Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 98 (2007)
Heft: 5

Artikel: Electroniques de puissance pour piles à combustible
Autor: Affolter, Jean-François / Carpita, Mauro / Garcia, Olivier
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857418

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: 25.12.2025

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

Electroniques de puissance pour piles à combustible

Chaque application demande une électronique spécifique

Si les piles à combustible sont des techniques prometteuses, leur rendement global doit toutefois être modéré par tous les éléments de la chaîne, surtout pour la mise à disposition des carburants nécessaires. Des électroniques de puissance performantes sont souhaitables pour augmenter au maximum l'efficacité énergétique de ces systèmes dans leur utilisation. En outre, vu les caractéristiques de tension particulières de ces générateurs électrochimiques, ces électroniques ne se trouvent pas dans le commerce et pour chaque prototype de pile, une électronique de puissance spécifique doit encore être développée.

A moyen terme, notre société sera confrontée à des problèmes énergétiques majeurs. Notre très forte dépendance aux énergies non renouvelables équivaut à une politique irresponsable si nous ne trouvons pas de solutions plus efficaces et ne développons rapidement et de manière

Jean-François Affolter, Mauro Carpita, Olivier Garcia

drastique les énergies renouvelables pour couvrir nos besoins sans perdre en qualité de vie.

Dans ce sens, la pile à combustible (PAC) est une technologie actuellement reexplorée et offre en effet certains avantages. Offrant plusieurs technologies [1], hautes ou basses températures, différents électrolytes, leur carburant primaire peut être élaboré à partir de diverses sources, telles l'eau, le vent (le soleil) ou la biomasse. Leur rendement dans l'utilisation est environ du double d'un moteur à combustion essence, ce qui est avantageux pour la mobilité. En ce qui concerne la cogénération, elles concurrencent avantageusement les autres technologies en terme de rendement. Pour toutes les applications, les piles à combustible présentent l'avantage non négligeable d'être plus silencieuses et sans vibration.

Leurs inconvénients se situent actuellement au niveau du coût pas encore compétitif et, parfois encore, de leur fiabilité. Et, en ce qui concerne la mobilité, leur avenir ne semble pas encore vraiment joué, face à l'émergence de nouvelles batteries à recharge rapide et face au si faible coût des technologies actuelles.

Les hautes écoles contribuent à l'avancement exploratoire de cette technologie. Ainsi, depuis plusieurs années, les instituts Energie et Systèmes électriques (Yverdon) et Energie et Automatisation (Sion) de la HES-SO utilisent les piles à combustible dans différentes applications [2–6].

Une des problématiques est la conversion efficace de l'énergie électrique de la pile et sa mise en forme pour l'utilisateur. Le présent article décrit les réalisations et performances atteintes dans ce domaine pour deux projets concrets: une petite motorisation électrique pour bateaux et la gestion de l'énergie du bateau de loisirs familial Hydroxy 3000, de 7 passagers.

Chargeur intelligent

L'objectif du projet a été de développer une petite motorisation silencieuse, non polluante dans son utilisation, basée sur une pile à combustible de 300 W, agissant comme «range extender» d'une motorisation électrique basée sur batteries (figure 1). L'électronique de puissance y joue un rôle important pour la mise en forme de l'énergie et une efficacité maximum est souhaitable.

Les caractéristiques de tension de la pile à combustible et de la batterie étant différentes, il est nécessaire d'utiliser une interface d'électronique de puissance pour recharger la batterie. Elle a pour but d'adapter la tension de la pile à combustible variant de 60 V à vide à 36 V à pleine puissance (200 W) à la tension de la batterie variant approximativement de 24 V (batterie déchargée) à 28,8 V (batterie chargée). Par la même occasion, elle permet de gérer la puissance de recharge de la batterie.

Comme la tension de la pile à combustible est toujours supérieure à celle de la batterie, un circuit abaisseur représenté dans la figure 2 a été choisi pour le chargeur. La puissance maximale de charge vaut 200 W. Le chargeur a été optimisé afin de générer le moins possible de pertes dans la plage d'utilisation (50–200 W). Le rendement du chargeur prenant en compte toutes les pertes (pertes internes et consommation de l'électronique de commande) est représenté dans la figure 3. Dans la plage d'utilisation (50–200 W), il se situe au-dessus de 95%.

De plus, une électronique de commande intelligente et peu gourmande en énergie, dédiée spécialement à l'application en question, a été développée. Elle a pour but de gérer de manière optimale l'état de charge de la batterie en fonction de l'utilisation du bateau. Toute l'intelligence du chargeur est implémentée dans un microprocesseur optimisé pour des ap-

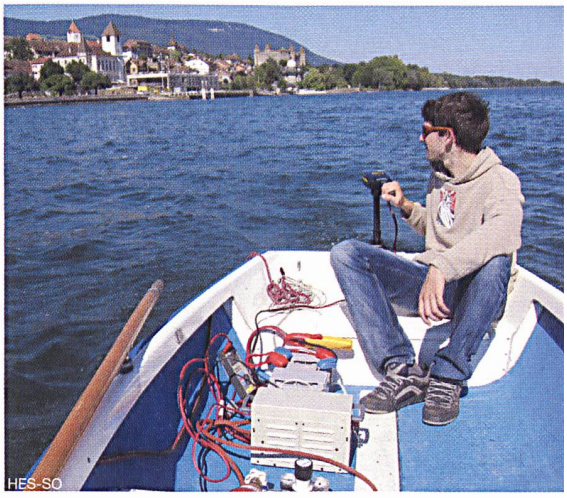

Figure 1 Bateau Piccolo et système pile à combustible (essais)

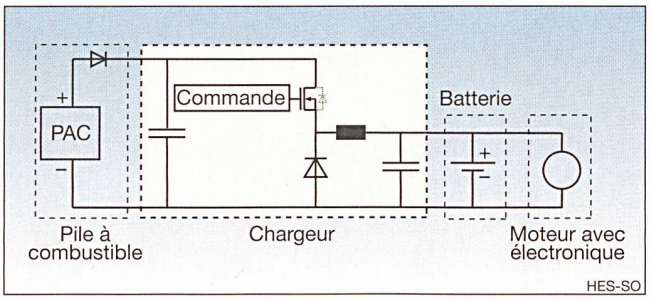

Figure 2 Schéma simplifié du chargeur de batterie

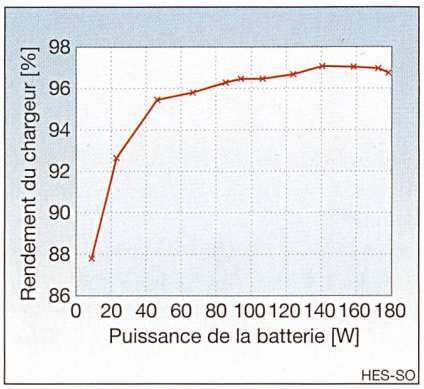

Figure 3 Rendement du chargeur de batterie

plications à faible consommation énergétique (gestion intelligente de la charge et de l'énergie, algorithme de régulation du chargeur, protection, affichage des erreurs, etc.). Celui-ci possède en outre un mode «veille» extrêmement économique.

Les alimentations auxiliaires pour l'électronique de commande ont été réalisées de manière à pouvoir être mises hors service en mode veille du chargeur afin d'économiser de l'énergie. L'interfaçage avec le système de la pile à combustible permet le déclenchement et l'enclenchement de celle-ci à partir du chargeur. De plus, l'affichage des erreurs et des états du chargeur facilite grandement son utilisation.

Le principe de fonctionnement de base du chargeur est résumé dans le schéma de la figure 2. Un interrupteur principal permet de mettre en marche ou d'éteindre le chargeur. Lorsque celui-ci est mis en marche, il contrôle de manière autonome l'état de charge de la batterie. Si celle-ci est déchargée ou que le moteur électrique consomme de l'énergie, le chargeur enclenche la pile à combustible et recharge la batterie. Tant que la tension de la batterie est inférieure à 28,8 V, le courant de charge est maximal (régulation du courant maximal). Dès que la tension de batterie atteint 28,8 V, elle est maintenue à cette tension tandis que le courant de charge diminue (régulation en tension). La batterie est considérée comme totalement chargée, dès que le courant de charge descend en dessous d'un seuil déterminé. Celui-ci correspond à une puissance de charge d'environ 50 W afin de maintenir un bon rendement énergétique du système.

Dès que la charge est terminée, le chargeur éteint la pile à combustible ainsi que les alimentations auxiliaires et se met en mode veille. Sa consommation tombe alors à environ 300 mW. Toutes les 30 secondes, il se réactive brièvement, vérifie que la batterie soit chargée et qu'aucun consommateur ne décharge la batterie. Si tel est le cas, il retourne en mode veille. Sinon, il réactive la charge de la batterie. En cas d'erreur, le chargeur arrête immédiatement la charge de la batterie et affiche un message d'erreur (figure 4).

Convertisseur DC/DC

Ce convertisseur DC/DC à commutation douce est destiné à améliorer le fonctionnement électrique du bateau Hydroxy 3000, réalisé en 2003 pour tester de manière pratique certaines technologies de piles à combustible dans la navigation (figure 5). La problématique actuelle est que la puissance de sortie de la pile est réglée naturellement, par la demande de charge. Une électronique est développée pour forcer sa production à un niveau plus élevé, par exemple pour accélérer l'embarcation ou recharger plus rapidement les batteries tampon.

Le convertisseur présenté ci-dessous a été développé pour stabiliser la tension de sortie des cellules sur la pile, laquelle fournit une tension nominale de 48 V. Cette tension dépend fortement des conditions d'utilisation. De plus, des transitoires de charge rapides et les ondulations de courant peuvent avoir des conséquences non négligeables sur la vie de la pile. Pour coupler correctement la pile avec d'autres sources d'énergie et charges, un convertisseur DC/DC s'avère donc souhaitable.

Les caractéristiques fondamentales pour un convertisseur de ce type doivent par conséquent être de bas niveau d'ondulation de courant à l'entrée et à la sortie, à haute dynamique de réponse et cela avec un rendement élevé dans différentes conditions de charge. Par contre, les cellules ne devant pas recevoir de l'énergie, une structure bidirectionnelle n'est pas nécessaire.

Après une analyse de différentes possibilités, le choix s'est porté sur une topologie avec une configuration en pont H avec «phase-shifting», c'est-à-dire avec variation de phase entre la branche amont et la branche aval. Cette structure a cependant été modifiée pour obtenir une commutation douce. La commutation douce de la branche amont (commutation douce à tension nulle) est obtenue en utilisant deux condensateurs de commutation en parallèle aux deux valves de la branche. La commutation douce de la branche aval (commutation douce à courant nul) est obtenue en utilisant un condensateur et une inductance saturable [7]. Le conden-

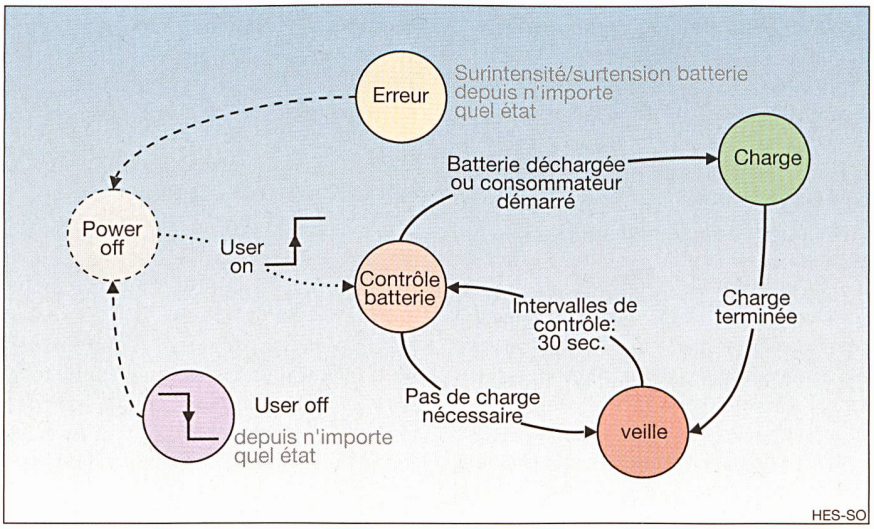

Figure 4 Schéma simplifié de fonctionnement du chargeur

sateur en série permet en plus d'amener le courant à zéro pendant la phase de recirculation en éliminant ainsi une partie importante des pertes par conduction.

Schéma électrique du convertisseur

Le schéma électrique du convertisseur est représenté à la figure 6a. L'allure des courants et tensions est représentée dans la figure 6b avec l'hypothèse de conduction continue et d'ondulation de courant dans l'inductance de sortie L_o négligeables. Le principe de fonctionnement de cette topologie est bien expliqué par Cho et Alii dans [7]. Nous considérons d'abord la commutation de la branche amont (S_1, S_3). Dans l'hypothèse de conduction continue et en négligeant les oscillations, le courant dans l'inductance peut être considéré constant. Pendant la phase M_1, avec S_1 et S_2 en conduction, le courant au primaire du transformateur, et par conséquent dans le condenseur C_b, est constant. La tension à ses bornes passe d'une valeur maximale négative à une valeur maximale positive. Pendant la phase M_2, le transistor S_1 se déclenche et la tension à ses bornes augmente, car imposée par les deux condenseurs C_1 et C_3 (en parallèle pendant cette phase). La tension aux bornes du composant S_3 se réduit. La tension V_{ab} diminue jusqu'à s'annuler. Lorsque la tension atteint le zéro, la diode D_3 entre en conduction. Pendant la phase M_3, la diode D_3 et le transistor S_2 sont en conduction. Suite à la tension imposé par le condensateur C_b sur l'inductance de fuite L_{lk}, le courant I_p aux primaire diminue jusqu'à s'annuler. Pendant la phase M_4, le courant aurait la tendance à s'inverser, mais il est maintenu à zéro par l'inductance saturable L_s.

Figure 5 Bateau pile à combustible Hydroxy 3000

Considérons maintenant la commutation de la branche aval (S_2, S_4). Pendant la phase M_5, le déclenchement (à courant nul) du transistor S_2 est commandé. Finalement, la commande d'enclenchement du transistor S_4 provoque l'entrée en conduction de la diode D_4. Comme on le voit clairement par l'analyse des allures de figure 6b, ce convertisseur permet la commutation douce de tous les composants de puissance. En plus, il permet d'obtenir un courant nul pendant la phase de recirculation en réduisant ainsi les pertes totales.

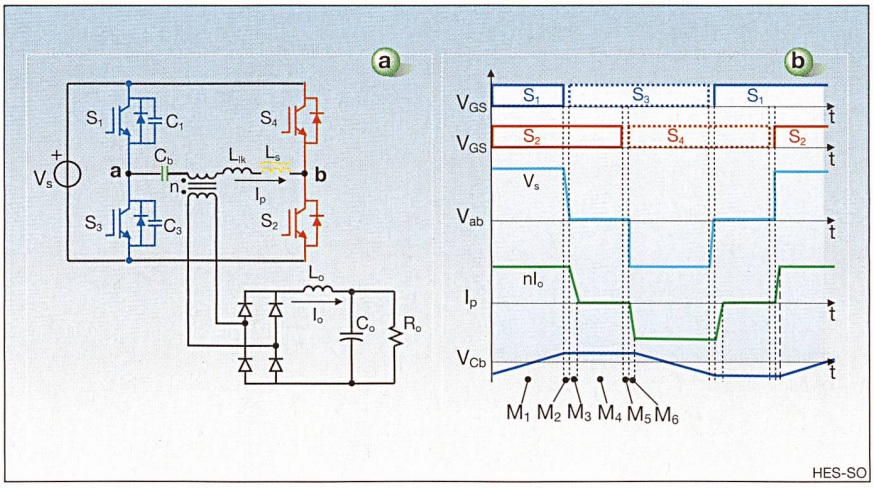

Figure 6 Convertisseur DC/DC

Figure 6a: schéma électrique du convertisseur; figure 6b: allures théoriques des grandeurs principales.

Résultats de simulation et expérimentaux

Le circuit de figure 6a a été simulé avec le programme Simplorer. La figure 7 représente le schéma électrique simulé, tandis qu'en figure 8, on trouve les principales grandeurs électriques. Les résultats sont en accord avec les allures théoriques présentées à la figure 6b.

Le prototype du convertisseur est représenté dans la figure 9a. Le convertisseur utilise le système de réglage universel développé par la HEIG-VD, adéquat pour des prototypes de laboratoire. Pour ce prototype, un transformateur dimensionné pour 72 V de tension de sortie et d'une puissance 2 kW a été utilisé. Le convertisseur a été dimensionné pour une tension d'entrée nominale provenant de la PACo de 48 V (variable de 35 à 63 V) et une tension de sortie variable de 48 à 57 V. La fréquence de commutation nominale est de 40 kHz. Pour l'utilisation sur le bateau, il est prévu de réaliser un nouveau prototype dans une prochaine phase, avec un transformateur convenable avec un réglage dédié.

La figure 9b représente les mesures de U_{out}, U_{ab}, I_p avec une tension d'entrée de 48 V, une tension de sortie de 72 V et une puissance de charge de 2,8 kW. L'angle de déphasage dans ces conditions est de 22°. Ces résultats sont en accord avec les

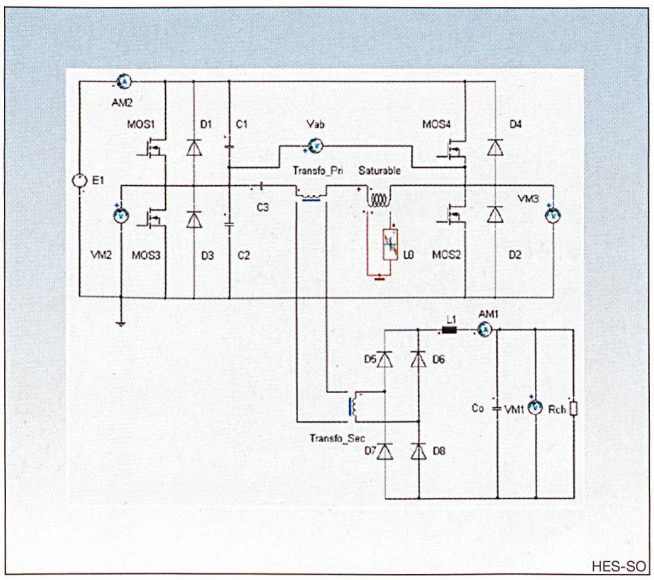

Figure 7 Résultats de simulation: schéma électrique du convertisseur

articles spécialisés

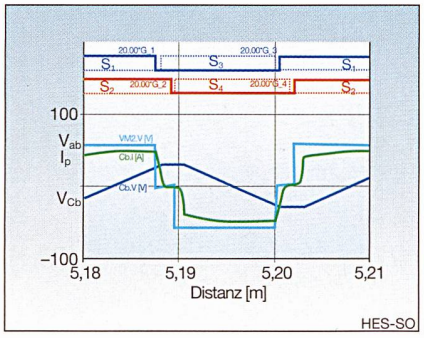

Figure 8 Résultats de simulation: allure des principales grandeurs

allures théoriques présentées à la figure 6 et avec les simulations présentées à la figure 8.

Le rendement en fonction de la charge est présenté sur la figure 10. Les résultats expérimentaux montrent un rendement du système (constitué par convertisseur, transformateur et filtre de sortie) plus élevé que 90% à partir de 20% de la charge nominale et supérieur à 93% pour une charge supérieure à 30% de la charge nominale.

Les résultats expérimentaux démontrent la validité de cette structure pour des applications piles à combustible. Les prochains développements prévoient la réalisation de la dernière version du prototype, du réglage dédié et les tests en exploitation sur le bateau.

Conclusions

Technologie novatrice, permettant une production électrique plus respectueuse de l'environnement, la pile à combustible démontre en termes énergétiques et environnementaux de meilleures performances que les motorisations thermiques classiques. Toutefois, le rendement global doit être modéré par tous les éléments de la chaîne, surtout pour la mise à disposition des carburants nécessaires. Des électroniques de puissances performantes sont souhaitables pour augmenter au maximum l'efficacité énergétique de ces systèmes dans leur utilisation.

Les électroniques de conversion réalisées dans la HES-SO démontrent des rendements de 93 à 98%. Plusieurs technologies ont été ainsi testées dans le cadre de ces projets, permettant des choix ultérieurs liant efficacité, simplicité et maîtrise des coûts en vue de la phase d'industrialisation.

Références

[1] G. Santner: Brennstoffzellen gehen in Serie, Bulletin SEV/AES 1/2007.

[2] P. Favre, D. Cicio, J.-F. Affolter: Fun boat powered by a fully automatic fuel cell. European Fuel Cells Forum, Lucerne, 1999.

[3] J.-F. Affolter, P. Mariotti: Application des PAC aux embarcations; spécificités et réalisations. Congrès Vel Elec, Grenoble, Juin 2002.

[4] J.-F. Affolter, A. Gianinazzi, Y. Leuppi: Hydroxy 3000, third generation FC boat. European Fuel Cells Forum, Lucerne, 2004.

[5] J.-C. Heritier, HP. Biner: PilePac; pile à combustible et pompe à chaleur. HEVs, Rapport interne. 2004.

[6] J.-F. Affolter, M. Carpita, F. Gaille, S. Schintke: Possibilités et limites des piles à combustible dans la navigation. OFEN, Berne, déc. 2005.

[7] J. Cho, J. Sabaté, G. Hua, F.C. Lee: Zero-Voltage and Zero-Current-Switching Full Bridge PWM Converter for High-Power Applications, IEEE tr. on PE, vol. 11, no. 4, pp. 622–628, July 1996.

Informations sur les auteurs

Jean-François Affolter enseigne l'énergie électrique à la HEIG-VD depuis janvier 1995. Il est responsable du laboratoire haute tension et du laboratoire d'énergétique électrique. Diplômé ETS de la HEIG-VD en 1980 puis Master en génie électrique de l'Université McMaster (CDN) en 1987, son expérience professionnelle débute dans les câbleries (Cortaillod) et se poursuit dans les réseaux électriques (Ontario Hydro et EOS). A l'enseignement de ces sujets, il ajoute des développements dans l'application des piles à combustible depuis 10 ans.
HES-SO/HEIG-VD, 1401 Yverdon, jean-francois.affolter@heig-vd.ch

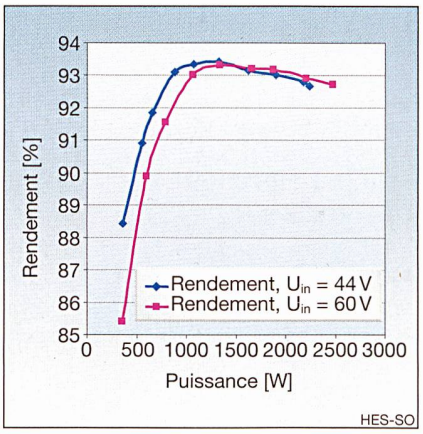

Figure 10 Rendement global en fonction de la puissance de charge, U_{out} = 72 V

Mauro Carpita, Master en génie électrique en 1985 et doctorat en électronique de puissance de l'Université de Gênes (Italie) en 1989, a développé son expérience professionnelle dans les centres de recherche de Ansaldo Ricerche, Lincoln Electric, ABB Ricerca et ABB Servomotors (Italie). Son expérience professionnelle concerne les convertisseurs de puissance pour l'énergie, pour les entraînements réglés et pour la soudure. Il a publié plus de 50 articles dans des conférences et journaux internationaux. Il a enseigné électronique de puissance à l'Université de Cassino (I) comme chargé de cours de 1998 à 2001. Il enseigne l'électronique de puissance à la HEIG-VD d'Yverdon-les-Bains (CH) depuis octobre 2003.
HES-SO/HEIG-VD, 1401 Yverdon, mauro.carpita@heig-vd.ch

Olivier Garcia est ingénieur EPF en électricité. Il a obtenu son diplôme de l'EPFZ en 1998 et son doctorat de l'EPFZ en 2002 durant lequel il a développé l'électronique de puissance nécessaire à interfacer la pile à combustible, les supercondensateurs et le système d'entraînement de la voiture à hydrogène Hy-Power. Il est actuellement professeur à la Haute Ecole valaisanne dans le domaine de l'électronique industrielle et des systèmes énergétiques.
HES-SO/HEVs, 1950 Sion, olivier.garcia@hevs.ch

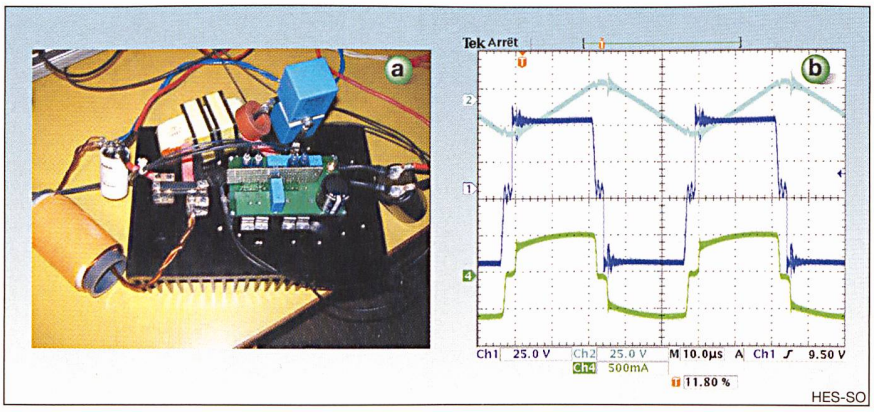

Figure 9 Résultats expérimentaux
Figure 9a: prototype; figure 9b: mesures de U_{ab}, U_{Cb}, I_p, P = 2,8 kW

Zusammenfassung

Leistungselektronik für Brennstoffzellen

Jede einzelne Anwendung erfordert die passende Elektronik. Brennstoffzellen stellen zwar eine vielversprechende Technik dar, bei der Beurteilung ihres Gesamtwirkungsgrades gilt es jedoch, die ganze Leistungskette zu berücksichtigen, insbesondere bezüglich der Bereitstellung der benötigten Brennstoffe. Gefragt sind effizient arbeitende Leistungselektroniksysteme, um die Energieeffizienz im Betrieb zu optimieren. Ferner sind angesichts der besonderen Spannungscharakteristiken dieser elektrochemischen Stromquellen solche Elektroniksysteme nicht im Handel erhältlich, und für jeden Zellentyp muss eine spezifische Leistungselektronik entwickelt werden.