

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 94 (2003)
Heft: 7

Artikel: Supercondensateurs et stockage d'énergie
Autor: Rufer, Alfred / Barrade, Philippe / Hotellier
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857537>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.03.2025

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

Supercondensateurs et stockage d'énergie

Solution pour l'alimentation en bout de ligne des transports publics

Un circuit d'électronique de puissance a été étudié, dans le but d'interfacer un banc de stockage d'énergie à base de supercondensateurs avec la caténaire d'alimentation d'un réseau de trolleybus. L'installation a été conçue de manière à pouvoir agir comme compensateur actif de chutes de tension, aux endroits où un tel réseau présente une sensibilité importante. Un convertisseur statique à circuit intermédiaire permet d'injecter de l'énergie en mode de fonctionnement en source de courant, indépendamment de l'état de tension de la ligne ou de l'état de stockage du banc accumulateur. Un circuit de réglage spécifique est également proposé et permet la régulation du niveau de tension au point d'interconnexion sur une valeur constante. Les résultats obtenus par simulation ont pu être vérifiés en pratique, grâce à la réalisation d'un modèle réel à puissance réduite.

L'alimentation en énergie électrique des véhicules de transports publics tels que les trolleybus est réalisée à l'aide de sous-stations redresseuses connectées généralement à un réseau de distribution. De par le niveau de tension relativement bas – de l'ordre de grandeur de 500 V à 700 V – et de par l'utilisation de véhi-

Alfred Rufer, Philippe Barrade, David Hotellier

cules de plus en plus performants, ce type de réseau est parfois confronté à des problèmes de chutes de tension. Comme conséquence, les véhicules modernes utilisant la technique de propulsion à fréquence variable, réputée pour sa robustesse et son absence d'entretien des moteurs, peuvent se trouver confrontés à des difficultés lorsque la tension d'entrée de leur convertisseur de fréquence ne correspond plus à une limite inférieure imposée.

D'autre part, le freinage par récupération fait partie naturellement des propriétés de presque tous les véhicules modernes, mais n'est pas compatible avec les sous-stations non réversibles utilisées dans la plupart des réseaux. Il en résulte l'utilisation de dissipateurs de freinage, peu favorables à un bilan énergétique acceptable, sans compter l'aspect écono-

mique en exploitation sur une longue durée.

Les systèmes de stockage d'énergie présentent aujourd'hui des solutions très prometteuses, non seulement comme éléments complémentaires aux sous-stations non réversibles, mais également comme compensateurs actifs des chutes de tension aux points sensibles des réseaux d'alimentation, tels qu'on les trouve aux extrémités des lignes.

Des applications de stockage réelles ont été déjà réalisées, basées sur la technique du stockage par volant d'inertie, ou plus récemment comme installation purement statique à base de nouveaux composants appelés supercondensateurs [1], [2], [3]. En relation avec ces systèmes, des convertisseurs statiques de puissance permettent un contrôle rapide du flux de

puissance au point d'injection et nécessitent des structures de réglage bien adaptées.

De nouveaux composants pour le stockage d'énergie

Le supercondensateur représente un des développements récents importants dans le domaine du stockage d'énergie électrique, ouvrant la porte à de nombreuses nouvelles applications, en apportant une solution aux exigences de puissances instantanées importantes et sans phénomènes de vieillissement comme on les connaît avec les accumulateurs traditionnels. Bien que la densité énergétique des supercondensateurs soit encore bien inférieure à celle des accumulateurs, toute une catégorie d'applications nouvelles, caractérisées par un nombre de cycles de charge/décharge important, se trouve actuellement en phase d'évaluation ou de développement industriel [4], [5].

Stockage d'énergie à base de supercondensateurs

Les points sensibles des réseaux continus à basse tension ne représentent pas un problème totalement nouveau et se situent généralement en bout de ligne, en région périphérique ou aux terminus de ligne des transports publics. On connaît des cas typiques de réseaux où les chutes de tension observées peuvent représenter plus de la moitié du niveau de tension d'un fonctionnement normal, soit approximativement 350 V pour une tension normale de 700 V. Ces cas anormaux peuvent se produire lorsque plusieurs bus se retrouvent au bout de ligne, résultant par exemple d'une circulation routière

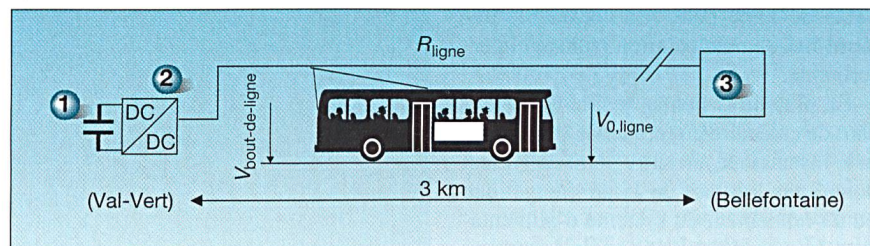


Figure 1 Système d'alimentation avec sous-station à stockage pour compenser les chutes de tension en bout de ligne

1: sous-station de stockage d'énergie à base de supercondensateurs; 2: convertisseur continu-continu; 3: sous-station avec redresseur ($V_{0, ligne} = 700 V_{DC}$)

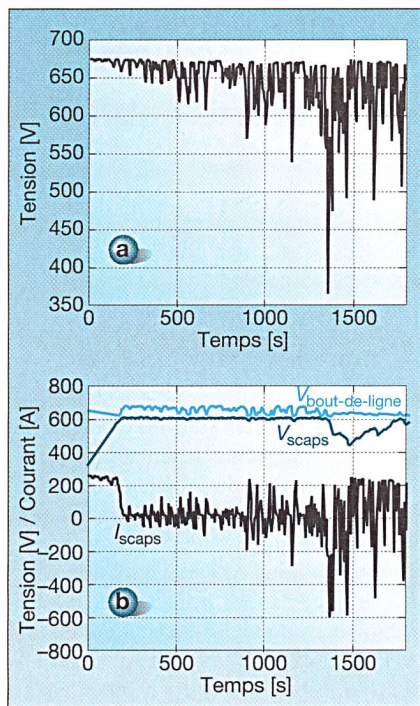


Figure 2 Chute de tension avec ou sans stockage d'énergie

a: tension de la caténaire en dépendance de l'éloignement entre un bus et une sous-station d'alimentation (sans compensation); b: courbes illustrant le fonctionnement du système de compensation active

chaotique ou surchargée. La probabilité d'une telle situation est encore augmentée lorsque la fréquence des bus doit atteindre une capacité de transport importante.

Par le passé, l'utilisation de la propulsion par moteurs à courant continu a assez bien toléré les chutes de tension de la caténaire, pour autant que les vitesses des véhicules restent basses. Pour les entraînements modernes à champ tournant, la qualité de la tension d'entrée du convertisseur à pulsation est beaucoup plus importante. Si traditionnellement le démarrage lent à puissance réduite était une solution pragmatique, adaptée au rythme normal de transport, et permettait de résoudre les problèmes de faible alimentation, la possibilité de stocker de l'énergie aux endroits sensibles ou aux bouts de ligne peut être considérée aujourd'hui comme solution réaliste et performante.

En plus de la bonne qualité de la tension de caténaire en termes de son amplitude instantanée, un autre point de vue est donné par l'aspect du bilan énergétique ou du rendement du système d'alimentation. Les conditions de chutes de tension en technique de courant continu sont données par le comportement résistif de la ligne de contact, par opposition aux chutes de tension inductives caractéris-

tiques des lignes alternatives. En continu, les chutes de tension sont donc la cause de dissipations importantes.

La figure 1 montre le schéma de principe d'une alimentation de bus telle qu'on peut la trouver à de nombreux endroits, mais complétée d'une sous-station de stockage à base de supercondensateurs. On a également représenté le convertisseur continu-continu pour l'interface flexible.

Le problème de la chute de tension est illustré par le diagramme de la figure 2a, où l'on reconnaît bien la chute de tension grandissante de la caténaire, en dépendance de l'éloignement d'un bus par rapport à la sous-station d'alimentation classique. La chute de tension est négligeable lorsque le bus quitte la dernière sous-station, elle est par contre maximale en bout de ligne, là où il n'y a pas d'alimentation. Sur la figure 2b, la même tension de ligne est représentée pour un système complété par le système de stockage muni d'un réglage instantané de la valeur de la tension. On remarquera sur la même figure

que le banc de supercondensateurs de la sous-station active est sollicité en puissance d'autant plus que la perturbation (le bus) s'approche de celle-ci. On reconnaît sur la courbe de courant de la sous-station que le système de stockage ne délivre que le courant de compensation en régime dynamique. Le transfert de puissance est bidirectionnel, selon les régimes d'accélération ou de freinage du véhicule.

Les résultats présentés ici sont obtenus par simulation numérique, en utilisant un profil de puissance mesuré sur un véhicule. Ce profil réel a permis aussi de dimensionner le banc stockeur de la nouvelle sous-station et a donné comme résultat une capacité énergétique de 20,5 MJ (5,7 kWh). Cette énergie est nécessaire pour compenser l'excursion que fait la courbe de consommation énergétique sur le parcours. Une autre condition pour le banc stockeur est celle de pouvoir délivrer seulement la composante alternative de la puissance consommée ou restituée. La capacité choisie correspond finalement à un nombre total de 4800 élé-

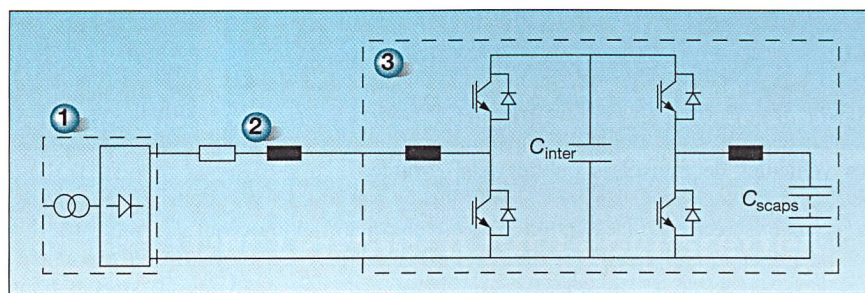


Figure 3 Schéma de principe de la sous-station et du convertisseur statique

1: sous-station avec redresseur; 2: ligne (caténaire); 3: sous-station de stockage d'énergie à base de supercondensateurs

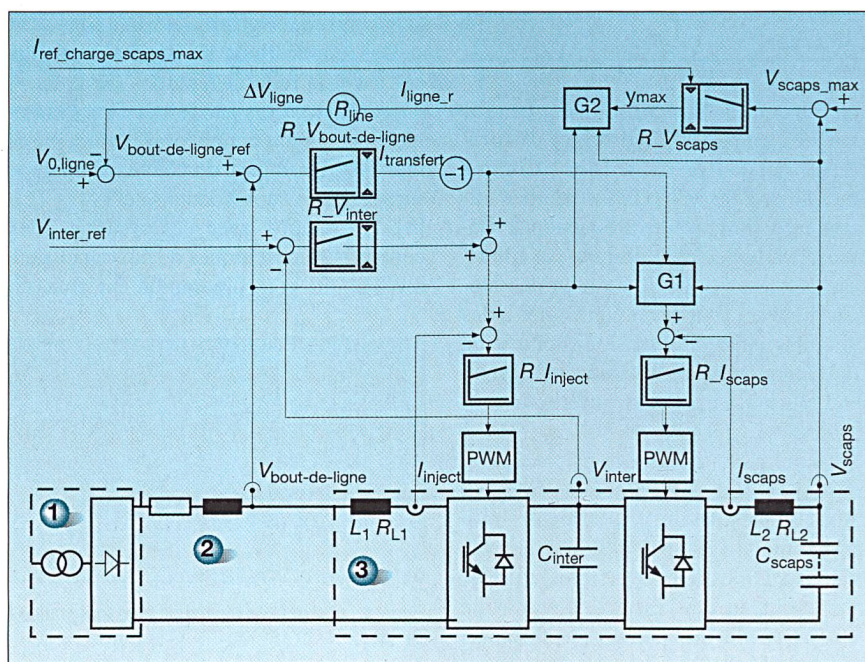


Figure 4 Diagramme structurel du réglage de la sous-station à stockage

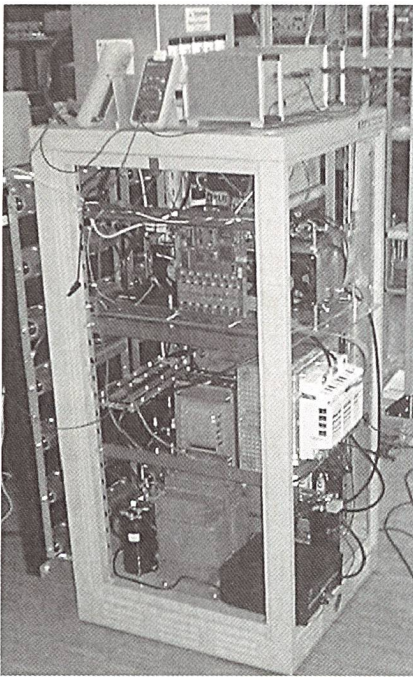


Figure 5 Modèle à puissance réduite (5 kW)

ments de 2600 F chacun, sous une tension de 2,5 V par élément. Le niveau de décharge des supercondensateurs est choisi égal à 70% de l'état de tension de la charge maximale.

Adaptation totale des niveaux de tension

La propriété principale du circuit de conversion représenté à la figure 3 est de pouvoir adapter flexiblement le rapport des tensions entre la caténaire et le banc de supercondensateurs, aussi bien dans le cas où un échange est demandé entre une caténaire à tension normale et un banc stockeur déchargé que dans le cas inverse où un banc chargé doit injecter de la puissance dans une caténaire abaissée fortement en tension. Pour cette spécification, deux montages élémentaires sont utilisés, remplissant les fonctions d'élevateur, respectivement d'abaisseur. Ces deux convertisseurs élémentaires sont reliés par un circuit intermédiaire à tension continue. Ils permettent également une bonne continuité du courant, dans la caténaire et dans les supercondensateurs.

Stratégie de réglage

Dans le diagramme structurel de la figure 4, on trouve une stratégie de réglage et de commande pour un fonctionnement performant du nouveau système. De chaque côté du convertisseur statique de la sous-station, on doit contrôler les courants à l'aide de régulateurs individuels. Il s'agit du courant dans la caténaire et du

courant dans le banc stockeur. Ces deux grandeurs ont aussi leur organe de mesure propre. Comme réglage superposé, on doit d'abord assurer le niveau de la tension intermédiaire et ensuite définir le transfert de puissance. Pour anticiper le réglage de ces deux conditions, on intervient de chaque côté du circuit intermédiaire à partir d'une consigne commune ($I_{\text{transfert}}$ dans figure 4). En tenant compte de l'état de tension à l'entrée et à la sortie du convertisseur statique, il est possible d'imposer deux consignes de courant pour les deux réglages de courant locaux qui ne modifient pas l'état de tension du circuit intermédiaire. Cette propriété est imposée par le bloc G1 (figure 4).

En ce qui concerne le réglage de la tension de la ligne au point d'interconnexion, on calcule d'abord une valeur de consigne qui représente une valeur fictive de tension, correspondant à une chute de tension moyenne, engendrée par le transport à travers la caténaire de la puissance moyenne consommée par le bus. Le régulateur peut ainsi corriger les déviations par rapport à cette valeur en commandant une injection ou un prélèvement de puissance à partir du stockage.

Vérifications pratiques sur un modèle à puissance réduite

Comme mentionné plus haut, des résultats de simulation ont été établis à partir de courbes réellement mesurées de la

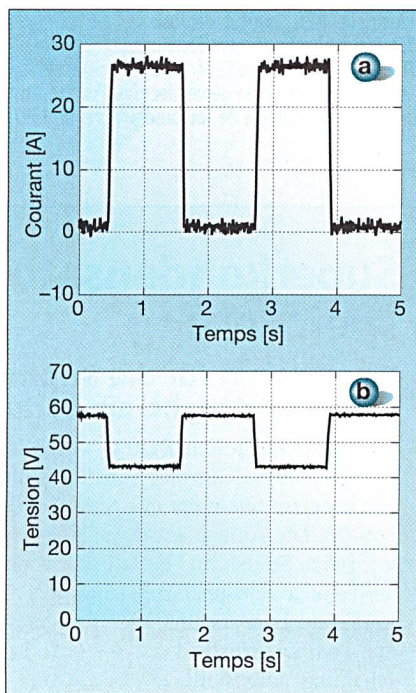


Figure 6 Comportement de la ligne sans compensation

a: courant de la charge; b: tension de bout de ligne

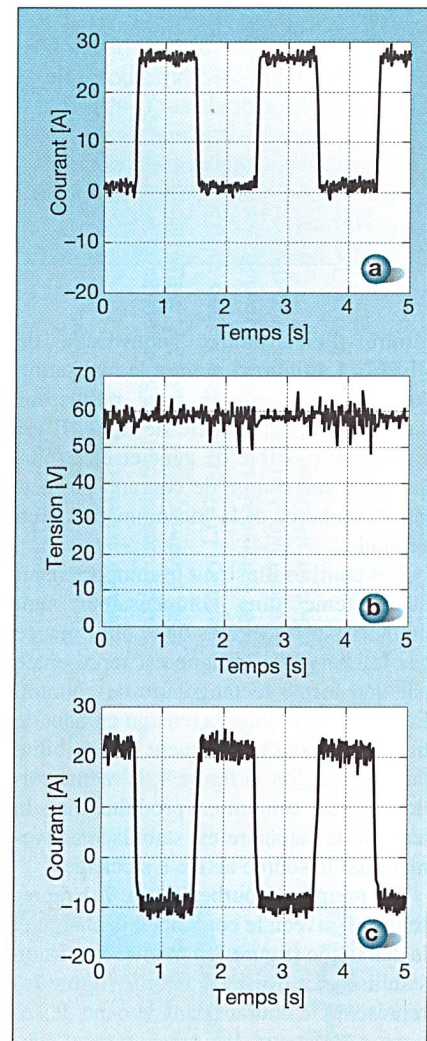


Figure 7 Résultats expérimentaux avec compensation active et réglage de tension

a: courant de la charge (bus); b: tension de bout de ligne; c: courant des supercondensateurs

puissance consommée par un véhicule. C'est sur la base des données du site correspondant qu'une maquette représentative a été développée. Les données ont été fournies par les *Transports Lausannois*, et le trajet de bout de ligne correspond à la ligne N° 7, entre la sous-station de Bellefontaine et le terminus de Val-Vert. Le modèle réalisé a les caractéristiques suivantes:

- Redresseur délivrant une tension de 60 V, avec un courant maximal de 100 A.
- Le banc de supercondensateurs a une capacité de 75 F/60 V/200 A. Il comprend 24 éléments de 1800 F chacun.
- Le convertisseur statique est réalisé avec des modules standards en technologie IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors).

La partie réglage est réalisée sur la base d'une carte universelle à DSP (Digital Signal Processor) développée au labo-

L'étude a pu être réalisée grâce au soutien de la Commission Recherche Développement et Prospective des Electriciens Romands et grâce à la collaboration des services techniques des Transports Lausannois.

ratoire d'électronique industrielle de l'EPFL. La figure 5 montre la réalisation complète du système avec redresseur conventionnel et modèle de ligne. Il est également possible de générer électroniquement une charge de courant, permettant l'émulation de la consommation d'un véhicule.

Les courbes illustrant le comportement du système sans compensateur sont données par les figures 6a et 6b. Dans ce cas la charge de la ligne est représentée par une forme rectangulaire de courant. La figure 6b montre la tension en bout de ligne où apparaît clairement la sensibilité du système. Sur la figure 7, la même sollicitation de courant est produite, mais la tension de caténaire est stabilisée activement par la source active à stockage.

La première courbe (figure 7a) représente à nouveau le courant de la charge et la deuxième (figure 7b) montre la tension stabilisée. La troisième courbe (figure 7c) représente le courant dans le banc de supercondensateurs. Par opposition au courant dans la charge, ce courant comporte un changement de signe, correspondant à un transfert de puissance bidirectionnel. Cette situation résulte de la superposition de deux effets, le premier étant la compensation de la variation de charge et le second étant un courant moyen nécessaire à éviter une décharge continue du système de stockage.

La figure 8 indique quelques détails en relation avec le saut de charge. Le comportement est typique d'une décharge à puissance constante des supercondensateurs.

Conclusions

Une sous-station à base de stockage d'énergie électrique par supercondensateurs a été développée, pour compenser les chutes de tension ohmiques, caractéristiques des systèmes d'alimentation à courant continu. Un convertisseur statique à circuit intermédiaire permet un échange flexible d'énergie, indépendamment de l'état de la tension et de l'état de charge du banc de supercondensateurs.

Une telle sous-station trouve son utilité par exemple en bout de ligne, en lieu et

place d'une sous-station d'alimentation conventionnelle supplémentaire.

Un système de réglage spécifique est proposé afin de gérer le transfert de puissance et pour stabiliser le niveau de la tension au point de couplage.

Des vérifications pratiques ont été effectuées sur un modèle à puissance réduite, confirmant les premiers résultats de simulation.

Références

- [1] Sitras SES Energiespeichersystem für 750 V DC Bahnanlagen. Siemens Transportation Systems, Public. Nr. A19100-V-300-B275 et 276.
- [2] H. Gerd: Erfolgreiche Energieverbrauchsreduzierung durch Einsatz eines Kondensatorenergiespeichers im Stadtbahnnetz Köln. Institutskolloquium Wintersemester 2001/2002, Elektrotechnisches Institut, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- [3] D. R. Kelsall: Pulsed power provision by high speed composite flywheel. Pulsed Power 2000, Digest N° 2000/053, IEE Symposium, 2000, pp. 16/1-16/5.
- [4] A. Rufer, P. Barrade: Stockage d'énergie électrique par super-condensateurs. Bulletin SEV/VSE, N° 7, 28 mars 2002, pp. 27-31.
- [5] A. Rufer, P. Barrade: A Supercapacitor-Based Energy-Storage System for Elevators With Soft Commutated Interface. IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 38, N° 5, September/October 2002, pp. 1151-1159.

Informations sur les auteurs

Prof. Dr. **Alfred Rufer**, Laboratoire d'électronique industrielle (LEI), Institut des Sciences de l'Energie (ISE), Faculté des Sciences et Techniques de l'Ingénieur STI, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne
Contact: alfred.rufer@epfl.ch

Dr. **Philippe Barrade**, Laboratoire d'électronique industrielle (LEI), Institut des Sciences de l'Energie (ISE), Faculté des Sciences et Techniques de l'Ingénieur STI, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Il a reçu son doctorat en génie électrique de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (France) en 1997.

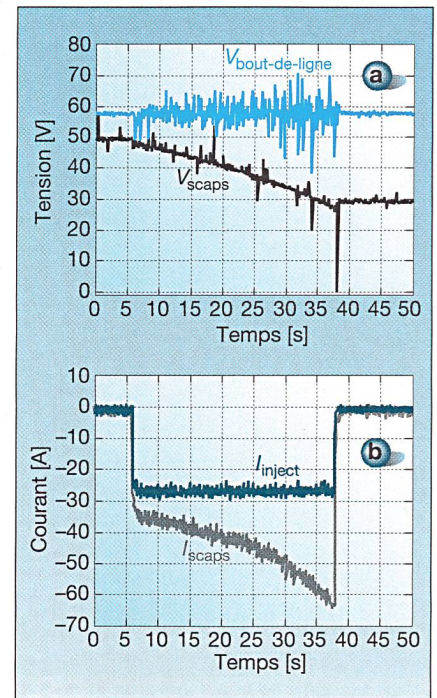


Figure 8 Saut de charge avec réglage de la tension
a: tension régulée au point de couplage (bout de ligne) et tension du banc de supercondensateurs;
b: courant injecté dans la ligne et courant des supercondensateurs

En 1999, il intègre l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne en tant que Premier Assistant, chargé de cours. Il est responsable de la thématique de stockage et gestion de l'énergie par supercondensateurs au Laboratoire d'Electronique Industrielle, CH-1015 Lausanne

Contact: philippe.barrade@epfl.ch.

David Hotellier, ingénieur électricien diplômé EPFL en 2002, a effectué au sein du Laboratoire d'électronique industrielle (LEI) plusieurs études dans le domaine du stockage d'énergie par supercondensateurs.

Contact: david.hotellier@libertysurf.fr

Superkondensatoren in der Energiespeicherung

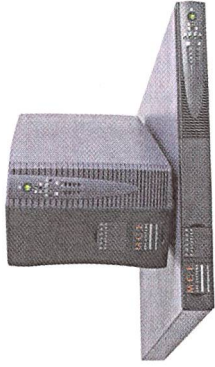
Eine Lösung für die Stromversorgung öffentlicher Verkehrsbetriebe am Leitungsende

Bei der in diesem Beitrag vorgestellten Neuentwicklung handelt es sich um eine Leistungselektronik-Schaltung, die es ermöglicht, die Fahrleitung eines Trolleybusnetzes aus einer aus Superkondensatoren bestehenden Speicherbatterie zu speisen. Die Anlage wurde so ausgelegt, dass Spannungseinbrüche an besonders kritischen Stellen im Netz aktiv kompensiert werden können. Ein als Stromquelle arbeitender statischer Umrichter mit Zwischenkreis sorgt für die Energieeinspeisung, und zwar unabhängig von den Spannungsverhältnissen auf der Fahrleitung und dem Ladezustand der Speicherbatterien. Es wird ferner eine spezielle Regelschaltung vorgestellt, um die Spannung am Einspeisepunkt konstant zu halten. Die durch Simulation erzielten Ergebnisse konnten anhand eines realen Modells mit reduzierter Leistung bestätigt werden.

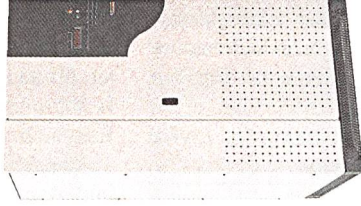
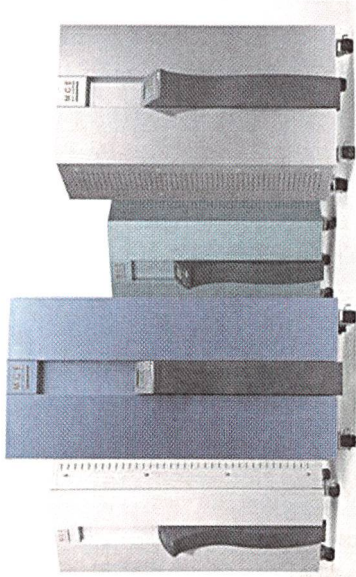
Unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen

EINE REVOLUTIONÄRE ENTWICKLUNG

Es hat eine neue Ära für USV-Anlagen begonnen



**NEU mit Wasserkühlung
und PFC-Gleichrichter**



The Merlin Gerin Know How

THE UNINTERRUPTIBLE POWER PROVIDER

MGE UPS SYSTEMS

IMMER EINEN SCHRITT VORAUS:

- ◆ Batteriemanagement-System mit zyklischer Ladung
- ◆ Automatische Erkennung und Konfigurierung des Batterie-Typs
- ◆ Verlängerung der Batterie-Lebensdauer mit der Antisulfatierungs-Ladetechnik (Weltneuheit, exklusiv bei MGE erhältlich)
- ◆ Automatische Entladetests
- ◆ Anzeige der effektiv verfügbaren Autonomiezeit unter Berücksichtigung der Belastung, Temperatur und Battericalterung
- ◆ Berechnung und Anzeige der effektiven Restlebensdauer der Batterien (ein Alarm wird ausgelöst, wenn die Kapazität um 20% sinkt)
- ◆ Temperaturregelte Ladespannung erhöht die Lebensdauer und die Kapazität der Batterien
- ◆ Batterieladung ohne Ripple-Ströme
- ◆ PFC „Power Factor compensated“ Gleichrichter
- ◆ Keine Gleichrichter-Oberwellen
- ◆ Eingangs Cos. Phi-Kompensation >0,99
- ◆ Batterie-Autonomiezeit von 7 Minuten bis 8 Stunden erhältlich
- ◆ Wechselrichter mit Crestfaktor 5 : 1, für die optimale Versorgung von nicht-linearer Last ohne Leistungseinschränkung
- ◆ Wählbare Betriebsart: Online oder Eco-Mode, Wirkungsgrad: > 98%
- ◆ Flüssigkeitsgekühlte Komponenten
- ◆ Modular erweiterbar
- ◆ Standardmässig Slot für Kommunikationskarten: RS232, USB, Modbus, SNMP und XML WEB-Interface
- ◆ Standard LCD (graphisches Display mit 15 wählbaren Sprachen)
- ◆ 3000 Ereignisspeicher: Zustandsmeldungen, Umschaltungen, Netzausfälle, Alarmer etc. bleiben gespeichert und können jederzeit abgelesen werden.

MGE
UPS SYSTEMS

www.mgeups.ch

Lenzenstrasse 11
8953 Dietikon
Tel. 01/745 40 80
Fax 01/745 40 85
E-Mail: info.ch@mgeups.com