

Supercondensateurs pour l'électronique de puissance

Grandes densités d'énergie et de puissance grâce aux nouveaux matériaux

Les supercondensateurs sont des composants de stockage de charges électriques qui ont pour but d'atteindre des densités d'énergie électrique de 15 Wh/kg et des densités de puissance de 2000 W/kg. Ces performances donnent accès à de nouvelles applications potentielles dans le domaine de l'électronique de puissance, spécialement dans le secteur des transports où le volume et le poids sont fortement limités.

Les applications de l'électronique de puissance ont besoin de composants passifs pour stocker l'énergie électrique dans un volume et avec un poids aussi petit que possible. Le choix du type de matériel de stockage dépend en particulier de la vitesse de stockage, en d'autres mots de la puissance requise par l'application. Effectivement, tandis que les événements de stockage lents peuvent être assurés par des batteries, les plus rapides doivent être effectués à l'aide de condensateurs.

Parmi les différents types de technologie de condensateurs, les supercondensateurs, qui sont des condensateurs électrochimiques à double couches (ECDL), présentent la densité d'énergie la plus élevée. Ils remplissent le domaine énergétique vide entre les batteries à résistance interne élevée et les condensateurs à énergie limitée. Ces supercondensateurs ont les propriétés d'un condensateur mais possèdent une technologie de fabrication similaire à celle des batteries.

La tension nominale de travail d'un condensateur ECDL est déterminée par la tension de décomposition de l'électrolyte. Pour une cellule élémentaire et pour un électrolyte organique cette tension vaut approximativement 2,5 Vdc. De plus, la tension de fonctionnement dépend de manière importante des conditions environnementales de température, d'intensité de courant et de la durée de vie requise. La capacité d'un supercondensateur peut être très grande. Par exemple quelques milliers de Farads, grâce à la distance très faible qui sépare les charges opposées qui se trouvent aux interfaces entre l'électrolyte et les électrodes et grâce à la très grande surface de celles-ci. Ces capacités sont de quelques ordres de magnitude plus élevés que celles des condensateurs conventionnels.

Dans la plupart des applications de l'électronique de puissance, en particulier dans le domaine de la traction, il est important de maintenir les coûts et le poids aussi bas que possible. Ce résultat s'obtient en réduisant la section des conducteurs pour autant que l'intensité du courant soit diminuée. Pour maintenir le niveau de puissance, la tension de travail doit être augmentée jusqu'à des valeurs nécessitant une connexion en série des cellules élémentaires. La répartition de la tension entre les cellules élémentaires doit être contrôlée soit par de l'électronique soit par des composants passifs.

Les buts de la recherche sur les condensateurs ECDL sont d'atteindre les densités d'énergie et de puissance les plus élevées de manière à obtenir des composants, pour une application donnée, avec un volume et un poids minimal. Concrètement, ces buts ont été fixés par le DOE (US Department of Energy) à 15 Wh/kg pour la densité d'énergie et 2000 W/kg pour la densité de puissance. Pour atteindre ces valeurs il est nécessaire d'augmenter la densité de capacité, de réduire la résistance en série et d'augmenter la tension nominale des cellules. Les efforts de recherche sont concentrés sur l'étude des électrodes, de leur surface et de leur accessibilité et sur la tension de décomposition des électrolytes.

Montena est actif dans le développement de condensateurs ECDL qui peuvent être utilisés dans deux catégories d'applications différentes.

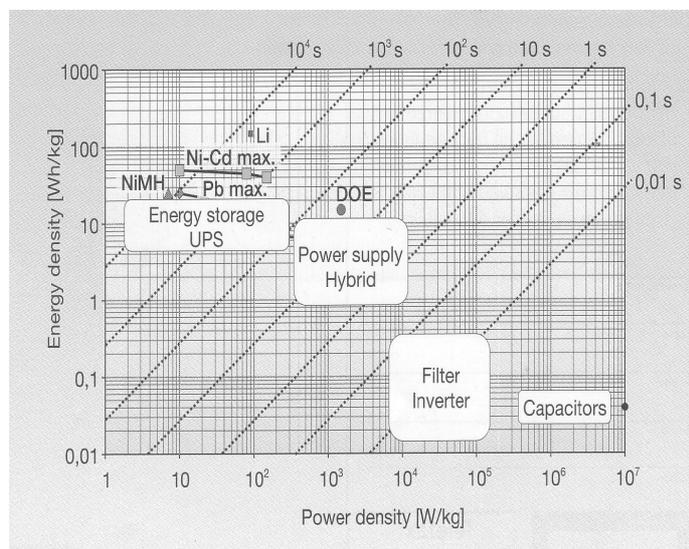


Fig. 1 Le graphique de Ragone représente la densité d'énergie en fonction de la densité de puissance des différents types de stockage d'énergie.

La première catégorie correspond à des applications de basse puissance, où les batteries seraient mieux adaptées, mais qui sont malheureusement à l'origine de problèmes de maintenance. Les condensateurs, même s'ils sont beaucoup plus gros, apportent suffisamment d'avantages pour pouvoir se substituer aux batteries. Dans ce créneau d'applications, les alimentations sans coupures (UPS) sont l'exemple le plus représentatif.

• La seconde catégorie correspond aux applications de puissance élevée où les batteries ne sont pas compétitives à cause de leur résistance interne trop élevée. Les condensateurs ECDL, en raison de leur haute performance en puissance, vont permettre à de nouvelles applications de prendre naissance. A titre d'exemple, la gestion rapide de l'énergie requise par les véhicules hybrides peut être avantageusement effectuée avec ce type de condensateurs. Le démarrage de gros moteurs diesel est un autre exemple où d'énormes courants entrent en jeu durant de courtes périodes de temps.

Les premiers prototypes réalisés exhibent des densités d'énergie de 3 Wh/kg et des densités de puissance de 1000 W/kg.

Les dispositifs de stockage d'énergie électrique sont de trois types différents: batteries faradiques, condensateurs électrostatiques et inductances magnétiques.

La densité d'énergie (figure 1) dans une batterie peut s'élever à 150 Wh/kg. C'est 10 fois la valeur maximale attendue pour les supercondensateurs. La densité de puissance dans une batterie a de la peine à atteindre 100 W/kg. C'est 20 fois plus petit que la valeur attendue pour les supercondensateurs. Les batteries souffrent de quelques faiblesses qui induisent une rapide décroissance de ses performances. Les origines de ce comportement peuvent être les charges et décharges rapides de la batterie, les décharges profondes ou les basses températures environnementales. Les batteries ont aussi une durée de vie limitée et nécessitent une maintenance onéreuse. Certains fabricants de batteries mentionnent des densités de puissance plus élevées (jusqu'à 1000 W/kg), mais omettent de parler des conséquences sur la durée de vie de la batterie si de telles puissances sont sous-tirées.

Les condensateurs peuvent être classifiés dans plusieurs catégories de technologies différentes:

Condensateurs diélectriques. Dans les condensateurs diélectriques le champ électrique est stocké soit dans une céramique, soit dans un film polymère tel que par exemple le papier, le polypropylène, le polyéthylène téréphtalate (PET), le polycarbonate ou le polystyrène. Les électrodes peuvent être constituées soit de feuilles d'aluminium, soit de dépôts métalliques sur la surface du film polymère obtenues par évaporation. Dans le polypropylène la rigidité diélectrique maximum est de 800 Vdc/ μm (dans les conditions de température ambiante et de vitesse d'augmentation du champ électrique de 30 Vdc/gm*s). Pour les applications à 70 °C et pour une durée de fonctionnement de 100 000 heures, la valeur typique du champ électrique nominal est environ 240 V/hm. Le domaine de tension des condensateurs à films diélectriques s'élève jusqu'à 5 kVdc. Des tensions plus élevées peuvent bien entendu être atteintes en connectant en série plusieurs condensateurs élémentaires.

Condensateurs électrolytiques. Dans les condensateurs électrolytiques le champ électrique est stocké dans l'oxyde diélectrique qui est obtenu en oxydant la surface de l'électrode métallique sur une épaisseur micrométrique. La conduction entre la surface rugueuse du diélectrique et la surface de l'électrode opposée est assurée par un électrolyte ionique. La couche oxydée possède une rigidité diélectrique d'environ 1000 Vdc/hm mais n'est pas plus épaisse qu'un micromètre. En pratique la tension de travail maximum est de 750 Vdc. Les pertes dans les condensateurs électrolytiques sont plus importantes que dans les condensateurs à film diélectrique. A cela s'ajoute que leur durée de vie est plus brève.

Type de condensateur		ECDL	Electrolytique	Film	Céramique
Rigidité diélectrique	[V/mmm]	1000	1000	700	1000
Epaisseur du diélectrique	[μm]	0,001	1	30	50
Tension nominale max.	[Vdc]	2,5	750	5000	10000
Capacité	[mF]	10 ³ -10 ⁴	10 ¹ -10 ⁴	10 ⁻³ -10 ¹	10 ⁻¹⁰

Tableau I Propriétés principales de condensateurs divers

Condensateurs électrochimiques à double couches. Dans les condensateurs électrochimiques le champ électrique est confiné aux interfaces entre l'électrolyte et les électrodes. Le milieu diélectrique est celui de l'électrolyte qui possède une permittivité diélectrique très élevée. La surface des électrodes est gigantesque, et la distance entre les charges opposées est à l'échelle nanométrique. Le phénomène de double couches aux interfaces entre le liquide ionique et le conducteur électronique a été découvert en 1879 par Helmholtz.

Le tableau I permet de comparer les principales propriétés de ces catégories de condensateurs, entre autres leur plage de capacité et de tension d'utilisation.

Technologie

L'énergie instantanée emmagasinée dans un condensateur est proportionnelle à sa capacité et au carré de la tension appliquée:

$$E_t = \frac{1}{2} C U_{ct}^2 \quad (1)$$

La capacité est proportionnelle à la surface S de l'électrode et à la permittivité diélectrique s du matériel. Elle est

inversement proportionnelle à la distance d séparant les charges opposées:

$$C = \epsilon S/d \quad (2)$$

Les objectifs du développement des condensateurs sont d'obtenir la densité d'énergie la plus haute possible, de manière à réduire au minimum le volume, le poids et les coûts, pour une application donnée. Cela veut dire que la capacité par unité de volume et la tension par unité d'épaisseur (le champ électrique) doivent être augmentées.

Le principe de base pour obtenir un condensateur électrochimique à double couches compétitif est de réunir les performances suivantes: grande conduction ionique de l'électrolyte, grande conduction ionique du séparateur, grande résistance électronique du séparateur, grande conduction électronique des électrodes, grande surface des électrodes, faible épaisseur du séparateur et des collecteurs.

Le condensateur présente une énorme capacité grâce à la taille gigantesque de la surface des électrodes et à la très faible distance séparant les charges opposées dans les interfaces entre l'électrolyte et les électrodes. Sa résistance en série doit être aussi faible que possible de manière à atteindre la plus haute puissance exploitable.

Le condensateur ECDL possède une interface chargeable sur les deux électrodes de part et d'autre du séparateur. Cela implique que la capacité du super-condensateur est deux fois plus petite que celle de l'électrode.

La tension qui peut être appliquée au condensateur est limitée par la tension de dissociation de l'électrolyte. A partir de cette tension, un phénomène d'oxydo-réduction irréversible commence à être actif. Le dégagement gazeux aux électrodes peut faire monter la pression dans la cellule, qui peut à la limite exploser. Pour cette raison il faut prendre garde de travailler en dessous de cette tension limite.

Conception de base de la cellule élémentaire

Une cellule élémentaire est constituée de deux électrodes, d'un séparateur et de l'électrolyte (figure 2).

Electrodes

Les électrodes sont constituées d'une partie hautement conductrice, le collecteur, et d'une partie à surface élevée, le matériel actif. Ce dernier peut être un oxyde métallique, un noir de carbone, un charbon actif, des fibres de carbone, des gels de carbone, des mesocarbons, du graphite, etc. Les électrodes de carbone peuvent avoir des surfaces s'élevant jusqu'à 3000 m² par gramme de matériel. La capacité des électrodes augmente linéairement avec la surface du carbone et peut atteindre des valeurs de 250 F/g.

Séparateur

Les deux électrodes sont séparées par une membrane qui permet aux ions chargés de l'électrolyte de se mouvoir d'une électrode à l'autre, mais empêche les électrons de passer au travers. Cette membrane doit être aussi mince et aussi poreuse que possible. Sa qualité permet de limiter le courant de fuite en assurant une résistance parallèle élevée du système.

Electrolyte

Suivant la puissance requise par l'application, l'électrolyte peut être choisi soit à l'état solide, soit organique, soit aqueuse. Il fournit et conduit les ions d'une électrode à l'autre. La tension de dissociation d'un électrolyte aqueux est de 1,23 Volts. Celle d'un électrolyte organique peut être plus élevée que 2,5 Volts. La densité d'énergie est par conséquent quelques 4 fois plus grande pour un électrolyte organique. Le point faible de ce dernier est sa plus faible conductivité ionique qui réduit ses performances en puissance. L'utilisation d'électrolyte organique complique le processus de fabrication car il faut travailler en milieu anhydre.

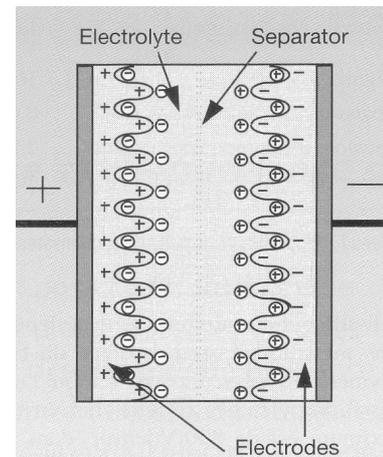


Fig. 2 Schéma d'un condensateur ECDL Pour obtenir une grande capacité, les électrodes doivent avoir une grande surface et les charges opposées doivent être séparées par une distance manométrique. Le séparateur assure l'isolation électronique et la conduction ionique.

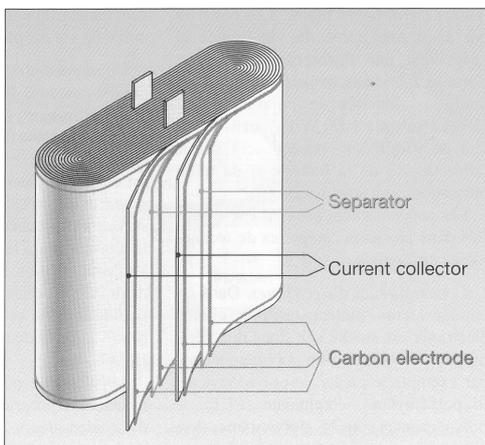


Fig. 3 Bobine de supercondensateur

Méthode de fabrication

La production de ces cellules élémentaires doit être effectuée à l'aide de processus de fabrication simples et économiques. La productivité doit être élevée, de manière à contenir les coûts de fabrication. Ces conditions sont réunies avec la technologie de bobinage, bien connue et maîtrisée dans le domaine des condensateurs films. Les machines bobinent simultanément plusieurs couches de films qui forment un couple de condensateurs (figure 3). Les électrodes de carbones ont été déposées préalablement sur les collecteurs métalliques par des méthodes d'enduction. Les bobines sont en suite séchées et imprégnées avec l'électrolyte. La difficulté principale à résoudre lors du développement de supercondensateurs est de trouver des matériaux bons marchés qui soient électriquement et chimiquement compatible avec l'électrolyte.

Circuit électrique équivalent

Le condensateur peut être modélisé par le circuit électrique dans la figure 4. La résistance en série R_s limite le courant et est responsable des pertes électriques. Pour obtenir des puissances élevées, il est absolument indispensable de disposer d'une résistance en série la plus faible possible.

La résistance parallèle R_p , est responsable de l'auto-décharge du condensateur. Elle doit être aussi élevée que possible pour limiter le courant de fuite. La constante de temps de l'auto-décharge est égale au produit $R_p C$.

L'inductivité parasite L du condensateur peut prendre une certaine importance. En effet si la capacité C est très grande, le produit LC l'est aussi. La fréquence de résonance qui est donnée par

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3}$$

peut devenir très faible.

La tension aux bornes du condensateur U , ne peut être mesurée qu'en englobant la capacité pure et la résistance en série. Au temps zéro, il y a une chute de tension U_s , instantanée due au courant dans la résistance en série R_s $I(0)$. La tension U_{ct} correspond à la force électromotrice. En utilisant un modèle simple de circuit du premier ordre, dans lequel on néglige l'inductance, le processus de décharge dans une résistance de charge R (figure 5) présente une décroissance temporelle exponentielle caractérisée par les équations suivantes:

Constante de temps $\tau = (R+R_s)C$ (4)

La force électromotrice du condensateur

$$U_{ct} = U_0 \exp^{-\frac{t}{\tau}} \tag{5}$$

La tension aux bornes du condensateur

$$U_t = U_0 \exp^{-\frac{t}{\tau}} - i_t R_s \tag{6}$$

Le courant à travers le condensateur

$$i_t = -U_0 \frac{C}{\tau} \exp^{-\frac{t}{\tau}} \tag{7}$$

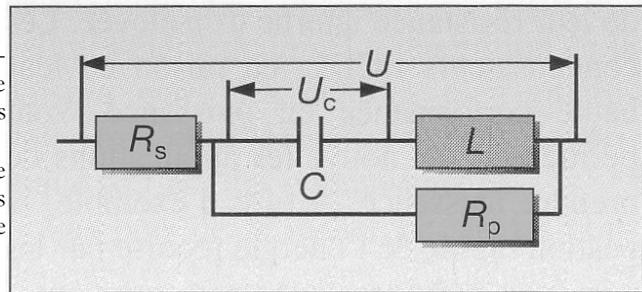


Fig. 4 Circuit équivalent de condensateur ECDL

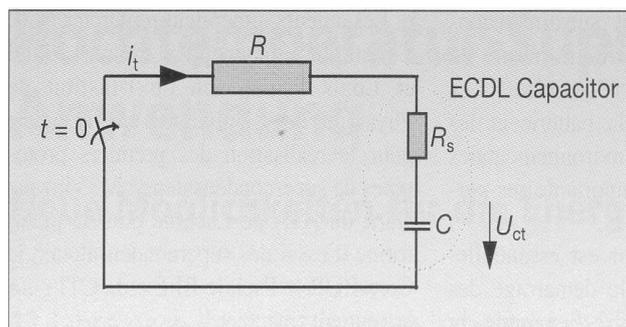


Fig. 5 Circuit de décharge d'un condensateur ECDL

La pratique montre que ce modèle est un peu rudimentaire. Le système se comporte comme un réseau de résistances et de capacités. Ces différentes grandeurs électriques peuvent être représentées en fonction du temps (figure 6).

Puissance

La puissance disponible dépend du temps. La valeur initiale de la puissance de décharge instantanée est donnée par

$$P_0 = \frac{U_0^2}{R} \left(\frac{R}{R+R_s} \right)^2 \tag{8}$$

La puissance moyenne disponible durant la période t est égale à

$$P_\tau = \frac{1}{2} P_0 \tag{9}$$

Pertes électriques

L'importance des pertes dissipées dans la résistance en série R, du condensateur durant une charge ou une décharge électrique du condensateur dépend de la résistance de la charge R et de la résistance interne du condensateur. Pour minimiser ces pertes, R, doit être aussi petite que possible. Avec des résistances de charge plus grandes, la constante de temps sera plus grande aussi et les pertes plus faibles. Les pertes sont données par

$$E_{\text{loss}} = \int_0^\infty R_s i_t^2 dt = C \frac{U_0^2}{2} \frac{R_s}{R+R_s}$$

$$\frac{E_{\text{loss}}}{E_{\text{max}}} = \frac{R_s}{R+R_s} \tag{10 et (11)}$$

Où E_{max} est l'énergie maximum emmagasinée dans le condensateur et E_{Loss} est l'énergie électrique dissipée lors d'une décharge.

Temps de charge	Pertes	Taux d'efficacité	R _L
10 τ'	10%	90%	9 R _S
5 τ'	20%	80%	4 R _S
2 τ'	50%	50%	R _S
τ'	100%	0%	0

Tableau II Pertes électriques en fonction de la résistance de charge RL

Du tableau II, où τ' =R_sC, il est clair que la résistance de la charge R devrait être environ dix fois plus élevée que la résistance interne du condensateur pour limiter les pertes à 10% et jouir d'un taux d'efficacité suffisant.

Vieillessement

Les supercondensateurs ne sont en principe pas le siège de réactions chimiques. Leur vieillissement est donc bien plus lent que celui des batteries. On observe toutefois une diminution de la capacité et une augmentation de la résistance en série avec le temps. A la longue, ces effets ont cependant tendance à se stabiliser.

Applications

Les supercondensateurs peuvent être utilisés dans des applications qui nécessitent soit du stockage d'énergie soit de la puissance instantanée.

La plupart des applications où des condensateurs ECDL sont impliqués ont besoin d'une batterie complémentaire pour assurer un degré d'autonomie suffisant sans atteindre des volumes excessifs. La mise en parallèle d'un condensateur ECDL avec une batterie doit être réalisée d'une manière non triviale, car les batteries et les condensateurs ont un comportement dynamique fondamentalement différent. Les batteries sont des composants de stockage de type faradaique (redox). Lors de leur charge ou de leur décharge la tension reste en première approximation constante. Il y a bien entendu une petite variation de tension lorsque la batterie approche la décharge complète. Les condensateurs sont des composants de stockage de type électrostatique. La tension varie proportionnellement au niveau de charge Q . Les condensateurs électrochimiques à double couche suivent la loi de charge de type électrostatique. Pour gérer cette incompatibilité, un Super Accumulator Module (SAM) est en cours de réalisation au HTA de Lucerne [1].

Véhicule hybride

Le marché du véhicule hybride promet un développement important. En effet, contrairement au véhicule «tout électrique», il a la possibilité d'être produit à des coûts de marché compétitifs. Le véhicule «tout électrique» doit être équipé de 300 kg de batterie Ni-Cd pour avoir une autonomie de 100 km. Cela représente un coût qui double l'investissement du véhicule. Pour preuve, Toyota a mis le feu aux poudres au début de l'année 1998 en lançant son modèle de voiture hybride Prius, à la cadence de 2000 exemplaires par mois, à un prix d'environ 20000 fr.

Les véhicules hybrides possèdent des moteurs électriques alimentés, au travers d'un circuit intermédiaire, par un générateur thermique (gaz, essence ou diesel) ou par un système de stockage électrique. La seconde génération de véhicule hybride pourrait mettre en oeuvre des super-condensateurs en complément des batteries pour d'une part améliorer la puissance de pointe du véhicule, d'autre part pour récupérer l'énergie de freinage. La troisième génération de véhicule hybride devrait voir l'apparition des piles à combustibles. Le prix de ces dernières étant extrêmement élevé, il sera indispensable d'en limiter la puissance. Pour cette raison, le supercondensateur trouvera une place privilégiée pour fournir la puissance manquante. Pour un véhicule léger de 1 tonne, les supercondensateurs peuvent porter la puissance du véhicule de 30 à 60 kW.

L'idée sous-jacente à l'utilisation d'un supercondensateur en complément de la batterie est la suivante:

- lors d'un freinage rapide l'énergie est emmagasinée dans le supercondensateur
- au démarrage l'énergie est sous-tirée au supercondensateur
- en freinage lent (descente) l'énergie est stockée dans la batterie
- le moteur tourne la plupart du temps au même régime

Démarrage

Aujourd'hui le démarrage des moteurs est assuré généralement par des batteries, soit au plomb, soit au nickel-cadmium. A cause de leur grande résistance interne qui limite l'amplitude du courant, elles doivent être largement sur-dimensionnées en énergie pour être en mesure de fournir le courant nécessaire. Les décharges rapides de la batterie et les basses températures environnementales affectent de manière importante ses performances.

Le supercondensateur est essentiellement compétitif pour le démarrage des gros moteurs diesel. A titre d'exemple, on peut citer le cas d'une locomotive diesel qui a besoin d'une batterie au plomb de 1000 kg pour fournir un courant de démarrage de 1000 A sous 72 V. Dans ce cas le démarrage peut être assuré par un supercondensateur de 22 kg. Dans la pratique la batterie assure aussi une fonction de sécurité en fournissant 20 A durant 5 heures. Pour remplir le cahier des charges, il est nécessaire d'ajouter tout de même une batterie de 300 kg. On peut cependant remarquer que les propriétés énergétiques sont offertes par le surdimensionnement, mais ne sont pas forcément nécessaires.

Les véhicules «émission-zéro», complètement électrique, n'ont pas besoin de condensateur ECDL car les batteries, qui sont dimensionnées par la distance d'autonomie, sont suffisamment grosses pour fournir la puissance de pointe.

Conclusion

La combinaison d'un supercondensateur avec une batterie améliore

- la puissance disponible
- les coûts de maintenance
- le taux d'efficacité de la gestion de l'énergie
- la durée de vie du composant.

Dans les applications de transport, les condensateurs ECDL permettent d'obtenir des réductions de poids très importantes.

Les auteurs aimeraient remercier MM. Christophe Emmenegger, Andreas Züttel et Louis Schlapbach de l'Institut de Physique de l'Université de Fribourg pour la réalisation des premiers prototypes de supercondensateurs; M. Vinzenz Härrli du HTA de Lucerne pour la plateforme d'essai des supercondensateurs; la Cree-RDP, le Psel, le BFE et la CTI pour le soutien financier.

Cet article sera présenté lors d'un cycle de séminaires ETG qui aura lieu à l'EPF Lausanne le 28.10., le 11.11. et le 25.11.99 (voir les pages ETG-News).

Bibliographie

- [1] V. Härrli: Superkapazitäten revolutionieren Energiespeicher. Bulletin ASE/UCS 90(1999)1, 25.
- [2] A. Yoshida et al.: An Electric Double-Layer Capacitor with High Capacitance and Low Resistance. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology 15(1992)1, 133.
- [3] V. Härrli, G. Marinkovic: Innovative Technologien im Einsatz bei Hybrid-Fahrzeugen, Blauer Engel wird flügge. Megalink (1997)6, 20.
- [4] R. Miller: Electrochemical Capacitors for Hybrid Vehicles. The 7th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, Deerfield Beach, 7(1997).
- [5] S. M. Halpin et S. R. Ashcraft: Design Considerations for Single-Phase Uninterruptable Power Supplies Using Double-Layer Capacitors as the Energy Storage Element. IAS 96, 4(1996), 2396.
- [6] S. M. Halpin et al.: Application of Double-Layer Capacitor Technology to Static Condensers for Distribution System Voltage Control. IEEE Transactions on Power Systems, 11(1996)4, 1899.
- [7] T. S. Davies et al.: DC/DC Power Conversion for Supercapacitor Energy Storage System. 31st Universities Power Engineering Conference, 1(1996), 289.
- [8] R. L. Spyker et R. M. Nelms: Double-Layer Capacitor/DC-DC Converter System Applied to Constant Power Load. IECEC 96, 31/1(1996), 255.
- [9] B. E. Conway: Electrochemical Supercapacitors, Scientific Fundamentals and Technological Application. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.

Superkondensatoren für die Leistungselektronik

Die Speicherung elektrischer Energie in Batterien oder Kondensatoren ist für zahlreiche Anwendungen der Leistungselektronik nicht optimal. Während Batterien hohe Energiedichten, aber geringe Leistungsdichten aufweisen, erlauben umgekehrt Kondensatoren die Entnahme hoher Leistungen bei allerdings unzureichender Energiedichte. Superkondensatoren speichern elektrostatische Energie in der elektrochemischen Doppelschicht des Elektrolyten und zeichnen sich durch vergleichsweise hohe Energiedichten von bis zu 15 Wh/kg und Leistungsdichten von maximal 2000 W/kg aus. Obwohl diese Energiedichte immer noch zehnmal kleiner als bei Batterien ist, könnten der wartungsfreie Betrieb und die grosse Lebensdauer dieser Bauteile zu neuen Anwendungen insbesondere in der Fahrzeugtechnik führen.