

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 102 (2011)

Heft: 9

Artikel: Le stockage hydropneumatique d'énergie HyPES

Autor: Lemofouet, Sylvain / Rufer, Alfred

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856847>

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: 18.02.2026

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

Le stockage hydropneumatique d'énergie HyPES

Une solution écologique pour faciliter l'exploitation des sources renouvelables intermittentes

La part des énergies renouvelables est amenée à croître fortement dans le mix énergétique de demain. Or, le caractère stochastique de ces sources induit la nécessité de pouvoir stocker l'énergie produite pour la livrer au réseau en temps voulu. Cet article présente un nouveau concept de stockage exploitant la propriété bien connue de la compressibilité de l'air pour conserver l'énergie, tout en améliorant considérablement l'efficacité de ce type de systèmes grâce à l'utilisation d'eau comme piston pour les transferts d'énergie.

– qui pour une grande majorité sont de type électrochimique –, soit à développer de nouvelles solutions répondant mieux à cet énorme besoin en termes d'efficacité, de coût et d'impact sur l'environnement.

Le stockage d'énergie par air comprimé n'est pas en reste. Les premières tentatives d'utilisation de l'air comprimé comme vecteur d'énergie remontent à la fin du XIX^e siècle, notamment dans les transports. Mais cette technique a été rapidement abandonnée à cause du faible rendement des moteurs/compresseurs de l'époque et de l'arrivée du pétrole qui était économiquement plus avantageux.

Cet article expose un nouveau concept de stockage d'énergie par air comprimé développé actuellement par la start-up Enairys Powertech de l'EPFL: le stockage hydropneumatique d'énergie (HyPES pour HydroPneumatic Energy Storage). Il explique d'une part les propriétés de base du stockage d'énergie par air comprimé, puis présente le principe de fonctionnement et les caractéristiques essentielles des deux systèmes de stockage hydropneumatique d'énergie étudiés à l'EPFL.

Sylvain Lemofouet, Alfred Rufer

Dans un contexte d'approvisionnement énergétique qui devra à moyen terme se passer des énergies fossiles et nucléaires, et en même temps accroître considérablement la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique global, le stockage d'énergie devient un enjeu majeur et un défi de taille pour l'industrie électrique. Le stockage est en effet indispensable pour supprimer les effets néfastes dus à l'intermittence naturelle de certaines sources d'énergies

renouvelables – comme les sources éolienne et solaire –, ainsi que pour améliorer l'efficacité des moyens de production conventionnels en assurant une meilleure adéquation entre la production et la consommation.

Les activités de recherche et développement en matière de stockage d'énergie connaissent de ce fait un regain d'engouement ces dernières années. Ces travaux visent soit à améliorer l'efficacité et la durabilité des technologies existantes

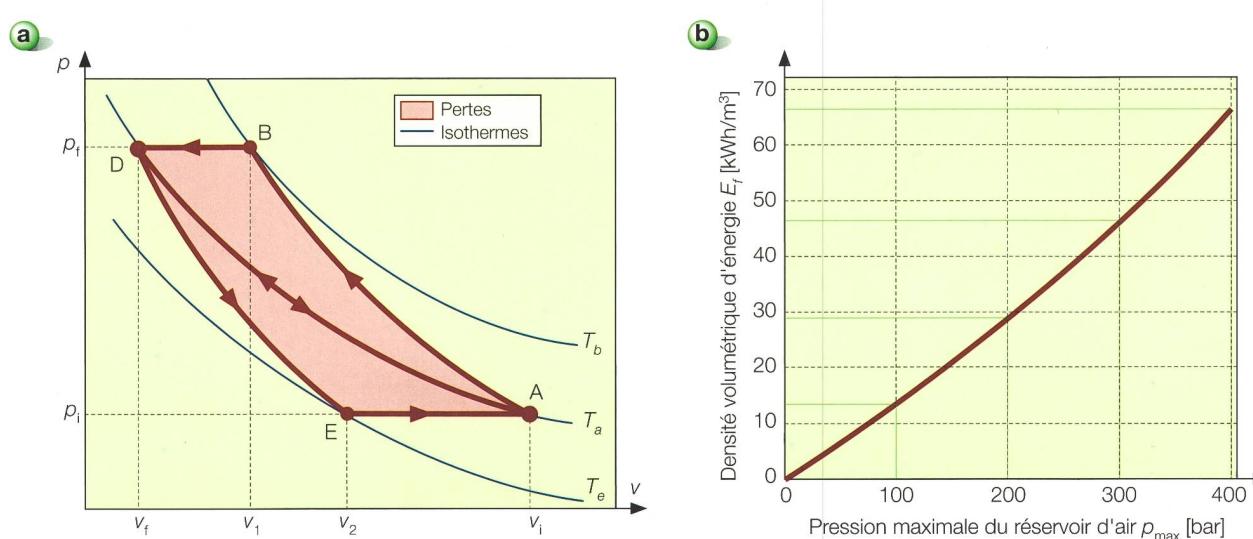


Figure 1 a) Diagramme PV d'un cycle de stockage d'énergie par air comprimé. b) Densité volumétrique d'énergie de l'air comprimé en fonction de la pression.

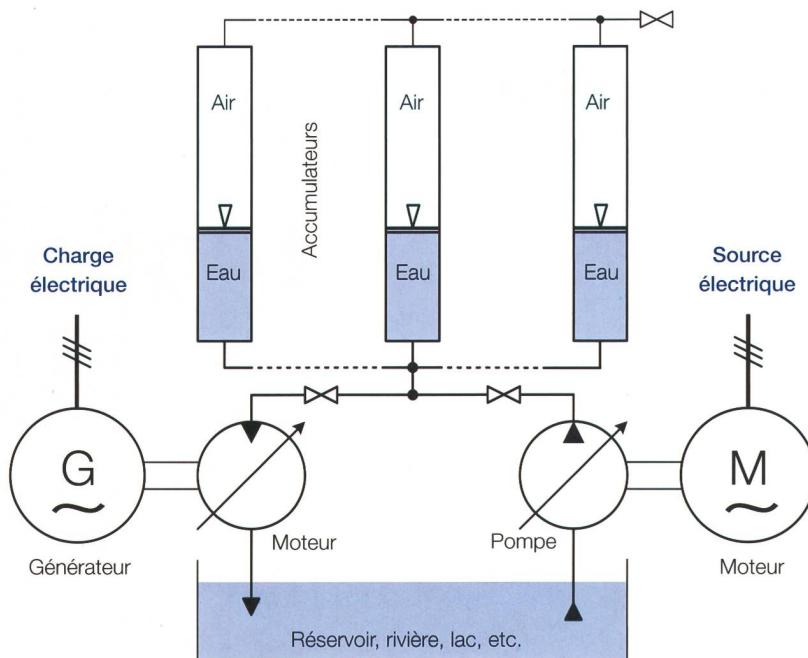


Figure 2 Schéma de principe du système de stockage hydropneumatique d'énergie à circuit d'air fermé (HyPES-1).

Stockage d'énergie par air comprimé

Cette forme de stockage fait l'objet d'une recrudescence d'intérêt depuis quelques années, et deux approches fondamentales se dégagent pour améliorer l'efficacité de ce principe centenaire et valoriser ses avantages écologiques intrinsèques :

■ L'approche adiabatique [1]: elle consiste à comprimer l'air au moment du stockage par les moyens classiques, puis à extraire et emmagasiner séparément l'importante chaleur de compression produite, avant de stocker l'air dans une cavité souterraine. La chaleur ainsi accumulée est utilisée au moment du déstockage pour réchauffer l'air comprimé avant de le détendre dans une turbine classique entraînant une génératrice électrique. Cette approche exige donc une bonne isolation thermique vis-à-vis de l'extérieur et des machines conçues pour des températures de fonctionnement élevées, de l'ordre de 1000 °C.

■ L'approche isotherme: il s'agit là de comprimer l'air de la manière la plus isotherme possible lors du stockage et de le détendre de façon similaire lors de la restitution de l'énergie, ce par des moyens hydrauliques. Cette approche exige un bon échange thermique avec l'environnement pour le maintien de la température constante.

Cette seconde approche est celle adoptée à l'EPFL et sert de base aux

deux concepts technologiques présentés dans les paragraphes qui suivent.

Potentiel énergétique de l'air comprimé

Le stockage d'énergie par air comprimé consiste simplement à convertir l'énergie initiale (généralement électrique) sous forme de pression d'air (compression) pendant le stockage, et à reconvertis cette pression d'air (détente) sous la forme d'énergie initiale lors de la décharge. Cette conversion de l'énergie électrique se fait de manière indirecte à travers l'énergie mécanique et, dans le cas des systèmes hydropneumatiques, l'énergie hydraulique.

Du fait de la nature gazeuse de l'air, les processus de compression et détente s'accompagnent indiscutablement de phénomènes thermiques dont l'ampleur est déterminante pour leur efficacité énergétique. La figure 1a montre la courbe PV (pression-volume) d'un processus de stockage pneumatique d'énergie suivant le cycle de Joule. Ce cycle s'effectue entre l'état initial A(p_i, V_i, T_a) caractérisé par la pression initiale p_i , le volume initial V_i et la température ambiante T_a , et l'état final D(p_f, V_f, T_a) déterminé par la pression finale p_f , le volume final V_f et la température ambiante T_a .

La phase de stockage est décrite par la compression selon le segment AB et le transvasement à pression constante selon

le segment BD. Elle s'accompagne d'une élévation de température de T_a à T_b , et l'énergie consommée correspond à l'aire « $ABDV_fV_i$ ». La phase de décharge est représentée par la détente selon le segment DE et le transvasement à pression constante selon le segment EA. Elle a pour conséquence un abaissement de température de T_a à T_e , et l'énergie produite est indiquée par l'aire « $DEAV_iV_f$ ». Il en résulte que l'aire « ABDE » définit les pertes thermodynamiques du cycle : plus l'excursion de température est grande, plus cette aire est large et plus le rendement du cycle est faible. Le cycle idéal est donc celui faisant le trajet ADA le long de l'isotherme à température ambiante T_a .

Le potentiel énergétique de l'air comprimé, c'est-à-dire le travail que pourrait fournir une masse d'air comprimé à l'état (p_f, T_a) est défini par son energie pour une transformation reversible qui l'emmène à l'état d'équilibre atmosphérique (p_a, T_a). Cette énergie potentielle E_f dépend également du type de transformation généralement caractérisé par le facteur polytropique n – en théorie n varie entre « 1 » pour une transformation isotherme idéale et « 1,4 » pour une transformation adiabatique idéale (sans échange de chaleur avec l'extérieur), mais en pratique il se situe entre ces deux valeurs. L'énergie potentielle E_f pour une unité de volume de 1 m³ est définie par la relation suivante [2] :

$$E_f = \frac{n}{n-1} p_f \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_f} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

L'énergie potentielle maximale est obtenue pour une détente isotherme ($n=1$) à la température ambiante T_a ; elle est représentée à la figure 1b. On constate une relation quasi-linéaire avec la pression maximale de service, d'où l'intérêt de stocker à la pression la plus haute possible.

Stockage à circuit d'air fermé (HyPES-1)

Ce système de stockage hydropneumatique est dit « à circuit d'air fermé » parce que la masse d'air qu'il contient reste invariante durant son fonctionnement.

Principe

Le principe du système HyPES-1 est illustré par le schéma de la figure 2. Ce système comprend :

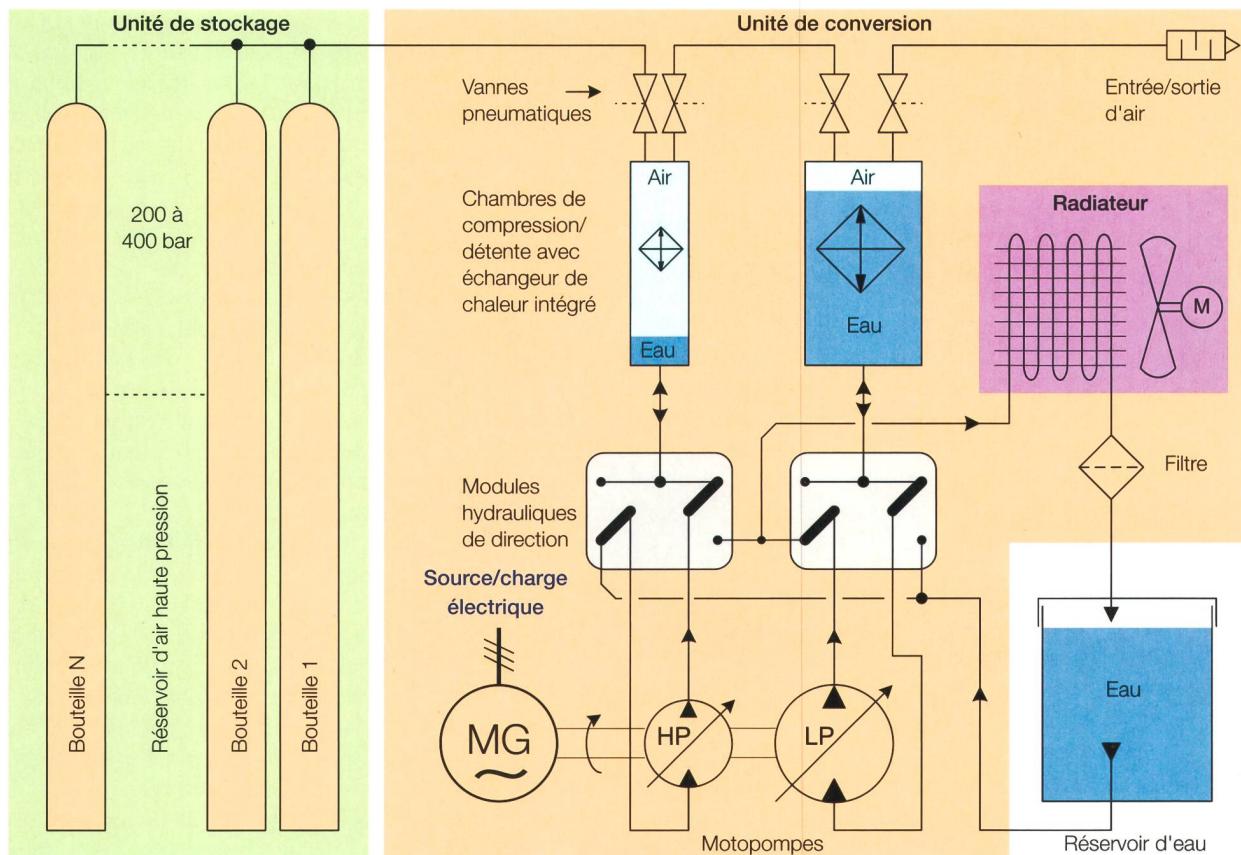


Figure 3 Schéma de principe du système de stockage hydropneumatique d'énergie à circuit d'air ouvert (HyPES-2).

Une unité de stockage haute pression (> 200 bar) constituée d'une batterie d'accumulateurs hydropneumatiques connectés en parallèle et contenant de l'air ou de l'azote pressurisé à une pression initiale p_i . En cas de volume de stockage important, les accumulateurs peuvent être remplacés par des tronçons de pipeline.

- Un réservoir ou une source d'eau (rivière, lac, etc.).
- Un train de pompage comprenant un moteur électrique et une pompe hydraulique à débit variable, qui pompe l'eau du réservoir pour comprimer l'air contenu dans les accumulateurs pendant la phase de stockage.
- Un train de turbinage comprenant une génératrice électrique et un moteur hydraulique à débit variable, qui convertit le travail de détente de l'air comprimé en électricité pendant la phase de décharge.

L'échange thermique entre l'air et l'eau étant négligeable, les cycles de compression/détente doivent être suffisamment longs pour que l'échange thermique nécessaire à l'isotherme se fasse à travers les parois des accumulateurs. Le temps

de remplissage/vidage des accumulateurs doit donc être largement supérieur à leur constante de temps thermique, ce qui définit une capacité minimale pour ces accumulateurs pour une puissance donnée. Pour assurer un contrôle de la puissance pendant ces cycles, les variations de couple dues aux variations de pression dans les accumulateurs sont compensées par les variations de débit des machines hydrauliques.

Caractéristiques

Ce système présente l'avantage d'une grande simplicité et de l'utilisation de composants industriels standards pouvant être produits jusqu'à l'échelle du MW. Des rendements de cycle électrique de l'ordre de 75% sont réalisables : une efficacité comparable à celle des stations de pompage-turbinage. Il présente en outre, contrairement à ces dernières, l'avantage de ne pas nécessiter un site géographique particulier pour sa réalisation.

Le principal inconvénient de ce système est sa faible densité énergétique, de l'ordre de 1 kWh par mètre cube et hec-tobar (3 kWh/m³ à 300 bar) ; le volume

résiduel de gaz à l'état chargé est en effet faible par rapport au volume total du réservoir. Cette faible densité énergétique supporte néanmoins avantageusement la comparaison avec le stockage par pompage-turbinage : pour stocker 1 MWh par pompage turbinage, il faut pomper 2000 m³ d'eau dans un barrage ayant 250 m de dénivellation alors qu'avec ce système hydropneumatique, il faudrait pomper 200 m³ d'eau dans des accumulateurs ayant une capacité totale de 500 m³ [3].

Stockage à circuit d'air ouvert (HyPES-2)

Pour accroître la densité énergétique du stockage hydropneumatique, il est indispensable que les réservoirs haute pression soient exclusivement réservés au stockage de l'air comprimé et que le processus de compression/détente se fasse dans une unité séparée. Telle est l'approche adoptée pour le système hydropneumatique à circuit d'air ouvert.

Principe

Le principe du système HyPES-2 est illustré par le schéma de la figure 3. Ce

système comprend essentiellement trois parties :

- Une unité de stockage constituée d'une batterie de bouteilles ou cylindres haute pression connectés en parallèle, dont le volume total définit la capacité énergétique du système.
- Un réservoir d'eau.
- Une unité de conversion réversible, qui utilise l'eau du réservoir pour convertir efficacement l'électricité fournie en air haute pression, et qui reconvertit cet air comprimé en électricité lorsque cela est requis. La taille de cette unité dépend donc de la puissance maximale de l'application.

La conversion mécanique-pneumatique (et inverse) se fait par une chaîne hydropneumatique comprenant un nombre pair (2 ou 4) d'étages de différentes cylindrées. Chaque étage est essentiellement constitué d'une motopompe hydraulique à débit variable, d'un module hydraulique de direction et d'une chambre de compression/détente avec échangeur de chaleur intégré. Le processus de compression/détente se fait de manière séquentielle à travers les étages qui sont alternativement actifs et passifs. Comme pour le système HyPES-1, les variations de couple dues aux variations de pression dans les chambres de compression/détente sont compensées par la variation de débit des motopompes de manière à assurer un contrôle de la puissance.

Ces chambres constituent le cœur du système hydropneumatique, dans lequel le principe du piston liquide est appliqué pour comprimer ou détendre l'air de

manière quasi-isotherme. Les échangeurs de chaleur intégrés permettent d'avoir une très grande surface d'échange thermique entre l'air et l'eau tout en minimisant le contact direct entre les deux fluides pour éviter la dissolution de l'air dans l'eau. Cette grande surface d'échange, associée à la grande capacité calorifique de l'eau (4 fois supérieure à celle de l'air), permet de limiter les variations de température à l'intérieur des chambres à quelques degrés aussi bien en mode compression qu'en mode détente (quasi-isotherme) et d'obtenir ainsi un excellent rendement thermodynamique.

Les modules hydrauliques de direction servent à contrôler le sens d'écoulement de l'eau et ainsi à adapter le flux unidirectionnel dans les motopompes – qui leur assure un sens de rotation unique – au flux bidirectionnel dans les chambres de compression/détente. Ils permettent également de renvoyer l'eau en provenance des chambres, où elle a subit une légère augmentation ou diminution de température, toujours vers le radiateur externe où l'équilibre thermique avec l'environnement est réalisé avant le retour au réservoir.

Caractéristiques

Le système HyPES-2 présente l'avantage d'avoir une densité d'énergie plus de 10 fois supérieure à celle d'un système HyPES-1 ayant la même pression maximale de service. Cette densité d'énergie correspond à celle représentée à la figure 1b; elle peut donc atteindre 60 kWh/m^3 à environ 350 bar, ce qui est

comparable à la densité d'énergie des batteries au plomb pour des applications stationnaires à cycles de vie élevés.

Le système HyPES-2 possède néanmoins une chaîne de conversion relativement plus complexe et plus longue que celle du système HyPES-1, ce qui aboutit à un rendement de cycle électrique un peu plus faible, de l'ordre de 60% pour les systèmes de faible puissance. Une marge d'amélioration subsiste néanmoins et des rendements de 65 à 70% pourraient être atteints, notamment pour des systèmes de grande puissance.

Les systèmes HyPES-2 sont réalisables dans une large gamme de puissance, de quelques kW à plusieurs centaines de kW, voire de l'ordre du MW. Ils constituent une alternative intéressante aux batteries électrochimiques, aussi bien pour les applications résidentielles ou autonomes de petite puissance que pour les applications réseaux de grande puissance. La figure 4a présente le premier prototype industriel (15 kW/30 kWh) de ce système en cours de mise en service à l'EPFL. La figure 4b donne une illustration 3D d'un système HyPES-2 commercial dans la gamme de puissance de quelques dizaines de kW.

Conclusion

Les systèmes de stockage hydropneumatique d'énergie (HyPES) décrits dans cet article présentent trois principaux avantages. Ils offrent des solutions :

- Totallement écologiques du fait de l'utilisation d'air comme support de stockage, d'eau comme fluide actif et de métaux facilement recyclables (acier inox, aluminium) comme principaux matériaux de construction.
- Durables, car leur fondements technologiques en mécanique et hydropneumatiques sont bien établis dans le secteur industriel. Les principaux composants sont réparables et assurent à ces systèmes une durée de vie en service supérieure à 20 ans avec peu d'entretien.
- Economiques : la combinaison d'une longue durée de vie, d'un coût d'investissement relativement bas et la possibilité de valoriser les matériaux de construction en fin de vie, leur permet de présenter une rentabilité économique intéressante sur le cycle de vie.

Le principal risque lié à leur utilisation est la présence de la haute pression, mais des solutions de sécurité et sûreté existent et sont utilisées depuis des décennies dans l'industrie du gaz. Ces systèmes demeurent néanmoins encore en déve-



Figure 4 a) Prototype industriel du système HyPES-2 en cours de mise en service à l'EPFL. b) Illustration 3D d'un système HyPES-2 commercial pour applications résidentielles. Les dimensions indiquées correspondent à un système de l'ordre de 30 kW/60 kWh à 200 bar.

Zusammenfassung

HyPES: hydropneumatische Energiespeicherung

Eine ökologische Lösung für eine verbesserte Nutzung stochastischer erneuerbarer Energien

Ziel ist es, den Anteil erneuerbarer Energien im globalen Strommix künftig stark zu steigern. Das fluktuierende Auftreten dieser Energien macht es jedoch notwendig, die produzierte Energie zu speichern, um sie bei Bedarf ins Stromnetz einspielen zu können. In diesem Artikel wird ein neues Energiespeicherungskonzept vorgestellt, das derzeit vom Start-Up-Unternehmen Enairys Powertech der EPFL entwickelt wird. Grundprinzip dieses Konzepts ist die natürliche Eigenschaft der Verdichtbarkeit der Luft, wobei die Neuartigkeit dieser Technologie in der Verwendung von Wasser als Kolben sowohl bei der Energiespeicherung als auch bei der Energieabgabe besteht. Der «Flüssigkolben» ermöglicht es, die Effizienz dieses seit über einem Jahrhundert bekannten Energiespeicherungsprinzips deutlich zu steigern und seine intrinsischen ökologischen Vorteile zu nutzen. Einleitend werden die Grundeigenschaften der Energiespeicherung mit Druckluft erläutert, anschliessend folgt eine Beschreibung des Funktionsprinzips und der Hauptmerkmale der beiden von der EPFL erforschten hydropneumatischen Energiespeicherungssysteme.

CH

2004. http://www.2004ewec.info/files/24_1400_chrisbulloough_01.pdf.

[2] S. Lemoufouet: Investigation and Optimisation of Hybrid Electricity Storage Systems based on Compressed Air and Supercapacitors. Thèse de Doctorat N° 3628 EPFL-STI, Octobre 2006. http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2006/3628/EPFL_TH3628.pdf

[3] Y. Brunet: Technologies du stockage d'énergie. ISBN 978-2-7462-2054-6, Lavoisier, 2009.

Informations sur les auteurs

Dr **Sylvain Lemoufouet** est co-fondateur et directeur d'Enairys Powertech. Il a obtenu son diplôme d'ingénieur électrique à l'Ecole normale supérieure de l'enseignement technique (ENSET) de Douala (Cameroun) en 1999 et travaillé plusieurs années dans l'industrie et l'enseignement. Il a ensuite rejoint le Laboratoire d'électronique industrielle (LEI) de l'EPFL en 2002 pour effectuer une thèse de doctorat sur le stockage d'énergie. Les travaux de cette thèse sont le fondement de la technologie HyPES qui a conduit à la création d'Enairys Powertech en novembre 2008.

Enairys Powertech SA. Parc Scientifique EPFL-PSE D, 1015 Lausanne, sylvain.lemoufouet@enairys.com

Prof. **Alfred Rufer** est directeur du Laboratoire d'électronique industrielle (LEI) de l'EPFL et co-fondateur d'Enairys Powertech. Il a obtenu son diplôme d'ingénieur électrique EPFL en 1976 et a rejoint ABB en 1978 où il a travaillé sur le développement de convertisseurs à fréquence variable pour les entraînements de grande puissance. En 1993 il est devenu professeur-assistant à l'EPFL, puis professeur et directeur du LEI depuis 1996. Le professeur Rufer est l'auteur de plusieurs brevets d'invention et publications scientifiques de grande valeur.

EPFL-STI-LEI, Station 11, 1015 Lausanne, alfred.rufer@epfl.ch

Anzeige

lagement, des challenges technologiques et industriels doivent encore être relevés, et ils doivent prouver leur efficacité et leur fiabilité dans des applications réelles pour que leur commercialisation soit envisagée.

Le système HyPES-2 semble néanmoins très prometteur et est en cours d'industrialisation. La réalisation de la première installation pilote est prévue pour début 2012 à la centrale photovoltaïque de Mont-Soleil. Ce projet pilote,

dont le but est de lisser grâce à ce système de stockage la production électrique d'une partie de la centrale photovoltaïque, est réalisé en collaboration avec la Société Mont-Soleil et avec le soutien financier de BKW-FMB.

Références

- [1] C. Bullough, C. Gatzen, C. Jakiel, M. Koller, A. Nowi and S. Zunft: Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Integration of Wind Energy. Proc. of the European Wind Energy Conference EWEC 2004, 22-25 Nov. London, UK

ESL - EVU®



Die wirtschaftliche Zukunft für kleinere Unternehmen mit ESL-EVU

Abrechnung und Buchhaltung

- Von der Zählerablesung bis zum Druck der Rechnungen: alles aus einer Hand
- optimale Anbindung an Finanzbuchhaltung
- neueste Technologien und einfache Bedienung
- inklusiv HIK und ZFA/EDM
- Web-Portal für Kunden
- bereit für zukünftige Smart Metering – Systeme

Rufen Sie uns an. Gerne zeigen wir Ihnen die Zukunft.

Encontrol AG
Bremgartenstrasse 2
CH-5443 Niederrohrdorf

Tel. +41 56 485 90 44
E-Mail info@encontrol.ch
www.encontrol.ch

electrosuisse  **VSE** 

Sucht den Kontakt weber.vertigroup



Ineltec

13. – 16. Sept.
Halle 1.1
Stand A29

Kompakt, modular, anschlussfreundlich: Das weber.vertigroup Sortiment geizt nicht mit Vorzügen. Die 1- oder 3-polig schaltbaren NH-Sicherungs-Lastschalteleisten sind einfach und schnell montiert, ermöglichen ein sicheres Schalten und überzeugen mit einer kleinen Verlustleistung. Unschlagbarer Pluspunkt: weber.vertigroup ist offen für ein vielfältiges Zubehör-Programm, wie die verschiedenen Anschlussvarianten und den Stromwandlerblock.

:hager