

STROMNETZ FIT MACHEN FÜR DIE ERNEUERBAREN

Sei es bei der Stromerzeugung aus Wasserkraft, Sonne und Wind, sei es bei Elektrogeräten für Privathaushalte oder die Industrie: Komponenten, die elektrische Energie mit Hilfe von Halbleiter-Bauelementen umwandeln und nutzbar machen, werden immer wichtiger. Leistungselektronik-Komponenten können aber noch mehr: Ihr Einsatz ermöglicht auch eine effiziente Stromnutzung in modernen Elektrizitätsnetzen. Wie dieses Ziel am besten erreicht wird, erforschen Wissenschaftler im «Power Electronics Laboratory» der Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Ein Schwerpunkt liegt bei der Entwicklung und Erprobung von Komponenten für Mittelspannungsnetze. Diese Netze könnten in Zukunft ganze Quartiere praktisch ohne Umwandlungsverluste mit Gleichspannung versorgen und längerfristig – zumindest punktuell in spezifischen Bereichen – sogar die heute gängige Wechselspannung ablösen.



Drazen Dujic, Assistenzprofessor an der EPFL und Experte für Leistungselektronik. Foto: B. Vogel

Wer zu Hause ein Elektrogerät in die Steckdose steckt, bezieht 50 Hertz-Wechselstrom. Die Versorgung mit Wechselstrom funktioniert in den Industriestaaten mit hoher Zuverlässigkeit und schafft die Grundlage für Wohnkomfort und viele Annehmlichkeiten des modernen Lebens. Dass unsere Stromversorgung auf Wechselstrom beruht – also einem Elektronenstrom, der 50 Mal pro Sekunde seine Richtung ändert –, ist eher ein historischer Zufall: Im 19. Jahrhundert, als die Elektrizität ihren Siegeszug antrat, liessen sich Elektromotoren und Transformatoren für Wechselstrom einfacher bauen als für Gleichstrom, bei dem die Elektronen stets in die gleiche Richtung fließen. So kam es, dass wir heute in einer Welt von Wechselstrom leben, nicht in einer Welt aus Gleichstrom.

Doch ganz so klar ist die Situation heute nicht mehr. Viele Elektroanwendungen nutzen unterdessen Gleichstrom, der Computer ebenso wie das Mobiltelefon oder das Elektroauto. Auch viele Metros, Busse und Bahnen rund um den Globus fahren mit Gleichstrom. Der Strom, der aus Solarmodulen kommt, ist ebenfalls Gleichstrom. «Wenn wir die Stromversorgung heute nochmals neu erfinden könnten, würden wir wohl auf Gleichstrom statt auf Wechselstrom setzen. Gleichstrom hat auch den Vorzug, dass er sich über weite Strecken verlustärmer übertragen lässt als Wechselstrom», sagt Drazen Dujic. Dujic hat sich an der Universität in Novi Sad (Serbien)

zum Elektroingenieur ausbilden lassen, promovierte in Liverpool (GB) und forschte anschliessend bei ABB Schweiz. Seit 2014 lehrt und forscht er als Assistenzprofessor an der EPFL und leitet dort das «Power Electronics Laboratory», also das Institut für Leistungselektronik.

Effiziente Mittelspannungsnetze

Gleichstrom wird heute vorrangig auf Niederspannungsebene genutzt. Doch auch auf Mittelspannungsebene (1,5 bis 50 kV) kommt Gleichstrom mehr und mehr zum Einsatz, etwa in der Versorgung von Telekommunikationsanlagen, von Rechenzentren oder von Schiffen, die dank der Abkehr vom Wechselstrom bis zu 30% weniger Diesel verbrennen. Künftig könnten Mittelspannungsnetze eingesetzt werden, um den Strom aus mehreren Photovoltaik-Anlagen oder einer Vielzahl von Windkraftwerken verlustarm an einem Punkt zusammenzuführen, bevor der Gleichstrom umgewandelt und ins Wechselstromnetz eingespeist wird. Mit Gleichstrom betriebene Mittelspannungsnetze könnten zudem zur Erschliessung ganzer Quartiere oder von Industriegebieten herangezogen werden. Auf dem Hochschul-Campus in der deutschen Stadt Aachen ist seit einem Jahr ein Mittelspannungsnetz in Betrieb, das ganz auf Gleichstrom basiert.

In einem vom Bundesamt für Energie (BFE) und von ABB Schweiz unterstützten dreijährigen Forschungsprojekt hat

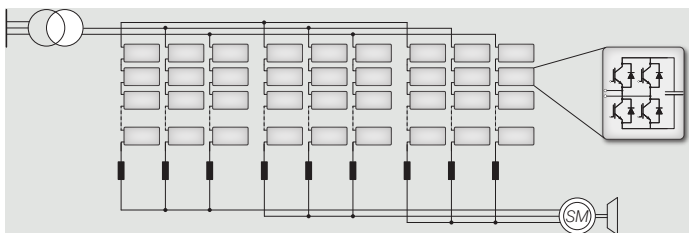


Blick in das Labor für Leistungselektronik an der EPFL. Foto: B. Vogel

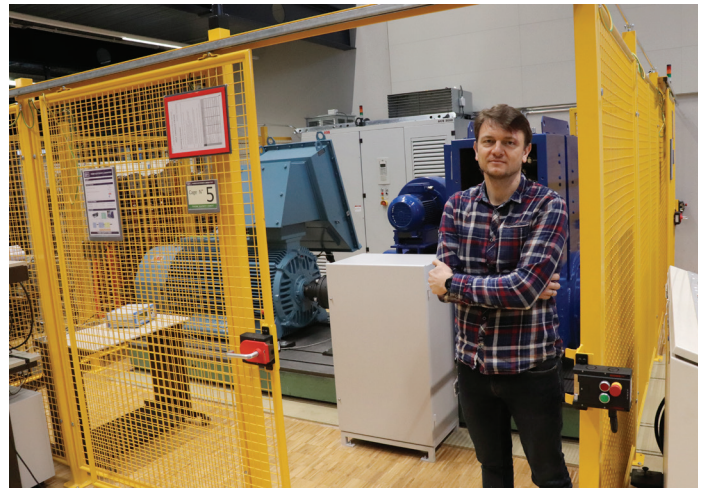
Drazen Dujic die Verwendung von Gleichstrom in Mittelspannungsnetzen untersucht, insbesondere den Einsatz von Leistungselektronik-Stromrichtern (Konvertern), die die Gleichspannung auf höhere Spannungen hochsetzen bzw. auf tiefere Spannungen tiefsetzen. Der Blick des Forschers und der beteiligten Kolleginnen und Kollegen richtete sich auf die sogenannten modularen Mehrpunktstromrichter (engl. Modular Multilevel Converter, MMC). Dieses Stromrichter-Konzept wurde vor rund 20 Jahren vorgeschlagen, um die Übertragung von Gleichstrom mittels Hochspannungsleitungen zu ermöglichen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler um Drazen Dujic schaffen nun die Voraussetzung, um diese Stromrichter auch auf Mittelspannungsebene einsetzen zu können. «Durch die verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien kommen immer mehr Konverter zur Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom und umgekehrt zum Einsatz. Wir untersuchen, wie die Konverter sich gegenseitig beeinflussen. Unsere Erkenntnisse helfen, die Stabilität des Netzes auch in Zukunft sicherzustellen», sagt Dujic. Den Ansatz des BFE-Forschungsprojekts führt der EPFL-Wissenschaftler in den nächsten fünf Jahren im Projekt Empower weiter, das vom Europäischen Forschungsrat (ERC) gefördert wird.

Wasserkraft modernisieren

Die modularen Mehrpunktstromrichter schaffen auch die Verbindung zu einem BFE-Forschungsprojekt, das Drazen Dujic Ende 2019 abgeschlossen hat und das sich mit Pumpspeicherwerken befasst. Von Pumpspeicherwerken spricht man, wenn Wasserkraftwerke nicht nur elektrischen Strom



Modulare Mehrpunktstromrichter (MMC) existieren seit rund 20 Jahren. Sie wurden ursprünglich für die Übertragung von Hochspannung entwickelt. Heute kommen sie mehr und mehr auch im Mittelspannungsbereich zum Einsatz. MMC sind – wie der Name sagt – aus Modulen aufgebaut. Je mehr dieser Module ein MMC enthält, desto besser ist der sinusförmige Verlauf der Wechselspannung, die aus der Gleichspannung erzeugt wird. Modulare Mehrpunktstromrichter können zur stufenlosen Regelung von Synchronmaschinen (SM) eingesetzt werden, welche in Pumpspeicherwerken genutzt werden, um Wasser zurück in den Stausee zu pumpen. 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, Poland



Drazen Dujic in der Mittelspannungs-Halle des EPFL-Labors für Leistungselektronik: Geschützt durch ein gelbes Metallgitter ist eine Versuchsplattform aufgebaut, welche die Kernkomponenten eines Pumpspeicherkraftwerks repräsentiert (wobei nur ein Teil des Prüfstands innerhalb der gelben Absperrung untergebracht ist). Die Komponente links ist der Netz-Emulator, also ein Gerät, das das Verhalten des Stromnetzes realitätsnah nachahmt. Die Komponente rechts ist der Turbinen-Emulator, der also das Verhalten der Turbine mit angeschlossener Synchronmaschine realitätsnah abbildet. Der Prüfstand dient dazu, das Leistungsverhalten von MMC unter verschiedenen (praktisch beliebig wählbaren) Bedingungen zu testen. Foto: B. Vogel

für das Stromnetz erzeugen, sondern auch «überschüssigen» Strom aus dem Stromnetz dazu verwenden, Wasser in den Stausee zurückzupumpen und elektrische Energie auf diese Weise zu speichern. Rund 40 Pumpspeicherwerke gibt es in der Schweiz, weltweit sogar 350. Die meisten von ihnen sind seit Jahrzehnten in Betrieb. «Die in diesen Anlagen verbauten Elektrotechnik ist veraltet und wartet darauf, im Zuge der anstehenden Retrofit-Massnahmen mit moderner Leistungselektronik ergänzt zu werden», sagt Drazen Dujic. Eine zentrale Rolle kommt hierbei den modularen Mehrpunktstromrichtern zu. Sie ermöglichen nämlich, die Pumpen, die das Wasser aus dem Tal in den Stausee zurückpumpen, mit variabler Leistung zu betreiben.

Der erste Stromrichter für eine Umrichter gespeiste Synchronmaschine (siehe Textbox S. 4) wurde 2013 von der Kraftwerke Oberhasli AG im Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2 eingebaut. Der Konverter macht es seither möglich, dass eine der insgesamt vier Pumpen (je 93 MW Leistung) im Bereich zwischen 60 bis 100 MW Leistung betrieben werden kann. «Diese Flexibilität ist für die Eigner des Elektrizitätswerks betrieblich und ökonomisch interessant, denn sie können für den Pumpenbetrieb genau soviel Strom einsetzen, wie auf

dem Markt verfügbar ist und dem Produktionsplan von Swissgrid damit besser entsprechen», sagt der in Lausanne tätige Forscher.

Prüfstand für neue Wasserkraft-Technologien

Der Stromrichter im Pumpspeicherwerk Grimsel hat Pioniercharakter, auch wenn er technisch heute bereits nicht mehr auf dem neusten Stand ist. Dujic will mit seiner Forschung an der EPFL den Weg für weitere technologische Fortschritte ebnen. Daher hat er im Rahmen des oben erwähnten BFE-Projekts in seinem «Power Electronics Laboratory» einen Prüfstand aufgebaut, welcher die Situation in einem Wasserkraftwerk emuliert, also mit realen Elektrogeräten realitätsnah nach-

ahmt. Der Prüfstand dient dazu, das Betriebsverhalten der MMC unter verschiedenen (praktisch beliebig wählbaren) Bedingungen zu testen. Hersteller können hier beispielsweise das Zusammenspiel von Generatoren und den zugehörigen Konvertern untersuchen. Auch lassen sich die Leistungsfähigkeit und das Verhalten von ganzen Systemen erforschen.

Zum Einsatz kommt der Prüfstand künftig unter anderem im Rahmen des im Herbst 2019 gestarteten EU-Projekts «Hydropower Extending Power System Flexibility» (XFLEX-HYDRO) unter der Leitung von Drazen Dujic und seinen EPFL-Kollegen François Avellan und Mario Paolone. In dem Forschungsverbund wollen 19 internationale Partner bis 2023 innovative

PUMPE MIT VARIABLER LEISTUNG

Das Herzstück eines Pumpspeicherwerks ist eine rotierende elektrische Maschine, meist vom Typ Synchronmaschine. Diese Maschine wird entweder als Synchrongenerator genutzt, wenn mit dem Wasser aus dem Stausee Strom produziert wird, oder aber als Synchronmotor, wenn das Wasser mit «überschüssigem» Strom in den Stausee hochgepumpt wird. Wird die Synchronmaschine als Generator eingesetzt, läuft sie in der Regel mit konstanter Leistung. Wird die Synchronmaschine hingegen als Motor eingesetzt, ist eine variable Leistung wünschenswert, weil dies die betriebliche Flexibilität erhöht. Diese Flexibilität erlaubt es, sekundenschnell auf die schwankende Stromproduktion aus Wind und Photovoltaik zu reagieren und dadurch das Netz zu stabilisieren.

Damit eine elektrische Maschine mit variabler Leistung betrieben werden kann, muss sie über einen drehzahlvariablen Antrieb verfügen. Dies ermöglichen Konverter, indem sie die Frequenz der Motorspannung nach Bedarf variieren. Für Pumpspeicherkraftwerke gibt es verschiedene Bauarten von drehzahlvariablen Antrieben. Der aktuell meist genutzte Typ ist die Doppelt Gespeiste Asynchronmaschine (engl. Doubly Fed Induction Generator/DFIG). Dabei weist der Konverter lediglich 10 bis 30% der Leistung der zugeschalteten Asynchronmaschine auf und ist daher relativ kostengünstig. Der Betrieb dieses Antriebstyps erfordert aber etliche weitere Komponenten und Betriebsschritte zum Schutz gegen Netzstörungen bei Start und Richtungsumkehr der Pumpen. Moderner sind die sogenannten Umrichtergespeisten Synchronmaschinen (engl. Converter Fed Synchronous Machines/CFSM). Die dabei verwendeten Konverter werden als Vollumrichter bezeichnet, weil sie für die volle Leistung der Synchronmaschine ausgelegt sind. Sie decken die Funktionen der DFIG-Zusatzkomponenten von Haus aus ab.

Je nach erforderlicher Pumpleistung werden verschieden grosse Maschinen eingesetzt. Sie unterscheiden sich auch in der Höhe der Motorspannung, die vom Konverter erzeugt werden muss. Für sehr grosse Maschinen reicht die verfügbare Konverter-Spannung nicht mehr aus und muss mit Transformatoren hochgesetzt werden. Diese Transformatoren nehmen einen signifikanten Teil der Kaverne von Pumpspeicherwerken ein.

Moderne Stromrichter vom Typ modulare Mehrpunktstromrichter (engl. Modular Multilevel Converter/MMC) können für beliebig hohe Motorspannungen skaliert werden; der Einsatz von Transformatoren wird damit überflüssig.

Moderne Konverter sind in Pumpspeicherwerken bisher kaum im Einsatz. Ein Grund dafür sind die langen Planungszeiträume für Retrofit-Massnahmen bei Wasserkraftwerken. Ein zweiter Grund sind die relativ hohen Investitionskosten. BV

Technologien entwickeln, um die Nutzung der Wasserkraft weiter zu optimieren. Zum Projekt gehören sieben Demonstrationsprojekte in europäischen Ländern. Eines davon ist in der Schweiz angesiedelt, nämlich beim Walliser Zmutt-Stausee, der zur grossen Wasserkraftanlage Grande Dixence gehört. Im Rahmen des Projekts soll eine Pumpeneinheit so modernisiert werden, dass sie drehzahlvariabel gesteuert und die Pumpleistung damit stufenlos geregelt werden kann.

Comeback der Wasserkraft

Der Blick auf Europa zeigt, dass eine Modernisierung der Wasserkraft ein erhebliches Potenzial hat. Für die europäischen Pumpspeicherwerke, die älter als 30 Jahre sind, entspricht diese Flexibilität einer Gesamtleistung von 10 GW. Damit werden die Elektrizitätswerke besser in die Lage versetzt, Systemdienstleistungen zu erbringen. Dazu gehört z.B. die Bereitstellung von Regenergie zur Stabilisierung des Stromnetzes. «Das schafft die Voraussetzung, dass die Wasserkraft wieder wettbewerbsfähig wird und zusammen mit Wind- und Photovoltaikstrom ihren Beitrag zur Versorgung mit erneuerbarem Strom leisten kann», sagt Dujic.

- Den **Schlussbericht** zum BFE-Forschungsprojekt zu neuen Technologien und Anlagen/Systemen zur Umwandlung elektrischer Energie in Mittelspannungs-Gleichstrom-Netzen (englischer Titel: «Medium-Voltage Direct-Current Energy Conversion Technologies and Systems») finden Sie unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36785>
- Den **Schlussbericht** zum BFE-Forschungsprojekt, in dessen Rahmen an der EPFL ein Prüfstand für Komponenten von Pumpspeicherwerken aufgebaut wurde (englischer Titel: «Real-Time Hardware-in-the-Loop Emulation Platform for Pumped Hydro Storage Power Plants»), finden Sie unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40235>
- **Auskünfte** zu den Projekten erteilen Dr. Michael Moser (michael.moser@bfe.admin.ch), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Netze, sowie Roland Brüniger (roland.brueeniger@brueniger.swiss), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Elektrizitätstechnologien.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Elektrizität finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-strom.



Im Wasserkraftwerk Grimsel 2 sind vier Synchronmaschinen mit 93 MW Leistung im Einsatz. Jede von ihnen kann entweder als Generator (Stromproduktion) oder als Motor (Stromspeicherung) eingesetzt werden. Seit 2013 ist eine der vier Synchronmaschinen mit einem Stromrichter (Foto) ausgerüstet, der es möglich macht, die Synchronmaschine beim Hochpumpen des Wassers in den Stausee im Leistungsbereich 60 bis 100 MW stufenlos zu regulieren. Foto: ABB Schweiz

GUTE ERFAHRUNGEN IM GRIMSEL-KRAFTWERK

Im Jahr 2013 hat die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) im Pumpspeicherwerk Grimsel 2 einen Konverter eingebaut, der es seither ermöglicht, eine von vier Speicherpumpen zu regeln. Vor der Inbetriebnahme des Konverters erfolgte die Regelung der Pumpenleistung jeweils über eine Turbine, was einen grossen Wasserverlust nach sich zog. Zum Nutzen der Umrüstung sagt Gian Marco Maier, COO Kraftwerke Oberhasli AG: «Durch den Umrücker ist es möglich, im reinen Phasenschieberbetrieb Systemdienstleistungen wie Spannungshaltung zu erbringen, ohne dass die Maschinen belastet werden. Weiter wird der Regelbereich im Pumpbetrieb über die ganzen 360 MW erheblich dynamischer und kann faktisch ohne zusätzliche Turbinen abgedeckt werden. Die betrieblichen Vorteile sind für die KWO so gross, dass aktiv Überlegungen gemacht werden, noch mehr auf diese Technik zu setzen. Dies auch hinsichtlich den Anzeichen, dass der Energie- und Systemdienstleistungsmarkt noch dynamischer und kurzfristiger wird.» BV