aux éléments considérés. Nous sommes donc dans un cadre de diffusion restreinte, ce qui se traduit par :

$$J_0(\delta_0, t) = 0 \quad (3)$$

Avec δ_0 la distance à partir de laquelle le flux s'annule (qui correspond alors à la distance de diffusion)

En passant l'équation (2) dans le domaine de Laplace, on obtient l'équation différentielle :

$$sC_0(x, t) = D_0 \frac{d^2 C_0(x, s)}{dx^2} \quad (4)$$

La résolution de cette équation différentielle [6], compte tenu de la condition limite ainsi que de la condition initiale (5) sera détaillée dans l'article final et nous amène à l'impédance (6).

$$J_0(0, s) = -\frac{I(s)}{nFA} \quad (5)$$

$$Z(s) = \frac{C_0(0, s)}{I(s)} = \frac{1}{nFA\sqrt{sD_0}} \coth\left(\sqrt{\frac{s}{D_0}} \delta_0\right) \quad (6)$$

Avec n le nombre de moles de l'élément, F la constante de Faraday et A la surface "traversée". I étant la valeur du courant électrique. Comme nous pouvons le voir, l'expression contient des racines carrées de $j\omega$ (en posant $s = j\omega$), ceci est dû à l'équation aux dérivées partielles d'ordre deux. Or, l'article [7] permet de généraliser ces équations (notamment dans le cas de l'"Anomalous diffusion" qui nous concernent) à des dérivées d'ordres non-entiers. Grâce à cela, nous disposons d'un degré de liberté supplémentaire dans l'algorithme de fitting de ce modèle avec les mesures.

Finalement, l'expression de cette impédance que nous utiliserons est la suivante :

$$Z_{Ano} = R_{Ano} \frac{\coth\left(\frac{j\omega}{\omega_1}\right)^{\frac{\gamma_1}{2}}}{\left(\frac{j\omega}{\omega_1}\right)^{\frac{1-\gamma_1}{2}}} \quad (2)$$

γ_1 valant 1 dans l'équation (6)

L'intérêt de cette représentation est multiple :

- Il rend compte de la physique du composant,
- Il permet d'obtenir une très bonne concordance entre modèle et mesures,
- Il repose sur une construction mathématique permettant a posteriori d'établir un modèle simplifié utilisable sur un ordinateur en temps réel pour du monitoring notamment à la manière d'un BMS – Battery Management System [réf. ajoutée dans l'article final].

3. Banc d'essai et protocole expérimental

Afin de pouvoir tester un lot de 6 composants sous étuve, nous avons choisi de simplifier les convertisseurs électroniques de puissance utilisés pour stresser les condensateurs : il s'agit de hacheurs série pilotés à rapport cyclique constant pour 3 d'entre eux et à rapports cycliques variables pour les 3 autres. L'air ambiant dans l'étuve est réglé à une température de 70°C pour permettre un vieillissement suffisamment rapide des condensateurs dans la mesure où les composants utilisés sont conçus pour fonctionner jusqu'à 150°C et qu'il aurait été difficile d'atteindre cette température par leur échauffement propre. **Un schéma ainsi qu'un tableau détaillés des paramètres du banc seront donnés dans l'article final.** Toutes les 500h environ, le banc d'essai est stoppé et une impédancemétrie des 6 condensateurs de découplage est réalisée. Ces derniers sont fixés sur des supports permettant de les désolidariser des hacheurs et de faciliter une mesure « à 4 fils » avec un impédancemètre BioLogic sur une plage de fréquence allant de 200Hz à 20kHz. L'impédancemétrie doit en outre être menée à différentes températures (à savoir 25, 60 et 80°C toujours dans l'étude) car l'évolution due au vieillissement, notamment de l'ESR, peut être assez sensible à 25°C sans que cela soit le cas à la température de fonctionnement normale des condensateurs.

4. Résultats expérimentaux

Les résultats d'impédancemétrie ont été exploités tout d'abord pour caractériser notre modèle avec une très bonne concordance comme en témoigne la figure 3 pour laquelle on peut voir la comparaison entre modèle et mesure à 25, 60 et 80°C.

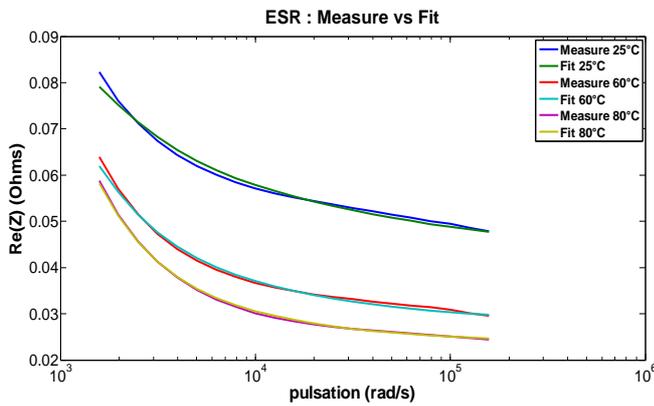


Figure 3 : « Fitting » du modèle avec les résultats d'impédancemétrie à différentes températures

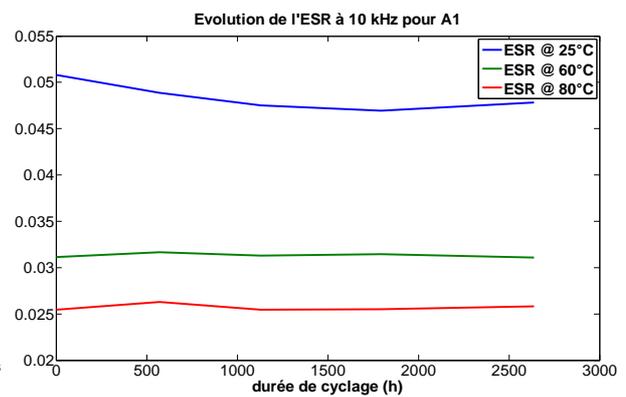


Figure 4 : Evolution de l'ESR pour un condensateur et pour chaque température

En outre, la décomposition possible de l'ESR du modèle en fonction de R1 d'une part, de R2 en parallèle avec C2 d'autre part ainsi que de la partie réelle de Z_{Ano} nous permettra, à terme, d'identifier les éléments significatifs dans l'analyse du vieillissement et de faciliter un monitoring des condensateurs intégrés à un onduleur.

5. Conclusion et perspectives

Cette étude sert de base pour l'ensemble du projet COPTON et permettra non seulement, au terme des essais, de déterminer l'impact du cyclage thermique sur le vieillissement des condensateurs mais aussi, elle ouvre des perspectives en terme de monitoring en temps réel des condensateurs dans un onduleur embarqué sur véhicule grâce aux modèles établis.

6. Références

- [1] T. D. NGUYEN, N. PATIN, G. FRIEDRICH, Analyse des sollicitations sur les condensateurs de filtrage du bus continu d'onduleur pour applications embarquées en fonction de la stratégie de modulation, Electronique de Puissance du Futur, 2010, Saint-Nazaire.
- [2] H. WANG, F. BLAABJERG, Reliability of Capacitors for DC-Link Applications – An Overview IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013, Denver, USA.
- [3] R. COUSSEAU, N. PATIN, E. MONMASSON, L. IDKHAJINE, A Methodology for Studying Aluminium Electrolytic Capacitors Wear-out in Automotive Cases, EPE-ECCE Europe, 2013, Lille.
- [4] L. GAGNEUR, A.L. DRIEMEYER-FRANCO, C. FORGEZ, G. FRIEDRICH, « Modeling of the diffusion phenomenon in a lithium-ion cell using frequency of time domain identification », Elsevier, Microelectronics Reliability, Volume 53, Issue 6, June 2013, Pages 784–796
- [5] A. J. BARD, L. R. FAULKNER, « Electrochemical methods, Fundamental and applications », 2000, J. Wiley and Sons
- [6] J. DIARD, B. LE GORREC, C. MONTELLA, « Cinétique électrochimique », 1996, Hermann
- [7] J. BISQUERT, A. COMPTE, « Theory of the Electrochemical Impedance of Anomalous Diffusion », Journal of Electroanalytical Chemistry, 499, pages 112-120. 2001.