

UN RÉSEAU PRÊT POUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Pour la production d'énergie, pour les équipements électriques des ménages privés ou de l'industrie: les systèmes qui transforment et rendent l'énergie électrique utilisable à l'aide d'éléments semi-conducteurs sont de plus en plus importants. Mais les systèmes d'électronique de puissance sont capables de bien plus: leur application permet également une utilisation efficace sur les réseaux d'électricité modernes. Des chercheurs de l'EPFL étudient comment atteindre au mieux cet objectif dans le «Power Electronics Laboratory». L'accent porte sur le développement et l'essai de systèmes pour les réseaux moyenne tension. A l'avenir, ces réseaux pourraient approvisionner des quartiers complets en tension continue pratiquement sans pertes de conversion et à long terme, au moins ponctuellement dans des zones spécifiques, ils pourraient même remplacer la tension alternative utilisée aujourd'hui.



Drazen Dujic, professeur assistant à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Photo: B. Vogel

Quiconque branche un appareil électrique sur une prise de courant prélève 50 hertz de courant alternatif. L'approvisionnement en courant alternatif fonctionne de manière plus fiable dans les pays industrialisés et forme la base du confort d'habitation et de nombreuses commodités de la vie moderne. Le fait que notre alimentation électrique se base sur le courant alternatif, c'est-à-dire un courant électronique qui change sa direction 50 fois par seconde, tient plus du hasard historique: au 19e siècle, lorsque l'électricité a commencé sa procession triomphale, il était plus aisé de construire des moteurs électriques et des transformateurs pour le courant alternatif que pour le courant continu, dans lequel les électrons circulent toujours dans le même sens. C'est pourquoi nous vivons aujourd'hui dans un monde de courant alternatif et non dans un monde de courant continu.

La situation n'est plus aussi limpide aujourd'hui. Entre-temps, de nombreuses applications électriques utilisent le courant continu, l'ordinateur comme le téléphone portable ou la voiture électrique. De nombreux métros, bus et trains autour du globe fonctionnent au courant continu. Le courant issu des modules solaires est également du courant continu. «Si nous pouvions réinventer l'alimentation électrique aujourd'hui, nous miserions sur le courant continu plutôt que sur le courant alternatif. Le courant continu a également l'avantage de pouvoir être transmis sur de longues distances

avec moins de pertes par rapport au courant alternatif», affirme Drazen Dujic. Dujic a suivi une formation d'ingénieur électricien à l'Université de Novi Sad (Serbie), a soutenu sa thèse à Liverpool (GB) pour finalement réaliser ses recherches chez ABB Suisse. Depuis 2014, il enseigne et recherche en tant que professeur assistant à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et y dirige le «Power Electronics Laboratory», c'est-à-dire l'Institut d'électronique de puissance.

Des réseaux moyenne tension efficaces

Le courant continu est aujourd'hui principalement utilisé à basse tension. Cependant, le courant continu est également de plus en plus utilisé au niveau de la moyenne tension (1,5 à 50 kV), par exemple pour l'alimentation de systèmes de télécommunication, de centres informatiques ou de navires, lesquels consomment jusqu'à 30% de diesel en moins grâce à l'abandon du courant alternatif. A l'avenir, les réseaux de moyenne tension pourraient être utilisés pour rassembler l'électricité produite par plusieurs systèmes photovoltaïques ou par un grand nombre de centrales éoliennes sur un seul point avec de faibles pertes avant que le courant continu ne soit converti et injecté sur le réseau de courant alternatif. Avec le courant continu, les réseaux de moyenne tension exploités pourraient également intervenir pour l'aménagement de quartiers complets ou de zones industrielles. Sur le campus universitaire de la ville allemande d'Aachen, un réseau



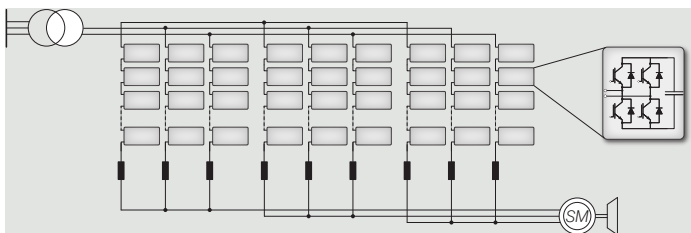
Vue dans le laboratoire d'électronique de puissance à l'EPFL.
Photo: B. Vogel

moyenne tension entièrement basé sur le courant continu est en service depuis un an.

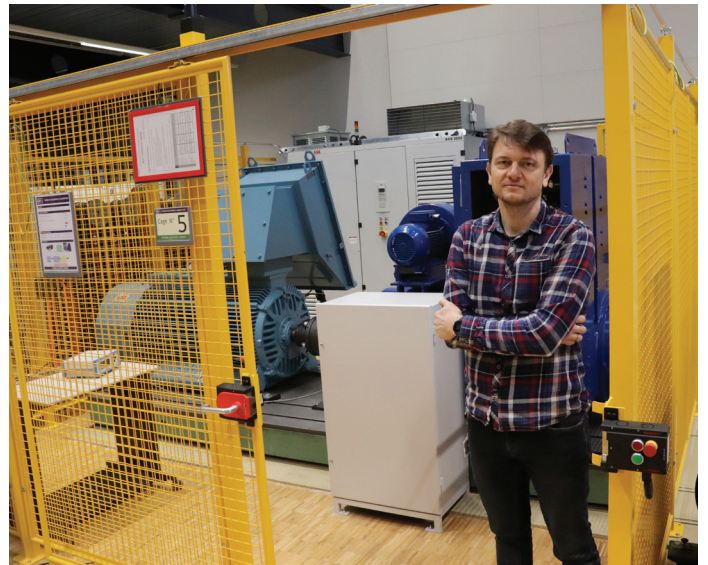
Dans le cadre d'un projet de recherche de trois ans financé par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et ABB Suisse, Drazen Dujic a étudié l'utilisation du courant continu sur les réseaux moyenne tension, notamment l'utilisation de convertisseurs de puissance qui élèvent la tension continue à des tensions plus élevées et l'abaissent à des tensions plus basses. Le chercheur et les collègues impliqués se sont concentrés sur lesdits convertisseurs modulaires multiniveaux (Modular Multilevel Converter, MMC, en anglais). Ce concept de convertisseurs a été proposé il y a 20 ans pour permettre la transmission de courant continu à l'aide de câbles à haute tension. Les scientifiques autour de Drazen Dujic ont désormais posé la base pour pouvoir utiliser ces convertisseurs sur la moyenne tension également. «En raison de l'application accrue d'énergies renouvelables, de plus en plus de convertisseurs sont utilisés pour la transformation du courant continu en courant alternatif et vice-versa. Nous étudions la manière dont les convertisseurs interagissent les uns avec les autres. Nos découvertes nous aident à assurer la stabilité du réseau, pour l'avenir également», affirme Dujic. Au cours des cinq prochaines années, le scientifique de l'EPFL poursuivra l'approche du projet de recherche de l'OFEN dans le cadre du projet Empower, lequel est financé par le Conseil européen de la recherche (ERC).

Modernisation de l'énergie hydraulique

Les convertisseurs modulaires multiniveaux établissent éga-



Les convertisseurs modulaires multiniveaux (MMC) existent depuis environ 20 ans. A l'origine, ils ont été conçus pour la transmission de la haute tension. Aujourd'hui, ils sont de plus en plus souvent utilisés sur la plage de moyenne tension. Les MMC ont, comme leur nom l'indique, une structure modulaire. Plus une MMC contient de modules, meilleur est le profil sinusoïdal de la tension alternative générée à partir de la tension continue. Les convertisseurs modulaires multiniveaux peuvent être appliqués pour la régulation continue de machines synchrones (SM), lesquelles sont utilisées dans des centrales de pompage-turbinage pour pomper l'eau dans le lac de retenue. Illustration: M.Basic, P.D.C. Silva, D.Dujic: «High power electronics innovation perspectives for pumped-storage power plants»; Hydro 2018; October 15–17, 2018, Gdansk, Pologne



Drazen Dujic dans la salle moyenne tension du laboratoire d'électronique de puissance de l'EPFL. Protégée par une grille métallique jaune, une plateforme d'essai représentant les principaux composants d'une centrale de pompage-turbinage est mise en place (seule une partie du banc d'essai se situe à l'intérieur de la grille jaune). Le système à gauche est l'émulateur de réseau, c'est-à-dire un appareil qui imite le comportement du réseau électrique de manière réaliste. Le système à droite est l'émulateur de turbine qui représente de manière réaliste le comportement de la turbine avec une machine synchrone raccordée. Le banc d'essai sert à tester la performance du MMC dans différentes conditions (au choix dans la pratique). Photo: B. Vogel

lement le lien avec un projet de recherche de l'OFEN que Drazen Dujic a achevé à la fin de l'année 2019, lequel portait sur les centrales de pompage-turbinage. On parle de centrales de pompage-turbinage lorsque les centrales hydrauliques ne produisent pas uniquement une puissance électrique pour le réseau mais utilisent également le courant «excédentaire» du réseau en vue de pomper l'eau du lac de retenue et ainsi, de stocker de l'énergie électrique. Il y a environ 40 centrales de pompage-turbinage en Suisse, et même 350 dans le monde. La majorité d'entre elles sont en service depuis des décennies. «La technologie électrique installée dans ces centrales est désuète et attend d'être complétée dans le cadre des mesures de modernisation à venir», affirme Drazen Dujic. Ce faisant, les convertisseurs modulaires multiniveaux endossent un rôle central. Ils permettent effectivement d'exploiter avec une puissance variable les pompes qui pompent l'eau de la vallée dans le lac de retenue.

Le premier convertisseur pour une machine synchrone alimentée par convertisseur (voir encadré p. 5) a été installé en

2013 par la société Kraftwerke Oberhasli AG dans la centrale de pompage-turbinage Grimsel 2. Depuis, le convertisseur permet qu'une pompe sur les quatre (d'une puissance de 93 MW chacune) puisse être exploitée sur une plage de puissance entre 60 et 100 MW. «Cette flexibilité présente un intérêt opérationnel et économique pour les propriétaires de la centrale, car ils peuvent utiliser exactement la même quantité d'électricité pour le fonctionnement des pompes que celle disponible sur le marché et ainsi mieux correspondre au plan de production de Swissgrid», explique le chercheur de Lausanne.

Banc d'essai pour les nouvelles technologies hydroélectriques

Le convertisseur dans la centrale de pompage-turbinage Grimsel a un caractère de pionnier, même s'il n'est déjà plus actuel du point de vue technique. Avec son étude à l'EPFL, Dujic souhaite frayer un chemin pour d'autres avancées technologiques. C'est pourquoi, dans le cadre du projet de l'OFEN susmentionné, il a installé un banc d'essai dans son «Laboratoire d'électronique de puissance», lequel reproduit la situation d'une centrale hydroélectrique, c'est-à-dire en réalisant une simulation réaliste avec des machines électriques réelles.

POMPE À PUISSANCE VARIABLE

La pièce essentielle d'une centrale de pompage-turbinage est une machine électrique rotative, la plupart du temps de type machine synchrone. Cette machine est utilisée soit en tant que générateur synchrone, lorsque le courant est produit avec l'eau du lac de retenue, soit en tant que moteur synchrone, lorsque l'eau est pompée dans le lac de retenue avec le surplus d'électricité. Si la machine synchrone est utilisée comme générateur, elle fonctionne généralement à puissance constante. Si en revanche, la machine synchrone est utilisée comme moteur, une puissance variable est préférable car elle améliore la flexibilité opérationnelle. Cette flexibilité permet de réagir en quelques secondes aux fluctuations de la production d'électricité d'origine éolienne et photovoltaïque et ainsi de stabiliser le réseau.

Pour qu'une machine électrique puisse être exploitée avec une puissance variable, elle doit disposer d'un entraînement à vitesse de rotation variable. Les convertisseurs rendent cela possible en faisant varier la fréquence de la tension du moteur selon les besoins. Il existe différents types d'entraînements à vitesse de rotation variable pour les centrales de pompage-turbinage. Le type actuellement le plus utilisé est la machine asynchrone à double alimentation (Doubly Fed Induction Generator/DFIG en anglais). Ce faisant, le convertisseur est dimensionné pour 10 à 30% de la puissance de la machine asynchrone et est, par conséquent, relativement bon marché. Cependant, le fonctionnement de ce type d'entraînement nécessite plusieurs autres composants et étapes pour protéger contre les perturbations du réseau lors du démarrage et de l'inversion du sens de rotation des pompes. Les dites machines asynchrones alimentées par convertisseur (Converter Fed Synchronous Machines/CFSM en anglais) sont plus modernes. Les convertisseurs utilisés sont désignés comme convertisseurs complets car ils sont conçus pour la puissance totale de la machine synchrone. Ils couvrent les fonctions des composantes supplémentaires de la DFIG.

En fonction de la capacité de pompage requise, des machines de différentes tailles sont utilisées. Elles se différencient également par le niveau de la tension moteur qui doit être générée par le convertisseur. Pour les très grosses machines, la tension disponible du convertisseur ne suffit plus et doit être complétée au moyen de transformateurs. Ces transformateurs occupent une partie importante de la caverne des centrales de pompage.

Les convertisseurs de puissance modernes du type MMC (Modular Multilevel Converter en anglais) peuvent être adaptés à toutes les tensions élevées des moteurs, ce qui rend l'utilisation de transformateurs superflue.

Les convertisseurs modernes ne sont guère utilisés dans les centrales de pompage-turbinage jusqu'à présent. Cela s'explique notamment par les longues périodes de planification des mesures de modernisation des centrales hydroélectriques. Les frais d'investissement relativement élevés sont une seconde raison. BV

Le banc d'essai sert à tester le comportement de fonctionnement du MMC dans différentes conditions (au choix dans la pratique). Les fabricants peuvent, par exemple, étudier l'interaction des générateurs et des convertisseurs correspondants. Les performances et le comportement de systèmes complets peuvent également être étudiés.

A l'avenir, le banc d'essai sera utilisé, entre autres, dans le cadre du projet européen «Hydropower Extending Power System Flexibility» (XFLEX-HYDRO) lancé en automne 2019 sous la direction de Drazen Dujic et de ses collègues de l'EPFL François Avellan et Mario Paolone. Au sein de l'association de recherche, 19 partenaires internationaux veulent développer des technologies innovantes d'ici 2023 afin d'optimiser davantage l'utilisation de l'énergie hydraulique. Le projet inclut sept projets de démonstration dans des pays européens. L'un d'entre eux est implanté en Suisse, à savoir au barrage de Zmutt, dans le Valais, lequel fait partie de la grande centrale hydroélectrique de la Grande Dixence. Dans le cadre du projet, une unité de pompage doit être modernisée de telle sorte qu'elle puisse être contrôlée à vitesse variable pour une régulation continue de la capacité de pompage.

Le retour de l'énergie hydraulique

Un regard sur l'Europe montre que la modernisation de l'hydroélectricité cache un potentiel considérable. Pour les centrales de pompage-turbinage européennes de plus de 30 ans, cette flexibilité correspond à une puissance totale de 10 GW. Les compagnies d'électricité seront ainsi plus facilement en mesure de fournir les services système. Ces prestations comprennent, par exemple, la mise à disposition d'une réserve de puissance pour la stabilisation du réseau électrique. «Cela pose les conditions requises pour que l'hydroélectricité redevienne compétitive et, avec l'énergie éolienne et photovoltaïque, contribue à l'approvisionnement en électricité renouvelable», déclare M. Dujic.

➤ Le **rapport final** du projet de recherche de l'OEFN sur les nouvelles technologies et les installations/systèmes pour la conversion de l'énergie électrique sur les réseaux de courant continu de moyenne tension (titre en anglais: «Medium-Voltage Direct-Current Energy Conversion Technologies and Systems»), est disponible sur: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36785>



Quatre machines synchrones d'une capacité de 93 MW sont en service dans la centrale hydroélectrique Grimsel 2. Chacune d'entre elles peut être utilisée comme générateur (production d'électricité) ou comme moteur (stockage d'électricité). Depuis 2013, une des quatre machines synchrones est équipée d'un convertisseur (photo) qui permet la régulation continue de la machine synchrone lors du pompage de l'eau dans le lac de retenue sur une plage de puissance de 60 à 100 MW. Photo: ABB Suisse

EXPÉRIENCES POSITIVES DANS LA CENTRALE DE GRIMSEL

En 2013, la société Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) a installé un convertisseur dans la station de pompage-turbinage Grimsel 2, ce qui a permis depuis lors de réguler une des quatre pompes de stockage. Avant la mise en service du convertisseur, la régulation de la puissance de pompage était réalisée par le biais d'une turbine, ce qui provoquait une grande perte d'eau. Gian Marco Maier, directeur d'exploitation de la société Kraftwerke Oberhasli AG, explique les avantages de la conversion: «Le convertisseur permet de fournir des prestations telles que le maintien de la tension en fonctionnement purement déphasé sans charger les machines. En outre, la plage de régulation en fonctionnement de la pompe devient considérablement plus dynamique sur l'ensemble des 360 MW et peut être couverte pratiquement sans turbines supplémentaires. Les avantages opérationnels pour la KWO sont si grands qu'elle réfléchit activement à miser encore plus sur cette technique. Et ce également en vue des signes indiquant que le marché de l'énergie et des prestations de système devient encore plus dynamique et à court terme.» BV

- Le **rapport final** du projet de recherche de l'OFEN, dans le cadre duquel un banc d'essai pour les systèmes des installations de pompage-turbinage a été mis en place à l'EPFL (titre en anglais: «Real-Time Hardware-in-the-Loop Emulation Platform for Pumped Hydro Storage Power Plants»), est disponible sur:
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40235>
- Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch), responsable du programme de recherche de l'OEFN sur les réseaux ainsi que Roland Brüniger (roland.brue-niger@brueniger.swiss), responsable du programme de recherche de l'OFEN sur les technologies de l'électricité, communiquent des **informations** sur les projets.
- Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets phares et de recherche, les projets pilotes et de démonstration dans le domaine de l'électricité sur www.bfe.admin.ch/ec-electricite.