

Alimentation par biberonnage solaire photovoltaïque d'une chaîne de motorisation électrique

Abdesslem Djerdir^{*}, Khadidja El kadri et Abdellatif Miraoui

L2ES - Laboratoire en Electronique et Electrotechnique et Systèmes
UTBM Bât – F, Rue Thierry Mieg, 90010 Belfort Cedex – France

(reçu le 18 Juin 2005 - accepté le 21 Juin 2006)

Résumé - Le but de ce travail est d'étudier l'association des supercondensateurs et des générateurs photovoltaïques pour alimenter un véhicule électrique. Afin de classer ces composants, on a proposé deux modèles électriques à partir de leurs comportements physiques. Deux convertisseurs DC-DC sont proposés pour la gestion de l'énergie entre le générateur photovoltaïque, les supercondensateurs et la barre DC du véhicule électrique. La simulation de leurs fonctionnalités donne de bons résultats et montre la possibilité de cette nouvelle application.

Abstract - The aim of this work is to study the association of the ultracapacitors and photovoltaic generators to feed an electrical vehicle. In order to size these components, two electrical models have been proposed starting from their physical behaviours. Two DC-DC converters for the energy management between the photovoltaic generator, the ultracapacitors and the DC bus of the electrical vehicle, have been proposed. The simulation of their functionalities gives good results and shows the possibility to build this new application.

Mots clés: Véhicule électrique - Supercondensateurs - Convertisseur DC-DC - Générateur photovoltaïque.

1. INTRODUCTION

Le développement technologique actuel des batteries n'assure, au véhicule électrique, qu'une autonomie très limitée par rapport aux véhicules classiques. De plus, faire subir aux batteries des régimes de fortes fluctuations de puissances, altère énormément leur fiabilité et leur durée de vie. Ces inconvénients peuvent être diminués en insérant une nouvelle source énergétique capable de fournir des pics de puissance au moment opportun. Les supercondensateurs, par leur forte densité de puissance et leur grande aptitude à se charger et se décharger, sont une des solutions réalistes pour ce problème [1].

En effet, les équations sur les condensateurs montrent que l'obtention d'une capacité importante est tributaire de la surface des électrodes, de la permittivité du matériau diélectrique entre les électrodes et de la distance entre celles-ci. Afin d'obtenir des capacités nominales élevées, il faut donc avoir : une très grande surface, une très grande permittivité relative, et une distance entre les électrodes très faible.

Dans ces conditions, la capacité pourra être importante. Si, par ailleurs, la tension entre les électrodes est grande, alors l'énergie stockée deviendra importante. Le graphique de la figure 1 montre les domaines énergie-puissance pour les batteries, condensateurs, et supercondensateurs. Il est visible que les supercondensateurs se situent dans un domaine intermédiaire. Les applications sont typiquement d'appoint: source auxiliaire de puissance pour le véhicule électrique, lisseurs pour les réseaux de distribution (micro-coupures)...

Dans la référence [3], les auteurs décrivent un train destiné au transport urbain dont l'alimentation en énergie électrique est complètement assurée par l'intermédiaire de supercondensateurs. Ces derniers sont approvisionnés en énergie à leur tour lors des arrêts du

^{*} Abdesslem.djerdir@utbm.fr

train. Grâce à ce procédé, on résout le problème de la faible capacité de stockage des supercondensateurs par rapport à celle des batteries, c'est le principe de biberonnage. Avec ce système d'alimentation, le problème d'autonomie ne se pose plus. Les lignes électriques ferroviaires classiques sont supprimées avec tout ce que cela comporte en terme de coût, d'entretien et pollution des réseaux et de l'environnement.

Le travail présenté dans ce papier s'inscrit dans le cadre du développement du concept du biberonnage à base de supercondensateurs associés aux panneaux solaires. Les contraintes sur le système sont celles appliquées dans le domaine de la traction électrique urbaine. Les supercondensateurs sont utilisés comme source principale d'énergie capable de fournir et de récupérer la puissance sur le bus continu du train électrique (Fig. 2).

2. IMPLANTATION DES SUPERCAPACITES A BORD D'UN VEHICULE ELECTRIQUE COMME SOURCE PRINCIPALE D'ENERGIE

L'implantation des supercondensateurs au sein du véhicule électrique consiste tout d'abord à les dimensionner pour assurer l'énergie nécessaire à un fonctionnement autonome du dit véhicule. Ce pack de supercondensateurs est couplé au véhicule à travers un étage de conditionnement d'énergie. Ce dernier peut assurer un bus continu aux convertisseurs classiques alimentant les moteurs de traction (convertisseur DC-DC) ou assurer lui-même le contrôle des moteurs (convertisseur DC-AC).

Dans le cadre de cette étude, nous choisissons de traiter le premier cas. Le pack de supercondensateurs est destiné à entraîner les moteurs du véhicule en deux quadrants au minimum (marche avant en moteur et en frein). La fonctionnalité de récupération d'énergie lors d'un freinage électrique doit donc être intégrée lors du choix de la topologie du convertisseur conditionneur.

Pour pouvoir utiliser les supercondensateurs comme source de puissance dans un train électrique, il faut prévoir le conditionnement de leur tension à celle du bus continu adapté à l'entraînement à vitesse variable dans le domaine de la traction électrique (400 V par exemple).

Par ailleurs, les niveaux de tension et de courant admissibles par les supercondensateurs disponibles actuellement (2.3V et 400 A) imposent l'utilisation des montages d'éléments en série, ou en série/parallèle.

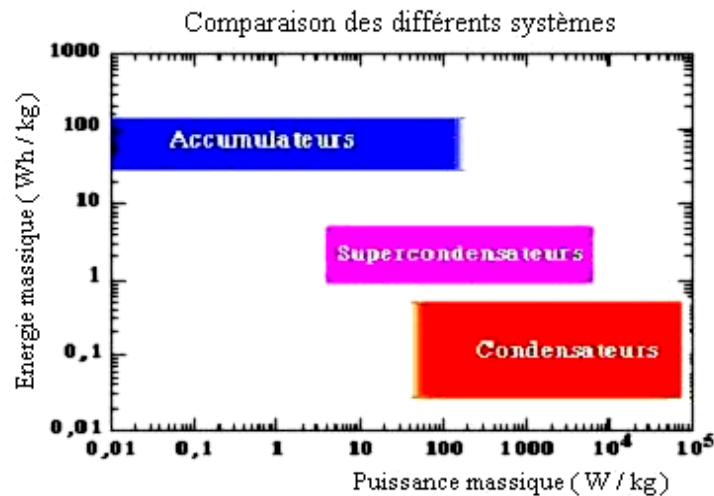


Fig. 1: Positionnement énergétique des supercondensateurs

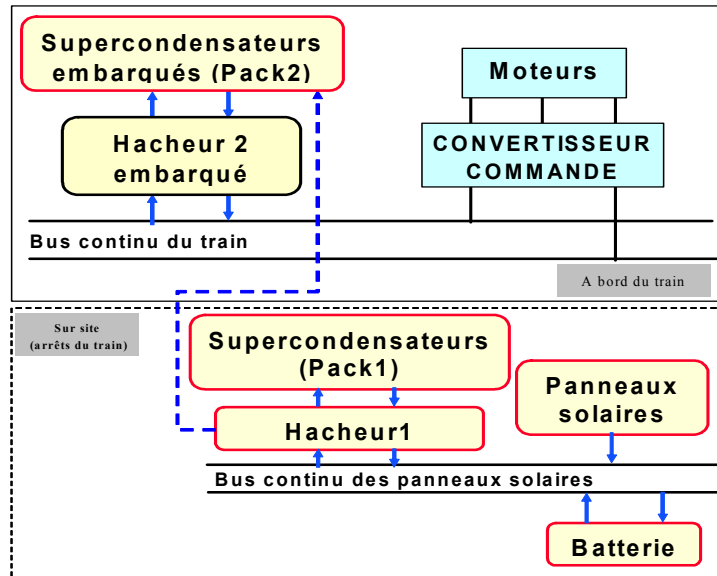


Fig. 2: Schéma énergétique du système de biberonnage

2.1 Dimensionnement du pack

En partant d'un cahier des charges énergétique, le dimensionnement consiste à :

- déterminer l'Elément SuperCondensateur (ESC) à utiliser,
- le nombre d'ESC en série,
- le nombre d'ESC en parallèle.

Les modèles fins de supercondensateurs, tels que celui de la figure 3, sont très difficiles à utiliser dans de tels calculs. Ainsi, nous considérons quelques hypothèses fonctionnelles simplificatrices sur ses modèles.

Nous négligeons l'inductance série $L_{\text{série}}$, la résistance de fuites R_f , ainsi que l'effet de la branche lente (R_1 et C_1). Ce qui est acceptable pour des régimes de fonctionnement (charges et décharges) à des fréquences allant de quelques Hz à quelques dizaines de kHz. Le supercondensateur est donc assimilé à un condensateur parfait de capacité C_0 monté en série avec une résistance R_0 .

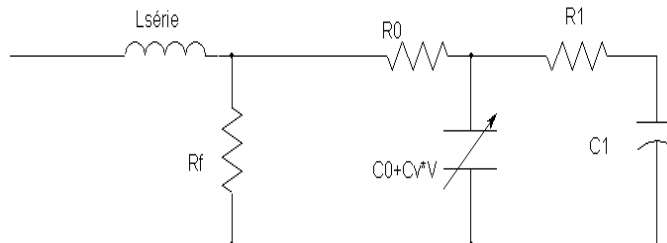
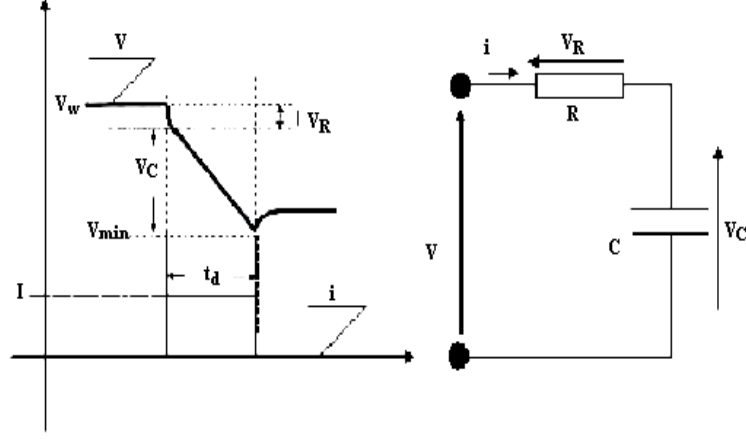


Fig. 3: Modèle trois branches du supercondensateur

Les deux composantes R et C sont clairement identifiées sur le profil de décharge, à courant constant d'un supercondensateur (Fig. 4) [8].



V_w : tension de travail

V_R : chute de tension due à la résistance série

V_C : variation de tension due à la résistance de la capacité

V_{min} : tension minimale permise par le système (ou tension minimale recherchée lors d'une décharge)

t_d : temps de décharge

Fig. 4: Profil de décharge d'un supercondensateur

L'équation régissant la variation de tension aux bornes du pack de supercondensateurs est la suivante :

$$dV = i \cdot \frac{dt}{C} + i \cdot R \quad (1)$$

Le courant de décharge de la capacité i est supposé constant lors de la décharge, dt est la durée de l'impulsion de décharge, C est la capacité du pack supercondensateur à son point nominal. Cette dernière dépend du nombre d'ESC branchés en série ($N_{série}$), en parallèle ($N_{parallèle}$) ou en série/parallèle.

$$C_{tot} = C_0 \cdot \frac{N_{parallèle}}{N_{série}} \quad (2)$$

Pour déterminer $N_{série}$, il suffit de diviser la tension V_{max} par la tension maximale admise par un élément de supercondensateurs, par exemple 2.3 V. $N_{parallèle}$ est calculé pour donner une capacité totale (C_{tot}) adaptée aux exigences de l'application. La capacité ainsi que la résistance équivalentes peuvent être changées soit en mettant plus d'ESC en parallèle ou en utilisant un plus grand nombre d'ESC mis en série. La résistance R du pack de supercondensateur à son point nominal est calculée d'après le nombre des supercapacités en série ou en parallèle. Sa valeur équivalente totale pour un pack comprenant $N_{parallèle}$ ESC en parallèle et $N_{série}$ ESC en série est donnée par :

$$R_{tot} = R_0 \cdot \frac{N_{série}}{N_{parallèle}} \quad (3)$$

2.2 Choix du convertisseur embarqué

La nature différente des supercondensateurs et les autres sources d'énergie à bord du véhicule électrique, impose l'utilisation d'un convertisseur conditionneur de tension entre les supercondensateurs et le bus continu (ou les supercondensateurs et les moteurs). Ce convertisseur doit satisfaire le cahier des charges suivant :

1. Elever la tension des supercondensateurs à celle du bus continu.
2. Asservir du rapport d'élévation de tension, étant donné que la source primaire (supercondensateurs) voit une tension décroissante à ses bornes, lors d'une décharge (croissante lors de la charge).
3. Réversibilité de courant.

Les sources mises en jeu étant des sources de tensions continues, il est clair que le convertisseur recherché est du type continu-continu (DC-DC) à étage intermédiaire inductif. Une étude comparative entre différentes structures de convertisseurs [2, 5] a abouti au choix de la structure la plus simple et la moins encombrante constituée à base de hacheurs survolteur/dévolteur groupés en parallèle.

2.3 Choix du niveau de tension du pack de supercondensateurs

En prenant les pertes dans le convertisseur conditionneur comme critère, nous pouvons dire qu'il faudrait un niveau de tension des packs le plus élevé possible. De plus, les constructeurs des supercondensateurs affirment que la mise en série d'éléments supercondensateurs est de moins en moins fiable en augmentant leur nombre. Un niveau de tension le plus bas possible est donc recommandé. D'autre part, ces constructeurs parlent de la possibilité d'une mise en série fiable jusqu'à 32 éléments supercondensateurs, ce qui donne un niveau de tension de pack élémentaire de 100 V environ. C'est le niveau de tension du pack le plus haut préconisé dans ce type d'applications.

3. BIBERONNAGE A PARTIR DE L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

3.1 Modélisation de la source photovoltaïque en vue de la simulation et du dimensionnement

La modélisation en régime dynamique est nécessaire pour le dimensionnement du générateur photovoltaïque par rapport à un besoin énergétique donné, la simulation du fonctionnement et la gestion de l'énergie du système. Les générateurs photovoltaïques présentent une caractéristique courant/tension très fortement non linéaire qui résulte directement du comportement des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de la réalisation (Fig. 5).

Les études effectuées par les spécialistes des divers domaines d'application ont conduit au développement de nombreux modèles de générateurs parmi lesquels celui que nous retenons et qui est schématisé sur la figure 6.

$$I_p = I_{ph} - I_D - V_D / R_{sh}$$

$$V_p = V_D - R_p I_s$$

$$V_p = R I_p$$

$$I_{ph} = n_p i_{ph}$$

$$I_D = n_p i_D$$

$$V_D = n_s v_D$$

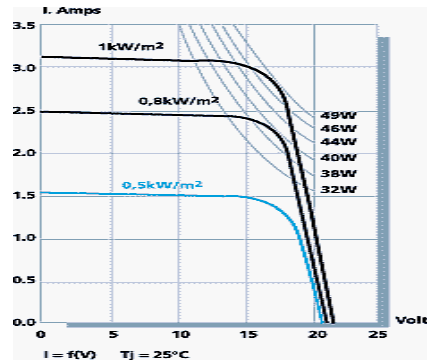


Fig. 5: Exemple de caractéristiques d'un panneau solaire 50 W pour différents éclairements [7]

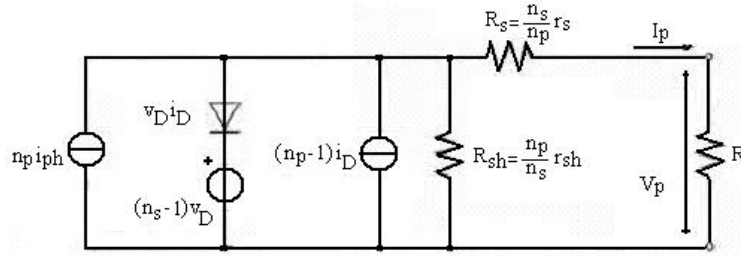


Fig. 6: Modèle et schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque [6]

Nous constatons que la source photovoltaïque se comporte comme une source de courant tant que la tension aux bornes ne dépasse pas un certain seuil. On note également que le rendement de ce générateur est de l'ordre de 15 % pour des cellules au silicium. Ainsi pour une puissance de travail maximale P , il faudrait un panneau solaire tel que celui de la figure 5 dont la surface est $S = \frac{P}{0,15 \times 1000}$. Ensuite, il faut vérifier si le courant de 3,2 A subvient au besoin de l'application.

Dans le cas contraire, il faut associer plusieurs panneaux en parallèle.

3.2 Choix du convertisseur Solaire – Pack1 et Pack1-Pack2

Les deux convertisseurs sont du type DC-DC. Le premier (solaire-pack1) est un hacheur dévolteur étant donné que le panneau solaire est assimilé à une source de courant de faible valeur limitée en tension (pour un panneau 150 W : 3,2 A et 12,5 V).

Le Pack2 devant se charger jusqu'à 24 V, le deuxième convertisseur (pack1-pack2) doit être un hacheur élévateur. Ces derniers peuvent être regroupés en un seul convertisseur réversible en courant : le hacheur abaisseur/élévateur moyennant un dimensionnement adapté des interrupteurs et des composants réactifs (inductance et capacité de filtrage).

Pour la maquette, nous choisissons la structure non isolée pour sa simplicité (Fig. 7). Le premier mode de fonctionnement, celui de l'abaisseur, s'obtient en mettant le contacteur CT à la position 1; le pack1 se charge lentement à partir du panneau. La position 2 du contacteur définit le deuxième mode de fonctionnement dans lequel le pack2 se charge rapidement à partir du pack1.

Pour les applications à grandeur nature, il faudrait privilégier les structures à haut rendement (isolées et/ou à étages résonnants). Le problème d'encombrement posé par ces dernières n'a pas de forts impacts du fait que le pack de supercondensateurs et son convertisseur se situent tous les deux sur site.

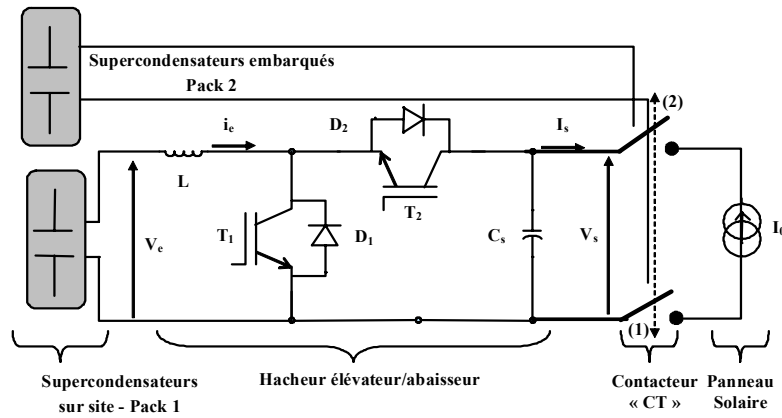


Fig.7: Topologie du convertisseur sur site (hacheur 1)

4. MAQUETTE A ECHELLE REDUITE

L'étude présentée dans ce papier concerne une maquette d'un train électrique 'échelle 1/24^{ième}'. La figure 8 représente une vue des parties essentielles de cette maquette. Le train est actuellement opérationnel grâce à une alimentation en tension continue obtenue par redressement à partir du réseau. Notre objectif est de réaliser les deux convertisseurs (hacheur1 et hacheur2) et développer ainsi le biberonnage solaire. A ce stade de l'étude, nous avons choisi les topologies des deux convertisseurs, effectué leur dimensionnement et simulé leur fonctionnement. Dans cette section, nous présentons le processus de dimensionnement des packs, du hacheur1 et du panneau solaire.

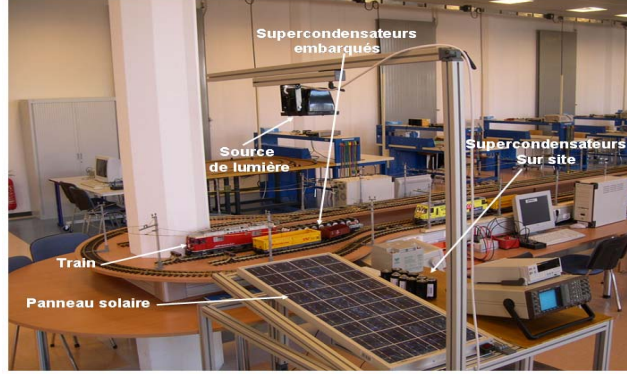


Fig. 8: Maquette du train électrique biberonné

4.1 Dimensionnement du pack2

Les conditions de travail des supercondensateurs embarqués sont les suivantes :

- 6 A pendant 120 s.
- tension de travail 24 V.
- tension minimale permise 12 V.
- tension maximale 24 V.

Nous supposons un niveau de tension initial du pack de 24 V et un niveau final de 12 V et une tension de travail du bus continu constante et égale à 24 V. Ce qui donne les paramètres de dimensionnement :

- $V_w = 24 \text{ V}$, $V_{\min} = 12 \text{ V}$ ($dv = 12 \text{ V}$)
- $I_{\max} = 150/12 = 12,5 \text{ A}$ et $I_{\min} = 150/24 = 6,25 \text{ A}$ ($i_{\text{moy}} = 9,4 \text{ A}$),
- $dt = 120 \text{ s}$

soit une capacité nécessaire $C = dt \cdot i_{\text{moy}} / dv = 93,75 \text{ F}$.

Le nombre d'éléments en série est $N_s = 24/2,5 \approx 10$. En utilisant des éléments de 1000 F nous obtenons la capacité nécessaire ($1000/10 = 100 > 93,75$). La résistance série équivalente de ce pack est $R_{s1} = 10 \text{ m}\Omega$.

Ayant défini toutes les variables, nous pouvons les tester pour une variation de tension (dv), ou pour une variation de temps (dt). Puisque l'équation (3) est déjà résolue par rapport à dv , il suffit d'y substituer les grandeurs calculées :

$$dv = i \cdot \frac{dt}{C} + i \cdot R = 9,4 \cdot \left(\frac{120}{100} + 0,01 \right) = 11,37 \text{ V}$$

dV obtenu est du même ordre que les exigences du cahier des charges. Il n'est donc pas nécessaire de rajouter un pack en parallèle. Nous optons donc pour l'utilisation d'un pack de 10 éléments de supercondensateurs '1000 F' montés en série.

4.2 Dimensionnement du pack1

Nous prenons un niveau de tension initial du pack de 10 V et un niveau final de 5 V et un transfert de l'énergie au pack2 dans une durée de 10 s. En suivant la même démarche que précédemment nous retenons l'utilisation de quatre éléments de supercondensateurs '2700 F' montés en série.

4.3 Dimensionnement du hacheur1

Le choix de la fréquence est primordial dans le dimensionnement de cette structure. En effet, les fréquences inférieures à 10 kHz engendrent des perturbations acoustiques provoquées par les inductances. Par ailleurs, l'emploi des MOSFET limite la fréquence à quelques dizaines de kilohertz. La fréquence de travail sera donc, comprise entre 10 et 50 kHz. Nous effectuons le dimensionnement des différents composants en nous basant sur le même cahier des charges énergétique présenté ci-dessus. Le fonctionnement en survolteur est plus sévère sur les composants que celui du dévolteur. Ainsi, nous prenons ce mode de fonctionnement pour calculer les contraintes de dimensionnement.

Dimensionnement des MOSFET et des diodes

Les interrupteurs utilisés dans les hacheurs survolteurs/dévolteurs sont commandés au blocage et à l'amorçage. On s'orientera donc naturellement vers des transistors. Cependant, les puissances mises en jeu ainsi que la tension et la fréquence de sortie désignent le MOSFET comme la meilleure solution. Les interrupteurs électroniques devront supporter une tension minimale de sortie de 24 V et un courant de 400 A (courant maximal supporté par les supercondensateurs). Cependant, compte tenu des éléments parasites et d'un facteur de sécurité, les valeurs de tension et de courant supportées sont légèrement surdimensionnées, on choisira donc des MOSFET 50V. Ce composant peut commuter à des fréquences allant de quelques centaines de Hz jusqu'à 50 kHz environ.

Dimensionnement de l'inductance

La fréquence de travail est comprise entre 10 kHz et 50 kHz et le rapport cyclique α entre 0 et 1. Lorsque la tension du pack2 évolue de 12 jusqu'à 24 V (lors du régime de charge pack1-pack2) α varie entre 0,16 et 0,81. Nous choisissons cette dernière valeur pour déterminer l'inductance dans les conditions les plus défavorables, le courant est à ce moment à son maximum. Quand l'interrupteur T_1 est passant, la tension à ses bornes est faible. Par conséquent, la tension appliquée aux bornes de l'inductance peut être assimilée à celle délivrée par les supercondensateurs. On en déduit l'expression de l'inductance :

$$L = V_e \cdot \frac{\Delta t}{\Delta i} \quad (4)$$

Δt est déterminé par le temps de conduction du MOS :

$$\Delta t = \alpha \cdot T \quad (5)$$

où, T est la période et $\alpha = 0,81$. En fixant Δi par rapport à un certain courant de charge I_{moyen} , nous obtenons les valeurs d'inductances pour différentes fréquences.

Dimensionnement de la capacité

Lorsque le MOS est bloqué, la capacité se charge avec le courant de la bobine (I_{max} dans le cas le plus défavorable). Lorsque le MOS conduit, la capacité de sortie fournit le courant du pack2, elle est donc traversée par un courant $-I_{max} \times V_{pack1} / V_{pack2}$. A partir de là, on

détermine la variation du courant dans le condensateur. Cependant, cette variation n'intervient que pendant la durée de blocage du MOS soit :

$$\Delta t = (1 - \alpha) \cdot T \quad (6)$$

En fixant la variation de tension $\Delta V_C = 1V$ pour que la tension de sortie soit la moins ondulatoire possible. On obtient la valeur de la capacité correspondante :

$$C = i \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V_C} \quad (7)$$

4.4 Panneau solaire

Le temps de la charge lente du pack1, dont la capacité est de 675 F, ne doit pas excéder 5 mn (durée moyenne entre deux passages de trains). Le courant nécessaire à sa charge de 5 à 10 V, est

$$I_{\text{moy}} = 675 \cdot \frac{5}{300} = 11,3 \text{ A} . \text{ Il faudrait donc associer trois panneaux } 50 \text{ W en parallèle.}$$

5. SIMULATION

Les simulations sont réalisées sous le logiciel Matlab/Simulink. Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation démontrant la possibilité du biberonnage solaire.

5.1 Charge lente : panneau solaire – pack1

Afin de pouvoir réaliser la simulation, nous considérons une valeur de capacité du pack1 beaucoup plus faible que la valeur réelle (6,75 F par exemple). Le temps de charge se réduit alors à 3 secondes environ. Pour cette valeur de capacité, nous obtenons les allures des tensions et courants (Fig. 9) dans le pack 1 et dans le panneau. Nous avons modélisé ce dernier par une source de courant parfaite associée à une résistance en parallèle dont la valeur change en fonction de la tension de telle façon à approximer les deux zones quasi-linéaires de la caractéristique $I = f(V)$ du panneau (Fig. 4) par deux droites de pentes différentes. Le fonctionnement nominal se situe au niveau de la première zone (tension $\leq 12,5 \text{ V}$). La charge lente s'effectue dans cette zone.

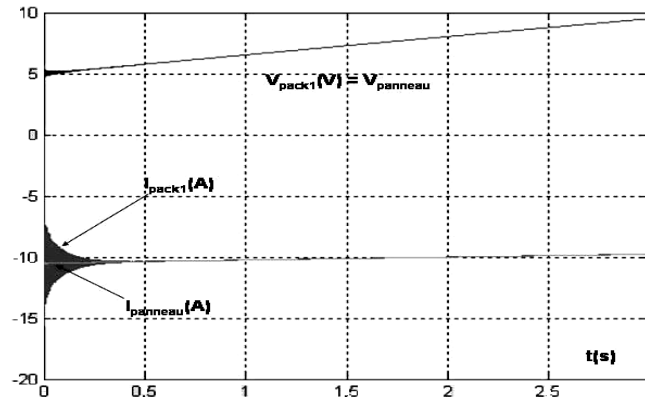


Fig. 9: Allures des tensions et courants du pack1 et du panneau solaire lors de la charge lente

5.2 Charge rapide : pack1 – pack2

La durée maximale de charge est fixée à 10 secondes. Le pack1 initialement chargé à 10 V se décharge violemment sur le pack2. Trois modes de décharges sont envisageables : charge à courant constant, à impulsion de courant libre (imposée par les deux packs de supercondensateurs) ou

contrôlée (imposée par la commande). Le rendement des décharges dépend fortement du type de courant de charge; le courant constant offre généralement un meilleur rendement. Nous présentons les résultats relatifs à ce mode de charge rapide (Fig. 10 et 11).

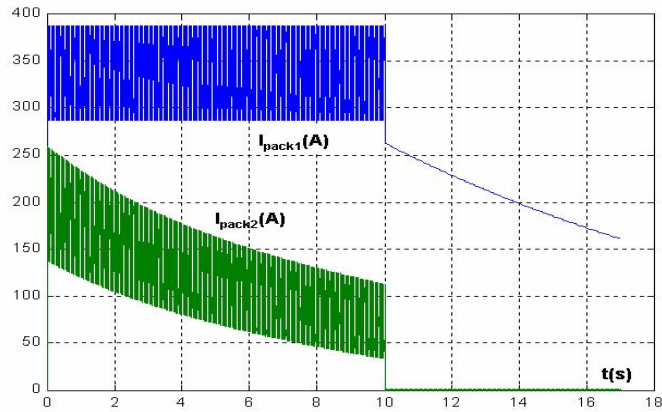


Fig. 10: Allures des tensions des pack1 et 2 lors de la charge rapide

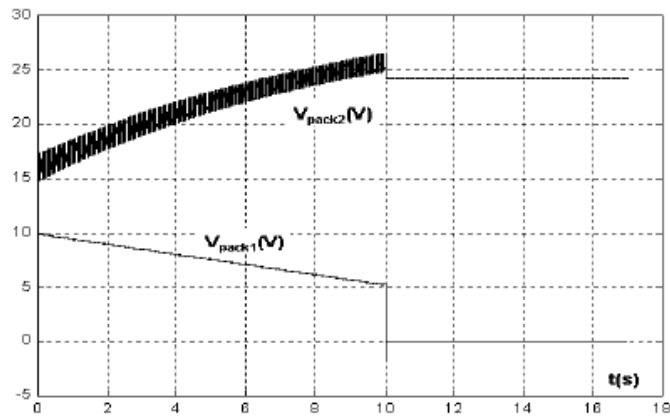


Fig. 11: Allures des tensions et des courants des pack1 et 2 lors de la charge rapide

5.3 Pack2 - Bus continu

Cette simulation met en évidence l'une des deux fonctionnalités du hacheur 2 à savoir, assurer un bus continu de 24 V lors d'un cycle de fonctionnement de la chaîne de motorisation électrique. Nous utilisons les modèles suivants :

- Pack2 : modélisé par une capacité de 75 F (au lieu de 100 F pour montrer l'effet de la diminution de la tension du pack) en série avec une résistance de 10 mΩ.
- Charge : la charge (le système convertisseurs - moteurs roues) est modélisée par une source de courant, un échelon de couple correspond donc à un échelon de courant positif.
- Interrupteurs : nous les modélisons par le modèle idéal $r_{on} = 0$ et $r_{off} = \infty$.

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures 12 et 13. Il est bien visible que le bus continu de 24 V est assuré tout le long du cycle de fonctionnement. On remarque que le courant dans le pack1 augmente au fur et à mesure que la tension baisse.

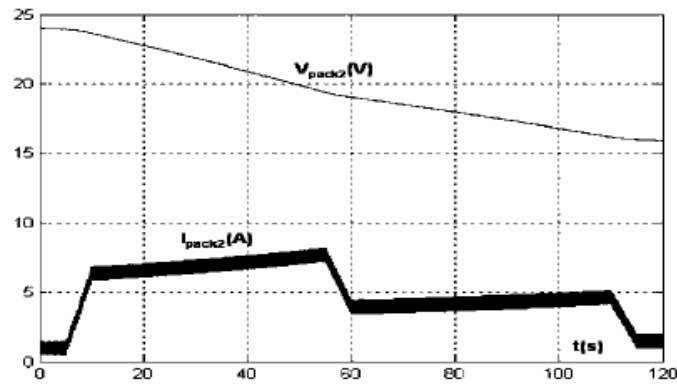


Fig. 12: Allures de la tension et du courant du pack2 lors d'un cycle de fonctionnement de la chaîne de motorisation

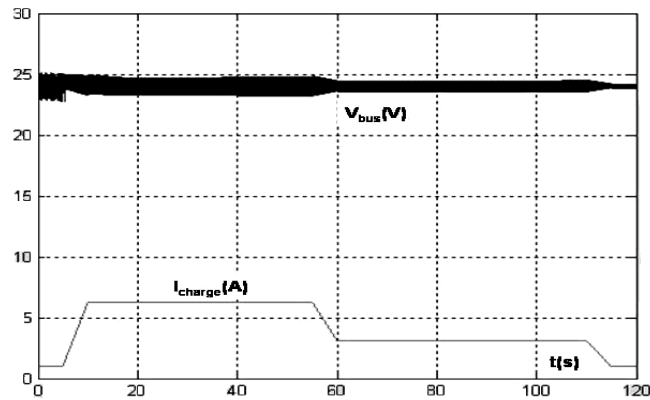


Fig. 13: Allures de la tension et du courant du bus continu lors d'un cycle de fonctionnement de la chaîne de motorisation

6. CONCLUSION

Cette étude a mis en évidence la possibilité d'utiliser les supercondensateurs pour alimenter une chaîne de motorisation d'un véhicule électrique. Les résultats de simulation montrent que le conditionneur de tension embarqué permet d'assurer un bus continu au véhicule et utiliser ainsi les systèmes de variation de vitesse actuellement disponibles.

Un dispositif à base de supercondensateurs pour le stockage de l'énergie solaire photovoltaïque a été proposé. Ce dernier offre la possibilité de réaliser un système complet de biberonnage pour un véhicule électrique. Des convertisseurs électriques de conditionnement d'énergie assurant le transfert d'énergie entre les panneaux et le pack1, entre le pack1 et le pack2 et entre ce dernier et le bus continu, ont été proposés. Ces convertisseurs, dont la topologie est basée sur le hacheur survolteur/dévolteur, ont été dimensionnés et simulés.

A ce stade du travail, nous sommes en train de finaliser la maquette. Cette dernière permettra de mener plusieurs études dans le domaine de la gestion d'énergie des systèmes de transport.

REFERENCES

- [1] J.J. Bezian, '*Systèmes de Piles à Combustibles pour la Cogénération - Etat de l'Art*', Rapport réalisé pour l'ADEME, Octobre 1998.
- [2] A. Djerdir, D. Bouquain, H. Gualous, A. Berthon, Y. Ayad, I. Rasoanarivo, S. Rael et B. Davat, '*Utilisation des Supercondensateurs dans la Chaîne de Motorisation des Véhicules à Pile à Combustible*', Colloque sur les Piles à Combustibles et Interfaces pour les Transports, pp. 117 – 124, Belfort, 8-9 novembre 2000.
- [3] P. Barrade, D. Hotellier et A. Ruffer, '*Apport des Supercondensateurs dans le Transport Terrestre : une Meilleure Gestion de l'Energie*', Colloque sur le Transport Terrestre Electrique, pp. 40 – 46, Belfort, 25 avril 2002.
- [4] L. Zubieta and R. Bonert, '*Characterization of Double-Layer Capacitors (DLCs) for Power Electronics*', IEEE, pp. 1149 – 1154, 1998.
- [5] A. Djerdir, D. Bouquain, H. Gualous and A. Berthon, '*Managing Ultracapacitors Energy to Feed Electric Vehicles DC Bus*', EPE Conference, CD-ROM, Graz, 2001.
- [6] L. Protin et S. Astier, '*Convertisseurs Photovoltaïques*', Techniques de l'Ingénieur - Energie, D3360.
- [7] <http://www.photowatt.com>
- [8] <http://www.powercash.com>