

Netzwiederaufbau nach einer Grossstörung

Vorgehen nach einer Grossstörung | Ohne elektrische Energie geht in unserer Gesellschaft nichts mehr. Daher ist es unabdingbar, dass die Netze nach einer weitreichenden Störung schnell wieder aufgebaut werden - und zwar so, dass sie nicht gleich wieder ausfallen. Zu diesem Zweck hat Axpo gemeinsam mit den Kantonswerken ihr Netzwiederaufbaukonzept überarbeitet.

TEXT RAINER LIETZOW, RICHARD GRAF

Für die moderne Zivilisation in Europa ist die Versorgung mit elektrischer Energie von existenzieller Bedeutung. Eine längere Unterbrechung der kompletten Stromversorgung würde grosse volkswirtschaftliche Schäden verursachen. Deshalb verlangt der Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (Entso-E) die Ausarbeitung von Netzwiederaufbauplänen. Axpo hat zusammen mit den Kantonswerken ihr Netzwiederaufbaukonzept überarbeitet. Im Vordergrund standen eine effiziente und rasche Wiederherstellung des Normalzustands sowie das Verhalten der Unterwerke beim Schwarzstart.

Da sich die Netztopologie infolge geplanter Ausschaltungen fast täglich ändert und Störungen an verschiedensten Stellen auftreten können, ändert sich ebenfalls täglich die mögliche Ausgangslage für einen Netzwiederaufbau (**Bild 1**). Aufgrund dieser Tatsache und der Empfehlung von Entso-E wurde 2012 ein Konzept für den Netzwiederaufbau im Schweizer Übertragungsnetz erarbeitet. Darin sind keine detaillierten Beschreibungen zum Vorgehen im Ereignisfall enthalten, sondern es werden die Vorgehensweisen zum Netzwiederaufbau im Übertragungsnetz festgelegt (prinzipielle Vorgehen). Diese Vorgehensweisen sind die Basis für die Netzwiederaufbaukonzepte der nachgelagerten Verteilnetzbetreiber.

Unterteilung in Segmente

Axpo ist als Verteilnetzbetreiberin für einen Viertel des Hochspannungsnetzes der Schweiz verantwortlich. In dieser Rolle hat Axpo ihrerseits ihr eigenes Netzwiederaufbaukonzept überar-

beitet. Die grösste Änderung liegt in der Erstellung des Ausgangszustands nach dem Eintritt der Grossstörung sowie bei der Lastzuschaltung während des Netzwiederaufbaus. Während im alten Konzept sämtliche Leitungen und Abgänge zur Erstellung des Ausgangszustandes abgeschaltet wurden, wird im neuen Konzept das Hochspannungsnetz in Teilnetze (Netzabschnitte) segmentiert. Dadurch ergibt sich für den Netzwiederaufbau ein grosser Zeitgewinn. Basis des neuen Konzepts ist eine Top-down-Strategie zur Wiederherstellung der Energieversorgung. Da in der Schweiz genügend schwarzstartfähige Grosskraftwerke vorhanden sind, wurde auf eine Bottom-up-Strategie (im Verteilnetz aufgebaute Inselnetze) verzichtet.

Im Rahmen dieses neuen Netzwiederaufbaukonzepts hat Axpo gemeinsam mit den Kantonswerken im Axpo-Netzgebiet (nachgelagerte Verteilnetzbetreiber der Axpo) den Ausgangszustand, die Autonomiezeiten sowie das Schwarzstartverhalten von Unterwerken im Verteilnetz untersucht und beurteilt, ob alle technischen Voraussetzungen für einen erfolgreichen Netzwiederaufbau erfüllt sind. Diese Untersuchungen und Ergebnisse werden hier vorgestellt.

Beispiele für Störungsereignisse

Türkei, 31. März 2015: Der Ausfall mehrerer Kraftwerke verursachte starke Schwankungen im türkischen Stromnetz, sodass die Netzkopplung zum europäischen Übertragungsnetz



Bild 1 Ausfall einer 50-kV-Leitung in Tuggen infolge des Sturms Burglind am 3. Januar 2018.

Bild: Axpo Power AG

getrennt wurde. Daraufhin kam es zu einem massiven Stromausfall in der Türkei und 80 von 81 Provinzen konnten nicht mehr mit elektrischer Energie versorgt werden. Rund 76 Millionen Menschen mussten fast neun Stunden ohne Strom auskommen.

Indien, 31. Juli 2012: Der bisher grösste Stromausfall in der Geschichte der Menschheit betraf über 600 Millionen Menschen in Indien. Er war die Folge einer Überlastung des Stromnetzes in 20 von 28 Bundesstaaten Indiens. Bereits am Tag zuvor war in diesen Regionen für mehrere Stunden das Stromnetz grossflächig zusammengebrochen. Rund 300 Millionen Menschen waren davon betroffen.

Europa, 4. November 2006: Als in Deutschland eine 380-kV-Hochspannungsleitung über die Ems abgeschaltet wurde, um ein Kreuzfahrtschiff passieren zu lassen, kam es zu Überlastungen und Auslösungen von weiteren Hochspannungsleitungen sowie zu Netztrennungen. Für über zehn Millionen Menschen gingen in mehreren Ländern Europas die Lichter aus.

Diese Beispiele zeigen, dass unabhängig vom technischen Ausbaustand der Stromnetze eine Verkettung unglücklicher Umstände in Europa und damit auch in der Schweiz jederzeit zu einem massiven Blackout führen kann.

Ausgangsschaltzustand erstellen

Sind grosse Teile oder das gesamte Übertragungsnetz in der Schweiz von einer Netzstörung betroffen, wird die Übertragungsnetzbetreiberin Swissgrid die Situation «Grossstörung Schweiz» deklarieren, alle nachgelagerten Verteilnetzbetreiber informieren und einen Störungsmanager einsetzen. Der Störungsmanager kommuniziert mit den beteiligten Akteuren über die gleichen Schnittstellen wie im Normalbetrieb. Die Verteilnetzbetreiber ihrerseits informieren ihre nachgelagerten Netzbetreiber (top-down).

Wurde die Situation «Grossstörung Schweiz» deklariert, muss ein definierter Ausgangsschaltzustand im Netz erstellt werden. Dazu werden das spannungslose Übertragungsnetz vom Ausland abgetrennt, die 380-kV- und 220-kV-Ebenen entkoppelt und das Übertragungsnetz in mehrere zusammenhängende Teilnetze aufgeteilt. Parallel zu den verschiedenen Schal-

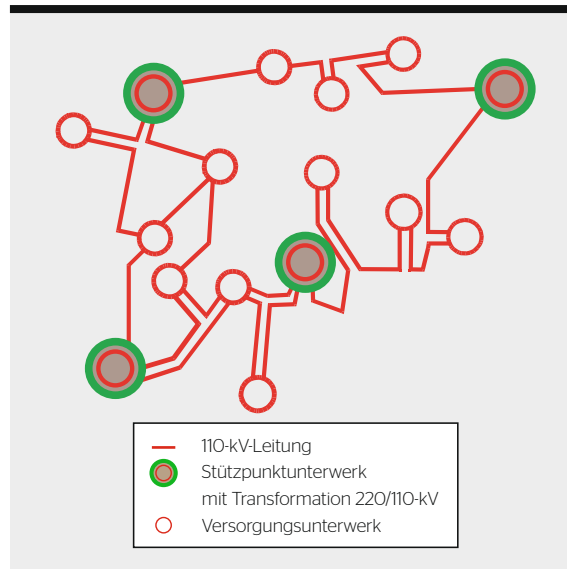


Bild 2 Ausschnitt Axpo-Verteilnetz mit Stützpunkt- und Versorgungsunterwerken.

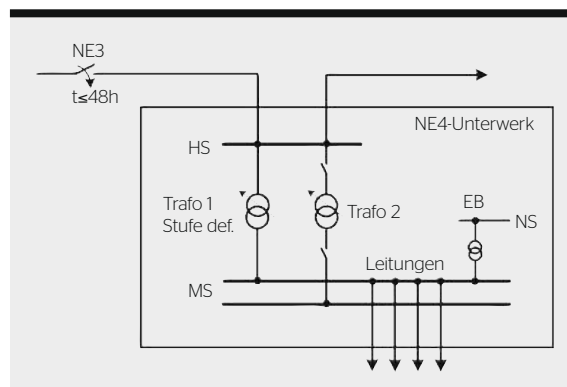


Bild 3 Prinzipschema Ausgangszustand im Versorgungsunterwerk.

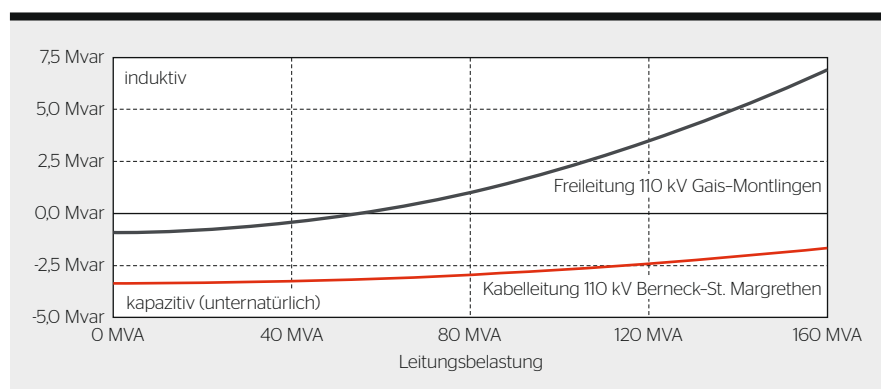


Bild 4 Blindleistungsverhalten einer Frei- und einer Kabelleitung.

tungen im Übertragungsnetz beginnt Axpo mit den Vorbereitungen in ihrem nachgelagerten Verteilnetz. Dieses überregionale Verteilnetz (NE3) der Axpo wird in der Regel vermascht betrieben (**Bild 2**). Dabei sind die Stützpunktunterwerke (Unterwerk in der NE3 mit einem Anschlusspunkt an die NE1) über verschiedene Leitungszüge miteinander verbunden. In diesen Leitungszügen sind jeweils mehrere Ver-

sorgungsunterwerke (Unterwerk in der NE3 mit Anschlusspunkten der NE4, ohne Anschlusspunkt an die NE1) eingebunden.

Als erste Massnahme schaltet Axpo alle NE2-Transformatoren aus, um das Verteilnetz vollständig vom Übertragungsnetz abzukoppeln. Anschliessend schaltet Axpo in den Stützpunktunterwerken sämtliche NE3-Leitungsabgänge aus. Dann werden die

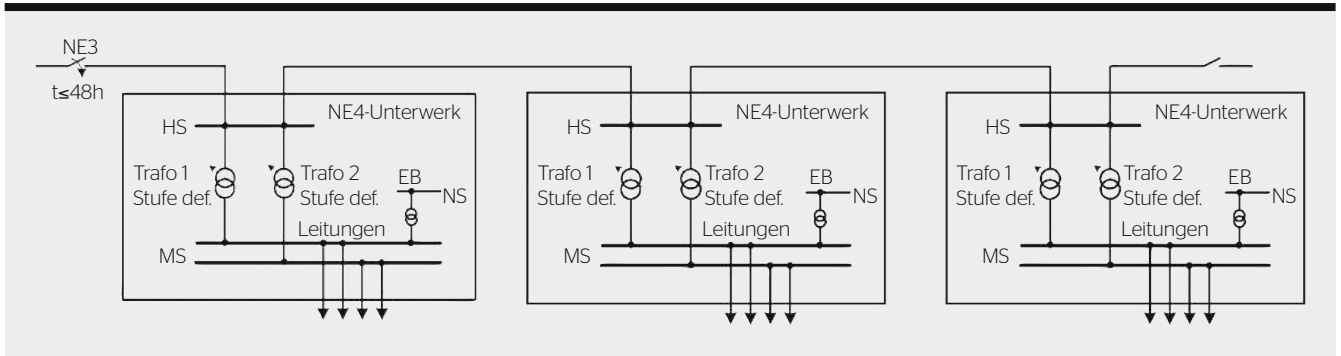


Bild 5 Prinzipschema Beispiel Zuschaltung von drei Unterwerken ab einem Stützpunktunterwerk.

abgetrennten NE3-Verteilnetzleitungen in Lastgrössen von zirka 6, 12, 25, 50 und 100 MW segmentiert. Diese Segmente müssen gebildet werden, damit beim Netzwiederaufbau die vom Übertragungsnetzbetreiber vorgegebenen Lastgrössen durch die Zuschaltung der entsprechenden Segmente erreicht werden können. In den Versorgungsunterwerken bleiben die Leitungsabgänge mit ihren Lasten eingeschaltet. Es ist vorgesehen, dass die Versorgungsunterwerke beim Zuschalten der entsprechenden Segmente sofort die angeschlossenen Kunden wieder mit Strom versorgen. Da zum Netzwiederaufbau keine Schalthandlungen in den Netzebenen 4 und 5 vorgesehen sind, kann die Wiederversorgung sehr schnell sichergestellt werden.

Autonomiezeiten

Bei einem Stromausfall wird in einem Versorgungsunterwerk der Eigenbedarf mittels Batterieanlage versorgt. Damit ist sichergestellt, dass Leittechnik, Kommunikation, Schutztechnik und Steuerung des Unterwerks auch ohne externe Spannungsversorgung verfügbar sind. Die Kapazität solcher Batterieanlagen ist zeitlich begrenzt und reicht nur zur Versorgung der wichtigsten Verbraucher im Unterwerk.

Gemäss den neuesten Anforderungen des Entso-E-Network-Codes Emergency and Restoration müssen bei einem Verlust der Primärstromversorgung die für den Netzwiederaufbau benötigten IT-Systeme, Anlagen und Einrichtungen der Verteilnetzbetreiber für mindestens 24 Stunden weiterbetrieben werden können (Autonomiezeit). Bei einer Grossstörung im europäischen Verbundnetz könnte der Netzwiederaufbau aber bis zu 48 Stunden

oder noch länger dauern. Damit besteht eine erhebliche Lücke zwischen der geforderten Autonomiezeit einer üblichen Batterieanlage und der möglichen Ausfalldauer bei einer Grossstörung in Europa. Um diese Lücke zu schliessen, sind organisatorische und technische Massnahmen vorgesehen.

Als organisatorische Massnahme wird vor Ende der Autonomiezeit ein vordefinierter Schaltzustand im Unterwerk erstellt. In der Regel wird dazu ein NE4-Transformator ausgeschaltet und zusammen mit allen MS-Feldern auf eine Sammelschiene gelegt. Der zweite NE4-Transformator wird auf der US-Seite mit dem Eigenbedarf des Unterwerks zusammengeschaltet (**Bild 3**). Als technische Massnahme wird entweder vorgängig eine grössere Batterieanlage eingebaut oder ein mobiles Notstromaggregat zur Verlängerung der Autonomiezeit eingesetzt. Mit einer stationären oder mobilen Notstromdieselgruppe kann die Autonomiezeit fast beliebig verlängert werden. Damit bleibt das Unterwerk steuerbar, solange Treibstoff zur Verfügung steht.

Netzwiederaufbau

Beim Netzwiederaufbau erfolgt eine laufende Lagebeurteilung, um das Vorgehen bezüglich der Spannungsvorgaben zu bestimmen. Sofern eine gesicherte und gesunde Spannung aus dem angrenzenden Aus- oder auch aus dem Inland vorhanden ist, kann der Aufbau basierend auf dieser Spannung top-down erfolgen. Ist keine gesunde Spannung vorhanden, erfolgt der Aufbau mittels Inselbetrieb (Bildung von Aufbauzellen) bottom-up. Dafür werden schwarzstart- und inselbetriebsfähige Kraftwerke benötigt. Diese Kraftwerke

befinden sich in den Bergregionen, während die für einen stabilen Netzbetrieb notwendigen Lasten eher im Mittelland zu finden sind. Deshalb müssen die verschiedenen Regionen mittels langer Leitungen miteinander verbunden werden.

Solange nur wenig Last zugeschaltet ist, können im leerlaufenden Netz sehr hohe Spannungen auftreten. Sobald ein Stützpunktunterwerk im Übertragungsnetz wieder mit Spannung versorgt wird, kann Axpo dort die Transformatoren einschalten. Dadurch wird der Eigenbedarf im Unterwerk via Netz versorgt und aktive Notstromaggregate können abgeschaltet werden. Sobald der Übertragungsnetzbetreiber die Freigabe zur Lastzuschaltung gibt, wird Axpo die angeforderte Last zuschalten. Sofern das Ende der Autonomiezeit in den NE4-Versorgungsunterwerken noch nicht erreicht wurde, erfolgt die Lastaufnahme unmittelbar durch die angeschlossenen Verbraucher. Ist die Autonomiezeit im Versorgungsunterwerk abgelaufen, wird durch das Zuschalten nur ein Transformator und der Eigenbedarf unter Spannung gesetzt. Anschliessend laufen die Gleichrichter hoch und die DC-Verbraucher werden ebenfalls mit Spannung versorgt. Erst wenn die Schutzgeräte wieder funktionsfähig sind, darf der zweite Transformator mit den Mittelspannungs-Leitungsfeldern zugeschaltet werden. In diesem Fall dauert die Lastaufnahme erheblich länger und eventuell wird noch Personal vor Ort benötigt.

Technische Herausforderungen beim Netzwiederaufbau

Blindleistungsproblematik: Während der Schwachlastzeiten im Sommer werden viele 110-kV-Leitungen im

Axpo-Verteilnetz im unternatürlichen Bereich betrieben und verhalten sich daher kapazitiv (**Bild 4**).

Bei einem Netzwiederaufbau verschärft sich diese Problematik, da allfällig schwach belastete Verteilnetzleitungen mit dem ebenfalls schwach belasteten Übertragungsnetz verbunden werden. Dieses Problem kann durch die Verlängerung der Autonomiezeit entschärft werden, denn dann sind die gesuchten Lasten schneller zuschaltbar. Als Fazit kann man festhalten: Solange die Last in einer Netzregion nur gering ist, wird auf die n-1-Sicherheit und die Einschaltung reiner Kabelleitungen möglichst verzichtet, damit die oberen Spannungsgrenzwerte nicht verletzt werden.

Wirkleistungsproblematik: Die Höhe der zuzuschaltenden Lasten muss abhängig von der rotierenden Leistung so gewählt werden, dass es nicht zu einem unzulässigen Absinken der Frequenz kommt. Das Bereitstellen von definierten Lasten nach einem Versorgungsunterbruch ist nicht so einfach. So werden zum Beispiel motorische Lasten, die in einen Fabrikationsprozess eingebunden sind, nach der Rückkehr der Spannung nicht automatisch hochgefahren. Stattdes-

sen muss der gesamte Prozess manuell hochgefahren werden.

Auf der anderen Seite führen Nachholeffekte bei Kälte- und Wärmeanlagen zu einem grösseren Strombedarf nach der Wiederversorgung. Zudem sind sehr viele Produktionsanlagen (inklusive PV usw.) nicht mehr am Netz, was ebenfalls zu einem grösseren Strombedarf aus dem vorgelagerten Netz führt, als dies vor der Grossstörung der Fall war. Speziell kleinere Anlagen werden nach der Wiederversorgung unkontrolliert zugeschaltet. Darum ist es für den Verteilnetzbetreiber schwierig, eine zuverlässige Prognose über den Leistungsbedarf der zugeschalteten Segmente zu machen.

Transiente Vorgänge: Wird ein Transformator eingeschaltet, kann bei einer ungünstigen Phasenlage der Spannung ein erhöhter Einschaltstromstoss (Inrush current) auftreten, weil der Eisenkern sättigt. Werden nun im Verteilnetz mehrere Versorgungsunterwerke mit eingeschalteten Transformatoren gleichzeitig vom Stützpunktunterwerk unter Spannung gesetzt (**Bild 5**), könnte der Einschaltstromstoss zu einer Schutzauslösung führen. Um dieses Risiko zu vermeiden, muss dies in den Schutzeinstellungen entsprechend be-

rücksichtigt werden, oder das Verteilnetz muss in kleinere Segmente aufgeteilt werden.

Schwarzstart eines Unterwerks: Bei der Tiefentladung werden Zellen eines Akkumulators so weit entladen, dass die Spannung unter die Entladungsspannung absinkt. Je nach Akkutyp können dabei verschiedene Schäden auftreten. Um das zu vermeiden, muss die Energieversorgung entweder mit einer Notstromdieselgruppe erfolgen oder organisatorisch sichergestellt werden, dass vor Ende der Autonomiezeit die Batterien abgetrennt werden.

Damit sind im Unterwerk alle Verbraucher für Steuerung, Schutz oder Kommunikation spannungslos und können ihre Aufgabe nicht mehr erfüllen. Da man die MS-Leitungen ohne Leitungsschutz nicht betreiben darf, werden diese auf eine Sammelschiene mit dem ausgeschalteten NE4-Transformator gelegt. Wird ein Versorgungsunterwerk in diesem Schaltzustand via Verteilnetz wieder unter Spannung gesetzt, erfolgt ein Schwarzstart nur mit dem Eigenbedarf als Last. Bei verschiedenen Versuchen mit neuen Unterwerken konnte aufgezeigt werden, dass ein Schwarzstart grundsätzlich möglich ist. Aber

RÉSUMÉ

Rétablissement du réseau de distribution après une perturbation majeure

Conditions techniques et procédure lors du rétablissement du réseau

Pour la civilisation moderne, en Europe, l'approvisionnement en énergie électrique revêt une importance existentielle. Une interruption totale, d'une certaine durée, de l'approvisionnement en électricité occasionnerait d'importants dommages économiques. C'est pourquoi le Réseau européen des gestionnaires de réseau de transport d'électricité (REGRT-E) demande l'élaboration de plans de rétablissement du réseau. En collaboration avec les entreprises électriques cantonales, Axpo a révisé son concept de rétablissement du réseau. L'accent a été mis sur la remise rapide et efficace à l'état normal, ainsi que sur le comportement des sous-stations lors d'un démarrage autonome.

En tant que gestionnaire de réseau de distribution, Axpo est responsable du quart du réseau à haute tension en Suisse. À ce titre, la société a révisé, de son côté, son propre concept de rétablissement du réseau. Le principal changement réside dans la remise en l'état initial après une perturbation majeure, ainsi que dans le réenclenchement progressif des sites de consommation pendant le rétablissement du réseau. Alors que, dans l'ancien concept, tous les

départs (lignes et transformateurs) étaient coupés pour la remise en l'état initial, le nouveau concept prévoit la segmentation du réseau à haute tension en réseaux partiels (segments de réseau). Cela permet de gagner un temps considérable pour le rétablissement du réseau. Ce nouveau concept se base sur une stratégie du haut vers le bas pour rétablir l'approvisionnement en énergie. Étant donné qu'en Suisse, il existe suffisamment de grandes centrales aptes au démarrage autonome, on a renoncé à une stratégie du bas vers le haut (rétablissement du réseau de distribution à partir de réseaux en îlotage).

Dans le cadre de ce nouveau concept de rétablissement du réseau, Axpo a analysé, en collaboration avec les entreprises électriques cantonales dans la zone de desserte d'Axpo (gestionnaires de réseau en aval d'Axpo) l'état de fonctionnement initial, les temps d'autonomie et le comportement de démarrage autonome des sous-stations dans le réseau de distribution, et évalué si toutes les conditions techniques étaient remplies pour rétablir le réseau avec succès. Ces analyses et résultats sont présentés ici.

MR

je nach Gerätetypen kann es länger dauern, bis alle Geräte wieder einsatzbereit sind. Erst wenn Schutz- und Steuergeräte hochgefahren und voll einsatzfähig sind, dürfen die MS-Abgänge durch Zuschaltung des Transformators unter Spannung gesetzt werden.

Erkenntnisse aus der Überarbeitung des Konzepts

Aufgrund der verschiedenen technischen Herausforderungen ergeben sich diverse Schlussfolgerungen: Da der Aufwand zum Testen der UW-Schwarzstartfähigkeit relativ gross ist und zudem das Risiko allfälliger Schäden nicht ausgeschlossen werden kann, wurden nur einzelne Versorgungsunterwerke stichprobenweise bei passenden Gelegenheiten, wie zum

Beispiel einer Erstinbetriebnahme, überprüft. Daher besteht das Risiko, dass bei älteren Unterwerken nach einem Schwarzstart nicht alle Geräte problemlos hochfahren und völlig fehlerfrei funktionieren.

Aus diesem Grund sollen in diesen Fällen rechtzeitig geeignete Massnahmen zur Autonomiezeitverlängerung der Akkumulatoren eingeleitet werden. Zur Erarbeitung eines tragfähigen Netzwiederaufbaukonzepts werden aktuelle Netzmodelle beziehungsweise Simulationswerkzeuge benötigt, mit denen sowohl statisches als auch dynamisches Betriebsverhalten der Netze und deren Betriebsmittel abgebildet werden können. Um den Ausbildungsstand der Mitarbeitenden in den Leitstellen zu verbessern, sollten regelmässig Simulations- und Netzwiederauf-

bauübungen mit den vor- und nachgelagerten Netzbetreibern durchgeführt werden.

Falls das Ende der Autonomiezeit in einzelnen Versorgungsunterwerken erreicht wird und damit die Sprach- und Datenkommunikation ausfällt, müssen einfache und klare Richtlinien vorliegen. So sind die Mitarbeitenden vor Ort auch ohne Anweisung der Leitstelle in der Lage, die notwendigen Schritte einzuleiten.

Autoren

Rainer Lietzow ist Leiter Projekte & Netzbetriebsplanung bei Axpo Power AG.

→ Axpo Power AG, 5401 Baden

→ rainer.lietzow@axpo.com

Richard Graf ist Fachingenieur Projekte & Netzbetriebsplanung bei Axpo Power AG.

→ richard.graf@axpo.com