

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 103 (2012)

Heft: 5

Artikel: Système de stockage d'énergie à bancs de condensateurs

Autor: Burnet, Jean-Paul / Rufer, Alfred

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857296>

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: 07.02.2026

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

Système de stockage d'énergie à bancs de condensateurs

Concept innovant pour l'alimentation des accélérateurs de particules du CERN

Les accélérateurs de particules sont des installations conçues pour recevoir des particules à basse énergie et les accélérer avant extraction. Ils fonctionnent généralement en mode pulsé, ce qui entraîne des variations de puissance très élevées et très rapides. Pour réduire l'impact de ces dernières sur le réseau électrique, le CERN a développé en collaboration avec l'EPFL un système de puissance avec stockage d'énergie intégré.

Jean-Paul Burnet, Alfred Rufer

Les accélérateurs de particules sont très largement utilisés dans le domaine de la recherche fondamentale, en sciences appliquées, en médecine et dans l'industrie. Il en existe divers types, le plus répandu aujourd'hui étant le synchrotron.

Un synchrotron est constitué d'un anneau circulaire dans lequel sont injectées des particules à basse énergie. Ces dernières sont accélérées par des systèmes radiofréquences, puis en sont extraites une fois qu'elles ont atteint l'énergie voulue. Afin de maintenir les particules sur cette trajectoire circulaire, des aimants sont disposés sur toute la circonference de l'accélérateur. Au fur et à mesure que les systèmes radiofréquences augmentent l'énergie des particules, le champ magnétique des aimants doit croître dans la même proportion pour conserver la bonne trajectoire. Les synchrotrons induisent par nature un fonctionnement en mode pulsé de leur système de puissance.

Situé à Genève, le CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire) possède plusieurs synchrotrons, le plus célèbre étant le LHC (Large Hadron Collider) dont la circonference mesure 27 km. Des protons y sont injectés à une énergie de 450 GeV pour y être accélérés jusqu'à 7 TeV. Mais auparavant, les protons doivent parcourir une chaîne d'accélérateurs, dont le PS (synchrotron à protons), afin d'atteindre une énergie suffisante pour être injectés dans le LHC (figure 1). Le système mis au point par le CERN concerne l'alimentation des aimants de l'accélérateur PS.

Une charge inductive pulsée

Le PS reçoit des particules à 1,4 GeV et les accélère jusqu'à 26 GeV. Les cycles durent 2,4 secondes et s'enchaînent les uns à la suite des autres, 7000 heures par an.

Cet accélérateur a une circonference de 628 m et possède 101 aimants, tous connectés en série pour obtenir un champ magnétique identique dans chacun d'entre eux et pour réduire le coût du câblage.

Les aimants principaux du PS représentent une charge totale de 0,9 H et 0,3 Ω. La puissance injectée peut atteindre plus de 45 MW durant l'accélération et s'inverse lors du retour à l'énergie d'injection avec une dynamique de 1 MW/ms (figure 2) [1, 2]. Par contre, la puissance moyenne sur un cycle est de l'ordre de 4 MW, soit un dixième de la puissance de pointe.

L'énergie fournie à l'aimant peut être décomposée en deux parties : l'une d'elles est dissipée par effet Joule dans les aimants et l'autre est stockée sous forme magnétique. Pour éviter de connecter directement cette charge sur le réseau électrique, le CERN a développé, en collaboration avec l'EPFL, une solution avec stockage d'énergie. L'idée était de créer un système de puissance incluant un stockage local qui puisse fournir et récupérer l'énergie magnétique de l'aimant lors de chaque cycle.

Dans le cas du PS, qui réalise 10 millions de cycles par an, le stockage sous

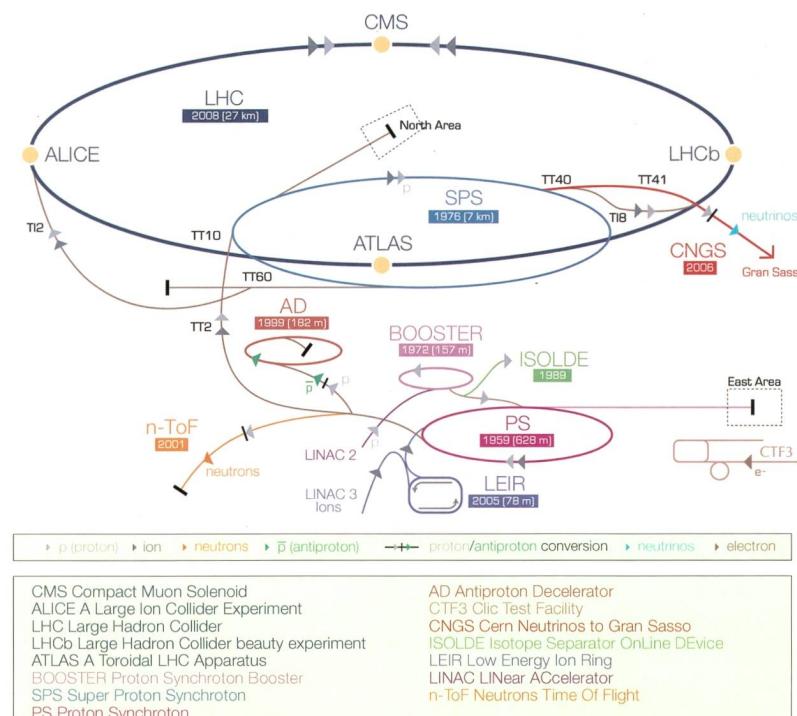


Figure 1 Les accélérateurs du CERN.

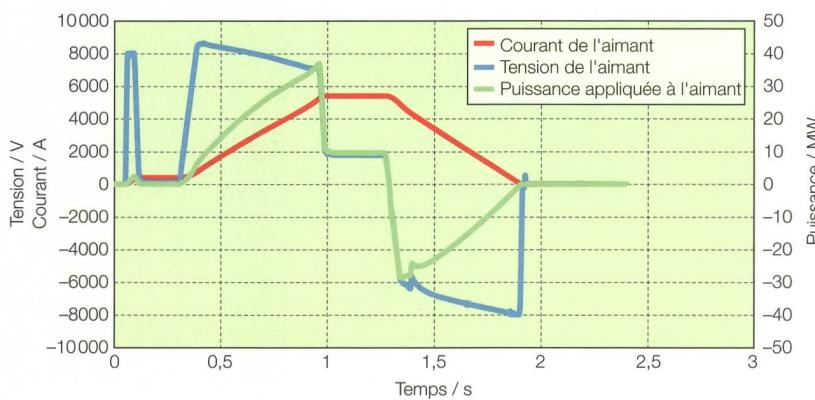


Figure 2 Exemple de cycle 25 GeV.

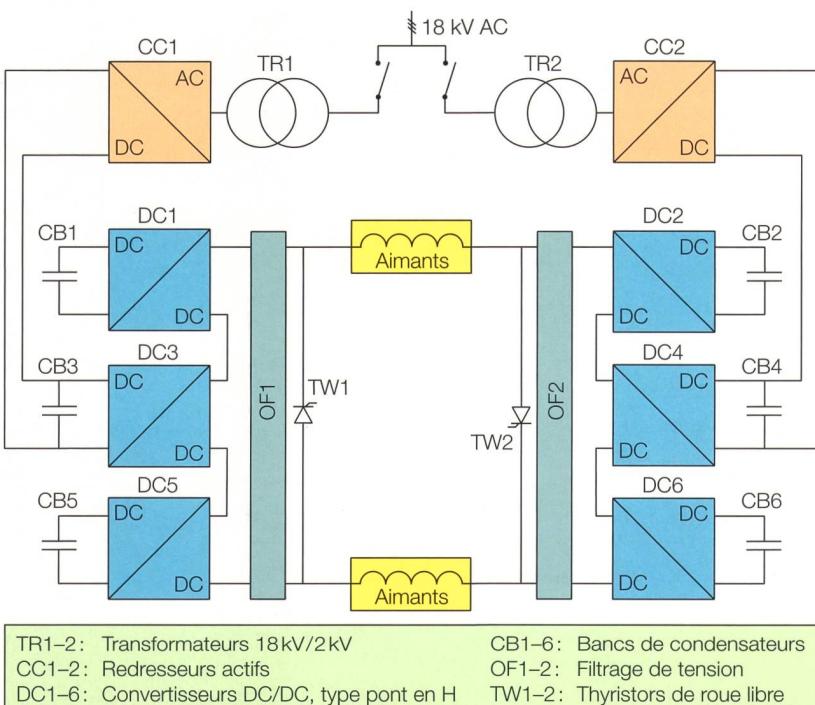


Figure 3 Topologie du nouveau système de puissance du PS avec deux chargeurs (CC1 et CC2), 6 convertisseurs DC/DC (DC1-DC6) et 6 bancs de condensateurs (CB1-CB6).

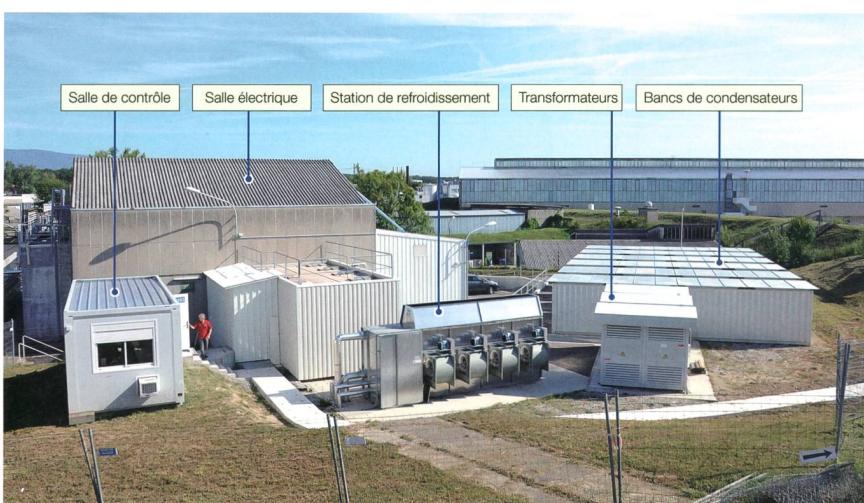


Figure 4 Nouveau système de puissance du PS installé au CERN : partie extérieure.

forme électrique est très contraignant. Par exemple, les batteries électrochimiques ne peuvent pas être utilisées car elles ne supporteraient pas un nombre de cycles de charge et décharge aussi élevé. La solution retenue est basée sur des condensateurs de puissance à film de polypropylène métallisé. Si la densité d'énergie stockée est relativement faible (300 J/kg), la densité de puissance est en revanche très élevée et ce, sans que les condensateurs ne souffrent du cyclage.

Une topologie innovante

La topologie proposée est brevetée par l'EPFL et le CERN [3]. Elle permet d'intégrer le stockage d'énergie dans le convertisseur de puissance qui alimente les aimants. Le principe est de conserver l'énergie dans des condensateurs et de la fournir aux aimants au cours de chaque cycle.

Pour des raisons de sécurité et pour créer un système modulaire, les condensateurs sont groupés en six bancs distincts (figure 3). L'échange d'énergie entre les condensateurs et les aimants est contrôlé par des convertisseurs DC/DC de type « pont en H » qui régulent le courant des aimants. Chaque convertisseur DC/DC est branché sur un banc de condensateurs. Quatre d'entre eux ne sont pas connectés directement au réseau mais sont laissés flottants [2, 4]. Seuls deux convertisseurs AC/DC (redresseurs actifs) sont raccordés au réseau électrique et fournissent l'énergie nécessaire pour compenser les pertes du système.

Ce système de puissance a été réalisé par l'entreprise Converteam et il est en opération depuis 2011 [5, 6]. L'ensemble comprend six bancs de condensateurs placés dans des conteneurs de type transport maritime (figure 4) et l'énergie totale stockée est de 18 MJ pour un poids de 60 t. 14 convertisseurs industriels de type variateur de puissance pour moteur 3,3 kV de 8 MW ont été disposés en série et parallèle pour contrôler l'énergie et réguler le courant délivré aux aimants. Le système de contrôle est évidemment complexe car il doit gérer l'allumage des 168 semi-conducteurs de puissance de type IGBT et assurer une précision de 10 ppm (partie par million) sur le courant délivré.

Cette topologie est modulaire afin de pouvoir utiliser des produits industriels existants et pour permettre l'introduction de redondances. Ainsi, ce système a deux redresseurs actifs connectés au réseau même si, en cas de faute, un seul est suffisant. Six convertisseurs DC/DC sont installés, toutefois le système peut fonc-

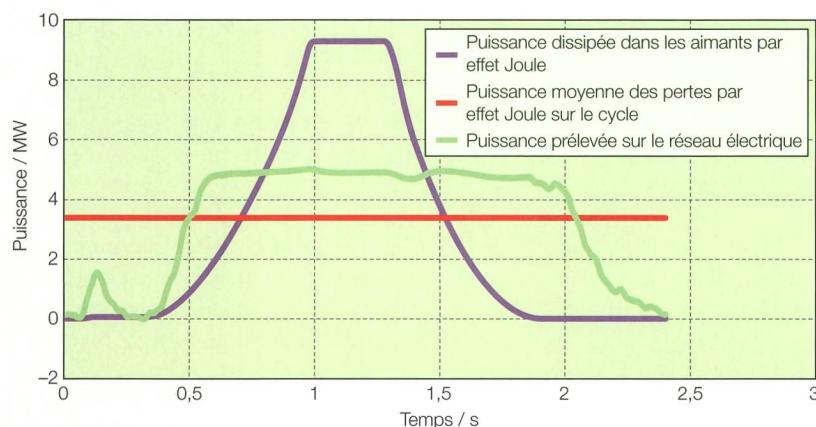


Figure 5 Principe de limitation de la puissance prélevée sur le réseau électrique.

tionner avec un élément de moins, tout comme les bancs de condensateurs.

Une gestion optimale de l'énergie

L'avantage de ce système est de limiter la consommation d'énergie au strict minimum. Seules les pertes par effet Joule des aimants ainsi que les pertes du système de puissance (700 kW) sont prélevées sur le réseau électrique. En optimisant la gestion de l'énergie durant chaque cycle, il a même été possible de ramener la contribution soustraite au réseau à une valeur très proche de la puissance moyenne sur un cycle (figure 5). Ainsi, le système réalisé permet de réduire la puissance demandée et d'enfacer une charge qui pourrait être extrêmement nuisible pour le réseau électrique.

Conclusions

Une idée innovante pour alimenter les accélérateurs de particules fonctionnant en mode pulsé a été étudiée et réalisée. La solution consiste à récupérer l'énergie magnétique des aimants et à l'échanger localement avec des bancs de condensateurs lors de chaque cycle. Elle permet d'éviter de solliciter le réseau de distribution électrique avec de très fortes pointes de puissance, ce qui réduit considérablement le risque de perturbations et limite la consommation d'énergie au strict minimum.

Ce système met en œuvre de façon originale des techniques classiques de l'électrotechnique à l'échelle de plusieurs mégawatts. Il s'agit d'un pas important pour tous les laboratoires de physique,

Figures: CERN

qui entraînera certainement un changement de culture pour l'alimentation des systèmes pulsés de très forte puissance. Ce principe d'échange d'énergie locale est bien sûr applicable à d'autres systèmes. Cependant, le stockage d'énergie sous forme électrique reste le point sensible qui limite le développement de ces techniques.

Références

- [1] F. Bordry, J.-P. Burnet, F. Voelker: CERN-PS Main Power Converter Renovation: How to Provide and Control the Large Flow of Energy for a Rapid Cycling Machine. Proceedings of the Particle Accelerator Conference PAC 05, pp. 3612-3614, May 2005.
- [2] C. Fahrni : Principe d'alimentation par convertisseurs multiniveaux à stockage intégré : application aux accélérateurs de particules. Thèse EPFL n° 4034, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008. http://biblion.epfl.ch/EPFL_theses/2008/4034/EPFL_TH4034.pdf.
- [3] F. Bordry, J.-P. Burnet, C. Fahrni, A. Rufer : Device for Supplying a Load with an Integrated Energy Storage. European Patent, EP1868279, 2007.
- [4] C. Fahrni, A. Rufer, F. Bordry, J.-P. Burnet : A Multi-level Power Converter with Integrated Storage for Particle Accelerators. Power Conversion Conference PCC 07, Nagoya, 2007. <http://infoscience.epfl.ch/record/102713>.
- [5] R. Péron, V. Guenmegues, J.-L. Pouliquen, B. Golalentz, F. Bordry, J.-P. Burnet : Performances Analysis of Main Components Used in 60 MW Pulsed Power Supply for Particle Accelerator. 13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE-2009, Barcelona, 2009. <http://cdsweb.cern.ch/record/1254296/files/CERN-OPEN-2010-023>.
- [6] J.-P. Burnet : La nouvelle alimentation pulsée de 60 MW à 0,5 Hz pour le synchrotron à protons du CERN : un système totalement statique avec stockage d'énergie par condensateurs. La revue 3EI. <http://cdsweb.cern.ch/record/1347439/files/CERN-OPEN-2011-015.pdf>.

Informations sur les auteurs

Jean-Paul Burnet est diplômé de l'Ecole normale supérieure de Cachan et de l'Institut polytechnique de Grenoble. En 1998, il rejoint le CERN et travaille comme ingénieur dans le domaine de la conversion d'énergie et de l'alimentation des accélérateurs de particules. Depuis 2009, il dirige le groupe convertisseurs de puissance qui a pour mandat de concevoir et d'opérer les systèmes de puissance de tous les accélérateurs du CERN.

CERN, Technology Department, Electrical Power Converters Group, CH-1211 Genève - 23, jean-paul.burnet@cern.ch

Alfred Rufer est professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Après avoir obtenu le diplôme d'ingénierie en 1976, il débute son activité dans l'industrie chez ABB, Asea Brown Boveri à Turgi, où il contribue au développement d'entraînements réglés à fréquence variable et dirige de nombreux développements et innovations. En 1993, il est nommé professeur-assistant au Laboratoire d'électronique industrielle, puis professeur ordinaire en 1997, année au cours de laquelle il reprend la direction du laboratoire. Alfred Rufer est nommé Fellow de l'IEEE en 2006. **STI-LEI-EPFL, Station 11, CH-1015 Lausanne, alfred.rufer@epfl.ch**

Dans le cadre de la collaboration entre le CERN et le LEI de l'EPFL, le concept original de l'alimentation du PS a fait l'objet d'une thèse de doctorat réalisée par Claude Fahrni. Ce travail de thèse a remporté en 2008 le Prix de l'Innovation de l'ETG, la société pour les techniques de l'énergie d'Electrosuisse.

Zusammenfassung Energiespeichersysteme mithilfe von Kondensatorbänken

Innovatives Konzept für die Energieversorgung der Teilchenbeschleuniger des CERN
Teilchenbeschleuniger sind so konzipiert, dass sie Teilchen mit geringer Energie empfangen und diese beschleunigen, bevor sie extrahiert werden. Im Allgemeinen arbeiten diese Geräte im Impulsbetrieb, was sehr hohe und sehr schnelle Leistungsschwankungen zur Folge hat. Das CERN besitzt mehrere dieser Geräte, darunter auch das Protonen-Synchrotron (PS), das verwendet wird, um die Teilchen von 1,4 GeV auf 26 GeV zu beschleunigen. Es ist mit 101 Magneten ausgestattet, mit denen es die Teilchen auf einer kreisförmigen Umlaufbahn hält. Die Teilchen können während der Beschleunigung mit einer Leistung von mehr als 45 MW eingeschossen werden, die bei der Rückkehr zur Injektionsenergie mit einer Dynamik von 1 MW/ms umgekehrt wird. Die durchschnittliche Leistung während eines Zyklus liegt bei etwa 4 MW. Um zu vermeiden, dass dieser Strom direkt vom Stromnetz bezogen wird, hat das CERN in Zusammenarbeit mit der EPFL ein Leistungssystem mit integrierter Energiespeicherung entwickelt, das in der Lage ist, die Versorgung und Rückgewinnung der magnetischen Energie aus den Magneten bei jedem einzelnen der 2,4 Sekundenzyklen sicherzustellen, die 7000 Stunden pro Jahr aufeinander folgen. Die vorgesehene und umgesetzte Lösung umfasst Leistungskondensatoren mit metallisierter Polypropylenfolie. Obwohl die gespeicherte Energiedichte relativ gering ist (300 J/kg), ist die Leistungsdichte sehr hoch, und zwar ohne dass die Kondensatoren unter der zyklischen Anwendung leiden. Der Vorteil dieses Systems besteht darin, dass der Energieverbrauch minimiert werden kann. Tatsächlich werden dem Stromnetz lediglich der Stromwärmeverlust sowie die Verluste des Leistungssystems entnommen.

CHe