Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 93 (2002)

Heft: 7

Artikel: Stockage d'énergie électrique par supercondensateurs

Autor: Rufer, Alfred / Barrade, Philippe

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855397

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Stockage d'énergie électrique par super-condensateurs

Solutions de l'électronique de puissance et applications

A moyen et long terme, l'approvisionnement en énergie électrique sera confronté d'une part à une augmentation de la demande, d'autre part à la diminution des ressources primaires. Dans un tel scénario, certains préconisent l'utilisation de structures de micro-réseaux, avec une production décentralisée, qui est particulièrement sensible vis-à-vis des fluctuations de puissance. Dans ce contexte, le stockage d'énergie électrique est appelé à jouer un rôle important. En plus des propriétés des accumulateurs super-capacitifs, cet article décrit deux applications possibles de cette technique. Les aspects de la conversion statique par des moyens d'électronique de puissance sont traités, avec un accent sur le rendement énergétique élevé.

Le développement des super-condensateurs représente une des dernières innovations dans le domaine du stockage direct de l'énergie électrique. Ces nou-

Alfred Rufer, Philippe Barrade

veaux composants occuperont leur place dans un nombre élevé d'applications nouvelles du domaine de l'énergie. En particulier, ils seront utilisés pour couvrir des demandes de puissance instantanée élevée et de durée limitée, qui représentent des sollicitations importantes des réseaux de distribution. En comparaison des condensateurs classiques, ces nouveaux composants sont caractérisés par une densité énergétique bien plus élevée, avec en plus une densité de puissance très forte. A titre de comparaison, la figure 1 illustre la capacité énergétique d'un super-condensateur par rapport à un condensateur électrolytique de dimensions comparables. Bien que la densité énergétique ne soit pas comparable à celle des accumulateurs électrochimiques conventionnels, la quantité d'énergie stockable ainsi que le temps de charge possible de ces nouveaux composants les rendent compatibles avec de nombreuses applications industrielles.

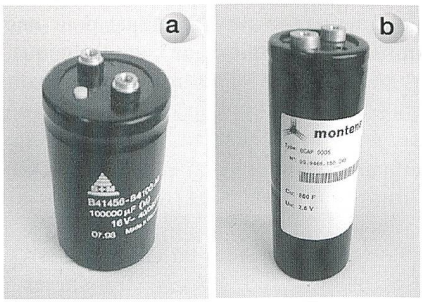


Fig. 1 Comparaison des technologies
À gauche: condensateur électrolytique classique (100 000 µF/16 V; capacité énergétique: 12,8 J); à droite: super-condensateur ECDL (800 F/2,5 V; capacité énergétique: 2500 J)

Dans les systèmes de transport par exemple, des systèmes associant super-condensateurs et pile à combustible ont déjà été proposés pour augmenter la puissance nécessaire aux accélérations ou pour la récupération lors du freinage [1]. La complémentarité énergie-puissance, en association avec des accumulateurs, a également aussi été décrite récemment [2].

Dans cet article, un compensateur dynamique pour réseaux faibles sera présenté, de même qu'une application de lissage de la demande de puissance. Au niveau des propriétés des convertisseurs statiques utilisés, un accent sera mis sur les performances en termes de rendement énergétique.

Le contexte plus global dans lequel sont conduites les études présentées est celui de la tendance de voir diminuer la disponibilité en puissance instantanée d'un réseau, effet caractéristique de la production décentralisée de l'énergie électrique [3].

D'autres études sur des applications originales du stockage supercapacitif font l'objet de travaux de recherche au Laboratoire d'électronique industrielle de l'EPFL, et sont décrites séparément [4, 5].

Stratégies de charge pour le stockage capacitif

Pour la charge et la décharge d'un condensateur de stockage, deux stratégies différentes sont comparées, mettant en évidence leurs propriétés du point de vue énergétique. La première de ces méthodes est celle du couplage direct d'une source de tension. Le schéma correspondant est représenté à la figure 2a. Elle est appelée *charge exponentielle*. La deuxième méthode, appelée *charge à courant constant* fait appel à un circuit d'électronique de puissance. Le schéma correspondant est illustré à la figure 2b.

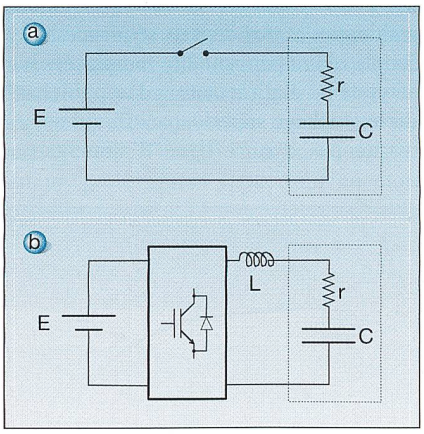


Fig. 2 Charge exponentielle (a) et charge à courant constant (b)

Dans le cas de la première stratégie où il faut tenir compte de la présence d'une résistance interne du super-condensateur, on se retrouve dans le cas classique du rendement pauvre de 50%, indépendemment de la valeur de la résistance (figure 3, ligne a). Sur l'abscisse, on a re-

porté d'une part le temps de charge T_{ch}, d'autre part le courant associé I_{ch}. On remarquera la direction opposée de ces deux axes, de par leur proportionnalité inverse.

Pour le cas de la charge à courant constant (figure 3, ligne b), le rendement du transfert d'énergie peut prendre des valeurs proches de l'unité, à condition de maintenir le courant à une valeur faible. Une augmentation du courant de charge permet une diminution du temps de transfert, mais augmente les pertes sur la résistance interne, et affecte le rendement. Sur la courbe b, un point particulier P est indiqué qui correspond au courant admis par le fabricant du super-condensateur.

Comme convertisseur statique pour la charge à courant constant, on peut utiliser un hâcheur réversible.

Compensation des chutes de tension

Dans des réseaux d'alimentation par caténaire à basse tension tels qu'on les trouve dans les transports urbains des trolley-bus ou trams, on rencontre bien souvent des points sensibles où la résistance de la caténaire amène à une chute de tension problématique lorsque plusieurs véhicules démarrent. Ces points correspondent à des bouts-de-ligne ou à des tronçons périphériques ne possédant pas de sous-station propre. A titre d'exemple, à un endroit particulièrement sensible du réseau des Transports Lausannois, la présence (non voulue) de trois bus à cet endroit peut provoquer un effondrement de la tension de 700 V à environ 170 V. Dans un tel cas, les solutions pragmatiques des départs séquencés ou à couple réduit peuvent être remplacées par un système d'alimentation d'appoint basé sur le stockage super-capacitif, qui ne nécessite pas d'autre ligne d'alimentation que la caténaire.

Sur la figure 4a on a représenté le schéma de principe du système, avec à gauche la sous-station redresseuse, et au bout-de-ligne, la sous-station à stockage. Pour cette dernière, les montages d'électronique de puissance sont également représentés. Les allures des tensions et courants de la caténaire sont représentées sur la figure 4b et 4c, respectivement sans et avec le compensateur à stockage.

La double adaptation de tension

La sous-station à stockage représentée sur la figure 4a possède la particularité de pouvoir s'adapter aussi bien à des variations de tension de la caténaire qu'à des variations de tension de l'accumulateur d'énergie entre l'état chargé et l'état déchargé. Pour cette raison, un convertisseur à circuit intermédiaire continu a été prévu, qui utilise deux hâcheurs réversibles, l'un à l'entrée, l'autre à la sortie. Le flux d'énergie peut ainsi circuler dans les deux directions. La charge du stockeur est possible à partir de n'importe quel état de la tension de la caténaire. Automatiquement, et selon la demande, la sous-station à stockage pourra injecter de l'énergie en mode «source de courant», avec en plus un circuit de réglage de tension superposé. La topologie choisie permet de fonctionner à courant non-intermittent aussi bien du côté caténaire que du côté stockeur.

Organisation série/parallèle d'un grand nombre de super-condensateurs

La mise en série d'éléments possédant des valeurs de capacité différentes entre elles peut conduire à un déséquilibre des tensions entre cellules, comme conséquence de l'intégration d'un courant identique (connexion série). Pour assumer un équilibrage parfait des tensions, un circuit de répartition actif a été décrit dans [6]. Un tel circuit utilise des dispositifs d'électronique de puissance ayant une chute de tension très faible à l'état passant, afin de garder les pertes à des valeurs faibles. Bien que le circuit de symétrisation active soit indispensable pour l'obtention d'un état de charge maximale et pour protéger les super-condensateurs contre une surcharge éventuelle, le nombre et le prix des composants ajoutés pourra s'avérer problématique pour une utilisation généralisée de cette technique.

La réalisation d'accumulateurs super-capacitifs de forte capacité implique un nombre élevé d'éléments qui peuvent être organisés en série-parallèle librement. On

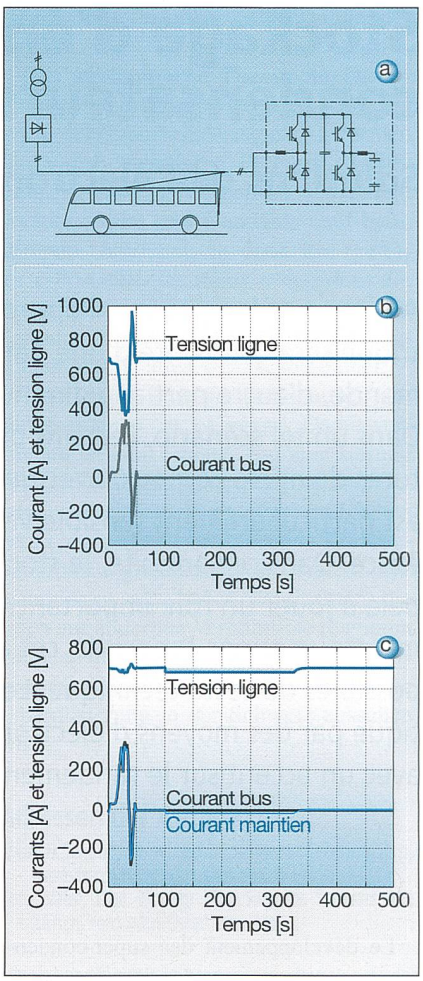


Fig. 4 Sous-station à stockage

a: schema; b: démarrage d'un bus sans injection de puissance; c: démarrage d'un bus avec injection de puissance (234 F/250 V, 0,48 m³)

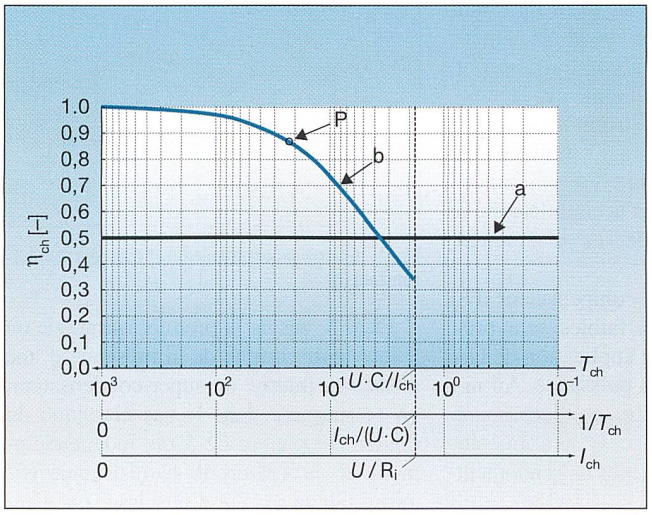


Fig. 3 Rendement énergétique de la charge

Efficacité du stockage pour un super-condensateur de 1800 F/2,5 V.
a: charge exponentielle;
b: charge à courant constant; I_{ch} = courant de charge; T_{ch} = temps de charge; résistance interne R_i = 1 mΩ; $U_n \cdot C/I_{chn}$ = 1,8 s;
P: courant admis par le fabricant du super-condensateur

Les projets liés au stockage super-capacitif ainsi qu'aux Transports Lausannois ont été supportés notamment par la Commission «Recherche Développement et Prospective» des Electriciens Romands.

considérera ici la possibilité de réduire le nombre de composants additionnels de symétrisation en utilisant la propriété d'égalisation naturelle de la capacité par la connexion parallèle, et qui pourra réduire sensiblement les coûts [7]. Sur la figure 5, on reconnaît le schéma proposé pour un répartiteur actif, avec une variante utilisant la connexion en parallèle. Pour cette dernière, le courant de symétrisation est plus faible en pourcentage que dans le cas du montage série pur, le nombre de composants est réduit.

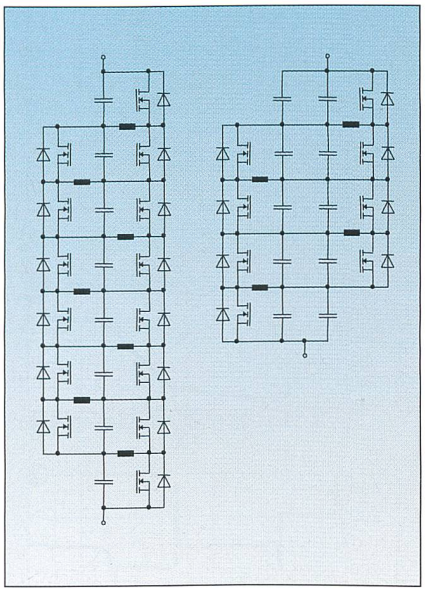


Fig. 5 Montages série et série/parallèle avec équilibrage actif des tensions de cellules

Adapter le niveau de tension à l'aide de transformateurs

Le niveau de tension idéal d'un accumulateur super-capacitif est lié aux propriétés et au dimensionnement de l'application concernée. Comme c'est le cas pour un grand nombre d'onduleurs de tension dans le domaine de la traction électrique, ce niveau se situe à la limite des centaines de volts, voire de quelques kilovolts pour les plus hautes puissances. Une bonne solution pour adapter le niveau de tension d'un accumulateur à celui de l'application donnée est d'utiliser un transformateur électromagnétique. Les développements récents de matériaux magnétiques performants permettent de réaliser ces transformateurs dans le domaine de la moyenne fréquence (MF), c'est-à-dire pour environ 10 kHz.

Sur la figure 6, on a représenté une possibilité d'utiliser un transformateur moyenne fréquence avec les convertisseurs associés. Du côté de la tension élevée (caténaire), un hâcheur réversible est interfacé avec un montage en pont fonctionnant en mode résonant. Au côté de la basse tension, dont la valeur est adaptée à une configuration série parallèle optimisée, une topologie similaire est utilisée. Elle permet l'adaptation de tension due à la décharge.

Techniques de commutation douce

Dans le schéma représenté sur la figure 6, le nombre d'étages de conversion silicium entre la caténaire et l'accumulateur est égal à quatre (numéros 1, 2, 3 et 4 dans la figure 6). Les performances en terme de rendement d'une telle cascade sont dépendantes à la fois des pertes en conduction et des pertes en commutation. Une autre solution peut être envisagée pour la même fonction avec un rendement énergétique supérieur grâce à l'utilisation des techniques de commutation douce, associant les propriétés du thyristor dual et de la commutation naturelle (ZVT+ZCS)[1] [8, 9, 10].

Dans le schéma de la figure 7, on a représenté un convertisseur statique répondant aux mêmes exigences d'adaptation de tension que celui de la figure 6, mais n'utilisant que trois étages de conversion silicium (chiffres I, II et III dans la ligne 7).

Le premier étage (I) est placé entre la caténaire et un circuit intermédiaire à tension constante, alors que le deuxième étage (II) génère une tension rectangulaire pour l'enroulement primaire du transformateur. Le troisième convertisseur (III) est placé entre l'enroulement secondaire et le circuit de stockage composé des super-condensateurs et d'une inductance de lissage.

Le deuxième convertisseur (II) fonctionne selon le mode rectangulaire, à fréquence de pulsation fondamentale, tel que la polarité du courant change après chaque transition de la tension de chacune des branches de cet onduleur. Ce mode est bien connu sous l'appellation *Zero Voltage Transition* (ZVT) ou selon le mode du thyristor dual [10]. Au côté secondaire, le convertisseur (III) fonctionne à commutation naturelle (*Zero Current Switching*, ZCS). Un montage antiparallèle permet la circulation bidirectionnelle du courant continu. Le fonctionnement à moyenne fréquence de ce type de convertisseur nécessite des dispositifs semi-conducteurs présentant d'excellentes propriétés au blocage (t_q). Pour la réalisation on utilise comme indiqué sur la figure une association de transistors IGBT[2] et de diodes.

Les courbes caractéristiques de la figure 8 montrent le fonctionnement de ce type de convertisseur, dont la tension de sortie peut être variée par l'intermédiaire d'une commande d'angle d'allumage. Le fonctionnement en redresseur est possible comme le fonctionnement en onduleur.

Egalisation de puissance et freinage récupératif pour un système d'ascenseur

Récemment, des critères et considérations énergétiques ont été la motivation du développement de convertisseurs de fréquence réversibles pour les ascenseurs, permettant la réinjection de l'énergie de freinage au lieu de la dissiper dans des résistances [11]. Au delà de ces améliorations, un système de stockage super-capacitif est capable de transformer un prélèvement d'énergie à fortes variations en un prélèvement lissé, tout en étant aussi performant du point de vue énergétique [12]. Le lissage de la puissance s'inscrit dans un contexte plus général lié à la production décentralisée de l'énergie

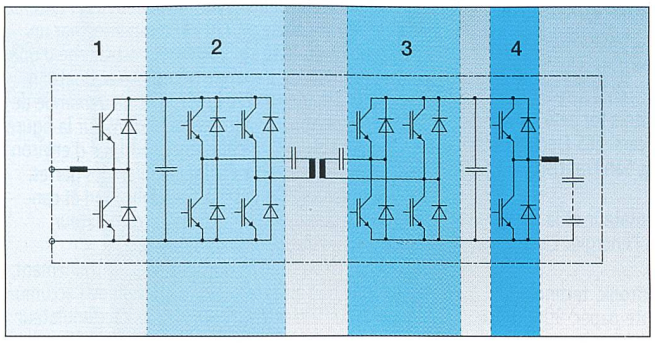


Fig. 6 Adaptation de tension par transformateur MF et résonance

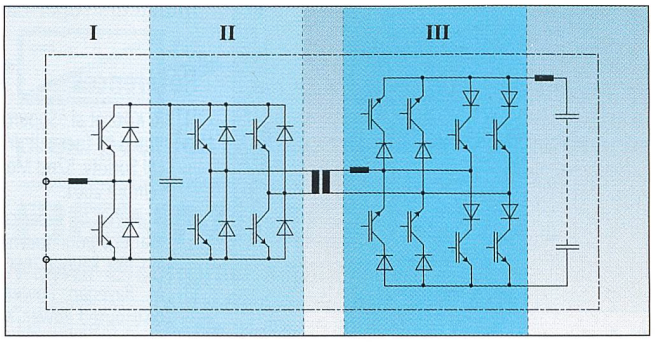


Fig. 7 Convertisseur à trois étages et commutation douce ZVT/ZCS

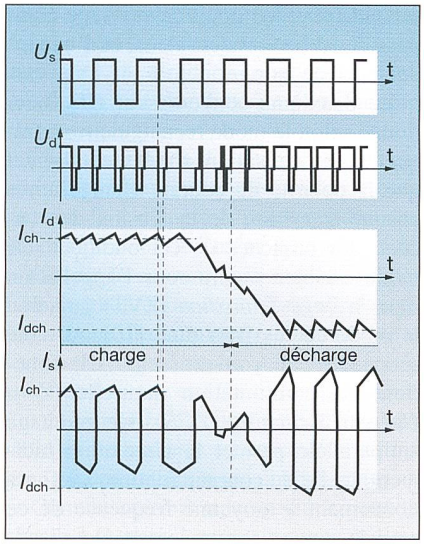


Fig. 8 Allure des signaux dans le convertisseur

U_s: tension secondaire du transformateur; U_d: tension de sortie du redresseur; I_d: courant dans les super-condensateurs; I_{ch}: courant de charge; I_{dch}: courant de décharge; I_s: courant de l'enroulement secondaire du transformateur

électrique, qui utilisera dans le futur des unités de puissance plus faibles que celles des centrales de production actuelles. Parmis ces unités aptes à être utilisées pour la cogénération, on trouve les micro-turbines, les piles à combustible ou des sources d'énergie renouvelables. Dans un tel contexte, l'effet de lissage statistique des charges, qui est une propriété typique des réseaux de distribution actuels, pourrait diminuer.

Exigences en puissance et énergie d'un ascenseur

Le prélèvement en puissance d'un ascenseur est caractérisé par un bilan énergétique réel très faible, entre les montées et les descentes, mais simultanément par des échanges de puissance instantanée de type impulsionnel, causés par les accélérations en montée et les freinages en descente. D'une part la demande instantanée doit être considérée lors de l'installation et nécessite des infrastructures importantes, d'autre part, l'utilisation de redresseurs réversibles en lieu et place des résistances de freinage pose le problème de la tarification de la réinjection.

De plus, la prise en compte des distorsions harmoniques et autres effets «flicker» liés aux pointes de puissance est une motivation supplémentaire pour utiliser un système d'entraînement dont le convertisseur est équipé au circuit intermédiaire d'un système d'accumulation d'énergie. La technique des super-condensateurs est bien adaptée au nombre élevé de cycles de charge et décharge, et permet de résoudre les problèmes de longévité des accumulateurs traditionnels.

Le schéma de principe d'une telle installation est donné à la figure 9. Dans ce système, l'accumulateur est en mesure de fournir à la fois l'énergie liée aux phénomènes inertiels de l'ascenseur, de sa charge et de son contrepoids, et également l'énergie demandée pour élever la différence de masse.

La demande typique d'un ascenseur pour monter au 10e étage et redescendre au même niveau est représentée par les courbes de la figure 10.

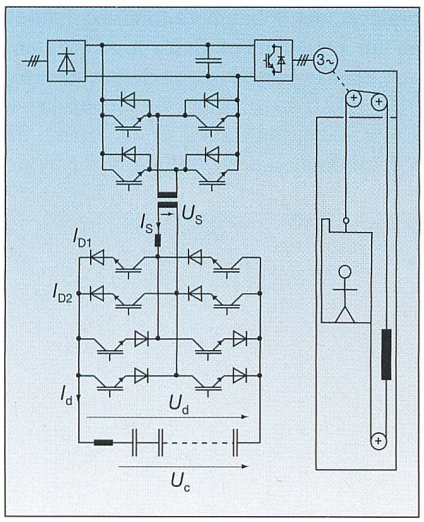


Fig. 9 Entraînement pour ascenseur avec système de stockage d'énergie

Conclusions

De nouveaux composants appelés super-condensateurs permettent d'accumuler des quantités d'énergie intéressantes à une puissance respectable.

Des applications typiques sont décrites avec les spécificités du cycle charge-décharge, notamment les performances en puissance instantanée. Ces applications nécessitent des développements adaptés, tant du point de vue du fonctionnement des convertisseurs et interfaces que du point de vue de la technologie des accumulateurs super-capacitifs eux-mêmes.

Références

[1] *R. Kötz* et al.: Supercapacitors for peak-power demand in fuel-cell-driven cars. ECS Electro-Chemical Society, 52nd Meeting, San Francisco, 2–7 septembre 2001.

[2] *A. Rufer:* Le super-condensateur et la batterie se marient pour fournir de l'énergie. Electronique, No 100, Février 2000.

[3] *M. Bayegan:* Power electronic technologies for distributed Power. Keynote paper, 9th European conference on Power Electronics and Applications, EPE 01, 27 August 2001, Graz/A.

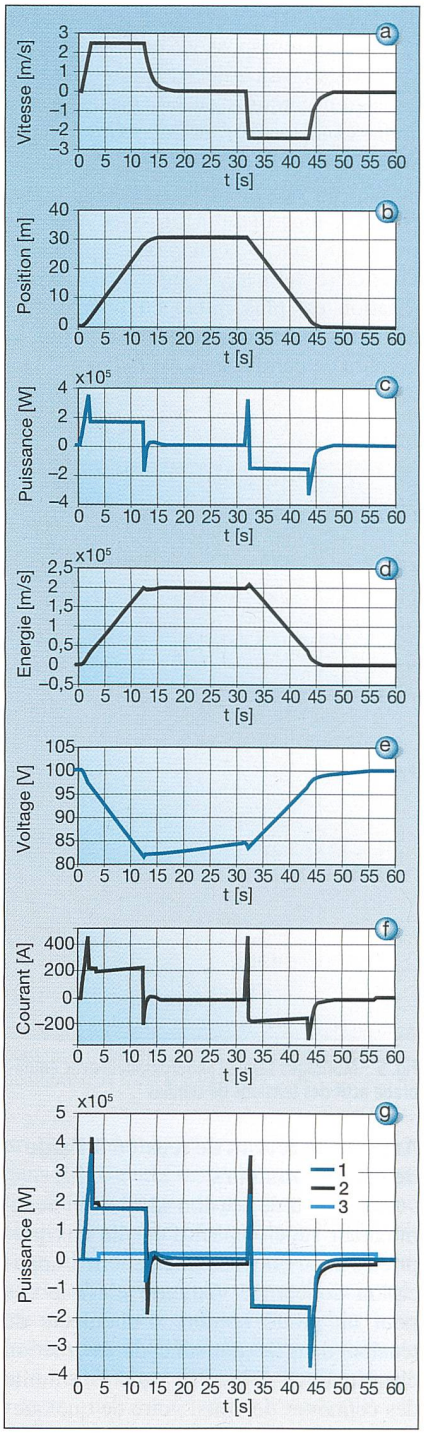


Fig 10 Grandeurs électriques pour un trajet de 10 étages

Les courbes représentées correspondent à un système réel avec une cabine de 720 kg, compensée par un contrepoids de 1440 kg. L'ascenseur est chargé d'une masse de 1400 kg. L'énergie nécessaire pour atteindre le 10e étage vaut 220 kJ (62 Wh). La demande de puissance maximale vaut environ 40 kW. Sur la figure g, on peut voir qu' une puissance continue d'environ 2,5 kW est nécessaire à égaliser le bilan des pertes. D'autres paramètres liés à cette application et concernant le dimensionnement de l'accumulateur super-capacitif sont donnés dans [12].
a: vitesse; b: position; c: puissance de l'entraînement; d: énergie de l'entraînement; e: tension de l'accumulateur supercapacitif; f: courant dans l'accumulateur supercapacitif; g: puissances: entraînement (1), accumulateur (2), réseau (3)

[4] *P. Barrade, A. Rufer:* Power smoothing and high power exchange between storage systems. International Conference on Quality and Security of Electrical Supply, The Oxford Belfry, Thame, UK, ERA Technology LTD Surrey KT227SA UK.

[5] *P. Barrade, A. Rufer:* High power fast energy exchange between storage systems: Supercapacitors as energy buffer in transportation systems. EVS-18 Conference, Electrical Vehicle Symposium, 21–24 Octobre 2001, Berlin/G.

[6] *P. Barrade, S. Pittet, A. Rufer:* Energy storage system using a series connection of supercapacitors with an active device for equalizing the voltages. IPEC 2000: International Power Electronics Conference Tokyo/J.

[7] *H. Barde:* Voltage balancing in series connected supercapacitors. Second Boostcap meeting, 29 Mars 2001, Ecole d'ingénieurs de Fribourg/CH.

[8] *P. Coulibaly:* Convertisseurs réversibles à commutation douce, association onduleur de tension/commutateur de courant. Thèse 1998, ENSEEIHT, Toulouse/F.

[9] *C. Chabert, A. Rufer:* Optimisation des convertisseurs de puissance embarqués: Adaptio des cellules à lien alternatif MF et commutation douce. 8e colloque EPF, Novembre 2000, Lille/F.

[10] *Y. Chéron:* Soft commutation. Chapman and Hall, 1992.

[11] *B. Ashok, H. Nguyen, E. W. Gaudet:* A comparative evaluation of line regenerative and non-regenerative vector controlled drives for AC Gearless Elevators., IEEE IAS 2000 , Octobre 2000, Rome/I.

[12] *A. Rufer, P. Barrade:* A supercapacitor based energy storage system for elevators with soft commutated interfaces. IEEE IAS Annual meeting, Octobre 2001, Chicago/USA.

Elektrische Energiespeicherung mit Superkondensatoren

Leistungselektronische Anwendungen

Mittel- und langfristig wird die Bereitstellung elektrischer Energie einerseits mit einer Zunahme des Verbrauchs und andererseits mit einer Verringerung der Primärenergien konfrontiert sein. In einem solchen Szenario wird von verschiedener Seite die Verwendung kleinster Teilnetze mit dezentraler Stromproduktion empfohlen. Diese reagieren jedoch empfindlich auf Leistungsschwankungen. In diesem Zusammenhang spielt daher die Speicherung elektrischer Energie eine zunehmende Rolle. Neben den Eigenschaften von Superkondensatoren beschreibt dieser Beitrag zwei mögliche Anwendungen dieser Technik. Dabei werden – mit Blick auf die Erhöhung des Wirkungsgrads – Aspekte der statischen Energieumwandlung mittels Leistungselektronik betrachtet.

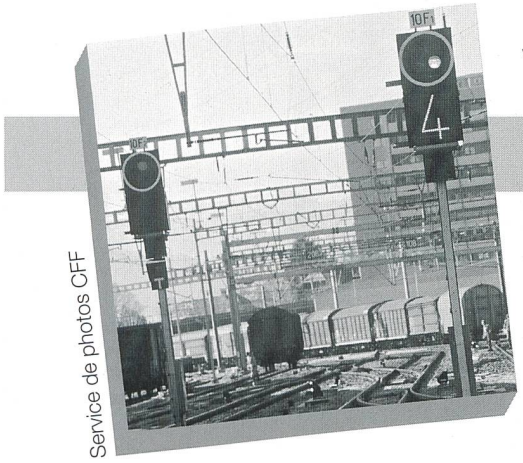
Adresses des auteurs

Alfred Rufer, Prof. Dr., Laboratoire d'électronique industrielle LEI, EPFL, CH-1015 Lausanne, alfred.rufer@epfl.ch

Philippe Barrade, Dr., Chargé de cours, Laboratoire d'électronique industrielle LEI, EPFL, CH-1015 Lausanne, philippe.barrade@epfl.ch

[1] ZVT: Zero Voltage Transition; ZCS: Zero Current Switching

[2] IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor


Service de photos CFF

Votre partenaire d'alimentation de secours

p. ex. pour les systèmes des infrastructures

BENNING
Power Electronics GmbH
Industriestrasse 6, CH-8305 Dietlikon
Tél. 01 805 75 75, Fax 01 805 75 80
http://www.benning.ch