HAL
open science

ELEMENTS D"ETUDE D"UN SYSTEME DE STOCKAGE DE "ENERGIIE ELECTRIIQUE : LE SUPERCONDENSATEUR

Emmanuel Hoang, Bertrand Revol, Gilles Feld, Denis Pénard

To cite this version:

Emmanuel Hoang, Bertrand Revol, Gilles Feld, Denis Pénard. ELEMENTS D"ETUDE D"UN SYSTEME DE STOCKAGE DE "ENERGIIE ELECTRIIQUE : LE SUPERCONDENSATEUR. La Revue 3E.I, 2007, pp.20. hal-00533011

HAL Id: hal-00533011

https://hal.science/hal-00533011

Submitted on 4 Nov 2010

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.

ELEMENTS D'ETUDE D'UN SYSTEME DE STOCKAGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE : LE SUPERCONDENSATEUR

Emmanuel Hoang❶, Gilles Feld❶, Bertrand Revol❶, Denis Pénard❷
❶ Ecole Normale Supérieure de Cachan, département E.E.A.
❷ Institut Universitaire de Technologie de Cachan
hoang@satie.ens-cachan.fr ; feld@eea.ens-cachan.fr ; revol@satie.ens-cachan.fr ; denis.penard@u-psud.fr

Résumé : *Dans les véhicules où la traction est réalisée, ou aidée, par une motorisation électrique, apparaît un nouvel élément de stockage de l'énergie électrique : le supercondensateur (ultracapacitor). Dans cet article est présenté un convertisseur continu-continu qu'il est indispensable d'associer à ces supercondensateurs. Dans une première partie, une modélisation uniquement de ces derniers est proposée. Dans une deuxième partie, nous nous intéressons au dimensionnement des éléments du hacheur. Pour le contrôle des flux d'énergie et pour la commande rapprochée des transistors de puissance, nous utilisons un nouveau type de microcontrôleur : le PSOC. Nous présenterons dans la dernière partie les avantages de ce composant et ses possibilités.*

1 Introduction

Dans un véhicule automobile à motorisation hybride (thermique – électrique), le stockage de l'énergie électrique peut être réalisé avec une batterie composée de 228 éléments Ni-MH (Nickel Métal Hydrure) connectés en série. La masse totale est de 52 kg. A pleine charge, la tension est de 300 V et la capacité est de 6,5 Ah. La résistance interne de la batterie a pour valeur R_{int} = 0,46 Ω. La puissance maximale théorique que peut fournir la batterie est de 50 kW ($U_0/4\ R_{int}^2$). S'il on considère le courant maximum à la décharge (80 A), la puissance maximale n'est plus que de 24 kW.
Avec 120 supercondensateurs (SC) de 350 F – 2,5 V connectés en série, la masse est de 7,2 kg et la puissance que l'on peut obtenir est de 28 kW (3,9 kW / kg). Par contre l'énergie stockée n'est que de 36 Wh (1950 Wh pour la batterie Ni-MH de 52 kg).
L'énergie nécessaire pour accélérer le véhicule, dont la masse est de 1400 kg, de 0 à 100 km/h est de 150 Wh. Cette valeur est de 38 Wh, pour passer de 0 à 50 km/h.

2 Constitution

D'après [3] : Le stockage de l'énergie électrique dans les supercondensateurs se fait sous forme électrostatique, au travers d'une accumulation de charges ioniques dans d'interface électrode/électrolyte. Cela donne des potentialités remarquables comparativement aux batteries ou aux condensateurs.

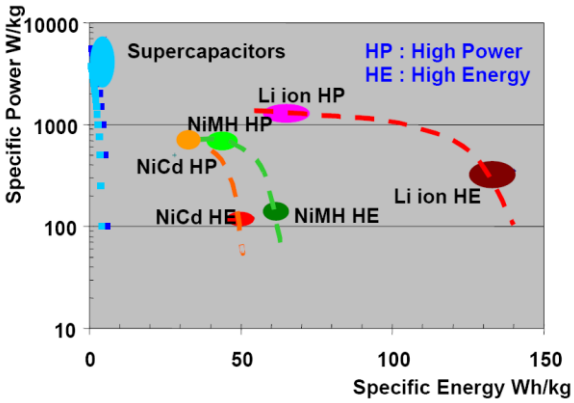

Fig. 1 : Diagramme de Ragon

3 Eléments de modélisation

Afin de nous ''familiariser'' avec ces ''nouveaux'' éléments, nous avons entrepris des études simples à mettre en œuvre avec le matériel disponible dans le laboratoire.
Pour notre étude, nous avons utilisé des supercondensateurs de 350 F – 2,5 V de chez Maxwell Technologies SA [5]. La masse d'un élément est de 60 g et son prix est d'une dizaine d'euros. Nous les avons connectés en série par groupe de six et toutes les connexions sont accessibles pour une analyse du comportement de chaque élément.

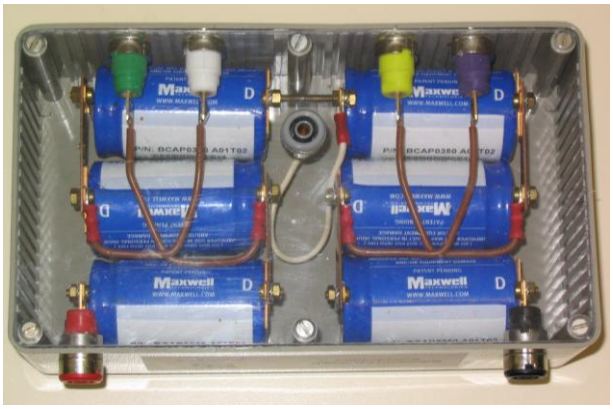

Fig. 2 : Disposition des six supercondensateurs.

3.1 Capacité de stockage

Dans un premier temps, nous avons étudié le comportement ''statique'' des SC. Pour cela, à l'aide d'une alimentation stabilisée, nous avons effectué une charge à courant constant (voir fig. 3) de 12 SC de valeur 350 Farad chacun connectés en série et nous avons déterminé l'énergie stockée par intégration de la puissance instantanée. Calcul de la capacité équivalente avec :

$$W = \frac{1}{2} C_{eq} V^2$$

A la tension maximale de 30 V (12 x 2,5 V), l'énergie stockée est de 12,8 kJ soit 3,5 Wh.
Pour 12 supercondensateurs, la valeur de la capacité varie de 22 Farad, sous une tension de 10 V, à 30 Farad, sous 30 V(voir fig. 4). Nous avons déterminé une dispersion de ± 7 % des capacités, en mesurant la tension aux bornes de chacun des douze éléments mis en série.

Il faut noter que dans notre cas, étant donné que tous les SC sont en série, la dispersion des valeurs des capacités ne pose pas de problème, car elle se traduit par des disparités sur les tensions mais dans des proportions acceptables. Dans le cas d'une mise en parallèle des SC, cela se traduit par des disparités en courant qui peuvent êtres pénalisantes.

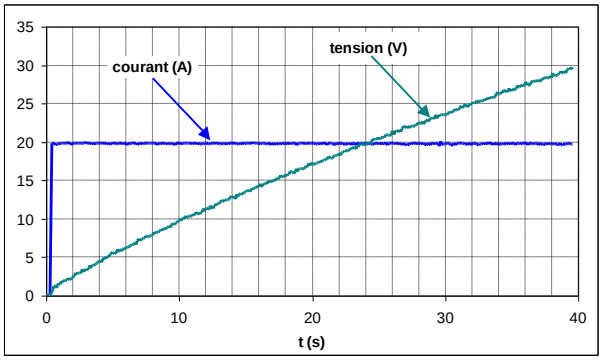

Fig. 3 : Charge à courant constant

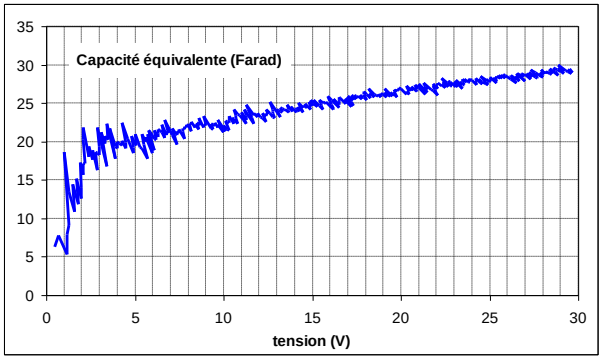

Fig. 4 : Détermination de la capacité équivalente

3.2 Décharge dynamique

Le deuxième point étudié est le calcul de l'énergie qu'il est possible de récupérer en fonction de la puissance demandée. Pour faire ce calcul les équations nécessaires sont :

$$v_{SC} = \frac{1}{C_{SC}} \int i_{SC}\, dt + ESR_{SC}\, i_{SC}$$

$$i_{SC} \text{ tel que : } p_{SC} = v_{SC}\, i_{SC} = p_0 \text{ et } p_0 < 0$$

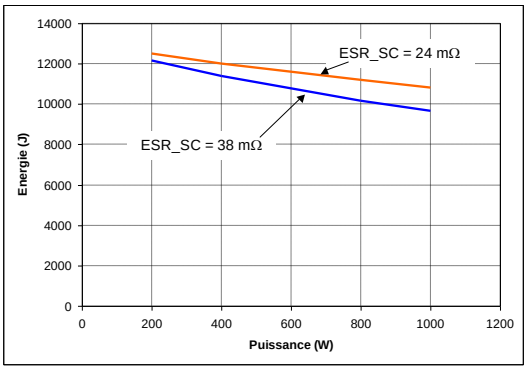

Fig. 5: Capacité énergétique en fonction de la puissance demandée pour deux valeurs de la résistance série.

R_q : La résolution des ces équations demande une méthode numérique.

On peut voir que la prise en compte des différents éléments dissipatifs va être déterminante sur la capacité de décharge dynamique des supercondensateurs.

3.3 Modèle dynamique

Afin de déterminer un modèle dynamique de l'ensemble des SC en série, en vu de leurs associations avec un convertisseur, des impulsions de courants sont injectées à l'aide d'un hacheur (cellule de commutation bidirectionnelle en courant) associé à un correcteur à hystérésis. La tension du bus DC est ajustée à 50 V avec une alimentation stabilisée. Une inductance de lissage est mise en série avec les SC. Deux essais ont été effectués avec une tension du bus DC de 50 V. Le premier à ondulation du courant ''minimale'' et à 'forte'' inductance (fig. 6), le second à ondulation ''maximale'' et à ''faible'' inductance (fig. 7).

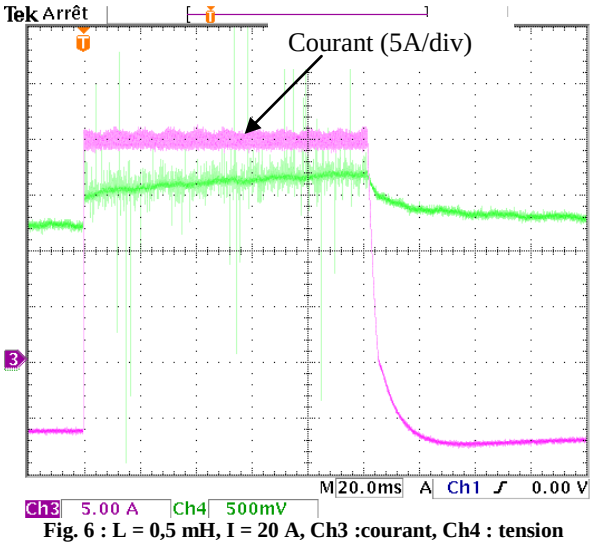

Fig. 6 : L = 0,5 mH, I = 20 A, Ch3 :courant, Ch4 : tension

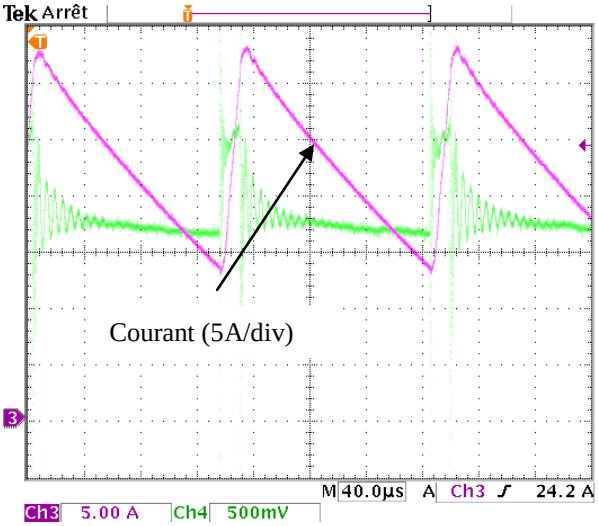

Fig. 7 : L = 30 µH, I = 20 A, Ch3 :courant, Ch4 : tension

Le modèle de l'ensemble des supercondensateurs (SC) est équivalent à la mise en série d'un condensateur (C_{SC}), d'une résistance (ESR_{SC}) et d'une inductance (l_{SC}).
pour 6 SC : C_{SC} = 60 F ; ESR_{SC} = 12 mΩ ; l_{SC} = 0,5 µH.

Rq : La valeur de la résistance série (ESR_{SC}) peut être obtenue à l'aide de la documentation technique du fabriquant.

4 Convertisseur associé

4.1 Rôle du convertisseur

L'énergie stockée dans les supercondensateurs est fournie (ou récupérée) à une source de tension continue, généralement un bus de tension DC, sur lequel est connecté des charges (hacheur + mcc ou onduleur + MS ou MAS). Cette tension est maintenue constante pour un ''bon'' fonctionnement des charges. La variation d'énergie des SC se traduit par une variation de tension à leurs bornes. La variation d'énergie s'exprime par :

$$\Delta W = \frac{1}{2} C_{SC} \left(V_{max}{}^2 - V_{min}{}^2 \right)$$

S'il on veut extraire 90 % de l'énergie maximale stockée, il faut que :

$$V_{min} = \frac{1}{3} V_{max}$$

Cette variation de tension nécessite d'intercaler un convertisseur DC-DC entre le bus DC et les SC.

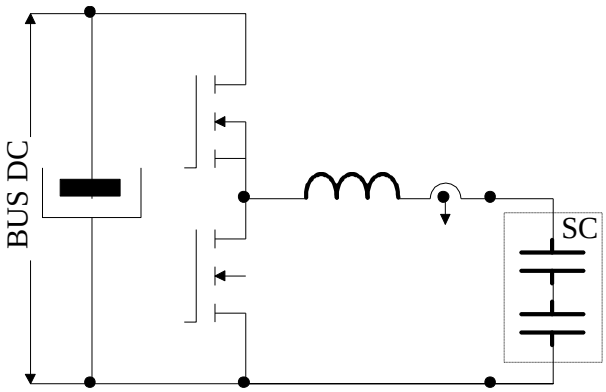

Fig. 8 : Convertisseur DC-DC associé aux SC

Cette structure de convertisseur, qui est la ''plus instinctive'', car les SC sont placés du côté ''basse'' tension, est cependant porteuse de contraintes contradictoires. En effet, l'utilisation ''optimale'' des SC nécessite des pointes de courant, qu'ils doivent accepter thermiquement, mais qui sont néfastes pour le dimensionnement de l'inductance de lissage et pour le ou les condensateurs du bus DC.
Ces deux éléments sont des contraintes fortes à prendre en compte lors du dimensionnement des éléments du convertisseur.

4.2 Dimensionnement des éléments

Pour l'étude des supercondensateurs, il est indispensable de leurs associer un convertisseur. Du dimensionnent de celui-ci dépendra, finalement, les performances des SC, car on considère souvent et peut être à tort les convertisseurs comme idéaux et non porteurs de paramètres pouvant influencer le comportement global d'un système de conversion d'énergie.
Pour le dimensionnement des éléments, les contraintes sont les pertes directes ou indirectes associées, les échauffements et les volumes.
Nous nous sommes imposés que le volume du convertisseur soit du même ordre (ou moindre si possible) que celui des supercondensateurs.
Nous avons dégagé un élément de dimensionnement critique qui est le <u>courant maximal</u> que l'on est capable de commuter. Cette valeur, qui tient plus du savoir faire, <u>détermine la valeur de la puissance maximale au point le plus défavorable</u>, c'est à dire quand la tension aux bornes des SC est égale à V_{min}. Dans le cas de décharge à puissance constante : $P_{max} = V_{min}\, I_{SC_max}$.

Nous nous sommes limités à une valeur de ± 100 A, ce qui donne pour 12 SC : V_{min} = 10 V ; P_{max} = 1 kW.

Mais pour le test de la décharge à puissance constante (voir fig. 5), la valeur du courant maximal vient encore dégrader la capacité de décharge dynamique, cette fois ci de l'ensemble SC – convertisseur.
En effet avec :

$$\Delta W = \frac{1}{2} C_{SC} \left(V_{max}{}^2 - V_{min}{}^2 \right)$$

Et $$P_{max} = V_{min}\, I_{SC_max}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta W = \frac{1}{2} C_{SC} \left(V_{max}{}^2 - \left(\frac{P_{max}}{I_{SC_max}} \right)^2 \right)$$

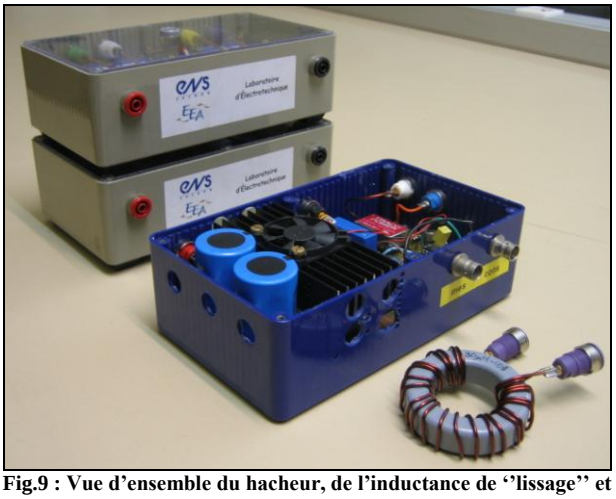

Fig.9 : Vue d'ensemble du hacheur, de l'inductance de ''lissage'' et des deux boites de six supercondensateurs.

Pour les pertes indirectes, l'élément principal est l'ondulation de courant dû au mode d'alimentation.

L'asservissement de courant se faisant à l'aide d'un correcteur à hystérésis, c'est l'ondulation de courant qui est fixée.

Pour le calcul des pertes Joule, le courant efficace dans les SC est donné par :

$$I_{SC_eff}{}^2 = I_{SC}{}^2 + \frac{\Delta I^2}{12}$$

I_{SC} étant le courant ''moyen'' dans les SC.

le courant efficace dans les condensateurs du bus DC :

$$I_{C_DC_eff}{}^2 = \alpha(1-\alpha) I_{SC}{}^2 + \alpha \frac{\Delta I^2}{12}$$

avec $\alpha = \frac{v_{SC}}{V_{DC}}$

v_{SC} = tension aux bornes des SC

V_{DC} = tension du bus DC

Pour le calcul des pertes de conduction dans les transistors, c'est le même courant que dans les SC et pour les pertes de commutation, nous avons :

$$P_{com} = 2\,\frac{1}{2}\,V_{DC}\,I_{SC}\,(t_r + t_f)\,f_d$$

$$f_d = \frac{\frac{v_{SC}}{V_{DC}}\left(1 - \frac{v_{SC}}{V_{DC}}\right) V_{DC}}{L\,\Delta I}$$

<u>Application numérique :</u>

- Condensateur du bus DC : 4700 µF / 63 V (2 en //)
  ESR par condensateur du bus DC = 50 mΩ
- Transistor MOSFET 180NE10
  R_{DSON} = 4,5 mΩ
  $t_r + t_f$ = 600 ns
- Super condensateur de 350 Farad (12 en série)
  ESR par SC = 3,2 mΩ
- Inductance de lissage : L = 30 µH ; R_L = 15 mΩ

Fig.10 : Vue de l'inductance de ''lissage''

Pour l'inductance, nous avons utilisé un tore de diamètre extérieur de 57,2 mm, de diamètre intérieur de 35,6 mm et de hauteur 14 mm. Le matériau utilisé est du MPP 55107, la perméance est de 200 nH et l'induction à saturation est de 750 mT. Le nombre de spire est de 12, ce qui permet d'avoir un courant de saturation magnétique de l'ordre de 60 A.

Le choix de l'inductance a été fait en fonction de son volume et des répercutions sur la fréquence de découpage.

Le choix de l'ondulation de courant s'est fait en fonction des répercussions sur les pertes supplémentaires et surtout en fonction de l'électronique de commande. En effet, nous avons utilisé une sonde de courant LEM LAS_50-TP. Cette sonde de courant, alimentée en 5 V, permet de mesurer des courants de ± 150 A. Avec un hystérésis électronique de 200 mV, cela se traduit par une ondulation de courant de 12 A. Compte tenu du ''bruit'' électronique, l'ondulation de courant a été ajustée à ± 20 A.

4.3 Résultats expérimentaux

Afin de tester le hacheur et la boucle d'asservissement de courant, nous imposons des impulsions de courant en consigne. Afin que l'alimentation du côté bus DC puisse fournir les pointes de courant, nous lui avons placé en parallèle 24 supercondensateurs de 350 Farad en série. Du côté de la charge, ce sont 12 supercondensateurs de 2600 F qui sont placés en série (voir Fig. 17). Les essais présentés à la figure suivante ont été réalisés avec un bus DC à 60 V et avec une consigne de courant à 80 A.

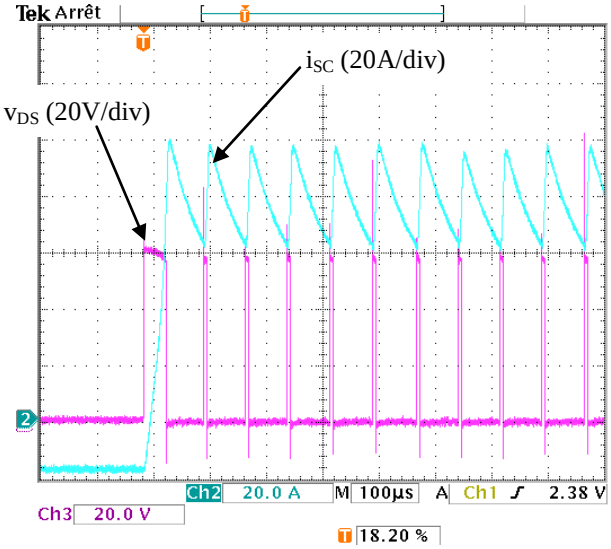

Fig.12 : essai de la boucle de courant. Courant dans les SC (i_{SC}) et tension drain source aux bornes du transistor du ''bas'' (v_{DS}).

En couplant les caractéristiques thermiques avec les simulations temporelles, il est possible de calculer les échauffements en fonction par exemple, de la valeur de l'inductance de lissage ou de la valeur de l'ondulation de courant. Les caractéristiques thermiques des différents éléments sont :

Par élément	R_{th}	C_{th}
Condensateur du bus DC	20 °C/W	45 J/°C
Super Condensateur	10 °C/W	75 J/°C
Dissipateur thermique	0,65 °C/W	300 J/°C

Le schéma de modélisation est donné en annexe.

5 Bilan énergétique

L'épreuve de ''vérité'' est finalement la capacité énergétique dynamique de l'ensemble constitué des supercondensateurs ET du hacheur.
Test de décharge sous 40 V côté bus DC et V_{SC0} = 30 V.

- Pour 104 W, pendant 50,8 s ⇒ 9347 J
- Pour 400 W, pendant 21,2 s ⇒ 8480 J
- Pour 800 W, pendant 7,44 s ⇒ 5952 J

Sur les deux figures suivantes, sont présentées la tension du bus DC (Ch2), le courant dans les SC (Ch4) et la tension aux bornes des SC (Ch3).

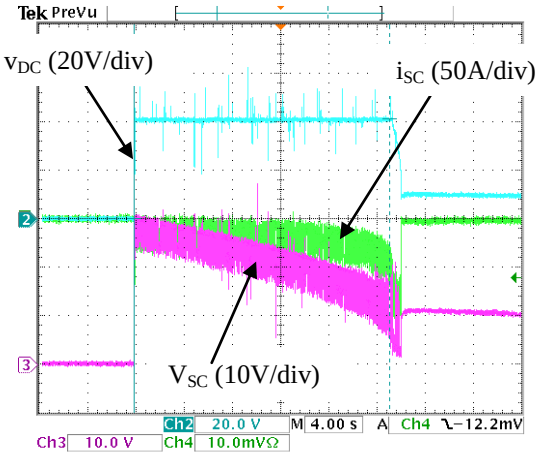

Fig.13 : Test de décharge sous 10 A du côté de bus DC

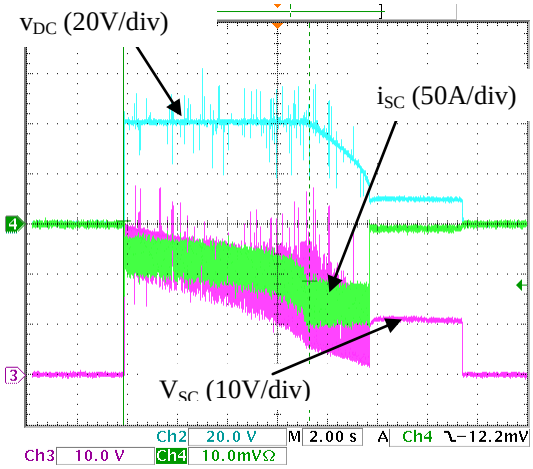

Fig.14 : Test de décharge sous 20 A du côté de bus DC

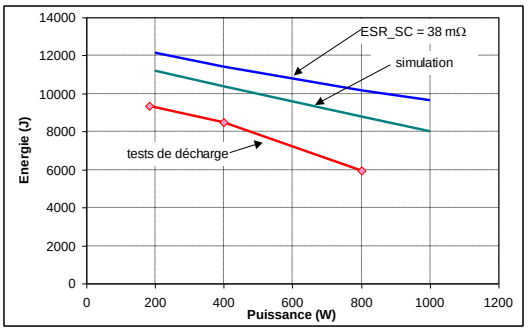

Fig.15 : Tests de décharge dynamique

6 Application(s)

6.1 Récupération d'énergie au freinage d'un véhicule hybride

Dans [8], les auteurs présentent un système de stockage d'énergie pour la récupération de l'énergie cinétique d'un véhicule de 1500 kg se déplaçant à 60 km/h.
Ce système de stockage utilise 27 supercondensateurs de 2700 F chacun. La tension maximale aux bornes des SC est de 56 V et le courant est limité à 400 A.
Au moment du freinage, la tension initiale des SC est de 28 V, ce qui permet d'absorber une puissance maximale de 11,2 kW et l'énergie récupérable est de 117 kJ.
Les auteurs ont, en autre, mesuré le rendement du système de récupération et les énergies perdues sur un cycle de charge/décharge en fonction de la puissance instantanée et du niveau de tension du bus DC. L'ordre de grandeur du rendement énergétique se situe entre 50 et 75 %.

6.2 Monte charge

Soit une masse de 20 kg, que l'on déplace verticalement sur une distance de 1 m à la vitesse de 1,5 m/s.
L'accélération est de 7,5 m/s^2. Les phases d'accélération et de freinage durent 200 ms, la phase à vitesse constante 500 ms. La puissance maximale est de 525 W et l'énergie nécessaire au déplacement, sans tenir compte des pertes, est de 210 J. Il faut noter que cette énergie doit être fournie à la masse lors d'une montée, mais est entièrement récupérable lors d'une descente.
Pour ce système, si l'on considère les pertes négligeables, dix SC de 10 F – 2,5 V en série peuvent suffire.
Compte tenu de la difficulté d'associer en parallèle deux source de tension, nous envisageons que le bus DC (de 48 V par ex.) soit alimenté par les SC associés à leur convertisseur DC/DC présenté dans la partie 4 et que l'alimentation depuis le réseau d'énergie se fasse via un redresseur à diode et un hacheur abaisseur régulé en courant directement au niveau des SC. Cette alimentation, est dimensionnée en puissance uniquement pour fournir les pertes du système complet.

6.3 Scooter électrique

Dans [9], les auteurs présentent un ensemble novateur hacheur – supercondensateurs ayant pour but de soulager la batterie, lors des phases transitoires, pour une motorisation de scooter électrique.
La batterie NiCd, composée de trois éléments de 6 V – 100 Ah, peut être amenée à fournir jusqu'à 3500 W lors des phases d'accélération. Grâce à l'assistance énergétique (SC) la puissance maximale fournie par la batterie est limitée à 1200 W, ce qui a pour conséquence d'augmenter la durée de vie de cette dernière.
Les auteurs présentent une structure et la commande associée de convertisseurs dc-dc entrelacés permettant de minimiser le volume des inductances ainsi que les pertes.

6.4 Tramway

Dans [1], les auteurs envisagent une alimentation de tramway par « biberonnage » nécessitant un double stockage. Des batteries de supercondensateurs installées dans des stations fixes reçoivent de l'énergie du réseau et permettent au passage de la rame de recharger les réservoirs d'énergie installés dans le véhicule sur un temps limité (inférieur à 20 s). Dans cette application, il est nécessaire d'installer environ 2400 supercondensateurs (1800 F_ 2,5 V) dans le véhicule et autant dans chaque station. Le nombre de supercondensateurs élevé conduirait aujourd'hui à un coût prohibitif.

Une autre application [1] possible dans les transports terrestres est la compensation des chutes de tension en des points sensibles du réseau. Sur l'exemple considéré, l'installation en bout de ligne de 6480 supercondensateurs (1800 F_ 2,5 V) représentant un volume de 1,9 m^3 et une masse de 2,5 t permettrait de limiter la chute de tension à 10 % alors qu'elle peut atteindre aujourd'hui 50 % lors du démarrage simultané de trois rames.

Une dernière application proposée [10] est l'assistance énergétique pour une locomotive diesel-électrique. Sur certains parcours à faible potentiel de trafic, l'électrification des lignes ne se justifie pas. L'utilisation dans ces conditions de locomotives diesel-électrique ne disposant pas de moyen de stockage réversible est pénalisant sur la consommation surtout sur des trajets en région montagneuse. Sur un parcours type, l'utilisation de 15000 éléments de 2600 F permettrait de réduire la puissance du moteur thermique dans un rapport de deux. Le gain en consommation serait de 50 % et ceci sans perte de performance. Le seuil de rentabilité serait franchi au bout de dix années.

7 Electronique de commande

La première version de l'électronique de commande est entièrement analogique (à l'ancienne). La boucle de courant est réalisée avec un correcteur à hystérésis (LM311) et la boucle de tension avec un correcteur PI (AOP TS921, qui a la particularité d'être '' rail to rail''). Les temps morts de commutation (2 µs) sont réalisés avec des circuits R-C-D et la commande rapprochée des transistors utilise des opto-coupleurs TLP 250 alimentés par des convertisseurs DC-DC isolés 5V / 15 V / 1 W. Pour finir, nous avons utilisé un convertisseur DC-DC 18-72 V / 5 V / 6 W pour l'alimentation de la partie électronique, la prise d'énergie étant faite à la fois au niveau des SC que du bus DC (OU à diodes) et la plage d'entrée de la tension 18-72 V permet de s'adapter à un grand nombre de configurations.

La ''simplicité'' de cette réalisation a une certaine limitation. La principale est, nous semble-t-il, l'hystérésis ''importante'' qu'il est nécessaire d'introduire compte tenu du ''bruit'' électronique.

Il serait intéressant de réaliser une correction analogique avec correcteur de type PI et M.L.I. à 15-20 kHz.

Il serait encore plus intéressant de réaliser cette modification en intégrant toute la partie électronique à l'aide d'un nouveau type de micro-contrôleur : le PSoC. Deux réalisations de hacheurs fonctionnent avec des PSoC et sont contrôlés par un bus de terrain I2C en temps réel (consigne courant, tension bus DC, gains des correcteurs).

Nous tenons à remercier messieurs Jean Marie Désagulier et David Du pour leurs savoirs faire quant à la réalisation des différents montages d'électronique de puissance et d'électrotechnique.

8 Conclusion

Nous avons présenté, dans cet article, un élément de stockage de l'énergie électrique adapté aux systèmes électriques où les régimes de fonctionnement transitoires occupent une place importante dans les cycles de fonctionnement. Cet élément, le, ou plutôt, les supercondensateurs est idéal pour fournir ou stocker l'énergie cinétique et potentielle des systèmes mécaniques. Nous avons présenté quelques exemples d'application afin de fournir des grandeurs numériques sur les énergies stockables et les puissances mises en jeu. Cependant, il est indispensable d'associer à ces supercondensateurs un convertisseur statique pour compenser les inévitables variations de tensions aux bornes de ces derniers. Généralement, la demande de puissance maximale se fait lorsque les supercondensateurs sont à leur niveau de charge le plus défavorable, ce qui signifie qu'il faut être capable de commuter des courants formidables et finalement, la difficulté de la mise en œuvre de ces supercondensateurs est plus un problème de dimensionnement et de conception de convertisseur statique DC-DC. Il nous semble, aussi, important d'étudier et de connaître la thermique des supercondensateurs afin de déterminer au mieux le courant limite (amplitude et durée) car c'est ce dernier qui va borner la puissance convertible du système de stockage.

9 Bibliographie

[1] Dr. P. Barrade, D. Hotellier, Prof. A. Rufer
Apport des supercondensateurs dans le transport terrestre : une meilleure gestion de l'énergie
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
(http://leiwww.epfl.ch ; http://www.epfl.ch)

[2] Bernard Multon, Jacques Ruer
Stocker l'énergie : oui, c'est indispensable et c'est possible. ! Pourquoi ? Où ? Comment ?
Publication du club ECRIN : www.ecrin.asso.fr

[3] Ph. Desprez, G. Barrailh, P. Lavaur, M. Bariand, C. Jehoulet (SAFT), S. Raël, B. Davat (INPL / GREEN)
SAFT Supercapacitors cells and batteries
Congrès EPE 2003 - Toulouse

[4] M.Y. Ayad, S. Raël, B. Davat

Hybrid power source using supercapacitors and batteries. Congrès EPE 2003 – Toulouse

[5] A. Schneuwly, G. Sartorelli, J. Auer, B. Maher
Ultracapacitors revolutionize the power electronic world
Maxwell Technologies SA, www.maxwell.com

[6] Hamid Gualous, Rolland Gallay, Alain Berthon
Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée : applications transport.
Revue REE, n°8, pp 83-90, septembre 2004.

[7] J. F. Fauvarque, A. Laforgue, C. Sarrazin, P. Simon
Supercondensateurs hybrides. Perspectives d'application aux véhicules.
Revue REE, n°10, pp 29-33, novembre 2004.

[8] Z. Cerovský, P Mindl
Regenerative braking by electric hybrid vehicles using super capacitor and power splitting generator
Congrès EPE 2005 – Dresden, Germany.

[9] B. Destraz, P. Barrade and A. Rufer
A new solution for increasing the efficiency of an electric scooter with supercapacitors through a novel interleaved multi-channel dc/dc converter
Congrès Electromotion 2005 – Lausanne, Suisse.

[10] : B.Destraz
Assistance énergétique pour une locomotive diesel-électrique avec un stockage supercapacitif
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
http://www.epfl.ch

10 Annexe

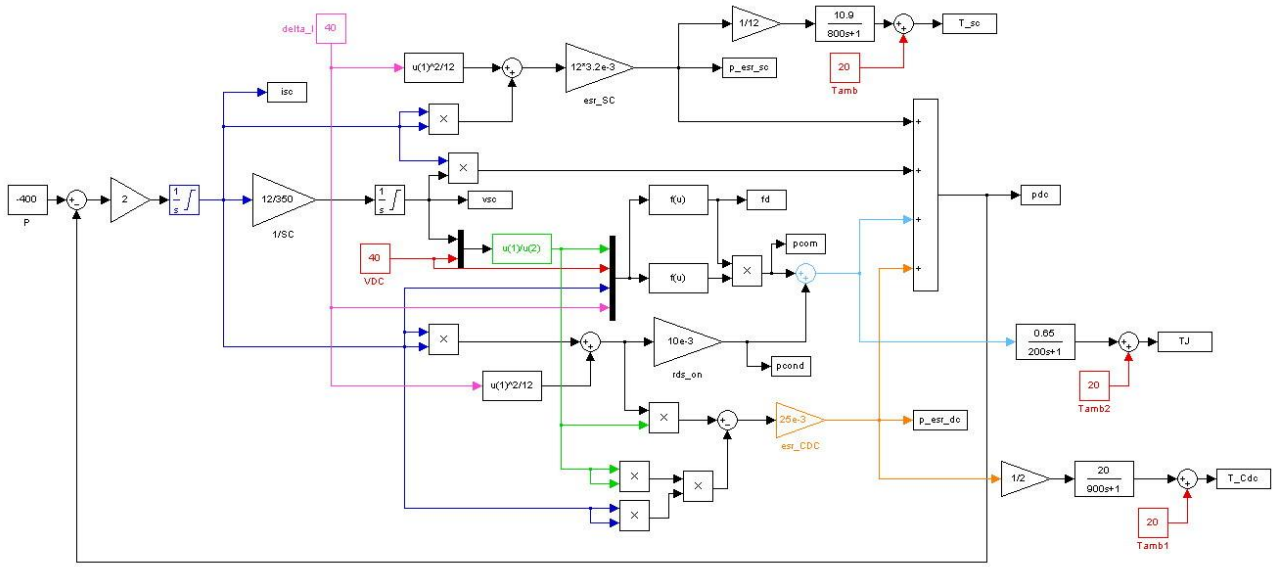

Fig. 16 : schéma de modélisation pour l'étude des cycles de fonctionnement.

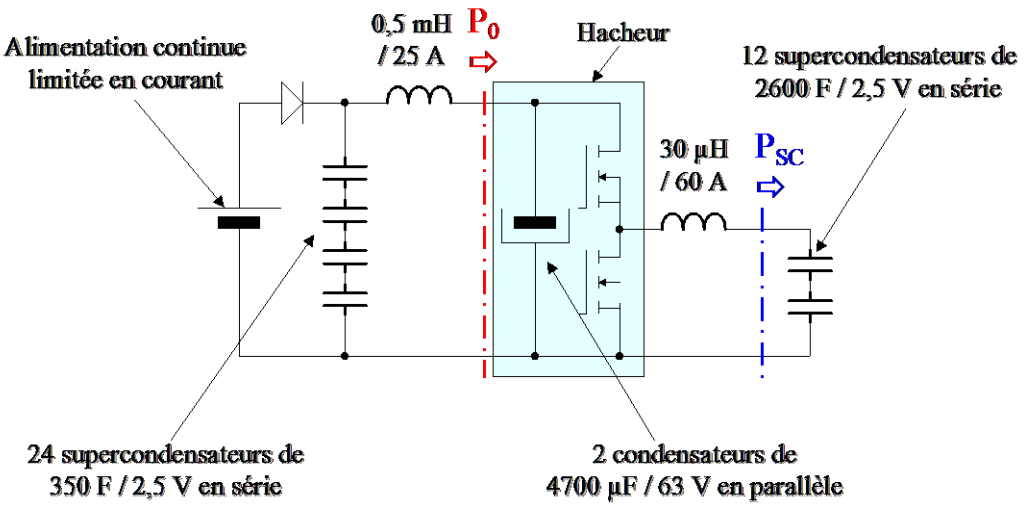

Fig. 17 : schéma du montage pour l'étude des cycles de fonctionnement.