Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 102 (2011)
Heft: 3

Artikel: Frequenzschwankungen durch nicht konforme Fahrplanwechsel
Autor: Scherer, Marc
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856786

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: 16.07.2025

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

Frequenzschwankungen durch nicht konforme Fahrplanwechsel

Ein verbundweites Problem und die Schweizer Lösung

Die Fähigkeit, ihre Leistungsabgabe innert Sekunden flexibel anzupassen, macht Wasserkraftwerke zu einem idealen Instrument der Netzregelung. Gleichwohl ist es ihnen aber möglich, diskreten Fahrplanänderungen nahezu augenblicklich zu folgen und damit genau die Netzregelung vor grosse Probleme zu stellen. In der Schweiz hat Swissgrid zur Entschärfung dieses Problems Mitte 2010 eine neue Regelung zur Berechnung der Ausgleichsenergie der Bilanzgruppen eingeführt.

Marc Scherer

Bilanzgruppen in der Schweiz melden ihre getätigten Energiegeschäfte der Übertragungsnetzbetreiberin Swissgrid. Diese sogenannten Fahrplanmeldungen erfolgen viertelstundenscharf. Da die Erzeugung und der Verbrauch in einem Stromnetz permanent ausgeglichen sein müssen, gibt es für jede Produktion einen Verbrauch bzw. für jeden Fahrplan einen entsprechenden Gegenfahrplan.

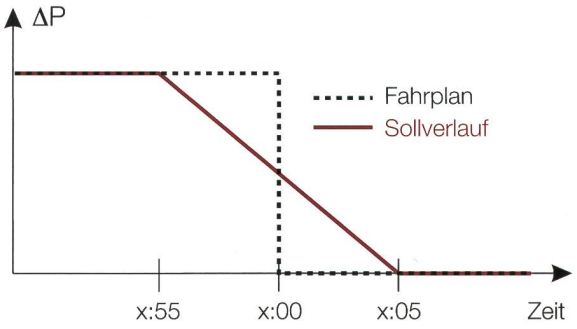
Der europäische Stromhandel wird von Stundenprodukten dominiert, weswegen es insbesondere zum Stundenwechsel zu grossen Fahrplanänderungen (Fahrplansprüngen) kommt. In der Schweiz, in der die Stromerzeugung zu rund 60 % aus flexibler Wasserkraft erfolgt, können diese zum Stundenwechsel besonders ausgeprägt sein und betrugen im Jahr 2010 bis zu über 3500 MW.

Würden nun aber die Produktion und der Verbrauch genau diesen treppenförmigen Fahrplansprüngen entsprechen, müssten sich folglich beide nicht nur sprungartig, sondern auch zeitgleich ändern, um das permanente Gleichgewicht zu gewährleisten. Dies ist weder technisch umsetzbar noch physikalisch realistisch, weswegen zur betrieblichen Abwicklung der Fahrpläne Regeln definiert wurden. Das sogenannte Operation Handbook der ENTSO-E [1] und der Transmission Code der Schweiz schreiben vor, dass Fahrplanänderungen betrieblich nicht diskret, sondern kontinuierlich über zehn Minuten umgesetzt werden müssen. [2, 3] **Bild 1** zeigt diesen rampenförmigen Verlauf bei einem Fahrplanwechsel. Diese Regelung gilt für Produktions- sowie Laständerungen innerhalb der Schweiz, aber auch grenzüberschreitend. [3] Hiervon gänzlich unberührt bleibt das Marktgeschehen, da das Clearing der Handelstransaktionen weiterhin auf Basis der über die Börse sowie OTC (bilaterale Geschäfte) festgelegten Preise erfolgt.

Folgen bei nicht konformen Fahrplanabwicklungen

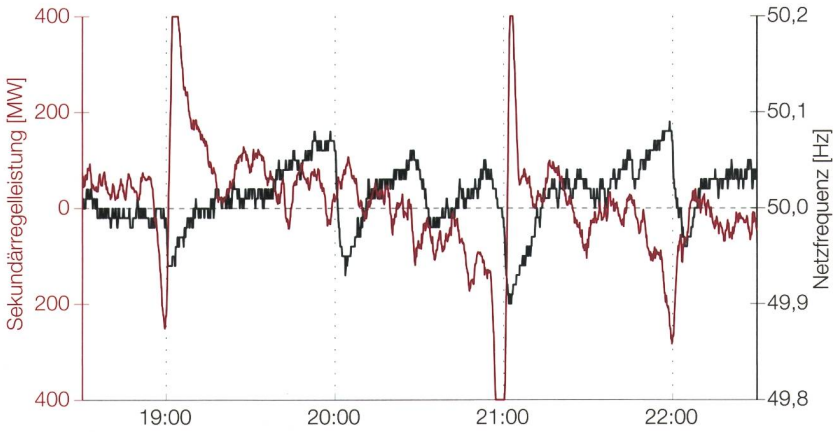
Diese Regeln sind allerdings nicht bindend, und es erfolgt keine (internationale) Sanktionierung nicht konformen Verhaltens, sodass Fahrplanwechsel nicht zwangsläufig gemäss dem oben beschriebenen Sollverlauf realisiert werden. Was geschieht aber, wenn die Fahrpläne beziehungsweise Fahrplanwechsel nicht korrekt gemäss **Bild 1** umgesetzt werden und dadurch Produktion und Last nicht übereinstimmen? [4] In diesem Fall entsteht ein Leistungsungleichgewicht, und der dreistufige Regelprozess der Netzregelung setzt ein. [2, 5]

- Primärregelung: Ist der Verbrauch zu hoch, wird den Maschinen der Produzenten mehr Energie entzogen, und die Netzfrequenz von rund 50 Hz beginnt zu sinken. Im umgekehrten Fall wird zu viel Strom erzeugt, und die Produzenten stossen Energie ins Stromnetz, wodurch die Frequenz steigt. Auf solche Frequenzänderungen reagiert innerhalb von Sekunden in ganz Kontinentaleuropa die Primärregelung, die umgekehrt proportional zur Frequenzabweichung Leistung aktiviert. In Kontinentaleuropa stehen dabei 3000 MW bei einer Abweichung von 200 mHz zur Verfügung, die solidarisch von jedem Land angefordert werden können.
- Sekundärregelung: Der Schnelligkeit wegen reagiert die Primärregelung nur auf Frequenzabweichungen. Die etwas langsamere Sekundärregelung errechnet deshalb aus dem geplanten und dem tatsächlichen Leistungsaustausch eines Landes (Regelzone und -block), wer das Leistungsungleichgewicht zu verschulden hat, und gleicht dieses aus. In der Schweiz stehen hierzu ±400 MW zur Verfügung. Die Sekundärregelung gleicht also im Gegensatz zur Primärregelung nur Ungleichgewichte im entsprechenden Land bzw. in der Schweiz aus.
- Tertiärregelung: Wird die Sekundärregelung über längere Zeit beansprucht, kann unterstützend manuell Leistung abgerufen werden. Da diese Reserve frühestens nach fünfzehn Minuten aktiviert ist,



Marc Scherer

Bild 1 Das Operation Handbook und der Transmission Code geben eine 10-minütige Rampe bei Fahrplanänderungen vor.



Marc Scherer

Bild 2 Die Leistungs- und Frequenzeinbrüche aufgrund nicht konformer Fahrplanwechsel sind abhängig von den Marktteilnehmern.

kann sie nicht zur Kompensation von nicht konformen Fahrplanwechseln eingesetzt werden.

Die dazugehörenden Produkte dieser Systemdienstleistungen werden von der Übertragungsnetzbetreiberin Swissgrid seit der Teilmarktliberalisierung Anfang 2009 marktbasiert über Ausschreibungen beschafft. [5, 6]

Unabhängig davon, ob Primär- oder Sekundärregelung zur Kompensation von nicht konformen Fahrplanwechseln und damit zum Ausgleich von Fehlverhalten der Marktteilnehmer eingesetzt werden muss – es entspricht nicht ihrem vorgesehenen Zweck, d.h., die Ressourcen der Netzregelung sind nicht darauf ausgelegt. Ihr Einsatz aufgrund des Fehlverhaltens generiert ausserdem zusätzliche Kosten, welche über die entsprechenden Tarife sozialisiert werden. Des Weiteren ist zu bedenken, dass die Reaktion der Netzregelung auf ein Leistungsungleichgewicht eines kumulierten Fahrplansprungs aus vielen nicht konformen Fahrplanwechseln immer verzögert ist.

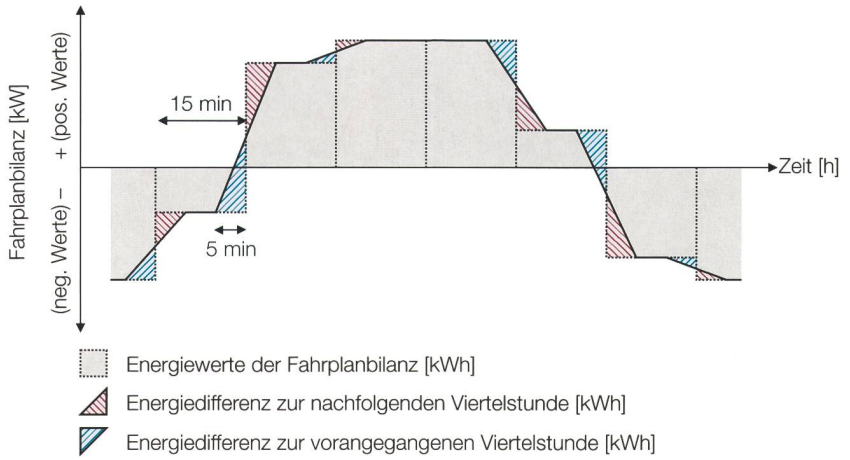
Bild 2 illustriert dies anhand eines Realbeispiels mit Verläufen der Frequenz und des Einsatzes der Sekundärregelleistung. Zu den Stundenwechseln sind die Frequenz- und Leistungsschwankungen aufgrund der Fahrplansprünge erkennbar. Um 19, 21 und 22 Uhr wurden die Fahrplanwechsel in der Schweiz nicht korrekt umgesetzt. Typisch dabei sind die fast symmetrischen Leistungsungleichgewichte um 19 und 21 Uhr; der Verlauf um 22 Uhr ergibt sich, wenn die Zuschaltung von Lasten wie zum Beispiel Pumpen nicht gestaffelt erfolgt. Werden die Fahrplanwechsel hingegen wie um 20 Uhr in bzw. aus der Schweiz korrekt umgesetzt, wird keine Sekundärregelleistung benötigt. Der Verlauf der Netzfrequenz verdeutlicht, dass Fahrplansprünge ein europaweites Problem darstellen. [7, 8]

Anreize für konforme Fahrplanwechsel

Aus diesem Grund muss ein Anreizsystem geschaffen werden, das nicht konformes Verhalten der Marktteilnehmer bestraft. Noch fundamentaler betrachtet, gilt es, gegenläufige Anreize, die Marktteilnehmer konformer Fahrplanwechsel benachteiligen können, zu verhindern. Gleichwohl darf das Marktgeschehen nicht eingeschränkt werden. Hierfür wurde in der Schweiz die Abrechnung der Ausgleichsenergie modifiziert. [9]

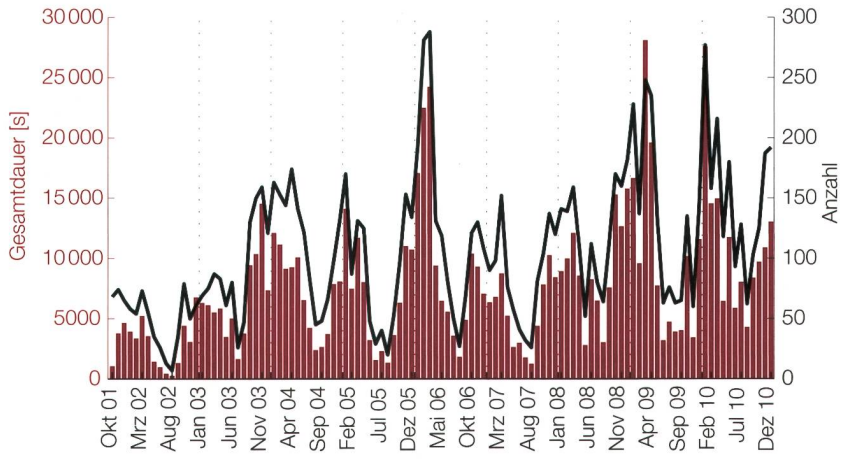
Die Ausgleichsenergie einer Bilanzgruppe errechnet sich auf Basis des Saldos aller Fahrplanmeldungen und der tatsächlich ausgetauschten Energie. Bis Mitte 2010 wurden für diese Berechnung die gemeldeten Fahrplanwerte ohne Berücksichtigung des Sollverlaufs bei Fahrplanwechseln herangezogen. Regelkonformes Verhalten führte damit zu einer Erhöhung der Ausgleichsenergiemenge und wurde bestraft. Konsequenterweise waren die Bilanzgruppen dadurch bestrebt, eher den diskreten Fahrplanwechseln zu folgen.

Seit Juli 2010 wird daher für die Berechnung der Ausgleichsenergie der rampenförmige Sollverlauf bei Fahrplanänderungen miteingerechnet. Konkret wird bei einer Änderung des Bilanzgruppensaldos die Rampe berücksichtigt und die entsprechende Energiedifferenz der jeweils vor- und nachgelagerten Viertelstunde hinzugezählt oder abgezogen. Dadurch werden die betrieblichen Anforderungen zur Umsetzung der Fahrplanwechsel und die monetäre Abbildung im Bilanzgruppenmodell konsistent. **Bild 3** illustriert an einem Beispiel diese Berechnung. Zu beachten ist, dass die immanente Vereinfachung des Bilanzgruppenmodells noch immer bestehen bleibt, d.h. die Ausgleichsenergie berücksichtigt nur die Energiedifferenz pro Viertelstunde und nicht den Verlauf des Leistungsaustauschs. Hierdurch kann die Ausgleichsenergie trotz Abweichungen innerhalb der Viertelstunde null betragen, was wiederum zum Einsatz von Regelleistung



Swissgrid AG

Bild 3 Die Berechnung der Ausgleichsenergie berücksichtigt den Sollverlauf bei einer Fahrplanänderung. Fahrpläne für die Lieferung von Regelenergie sind davon nicht betroffen.



Swissgrid AG

Bild 4 Das 75-mHz-Kriterium angewandt auf die Netzfrequenz Kontinentaleuropas (Überblick, 2001–2010).

Begriffe

Bilanzgruppe
Virtuelles Gebilde zu Abrechnungszwecken, welches eine beliebige Anzahl von Einspeise- und Entnahmestellen umfasst. Jeder Stromhändler, Produzent, Lieferant und Endverbraucher muss einer Bilanzgruppe angehören. Der Betreiber einer Bilanzgruppe kann Energiegeschäfte im In- und Ausland abwickeln. Dazu senden die Betreiber der nationalen Netzgesellschaft Swissgrid Fahrpläne. Sie sind verantwortlich, diese Fahrpläne und damit die Energiebilanz ihrer Bilanzgruppe einzuhalten.

Fahrplan
In viertelstündlichen Leistungswerten vereinbarte Zeitreihe über die Lieferung bzw. den Bezug von elektrischer Energie in einem bestimmten Zeitraum.

Ausgleichsenergie
Elektrizitätsmenge, die je Bilanzgruppe zum Ausgleich der Differenz zwischen dem effektiven Austausch gemäss Zählwerten und dem geplanten Austausch nach Fahrplan benötigt wird, um die Ausgeglichenheit der Bilanzgruppe gegenüber dem Regelblock Schweiz herzustellen. Die Betreiber der Bilanzgruppen müssen für die Ausgleichsenergie bezahlen und möchten diese entsprechend klein halten.

Regelleistung
Automatisch oder manuell abgerufene, elektrische Leistung zur Einhaltung des geplanten Elektrizitätsaustauschs über die Regelzonen- bzw. Regelblockgrenzen hinweg, zur Gewährleistung des sicheren Netzbetriebs und Korrektur der Netzfrequenz. Sie besteht aus Primär-, Sekundär- und Tertiärregelleistung.

Netzregelung
Einsatz der Regelleistung zur Einhaltung der Netzfrequenz innerhalb bestimmter Grenzen zur Gewährleistung eines sicheren Netzbetriebs.

Netzfrequenz
Mit Netzfrequenz wird in einem Stromnetz die Frequenz der elektrischen Energieversorgung mittels Wechselspannung bezeichnet. Die Netzfrequenz ist einheitlich und beträgt zum Beispiel in Kontinentaleuropa 50 Hz, im Bahnnetz $16\,^{2}/_{3}$ Hz oder in Nordamerika 60 Hz.

Regelblock/Regelzone Schweiz
Gebiet, für dessen Netzregelung die nationale Netzgesellschaft verantwortlich ist, wird physikalisch durch Messstellen festgelegt. [11]

führt. Deshalb ist es auch wichtig, dass die Bilanzgruppenbetreiber nicht fahrlässig versuchen, die Fahrpläne um die Energiedifferenz des rampenförmigen Sollverlaufs (straffierte Flächen in **Bild 3)** zu manipulieren, da die gemeldeten Leistungswerte dann von den getätigten Geschäften abweichen und so in den (Leistungs-)Sollwert der Schweiz und die Netzsicherheitsrechnung einfliessen.

Doch welchen Erfolg zeigt die Anpassung in der Berechnung der Ausgleichsenergie? Vergleicht man den Einsatz der Regelreserve aufgrund nicht konformer Fahrplanwechsel vor und nach Juli 2010 und der Einführung der anreizkonformen Berechnung der Ausgleichsenergie, so zeigt sich trotz der kurzen Auswertungsperiode von einem halben Jahr eine klare Verbesserung. Im zweiten Halbjahr 2010 kam es im Vergleich zum zweiten Halbjahr 2009 zu rund 40 % weniger Stundenwechseln, bei denen die Sekundärregelreserve ausgeschöpft wurde. Zwischen dem ersten und zweiten Halbjahr 2010 sind es gar 45 %. Die Anpassung in der Berechnung der Ausgleichsenergie hat einen positiven Effekt; gleichwohl muss sich aber noch zeigen, ob dieser Anreiz alleine ausreicht, um die Fahrplansprungproblematik in der Schweiz vollständig zu lösen.

Frequenzqualität

Bild 2 verdeutlicht bereits, dass die Fahrplansprungproblematik ein internationales Problem darstellt. Korrekt umgesetzte Fahrpläne müssten sich nun in der Netzfrequenz als Gesundheitsbarometer der europäischen Frequenzqualität widerspiegeln. **Bild 4** zeigt dazu das sogenannte 75-mHz-Kriterium. Auf Monatsbasis wurde ausgewertet, wie oft und wie lange die absoluten Frequenzabweichungen im kontinentaleuropäischen Stromnetz die Grenze von 75 mHz überschritten. Abhängig vom Handelsvolumen erkennt man neben den saisonalen Schwankungen die zunehmenden Abweichungen. Eine direkte Verbesserung nach Einführung der neuen Bilanzgruppenregelungen Mitte 2010 ist nicht nachweisbar, was aber daran liegt, dass die Schweiz mit rund 10,6 GW Höchstlast (rund 3 % des kontinentaleuropäischen Verbrauchs) eine vergleichsweise kleine Regelzone ist, die zwar ihren Anteil an die Frequenzstabilität liefern kann, diese aber nicht abschliessend bestimmt. Um eine nachhaltige Verbesserung der Frequenzqualität zu erreichen, muss die Fahrplansprungproblematik auch in grossen Regelblö-

cken wie zum Beispiel Deutschland und an Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen behoben werden.

Dieses wird umso relevanter, je enger die europäischen Strommärkte zusammenwachsen und je grösser das Handelsvolumen wird; der beobachtete Trend ist weg von der klassischen Lastfolge hin zum reinen Fahrplanbetrieb [10]. [7, 8] Daher kommt mit dem steigenden Handelsvolumen der betrieblichen Umsetzung der Fahrpläne eine zentrale Rolle zu. Je ausgeprägter die Frequenzschwankungen werden, desto mehr führt dies zu einer systematischen Destabilisierung des Stromnetzes und damit über kurz oder lang zu einer verminderten Versorgungssicherheit.

Fazit und Ausblick

Fehlende Sanktionierung bei Nichteinhalten der Regeln und falsche Anreize machen Fahrplansprünge zu einem verbundweiten Problem. Dieses wurde in der Schweiz erkannt und mit der Modifikation der Ausgleichsenergieberechnung eine erste Lösung geschaffen, die zu einer regelkonformen Umsetzung der Fahrpläne führt, gleichzeitig aber das Marktgeschehen unberührt lässt. Bei Betrachtung der eingesetzten Sekundärregelleistung der Schweiz zeichnet sich demnach seit Mitte 2010 eine klare Verbesserung ab. Der rampenförmige Sollverlauf bei Fahrplanänderungen wurde von vielen Unternehmen betrieblich umgesetzt und der Einsatz der Sekundärregelung aufgrund nicht konformer Fahrplanwechsel ging entsprechend zurück. Die grundsätzliche Kluft zwischen Regelleistung und Ausgleichsenergie besteht allerdings nach wie vor; ein betrieblich nicht konformer Fahrplanwechsel kann bei entsprechender Anpassung der gemeldeten Fahrplanwerte zum Einsatz von Regelleistung bei Swissgrid führen, ohne dass die Bilanzgruppe entsprechende Ausgleichsenergie aufweist. Dies käme zwar einem systematischen Fehlverhalten der Bilanzgruppe gleich – aber schlussendlich ist und bleibt das regelkonforme Verhalten der Marktteilnehmer nur so stark, wie die finanziellen Anreize zur Abweichung schwach sind. Um aber im gesamten Kontinentaleuropa eine zunehmende Verschlechterung der Frequenzstabilität zu vermeiden, müssen auch grössere Regelblöcke dem Schweizer Beispiel folgen und ihre Marktteilnehmer vermehrt zu einem regelkonformen Verhalten anregen.

Referenzen und Anmerkungen

[1] Die UCTE – bis Juli 1999: UCPTE (Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité) – wurde am 1. Juli 2009 in die ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) eingebunden und besteht als «Regional Group Continental Europe» weiter.
[2] OpHB-Team, UCTE Operation Handbook – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance, Version 3.0, 19. März 2009.
[3] Swissgrid AG, Transmission Code 2010, Version 23. November 2009.
[4] Es ist dabei zwischen nationalen und grenzüberschreitenden Energielieferungen zu unterscheiden. Wenn sich Produktion und der dazugehörende Verbrauch in der Schweiz befinden und übereinstimmen, führt dies zu keinem Leistungsungleichgewicht. Findet hingegen eine Transaktion mit dem Ausland statt, so führt eine Abweichung vom rampenförmigen Sollverlauf immer zu einer Unausgeglichenheit, da dieser beim Sollwert der Schweiz (Randintegral) berücksichtigt wird.
[5] Paul Niggli, Systemdienstleistungen gewährleisten eine zuverlässige Stromversorgung, Bulletin SEV/VSE, Nr. 9/2009.
[6] Andreas John, Der Übertragungsnetzbetrieb im geöffneten Strommarkt, Bulletin SEV/VSE, Nr. 9/2009.
[7] Tobias Weissbach, Ernst Welfonder, High Frequency Deviations within the European Power System – Origins and Proposals for Improvement, Invited Paper, ELECTRA, Nr. 242, Februar 2009.
[8] UCTE Ad-hoc group, Frequency Quality Investigation, Excerpt of the Final Report, 30. März 2009.
[9] Grundsätzlich sind auch andere Ansätze möglich, zum Beispiel könnte der Sollverlauf bei Fahrplanänderungen den Kraftwerken direkt vorgeschrieben werden, dies würde allerdings zusätzliche Einschränkungen mit sich bringen.
[10] Man spricht von Lastfolge, wenn der Produzent das genaue Verhalten (Lastgang) des Verbrauchers kennt und die Produktion entsprechend anpasst; der Fahrplan hat mehr unterstützenden Charakter. Mit Beginn der Liberalisierung der Strommärkte und der damit einhergehenden Entflechtung der Wertschöpfungskette ist dies nur noch bedingt möglich, der Fahrplan wird immer mehr zum einzig verbindenden Bindeglied zwischen Produktion und Verbrauch.
[11] Swissgrid AG, Glossar für die Regeln des Schweizer Strommarktes, 1. Auflage 2010, Version 1.0.

Angaben zum Autor

Marc Scherer, MSc ETH, ist Fachspezialist in der Abteilung Systemdienstleistungen von Swissgrid.
Swissgrid AG, 5080 Laufenburg
marc.scherer@swissgrid.ch

Résumé

Oscillations de la puissance et de la fréquence dues à des changements non conformes de programmes prévisionnels

Un problème connu dans tout le réseau d'interconnexion et la solution suisse

En Suisse, les groupes-bilan communiquent précisément tous les quarts d'heure les fournitures et soutirages d'électricité prévus à la société nationale du réseau de transport Swissgrid (programmes prévisionnels). Le manuel d'utilisation du REGRT-E et le Transmission Code suisse stipulent que les changements ne doivent pas être abrupts, mais réalisés de manière continue sur 10 minutes. Cette règle n'est toutefois pas contraignante; en cas de manquement, aucune sanction n'est prise. Si cette règle n'est pas respectée, il se produit un déséquilibre de la puissance qui doit être compensé par de l'énergie de réglage. Il en résulte des coûts et une charge pour le système.

Les groupes-bilan paient pour l'énergie d'ajustement qui doit être mise à disposition du fait des écarts par rapport aux programmes prévisionnels annoncés. Afin d'encourager une application continue des changements de programmes prévisionnels, Swissgrid tient compte, depuis juillet 2010, des différences par rapport au programme prévisionnel annoncé lors du calcul de la quantité d'énergie d'ajustement. Mn

Anzeige