

Utilisation des supercondensateurs pour les stockage de l'énergie embarquée : applications transport

H. Gualous*, R. Gallay**, A. Berthon*

* Laboratoire L2ES, UFC-UTBM-INRETS

Bat F, UTBM, rue Thiery-Mieg 90 010 Belfort

** Maxwell Technologies S. A

CH-1728 Rossens, Suisse

Résumé :

Cet article décrit le fonctionnement, les propriétés et la modélisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée. Trois applications utilisant les supercondensateurs sont présentées. La première utilise les supercondensateurs pour le démarrage d'un moteur thermique, la seconde concerne le stockage à base de supercondensateurs pour récupérer l'énergie de freinage dans le domaine du transport ferroviaire urbain. Cette application est réalisée par Siemens. La troisième application traite le stockage embarqué réalisé par Bombardier pour la ville de Mannheim.

Abstract:

This paper is about supercapacitors for energy storage. Supercapacitor modelling and specifications are presented. Three applications in transportation are described in this study. The first is about internal combustion engine. The second and the third deal energy storage with Maxwell supercapacitors for Tram-way applications.

1. Introduction

La pollution de l'air dans les villes liée aux gaz d'échappement des véhicules à moteur thermique a accéléré les recherches ces dernières années pour trouver des solutions de véhicules propres pour l'environnement. Cette solution doit intégrer un rapport qualité prix convenable. Des véhicules électriques ont été réalisés et commercialisés. Ils utilisent différents types de batterie pour le stockage de l'énergie (Pb, Ni-Cd, Li-Ion ...), mais leur durée de vie et leur coût d'entretien ont freiné le développement de ces véhicules. Le véhicule hybride utilisant une hybridation au niveau de la motorisation et des sources d'énergie est la solution envisagée actuellement. Le problème du stockage de l'énergie embarquée dans le véhicule peut être résolu en utilisant les supercondensateurs et les batteries. Une bonne gestion de l'énergie à bord entre les deux deniers éléments de stockage et l'énergie fossile donnera certainement le véhicule de demain [1, 2, 3, 4, 5].

Les batteries ont une forte densité énergétique mais une faible densité de puissance. Leur durée de vie en nombre de cycles charge-décharge est relativement limitée. Le développement technologique et la maîtrise de fabrication de nouveaux matériaux ont permis la réalisation d'autres systèmes modernes de stockage d'énergie électrique comme les supercondensateurs. Ils peuvent être utilisés de façon complémentaire aux batteries ou à la pile à combustible. Un choix de complémentarité en termes de puissance instantanée disponible et de quantité d'énergie stockée permettra d'augmenter les performances des systèmes d'alimentation des véhicules hybrides par exemple.

Pour intégrer les supercondensateurs dans le domaine du transport, il faut simuler leur fonctionnement dans un environnement électrique et thermique contraint, comme celui de l'automobile [6, 7].

2. Structure et fonctionnement des supercondensateurs

La structure élémentaire d'un supercondensateur est constituée par des collecteurs de courant en aluminium, des électrodes généralement en charbon actif imprégné dans un électrolyte organique ou aqueux. Un séparateur est intercalé entre les deux électrodes pour les isoler (figure 1). L'assemblage de l'ensemble est réalisé comme pour les condensateurs classiques.

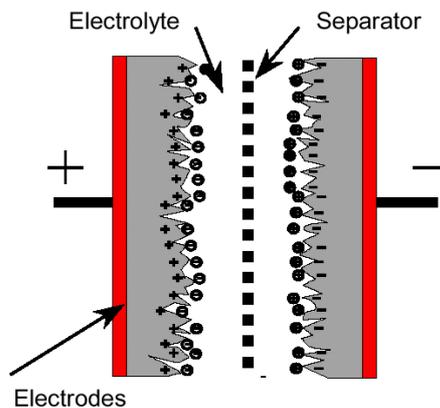


Figure 1 : Structure d'un supercondensateur

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

Un supercondensateur a une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels, et donc d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (1 à 5000 F). Ceci fait des supercondensateurs des éléments potentiels de stockage d'appoint, idéalement complémentaires aux batteries ou à la pile à combustible. L'utilisation de structures série-parallèle de plusieurs cellules de supercondensateurs permet d'atteindre une tension et un courant de sortie élevés.

En terme de coût des supercondensateurs, nous donnons les prix pratiqués par Maxwell dans la figure suivante [8] :

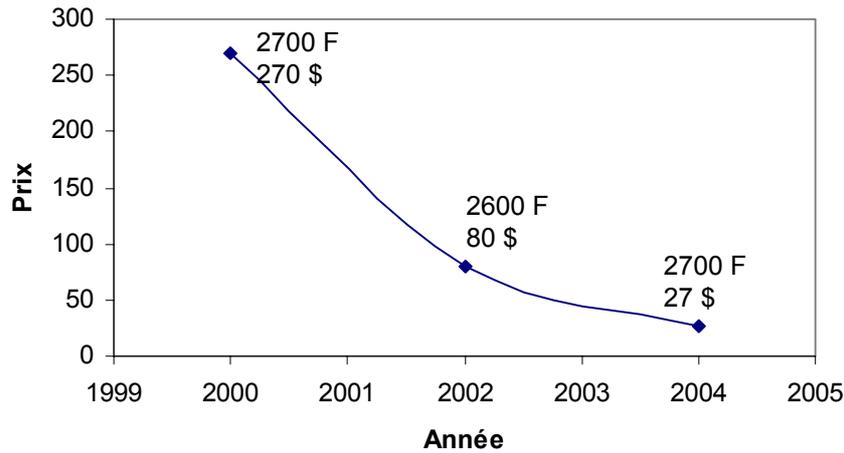


Figure 2 : Prix des supercondensateurs Maxwell

On constate que le prix d'un supercondensateur de 2700F est passé de 270\$ en 2000 à 27\$ en 2004. Il a donc été divisé par 10 en 4 ans. Les applications des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée ou stationnaire se multiplient (voir paragraphe 6), le prix est revu à la baisse pour les années à venir.

3. Comparaison entre les batteries et les supercondensateurs

Le supercondensateur possède une puissance instantanée plus importante que celle des batteries et une énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Sa durée de vie est plus élevée que celle des batteries (environ 10 ans). Sur le diagramme de Ragone (figure 3), nous avons représenté les différents systèmes de stockage d'énergie électrique dans le plan puissance spécifique-énergie spécifique. Ce diagramme montre que les condensateurs électrochimiques possèdent une très grande densité de puissance mais une très faible énergie spécifique. Ils sont utilisés généralement pour des constantes de temps inférieures à quelques centaines de ms. Les batteries ont une densité de puissance très faible et une énergie spécifique élevée. Elles peuvent être utilisées avec une constante de temps supérieure à la mn. En ce qui concerne la pile à combustible c'est un convertisseur d'énergie et non pas un élément de stockage. Entre les batteries et les condensateurs électrochimiques se trouvent les supercondensateurs qui sont utilisés pour stocker l'énergie avec une constante de temps inférieure à quelques dizaines de secondes. Le tableau ci-dessous résume les performances des trois éléments de stockage présentés ci-dessus [8].

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

D'après les données du tableau ci-dessus, il est clair que le supercondensateur est un élément potentiel pour le stockage de l'énergie embarquée comme source pour la demande de fortes puissances pendant quelques secondes. Son utilisation permet dans le domaine de l'automobile de diminuer la pollution liée aux gaz d'échappement. Des études réalisées dans ce domaine ont démontrées que l'utilisation des supercondensateurs dans le véhicule permet de réduire d'environ 15% sa consommation, et jusqu'à 20% celle des bus pour le transport collectif.

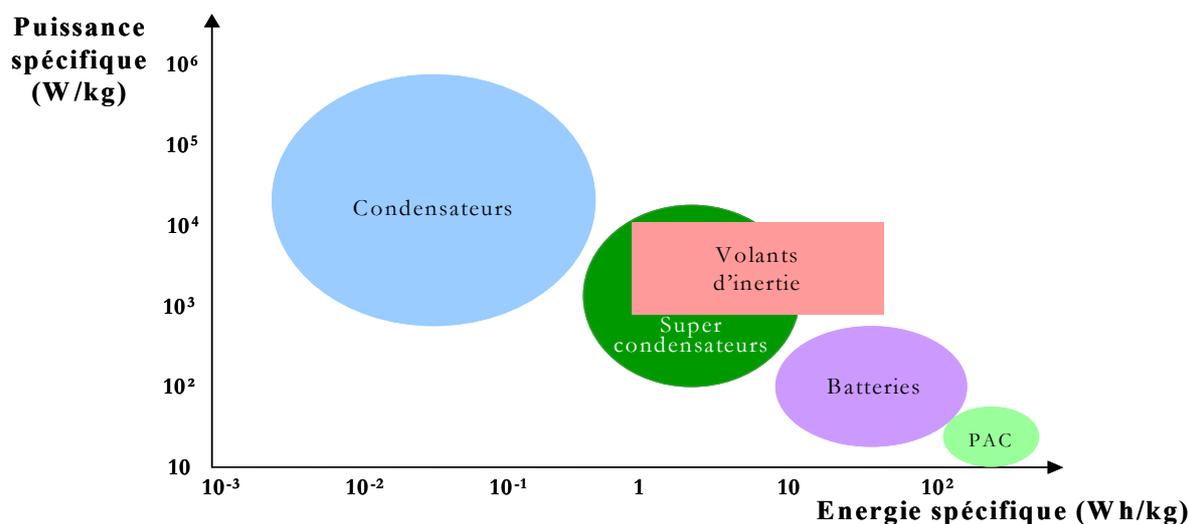


Figure 3 : Comparaison des densités de puissance et d'énergie pour différents éléments de stockage

4. Modélisation des supercondensateurs

Compte tenu des phénomènes physiques aux interfaces de la double couche électrique d'un supercondensateur, ce dernier ne peut pas être représenté par un simple condensateur formé par une capacité, une résistance série et une résistance de fuite. La théorie de Helmholtz permet de décrire le fonctionnement de la double couche électrique. Elle permet d'expliquer les différents phénomènes physiques qui se passent à l'interface entre un conducteur ionique liquide (électrolyte) et un conducteur électronique solide (électrodes). L'interface est modélisée par deux répartitions superficielles de charges, électronique pour l'électrode et ionique de signe opposé pour l'électrolyte [9, 10, 11, 12]. D'un point de vue modèle électrique et thermique, il est très difficile, voir impossible, de mettre en équation analytique le fonctionnement d'un supercondensateur pour plusieurs raisons. La première vient du fait qu'un ion doit passer au travers des pores du charbon actifs qui ne sont pas uniformes et donc difficiles à modéliser. De plus la présence d'une zone de charge d'espace à l'interface électrodes-électrolyte n'est pas prise en considération à cause de sa complexité. Une autre difficulté réside dans la variation de la conductivité électrique du charbon actif et de la conductivité ionique de l'électrolyte. D'autres théories ont amélioré la première comme celle de Gouy et Chapman et celle de Stern, mais elles ne permettent pas d'établir un modèle qui reproduit fidèlement le comportement électrique et thermique d'un supercondensateur.

Plusieurs auteurs proposent un modèle de type "circuit électrique" qui décrit le fonctionnement électrique d'un supercondensateur avec une bonne approximation. Ce modèle est basé sur la constante de charge répartie comme dans le cas d'une ligne de transmission (figure 4). Le calcul des paramètres du modèle est semblable à celui d'une ligne de

transmission qui consiste à résoudre les deux équations aux dérivées partielles qui décrivent la variation de la tension et du courant le long de la ligne. L'inconvénient de ce modèle est le calcul complexe des différents éléments du modèle. De plus le temps de calcul en simulation est élevé, ceci est lié aux nombres de branches RC [13, 14, 15].

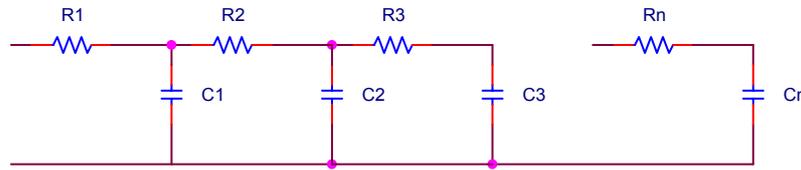


Figure 4 : Schéma électrique équivalent d'un supercondensateur à l'image d'une ligne de transmission

En utilisant des approximations et suivant le domaine d'utilisation des supercondensateurs, on peut simplifier le précédent modèle pour simplifier les simulations. Dans le domaine du stockage de l'énergie embarquée et pour des applications dans le véhicule hybride, le supercondensateur est utilisé comme tampon de puissance. Il fournit la puissance ou récupère la puissance lors du freinage, par exemple pendant une dizaine de secondes. Un modèle à deux branches dont la capacité est non linéaire et varie en fonction de la tension à ses bornes (figure 5) est largement suffisant. Ce modèle a été établi par les Canadiens Bonert et Zubieta [16].

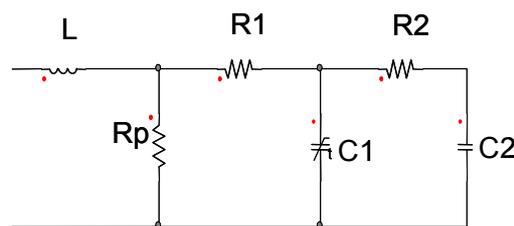


Figure 5 : Schéma électrique équivalent d'un supercondensateur

La branche dite rapide R_1C_1 intervient dans le régime transitoire et la branche lente R_2C_2 traduit les constantes de temps plus importantes. Dans cette étude qui s'intéresse uniquement aux phénomènes dynamiques du supercondensateur, on peut négliger cette branche lente car elle représente le phénomène de redistribution des charges au sein de la cellule. R_1 est la résistance série du supercondensateur, C_1 sa capacité et R_p la résistance de fuite. Pour tenir compte des phénomènes physiques à l'interface des matériaux du supercondensateur, C_1 est composée d'une capacité constante C_0 et d'une capacité variable en fonction de la tension entre ses bornes. Nous avons $C_1 = C_0 + C_v = C_0 + kV_1$. k est une constante et V_1 est la tension aux bornes de C_1 . Précisons qu'en régime transitoire, la résistance de fuite R_p est négligée. Les paramètres du modèle proposé peuvent être déterminés en faisant une charge du supercondensateur à courant constant d'une tension nulle à sa tension maximale. Le calcul des éléments du modèle se fait à l'aide des paramètres déterminés expérimentalement en utilisant un cycle de charge/décharge du supercondensateur. Pour plus d'informations sur les calcul des paramètres, il faut consulter les articles de Zubieta et Bonert [16].

5. Variation de la charge d'un supercondensateur en fonction de la température

Les supercondensateurs ont un comportement thermique meilleur par rapport aux batteries. Sur la figure 6 est représentée la charge d'un pack de 4 supercondensateurs de 2700F chacun en série. Ceci pour des températures de -40°C et 18°C . Le courant de charge est

constant environ 100A. On constate que le saut de tension au début de la charge est plus important à -40°C . Ceci se traduit par une résistance série plus élevée à -40°C qu'à 18°C . Des études menées au Laboratoire L2ES à Belfort et par des fabricants de supercondensateurs ont montré que la résistance série augmente quand la température diminue. L'augmentation est plus importante entre -20°C et -40°C . Ces résultats expérimentaux montrent également que la durée de charge du pack à 18°C (environ 60s) est plus élevée que celle à -40°C (environ 50s). Mais il est difficile de conclure sur la valeur de la capacité

Cette variation de temps de charge est liée à deux effets. Le premier est dû aux variations de la résistance série du supercondensateur en fonction de la température, et par conséquent une constante de temps qui varie en fonction de la température. Le second effet est lié à la diminution de la capacité totale du supercondensateur en fonction de la température. En effet la variation de la valeur de la capacité du supercondensateur est liée aux variations des caractéristiques du charbon actif, de la conductivité ionique de l'électrolyte en fonction de la température ainsi que la variation de l'épaisseur effective de la double couche en fonction de la température [5] Cependant la variation de la capacité globale en fonction de la température est moins importante que celle de la résistance série.

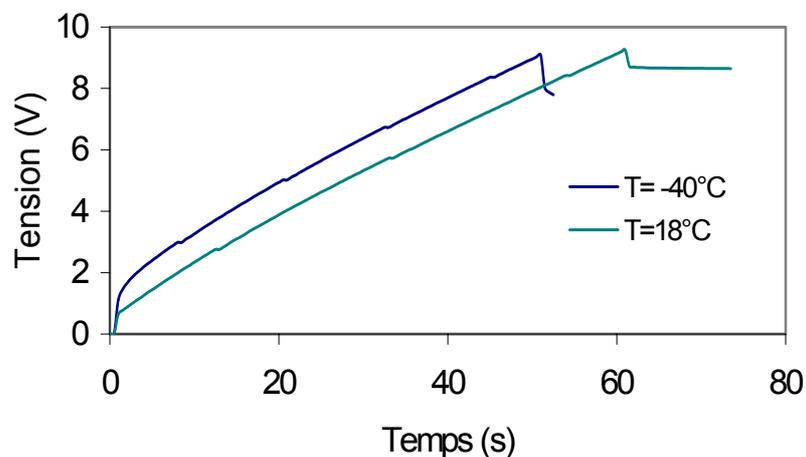


Figure 6 : Évolution de la tension aux bornes d'un pack de 4 supercondensateurs en série en fonction du temps, à courant constant et pour -40°C et 18°C

6. Application des supercondensateurs dans le domaine du transport :

Dans le domaine des transports terrestres, les applications envisagées pour les supercondensateurs regroupent

- l'automobile, en particulier les nouvelles architectures de chaîne de traction hybride,
- le transport collectif urbain : bus, tramways, métros,
- les trains.

Sur le segment de l'automobile la technologie des supercondensateurs satisfait les fonctions

- de démarrage, en particulier les contraintes à faible température
- d'organe de puissance des chaînes de traction hybride des architectures 42 V

Les concepts de véhicules hybrides parallèles, c'est à dire utilisant le moteur électrique comme complément du moteur thermique sur des durées de quelques secondes, sont appelés à se développer de façon massive. En effet, ils répondent aux aspirations de réduction de consommation et d'émissions, d'électrification croissante des équipements et d'intégration de nouvelles fonctions de confort.

- les supercondensateurs permettent d'améliorer le rendement énergétique des tramways et métros en permettant la récupération de l'énergie du freinage, ce qui autorise une augmentation du trafic sans investissement réseau et réduit le coût de possession,
- l'application des principes d'hybridation automobile aux bus urbains permet de réduire la consommation de plus de 20% et de satisfaire les exigences des politiques d'urbanisme et de transport

6.1. Essais de démarrage d'un moteur thermique.

Nous avons réalisé au laboratoire L2ES, le démarrage d'un moteur thermique automobile avec plusieurs packs de supercondensateurs. Le montage expérimental est présenté sur la figure 7.

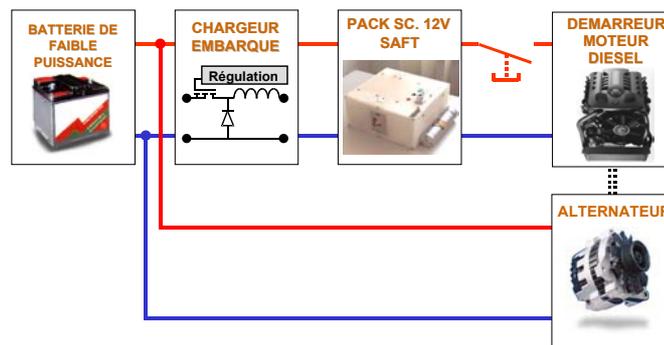


Figure 7 : Schéma de principe des essais de démarrage sur un moteur thermique.

Le pack de supercondensateurs peut être alimenté soit par la batterie lorsque le véhicule est à l'arrêt, soit par l'alternateur lorsque le véhicule fonctionne.

Le chargeur embarqué permet d'assurer une régulation de charge des supercondensateurs. Le démarreur du moteur est ensuite directement relié au pack de supercondensateurs lorsque le conducteur désire démarrer. Une fois que le moteur fonctionne, son alternateur permet de recharger, via le chargeur embarqué, les supercondensateurs.

Les démarreurs automobiles sont généralement constitués d'un moteur à courant continu à excitation série et d'un solénoïde permettant de mettre en contact le pignon du rotor avec la couronne du volant moteur et d'alimenter ensuite l'induit et l'inducteur.

Les caractéristiques du moteur utilisé sont les suivantes : moteur de Peugeot 604 turbo diesel de 80 CV, couple résistant au démarrage de 32 daN.m, vitesse minimale de lancement de 130 tr/min.

Nous avons testé deux packs de supercondensateurs :

- Un pack de 14 V / 143 F composé de 7 cellules de 1000 F mises en parallèle.
- Un pack de 10 V / 675 F composé de 4 cellules de 2700 F mises en parallèle.

Le but de l'expérience est de déterminer le nombre maximal de démarrage du moteur sans

recharger le pack de supercondensateurs.

En utilisant le pack de 143 F, nous n'avons pu réaliser que 2 démarrages à la suite du moteur. Seuls les deux premiers démarrages ont été concluants. Le troisième n'a pas abouti car la vitesse de rotation du moteur n'était pas assez élevée. Nous avons constaté que la tension minimale pour assurer le démarrage avec ce pack est d'environ 11,5 V. La première constatation est que le moteur a démarré normalement sans peiner. D'autre part le courant d'appel est moins important que dans le cas du démarrage par batterie classique (un peu moins de 400 A contre 500 A pour la batterie). La chute de tension est d'environ 1,2 V pendant le démarrage. Le pack de 143 F est donc capable d'assurer le démarrage du moteur.

Ne disposant pas d'un nombre suffisant de supercondensateurs de 2700 F, nous avons réalisé un essai sous tension réduite avec 4 supercondensateurs montés en série (tension maximale équivalente de 10 V) représentant un pack de 675 F. Dans cette configuration, nous avons constaté que le moteur démarre sans problème et cela 9 fois de suite. La chute de tension après chaque démarrage varie entre 0,2 et 0,75 V. La figure 8 représente l'évolution du courant et de la tension du pack de supercondensateurs pour chaque démarrage.

L'avantage principal du supercondensateur par rapport à la batterie est qu'il peut supporter plusieurs dizaines de milliers de cycles de charge/décharge à des courants très élevés. Les batteries sont limitées à seulement quelques centaines de cycles avec des courants beaucoup plus faibles. D'autre part, dans le cas d'un démarrage d'un moteur thermique, la batterie est extrêmement sollicitée ce qui oblige les constructeurs à installer des batteries de forte puissance. Dans notre application, une batterie de faible puissance suffit amplement car elle est uniquement utilisée lors de la première charge (à faible courant) des supercondensateurs. En effet, lorsque le moteur est lancé, c'est l'alternateur du véhicule qui charge les supercondensateurs. Il en résulte donc une diminution de la taille de la batterie et une plus grande longévité de fonctionnement de celle-ci.

A la vue des premiers résultats, les supercondensateurs semblent donc être une solution intéressante pour les applications réclamant de fortes pointes de puissance pendant des temps courts. Le cas du démarreur de moteur thermique en est un parfait exemple.

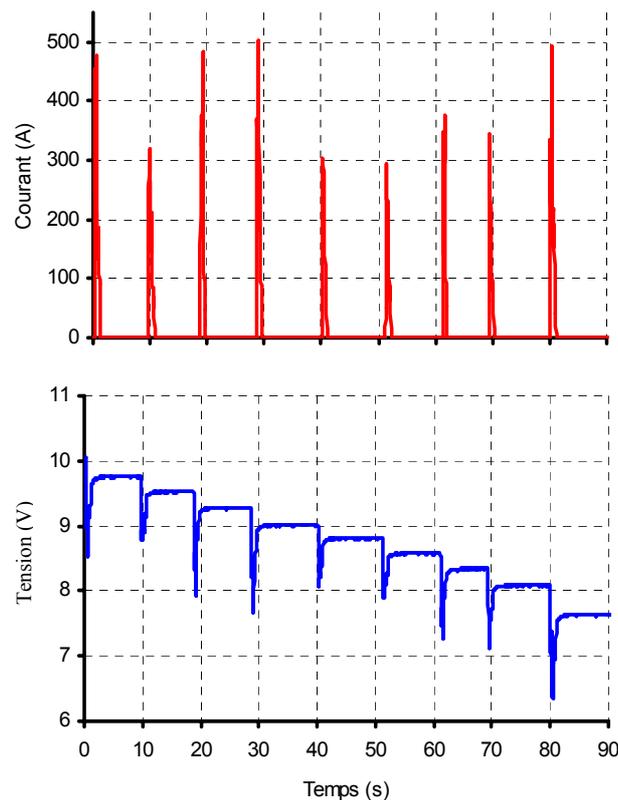


Figure 8 : Variation de la tension et du courant d’un pack de supercondensateurs pour plusieurs démarrages successifs d’un moteur thermique

6.2. Stockeur d’énergie fixe

Les autorités de quelques villes européennes telles que Cologne, Dresde et Madrid, ainsi que de Portland Oregon, aux États-Unis, ont décidé d’introduire des systèmes de stockage à base de supercondensateurs pour récupérer l’énergie de freinage dans le domaine du transport ferroviaire urbain. Le système, développé par les ingénieurs de Siemens Transportation Systems, construit sous le nom de « SITRAS[®] SES » [17], équipe des sous-stations du réseau d’alimentation. Son introduction à Dresde et à Portland en 2002 a permis d’effectuer des économies de plus de 30 %. Le principal intérêt réside cependant dans la stabilisation du réseau d’alimentation électrique, car le stockeur fournit localement les pics de puissance réclamés lors de la phase de démarrage des trams.

Les supercondensateurs BCAP0010 de Maxwell, qui sont utilisés dans le système “SITRAS[®] SES”, sont caractérisés par une capacité de 2600 Farads, une résistance interne de 0.4 mOhm et une tension d’utilisation de 2.5 Volts. Le stockeur d’énergie de 64 Farads, composé de 1300 BCAP0010, est conçu pour une tension nominale de 750 Vdc. Avec la cabine, le convertisseur et l’électronique de contrôle, le système occupe un volume de 2.8 m x 2.9 m x 2.8 m et pèse 5.5 tonnes. Il fournit une puissance maximale de 1 mégawatt dans un rayon de 3 km. La batterie de supercondensateurs permet de réduire en moyenne la puissance consommée de 50 kW.



Figure 9 : Pack de supercondensateurs dédié çà la récupération de l'énergie lors du freinage

Dans le cas de transport souterrain l'avantage est encore plus marqué. Lors du freinage, l'énergie du véhicule ne peut pas toujours être réinjectée dans le réseau, comme en soirée lorsque le nombre d'utilisateurs est faible. Dans un réseau seul 60% de cette énergie en moyenne peut être reprise par le réseau. L'énergie étant emmagasinée dans les supercondensateurs plutôt que dissipée sous forme de chaleur dans des résistances, l'élévation de température environnementale se trouve fortement réduite.

Les opérateurs qui ont mis en place un système « SITRAS[®] SES » réalisent des économies de coûts de fourniture d'énergie pouvant se monter jusqu'à 150 000 euros par année. Parallèlement à cette économie financière, le système évite l'émission équivalente de plus de 300 tonnes de CO₂.

6.3. Stockeur d'énergie embarqué

Lorsqu'il est question d'économie d'énergie de freinage de système de transport léger ou de réduction de l'intensité des pics de puissance dans un réseau, les ingénieurs se trouvent devant le choix, soit de placer le stockeur d'énergie à bord du véhicule, soit de le laisser fixe dans une sous-station du réseau.

Bombardier test son système économiseur d'énergie « MITRAC[®] » [18], sur un tram de la ville de Mannheim, depuis septembre 2003. Il est équipé d'un stockeur d'énergie capacitif se trouvant dans un conteneur de 1.9 m x 0.95 m x 4.5 m, pesant 450 kg, placé sur le toit du tram. Sa tension nominale est de 750 Vdc.

Sans compter les gains effectués sur les investissements qui eussent été nécessaires pour renforcer la puissance du réseau, l'économie annuelle d'énergie se monte à 30 000 €. A l'avantage économique s'ajoute encore l'amélioration de la situation environnementale, liée à la réduction d'émission de CO₂.

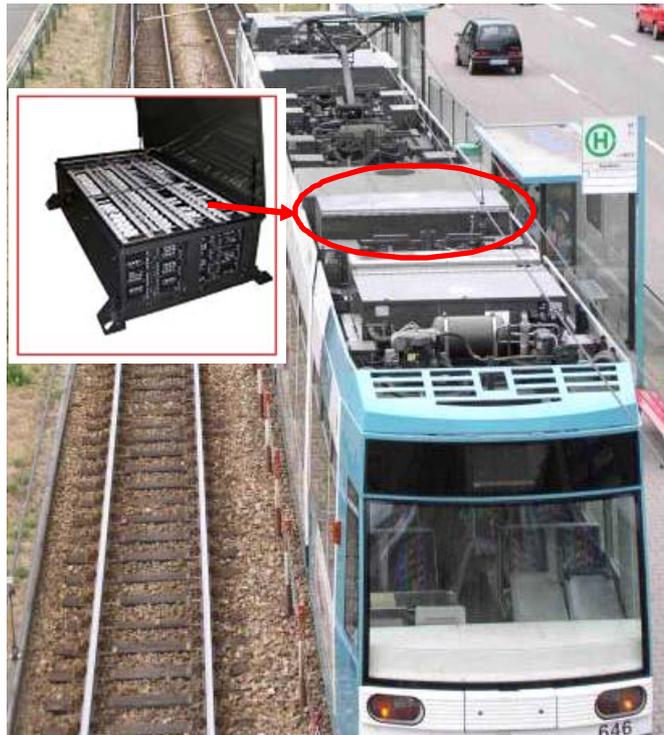


Figure 10 : Système MITRAC utilisant les supercondensateurs pour le stockage de l'énergie

La résistance entre la sous-station et le véhicule augmente à mesure que la distance les séparant en fait de même. Pour un courant typique de 1000 A, la chute de potentiel, vue par le tram à l'endroit le plus éloigné de l'alimentation, est de l'ordre de 100 Vdc. En réduisant l'intensité du courant, cette chute de potentiel diminue proportionnellement. En plus du gain en stabilité de tension, le système profite de la réduction des pertes ohmiques dans la caténaire.

Les mesures ont démontré qu'avec un stockeur capacitif embarqué, les pointes de puissance échangées avec le véhicule sont réduites de 40%. Ce résultat se traduit par un choix conceptuel pour dimensionner l'infrastructure : soit les sous-stations peuvent être éloignées les unes des autres en gardant des performances et des coûts d'exploitation constants, soit ces derniers sont améliorés en maintenant les caractéristiques de l'infrastructure. Les calculs montrent que la distance entre les sous-stations pourrait être augmentée jusqu'à 70%.

7. Conclusion :

Les supercondensateurs sont des éléments potentiels pour le stockage de l'énergie. Leur association avec les batteries ou avec une pile à combustible permet de réduire la consommation énergétique d'un véhicule. Les applications présentées dans cet article montrent que le supercondensateur peut jouer un rôle important dans le développement des véhicules hybrides et des transports en commun grâce à la récupération de l'énergie lors du freinage et à sa durée de vie très élevée.

Références

- [1] A. F. Burke ‘Ultracapacitor : why, how, and where is the technology ‘ Journal of Power Sources 91 (2000) 37 – 50
- [2] E.J. Dowgiallo and A.F. Burke, ‘Ultracapacitors for Electric and Hybrid Vehicles’. Electric Vehicle Conference. Florence, Italy. 1993
- [3] R. Kötz, M. Carlen ‘Principles and applications of electrochemical capacitors’ Electrochimica Acta 45, (2000) 2483 – 2498.
- [4] A. F. Burke, M. Miller, Proceeding of the 8th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, Florida Educational Seminar, December 1998.
- [5] B. E. Conway , W. G. Pell ‘Power limitation of supercapacitor operation associated with resistance and capacitance distribution in porous devices ‘ Journal of Power Sources 105 (2002) 169-181
- [6] H. Gualous, D. Bouquain, A. Berthon, J. M. Kauffmann, ‘Experimental study of supercapacitor serial resistance and capacitance variations with temperature’, Journal of Power sources n°123, 2003, p 86-93
- [7] H. Gualous, D. Bouquain, A. Berthon, J. M. Kauffmann, ‘Thermal behaviour of ultracapacitors in power electronic applications’, Power Electronics Europe, Issue 2 ,2003, p 21-28
- [8] Gianni Sartorelli, Adrian Schneuwly, Juergen Auer ‘Technologies et applications des supercondensateurs’ Colloque Énergie électrique : besoins, enjeux, technologies et applications UTBM, Belfort 18 Juin 2004.
- [9] Gouy, G. Comt. Rend. 1910, 149,654.
- [10] Chapman, D. L. Phil. Mag. 1913, 25, 475.
- [11] Bellhachemi F., Rael S., Davat B. EPE – PEMC 2000, Kosice (Slovakia)
- [12] Bellhachemi Farid Thèse de doctorat de l’INPL, 2001.
- [13] A. Yoshida ‘An electric double-layer capacitor with high capacitance and low resistance’ IEEE Transactions on components, Hybrids, and Manufacturing technology, Vol. 15, N°1, 1992, 133-138.
- [14] G. L. Bullard, H. B. Sierra-Alcazar, H. L. Lee, J. L. Morris ‘Operating principles of the ultracapacitor’ IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 25, N) 1, January 1989.
- [15] Peter J. Mahon, George L. Paul, Sarkis M. Keshishian, Anthony M. Vassallo ‘Measurement and modeling of the high-power performance of carbon-based supercapacitors ‘ Journal of power sources 91 (2000) 68-76.
- [16] L. Zubieta, R. Bonert ‘Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications’ IEEE-IAS’98, 1149-1154, 1998.
- [17] “Sitras” documentation, Siemens Transportation Systems
- [18] J. Scholten, ‘Energy Storage in Light Rail Vehicles’, Fourth BOOSTCAP Meeting, Fribourg 2004
- [19] H. Gualous, D. Bouquain, J. M. Kauffmann, “Variation de la résistance série et de la capacité des supercondensateurs en fonction de la température”, in *Proc. Electronique de Puissance du Futur EPF’2002*, p. 233 - 237, Montpellier, France, 2002.
- [20] B. E. Conway, Electrochemical supercapacitors, Kluwer Academic Publishers /Plenum Press, New York, 1999.