Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 95 (2004)
Heft: 4

Artikel: Versicherungen gegen Blackouts
Autor: Rehtanz, Christian
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857917

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: 22.01.2026

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

Versicherungen gegen Blackouts

Neue Systeme zur Erhöhung der Übertragungskapazität

Eine hundertprozentige Sicherheit gegen Systemzusammenbrüche wird es nie geben. Immer besteht der Zwiespalt zwischen maximaler Systemsicherheit und wirtschaftlich sinnvollen Massnahmen. Der Ausbau der Übertragungskapazität durch neue Leitungen ist sicherlich die effektivste Massnahme zur Reduzierung von Engpässen und damit zur Erhöhung der Versorgungssicherheit. Es ist aber auch die kostenintensivste und bei Freileitungen durch Landschaftsverbrauch auch eine wenig akzeptierte Massnahme. Im Folgenden werden neueste technologische Entwicklungen vorgestellt, die durch bessere Messtechnik sowie aktive Netzbeeinflussung bestehende Netze besser nutzbar machen. Sollte trotz dieser Technologien ein weiterer Netzausbau unumgänglich sein, so bieten unterirdische Gleichstrom-Kabelverbindungen neuester Bauart mit Spannungsumrichtern und speziellen Kabeln eine effiziente Alternative zu konventionellem Netzausbau.

■ Christian Rehtanz

N-1-Prinzip

Weltweit werden praktisch alle Energieübertragungsnetze nach dem N-1-Prinzip betrieben. Beim Ausfall eines Betriebsmittels muss das Übertragungssystem ohne manuelle Eingriffe stabil bleiben, und es dürfen auch keine Betriebsgrenzen verletzt werden. Für bestimmte Zeiträume wird jeweils der Netzbetrieb gemäss diesem Prinzip geplant. Ergeben sich Abweichungen hiervon und ist die N-1-Sicherheit nicht mehr gewährleistet, so müssen Massnahmen eingeleitet werden, um den N-1 sicheren Zustand wieder herzustellen. Ist dies nicht möglich und tritt eine Störung auf, so können Betriebsgrenzen weiterer Betriebsmittel verletzt werden, sodass Schutzabschaltungen gegen Überlast notwendig werden. Durch die hierdurch weiter reduzierte Übertragungskapazität werden weitere Betriebsmittel überlastet, die in Folge kaskadiert abgeschalten werden oder abgeschaltet werden müssen.

Adresse des Autors
Christian Rehtanz, Dr.-Ing. habil
ABB Power Systems
CH-8050 Zürich-Oerlikon
christian.rehtanz@ch.abb.com

Aufgrund der fehlenden Übertragungskapazität kann die Kraftwerksleistung nicht mehr zu den Versorgungsgebieten transportiert werden, sodass Versorgungsunterbrechungen folgen.

Bild 1 zeigt exemplarisch diesen Ablauf für eine Korridorsituation zwischen einem Gebiet mit Erzeugungsüberschuss und einem Gebiet mit überwiegendem Verbrauch, wie sie zwischen Energie handelnden Ländern typisch ist. Ausgehend von einem gefährdeten Zustand (a), bei dem die N-1-Sicherheit nicht gegeben ist, fällt eine Leitung aus (b), wobei eine weitere überlastet wird und ebenfalls ausfällt (c). In Folge kollabiert das System hin zu einer Versorgungsunterbrechung im Verbrauchergebiet (d).

Der Blackout in Italien zeigte dieses Verhalten genauso wie in den USA, wobei unterschiedliche Faktoren das kaskadierte Verhalten ausgelöst haben.

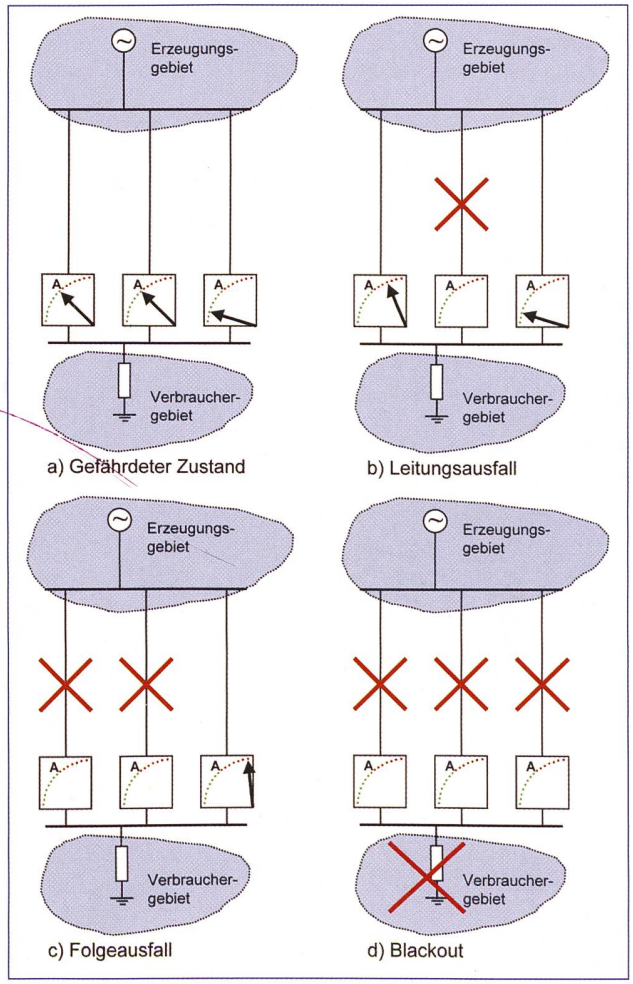

Bild 1 Prinzip des kaskadierten Blackouts.

Begrenzung der Übertragungsfähigkeit

Die kaskadierten Ereignisse sind eine Folge davon, dass ein Betriebsmittel oder ein Netzbereich überlastet ist. Bei der Übertragungsfähigkeit eines Netzbereiches oder auch einer einzelnen Leitung muss grundlegend zwischen physikalischen und nominalen Grenzen unterschieden werden. So ist zum Beispiel die thermische Nennbelastbarkeit (nominal) einer Leitung für quasi Windstille bei 30 °C Aussentemperatur gegeben. Physikalisch kann die Leitung jedoch bei ge-

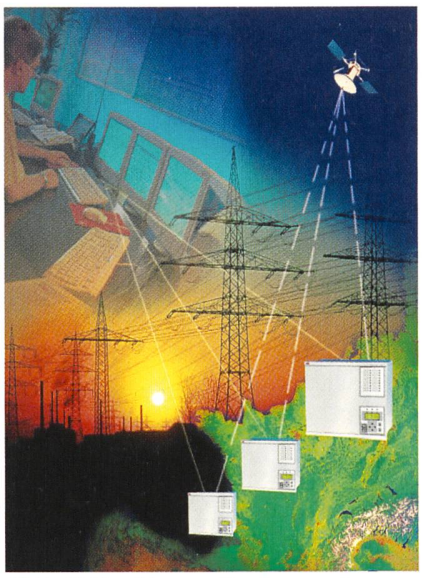

Bild 2 Weitbereichsmess-, Regelungs- und Schutzsystem.

ringerer Aussentemperatur oder bei Wind mit einem wesentlich höheren Strom belastet werden, ohne dass Temperatur oder Durchhang kritische Werte annehmen.

Für die Planung des Netzbetriebs und auch als Basis für den Energiehandel können nur die nominalen Werte herangezogen werden. Darüber hinaus müssen Erzeugungs- und Last- bzw. Marktszenarien für einen Folgezeitraum, zum Beispiel einen Folgetag, als Basis der Planung erstellt werden. Hieraus ergeben sich Ungenauigkeiten, die durch eingeplante Übertragungsreserven, die man möglichst gering halten möchte, berücksichtigt werden. Weicht das reale Verhalten im aktuellen Moment zu stark von den Planungswerten ab, dann kann es zu Verletzungen der N-1-Sicherheit oder bereits sogar zur nominalen oder physikalischen Überlastung einzelner Betriebsmittel kommen.

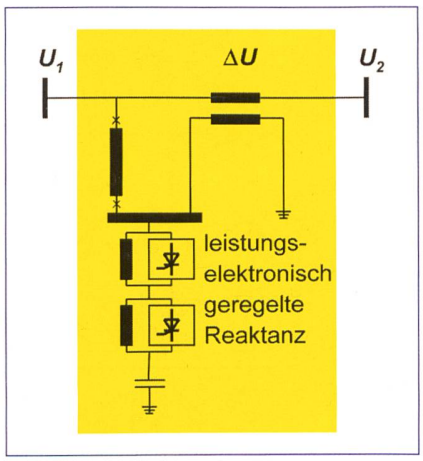

Bild 3 Dynamischer Leistungsflussregler (Dynamic Flow Controller – DFC).

Von der nominalen zur physikalischen Belastung

Bislang war es in derartigen Situationen nur unzureichend möglich, die aktuelle Netz- bzw. Leitungssituation präzise zu bewerten. Neue Messtechnologien mittels zeitsynchronisierter Zeigermessungen ermöglichen die schnelle und präzise Erfassung von Strom- und Spannungsbeträgen und -winkeln zu exakt gleichen Zeitpunkten an unterschiedlichen Stellen im Netz. Ein derartiges System ist exemplarisch in Bild 2 dargestellt. Die Informationen werden über vorhandene Signalleitungen zu einem Zentralrechner übertragen, auf dem geeignete Auswertealgorithmen laufen. Die Zeitsynchronisation erfolgt mit GPS-Satelliten-Zeitsignalen.

Aus diesen Messungen kann zum Beispiel mit den Betrags- und Winkelinformationen an beiden Seiten einer Leitung auf die aktuellen Leitungsparameter rückgerechnet werden. Da der ohmsche Widerstand einer Leitung temperaturabhängig ist, kann die aktuelle durchschnittliche Temperatur der Leitung ermittelt werden. Trotz Berücksichtigung bestimmter Ungenauigkeiten gibt der ermittelte Wert Aufschluss über die physikalische Belastung der Leitung, sodass nicht auf nominale Planungswerte zurückgegriffen werden muss. In einem Grossteil der Zeit wäre eine Leitung physikalisch gar nicht überlastet und könnte weiterbetrieben werden. Hierdurch ist ein erster Schritt getan, um kaskadierte Ereignisse aufzuhalten.

Die bislang entwickelten und patentierten Algorithmen decken das gesamte Spektrum von thermischen Grenzen, über Spannungs- und Winkelstabilität bis hin zur Detektion kritischer Systemschwingungen ab. Durch die verbesserte Messtechnik und deren Auswertung können in vielen Fällen aktuelle Reserven innerhalb des Netzes besser genutzt werden.

Entlastung kritischer Bereiche durch Leistungsflussregler

Eine weiter gehende Massnahme zur besseren Nutzung der vorhandenen Übertragungskapazität ist die aktive Verschiebung von Leistungsflüssen aus überlasteten Gebieten in Gebiete mit ausreichenden Reserven. In Europa wird zu diesem Zweck vielfach über die Verwendung von schrägregelnden Transformatoren nachgedacht. Die Nachteile derartiger Transformatoren, wie hoher Wartungsaufwand bei häufigem Stufen oder begrenzte Schaltgeschwindigkeit, schränken den gewünschten Nutzen häufig ein. Leistungselektronische Alternativen wie der Unified Power Flow Controller (UPFC) wurden bislang aufgrund der extrem hohen Kosten nicht realisiert.

Ein neues Konzept auf diesem Gebiet könnte der Dynamic Flow Controller (DFC) sein, ein gegenüber dem UPFC wesentlich vereinfachter leistungselektronischer Netzregler. Die Funktionalität entspricht dem eines verschleissfreien Schrägreglers. Bild 3 zeigt den DFC schematisch als geregelten Spannungsteiler. Alle Komponenten wurden hierbei von bestehenden etablierten Systemen übernommen. Zum Beispiel entsprechen die leistungselektronischen Bausteine denen von SVC (Static Var Compensator), die seit vielen Jahren erfolgreich im Einsatz sind. Aufgrund der verschleissfrei schaltenden Leistungselektronik bestehen keine Beschränkungen bezüglich der Schalthäufigkeit. Die Geschwindigkeit dieses Leistungsflussreglers reicht sogar aus, um Netzpendelungen dynamisch zu dämpfen.

Mit Hilfe eines DFC können Leistungsflüsse innerhalb des Netzes verlagert und dynamisch ausgeregelt werden. Bislang war dieses nur bei langen Leitungen durch zum Beispiel eine geregelte Serienkompensation (Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC) möglich (Bild 7).

Koordinierte Regelung

Zur praktischen Nutzung eines dynamischen Leistungsflussreglers muss ein Regelschema entworfen werden, das automatisch einen Belastungsausgleich für zum Beispiel einen Übertragungskorridor sicherstellt und Fehlhandlungen verhindert. Geht ein Netzbereich in einen N-1-Zustand über, so muss die Regelung abhängig von dem aktuell aufgetretenen Ereignis mit den verbleibenden Betriebsmitteln bzw. Leitungen einen Zustand maximaler Übertragungsfähigkeit einnehmen. Diese automatisch erzielte Kapazitätsverbesserung kann vorab in den Planungsberechnungen berücksichtigt werden.

Zur Implementierung einer derartigen Regelung ist es erforderlich, einen bestimmten Netzbereich dynamisch zu beobachten, so wie es mit dem oben vorgestellten Weitbereichsmesssystem möglich ist. Bild 4 zeigt exemplarisch die Verknüpfung dieser beiden Systeme. Die Übertragungsfähigkeit aller Leitungen eines Korridors muss dynamisch überwacht werden. Hieraus können dann durch Erweiterung des Systems zu einer Weitbereichsregelung, geeignete Stell-

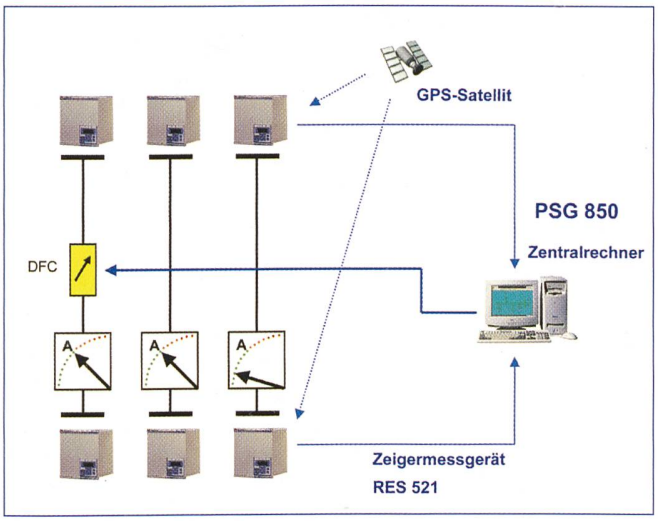

Bild 4 Koordinierte Weitbereichsregelung.

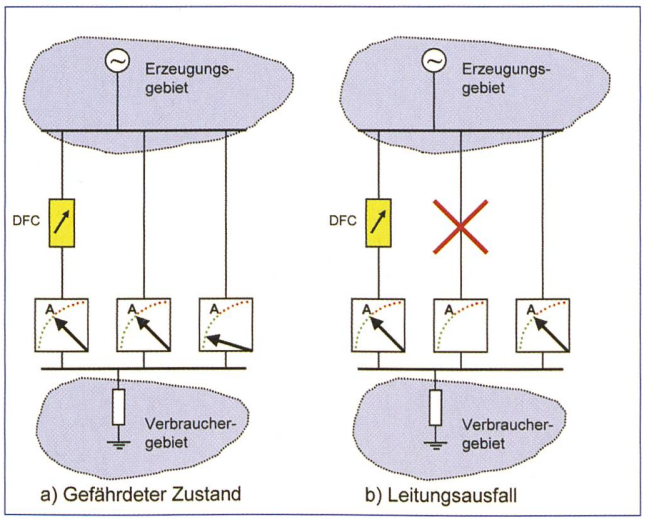

Bild 5 Vermeidung eines kaskadierten Blackouts durch Leistungsflussregelung.

grössen für den Netzregler generiert werden. Aus Sicht der Leitwarte sorgt die Weitbereichsregelung zum Beispiel dafür, dass bestimmte Teile des Korridors immer im selben Verhältnis ausgelastet sind und immer gleichmässig an ihre Belastungsgrenzen stossen. Hierdurch ist immer ein definierter Zustand gegeben, der vom Betriebsingenieur leicht nachzuvollziehen ist.

Die Reaktion dieses Regelschemas zeigt Bild 5. Ausgehend von der gefährdeten Situation (a) im Beispiel von Bild 1 hält der Leistungsflussregler bei dem auftretenden Leitungsausfall (b) den Leistungsfluss auf der linken Leitung konstant, wodurch die freie Kapazität auf der rechten Leitung genutzt wird und weitere kaskadierte Ausfälle verhindert werden.

Alle bislang vorgestellten Massnahmen dienen dazu, schnell und flexibel auf aktuelle Situationen im Netzbetrieb zu reagieren und dynamisch die vorhandene Übertragungskapazität bis an ihre physikalischen Grenzen auszunutzen.

Wenn es doch mehr Netz sein muss

Der Netzverbund in Europa wurde unter der Massgabe aufgebaut, einen Reserveleistungsaustausch zwischen einzelnen Ländern zu gewährleisten. Die neuen Anforderungen der Energiemärkte stossen daher bei vielen Länderverbindungen an die Grenzen der Übertragungskapazität. Ein Netzausbau ist jedoch in den meisten Fällen aufgrund des Landschaftsverbrauchs und der zugehörigen Genehmigung nur schwer realisierbar.

Alternativen bieten Kabelverbindungen, die jedoch in konventioneller Bauart sehr teuer sind, bei Entfernungen von mehr als einigen zehn Kilometern aufwändig kompensiert werden müssen und einen hohen Verlegeaufwand durch zum Beispiel eine hohe Anzahl an Muffen aufweisen. Diese Nachteile lassen sich durch Gleichstromkabel vermeiden.

Landschaftsschutz durch Gleichstromkabel

Hochspannungs-Gleichstromübertragungen (engl. High Voltage Direct Current HVDC) gibt es seit 50 Jahren. Bei den Anwendungen standen bislang die verlustarme Übertragung über weite Entfernungen mit Freileitungen oder die Verbindung über Gewässer mit Seekabeln im Vordergrund. Die geringeren Verluste werden jedoch teilweise durch die notwendigen Wechsel- bzw. Gleichrichter an beiden Enden aufgehoben. Bei der bisherigen Verwendung von netzgeführten Thyristorbrücken sind neben den Umrichtern grosse Filteranlagen erforderlich, um die notwendige Spannungsqualität an den Anschlusspunkten zu gewährleisten.

Für die Entwicklung von HVDC-Systemen war es daher eine Herausforderung, die Umrichter und deren zugehörigen Schaltanlagen und Filter möglichst raumsparend und effizient zu gestalten. Ein wesentlicher Durchbruch wurde hierbei durch den Übergang auf selbst geführte IGBT-Spannungsumrichter (Insulated Gate Bipolar Transistor) mit Pulsweitenmodulation erzielt. Derartige Umrichtertopologien sind heutzutage die meistverwendeten Typen und wurden für die Anwendung im Hochspannungsbereich optimiert.

Der Vorteil der Spannungsumrichter besteht darin, dass hiervon wesentlich geringere Netzrückwirkungen ausgehen,

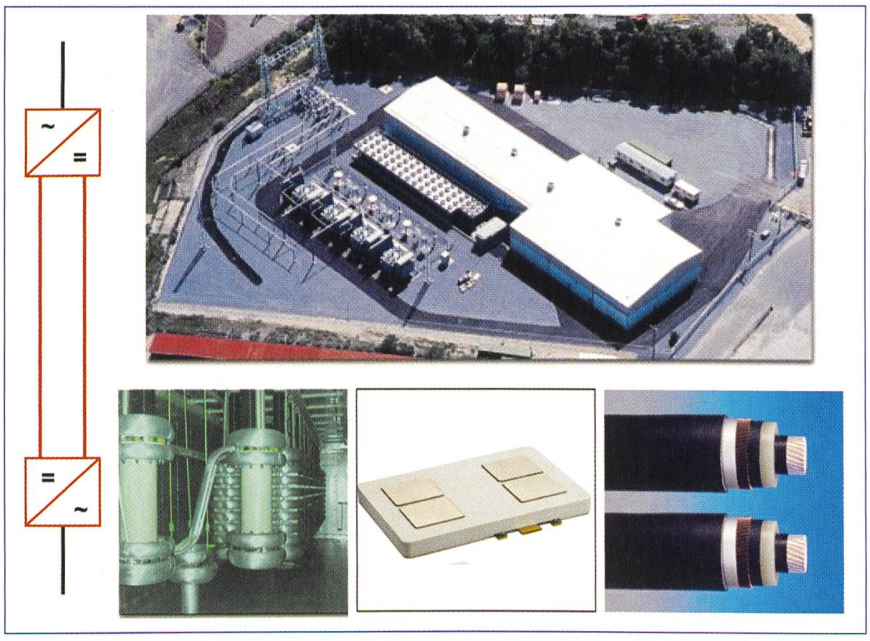

Bild 6 Gleichstromübertragung mit Spannungsumrichtern und Polymer-Kabeln (HVDC Light™).

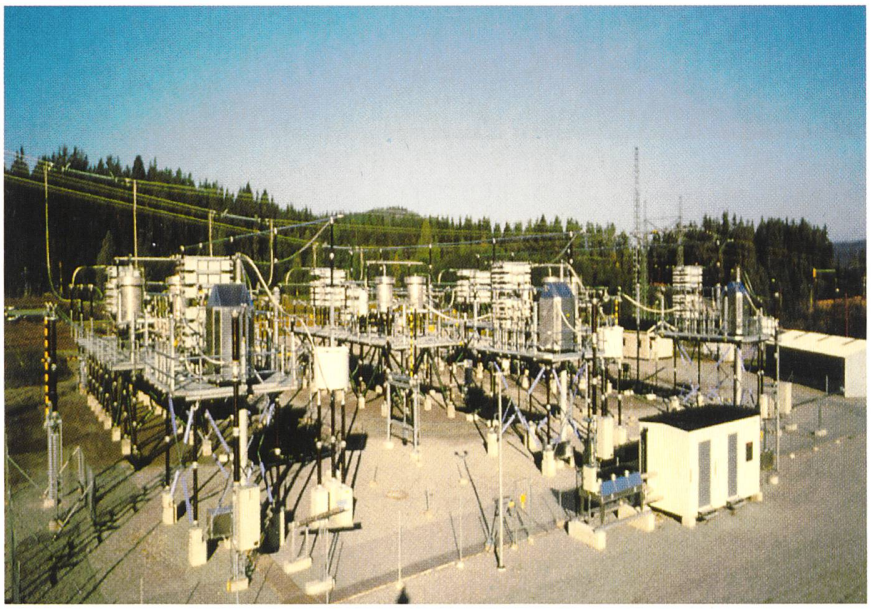

Bild 7 Thyristorgeregelte Serienkompensation zur Leistungsflussregelung langer Leitungen.

sodass nur noch geringe Filtereinrichtungen erforderlich sind. Die Umrichteranlagen können daher sehr kompakt gebaut werden, wodurch ABB dieser Technologie den Namen HVDC Light™ gab.

Ein weiterer Vorteil dieser Umrichter liegt neben der schnellen Regelbarkeit des Leistungsflusses in beide Richtungen in einer gleichzeitigen geregelten Abgabe oder Aufnahme von Blindleistung. Hierdurch können die angrenzenden Wechselstromnetzbezirke gestützt und deren Übertragungskapazität erhöht werden. Der Anschluss an weniger starke Anschlusspunkte und auch die Wiederversorgung unversorgter Netzbezirke ist mit dieser Technologie erstmals möglich.

Neben ersten kleineren Anlagen befinden sich seit zwei Jahren Übertragungsstrecken mit bis zu 330 MW Übertragungsleistung in Betrieb. Die Anschlussstation eines Leitungsendes ist in Bild 6 oben gezeigt. Die modularen Umrichter (Bild 6, unten links) sind in dem Gebäude untergebracht. Die verwendeten IGBT mit speziell aufgebauten Gehäusen (Bild 6, unten Mitte) werden ausschliesslich von ABB Schweiz in Lenzburg (AG) produziert.

Vereinfachte Installation

Neben den neuartigen Spannungsumrichtern kommen auch spezielle Polymer-Kabel zum Einsatz (Bild 6, rechts). Diese Kabel sind wesentlich leichter als herkömmliche Kabel und weisen eine längere Lebensdauer auf. Befürchtungen einer reduzierten Lebensdauer gegenüber Freileitungen sind hierdurch ausgeräumt. Durch das geringere Gewicht der Kabel lassen sich längere Strecken ohne Muffen überbrücken. Die geringe Muffenzahl und die wesentlich schnellere Herstellung einer Muffe gegenüber konventionellen Kabeln beschleunigt die Verlegung derartiger Strecken. Durch die schnelle Muffung lassen sich im Fehlerfall Störungen ähnlich schnell wie bei Freileitungen beheben.

Mit dieser Technologie wurde zum Beispiel die weltweit längste erdverlegte Kabeltrasse mit 200 MW über 180 km in Australien erstellt. Die schnelle Regelbarkeit des Leistungsflusses in beiden Richtungen ermöglicht eine flexible Nutzung der Kapazität innerhalb des Energiemarktes.

Flexibel im Netzbetrieb

Der kompakte Aufbau der Anschlussstellen, die geringe Trassenbreite, keine elektromagnetische Feldbelastung der Umwelt und die unterirdische vereinfachte Kabelverlegung machen diese neue HVDC-Technologie in vielen Fällen interessant zur schnellen Behebung von Kapazitätsengpässen. Darüber hinaus ergeben sich entscheidende Vorteile im Netzbetrieb.

Betrachtet man den Kollaps im Jahre 2003 in den USA und Kanada, so wird ersichtlich, dass die Gebiete zum Beispiel von Montreal bis Boston, die über grosse HVDC-Leitungen versorgt werden, vom Kollaps nicht betroffen wurden. Dieses liegt daran, dass eine HVDC-Leitung aufgrund der Regelbarkeit des Leistungsflusses vor Überlastungen geschützt ist. Der eingangs erwähnte Kaskadeneffekt wird hierdurch aufgehalten, da HVDC-Leitungen auch im gestörten Netzbetrieb bis zu ihrer Kapazitätsgrenze weiterbetrieben werden und nicht wie konventionelle Wechselstromleitungen wegen Überlast abgeschaltet werden.

Während des Blackouts wurde eine neu errichtete, aber bis dahin noch nicht in Betrieb gegangene HVDC LightTM-Leitung zur Versorgung von Long Island bei New York mit einer Sondergenehmigung in Betrieb gesetzt. Trotz stark fluktuierender Netzbedingungen konnte diese Anlage zuverlässig die Versorgung von Long Island verbessern.

Fazit

Durch die vorgestellten neuesten Entwicklungen eröffnen sich Möglichkeiten zur höheren Netzauslastung, die vor wenigen Jahren noch nicht denkbar waren. Die verbesserte Messtechnik bietet neue und präzisere Informationen über Übertragungsgebiete und Leitungen. Dynamische Leistungsflussregler, zusammen mit einer Weitbereichsregelung, werden in Zukunft dynamisch und flexibel den Betrieb in unterschiedlichen Situationen optimieren.

Der landschaftsschonende Netzausbau mit Kabeln in HVDC LightTM-Technologie vereinfacht auch den Netzbetrieb auf der Wechselstromseite und kann hierdurch einen entscheidenden Beitrag für eine erhöhte Zuverlässigkeit leisten.

Weiterführende Literatur

www.abb.com/FACTS
www.abb.com/HVDC

Technologies de stabilisation du réseau

Christian Rehtanz, Technology Manager d'ABB Power Systems, présente de nouvelles technologies visant à stabiliser le réseau. Il explique la panne survenue en Italie et «l'effet boule de neige» qui en a résulté. Pour y remédier, M. Rehtanz propose dans un premier temps de déterminer exactement les limites actuelles du transport et de les surveiller activement à large échelle. Dans un second temps, il suggère de transférer le flux de puissance sur les lignes non surchargées au moyen de régulateurs de réseau électroniques de puissance. Selon l'auteur, il faudrait également installer de nouveaux systèmes pour le transport du courant continu à haute tension.