Optimierung von Regel- und Fahrplanenergie

Autor(en): **Werlen, Karl / Epiney, Lucien**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **102 (2011)**

Heft 3

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856793

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Optimierung von Regel- und Fahrplanenergie

Analyse und Entscheidungsprozesse für Wasserkraftwerke

Regelenergie kann ein sehr lukratives Geschäft sein. Allerdings erschweren die stochastische Charakteristik der Regelsignale wie auch die Zufallsschwankungen bei den Zuflüssen die Aufgabe. Man muss deshalb die wichtigsten Optimierungsaspekte und die relevanten Risiken festlegen. Erst dann lässt sich sagen, ob man am Markt teilnehmen soll und was der beste Mix zwischen Energieproduktion und Regelenergie ist.

Karl Werlen, Lucien Epiney

Die stochastische Charakteristik der Produktion neuer erneuerbarer Energien führt zu erhöhtem Bedarf an Regelenergie. In den Alpen wird deshalb massiv in Pumpspeicherwerke investiert. Neben dem internationalen Spotmarkt für Fahrplanenergie besteht auf nationaler und internationaler Ebene ein attraktiver Markt für Regelenergie.

EVUs mit eigenen Kraftwerken haben den grossen Vorteil, dass sie neben Fahrplanenergie (z. B. an der EEX) auch Regelenergie anbieten können. Je nach Konstellation hat Regelenergie das Potenzial für sehr hohe Mehrerträge. Dabei sind Fahrplan- und Regelenergie eng miteinander gekoppelt. Mehr Regelenergie bedeutet eine Einschränkung bei der optimalen Gestaltung der Fahrpläne und umgekehrt. Eine optimale Angebotsstrategie betrachtet die beiden Komponenten integral und liefert den idealen Mix zwischen Fahrplan- und Regelenergie.

Das Risikomanagement für unsichere Prognosen von Preisen, Zuflüssen und Regelsignal bzw. Abruf von Regelenergie stellt eine grosse Herausforderung dar. Die Kalkulation der Risiken spielt vor allem in Kaskaden mit relativ kleinen Speichern (Tages- und Wochenspeicher) eine entscheidende Rolle.

Der vorliegende Beitrag zeigt die Komplexität der Problematik. Der erste Teil beschreibt einige Aspekte zur Optimierung von Fahrplan- und Regelenergie. Der zweite Teil zeigt drei Anwendungsbereiche für die Optimierung auf:

Die Bewertung dient dem EVU als Entscheidungsgrundlage, ob sich der Einstieg in das Geschäft mit Regelenergie lohnt. Die Angebotsstrategie liefert einen ganzheitlichen Ansatz, um den optimalen Mix zwischen Fahrplan- und Regelenergie zu finden. Die Betriebsoptimierung mit Realtime-Prozessintegration liefert optimale Arbeitspunkte und unterstützt das Dispatching.

Aspekte der Optimierung

Für jedes Risiko werden Annahmen getroffen, um sie in das Optimierungsmodell zu integrieren. Verfahren für robuste und stochastische Optimierung auf Tages-, Wochen- oder Jahresbasis liefern quantitative Ergebnisse. Ein kritisches Hinterfragen der Ergebnisse hilft bei der Überarbeitung und Verbesserung der getroffenen Annahmen. In dieser Phase werden Parameter festgelegt, um kundenspezifische Bedürfnisse abzubilden. Am Ende eines iterativen Prozesses entsteht ein äusserst effizientes, robustes und dynamisches System für die Bewertung von Regelenergie und die optimale Angebotsstrategie. Ein solches System erlaubt dem Projektmanager, Analyst, Trader oder Dispatcher, schnell zu agieren und die Opportunitäten des Marktes optimal zu nutzen.

Das Modell des Kraftwerksparks

Für die Optimierung von Fahrplan- und Regelenergie muss der Kraftwerkspark genügend genau abgebildet werden. Für Wasserkraftwerke beinhaltet dies Dimension und Topologie von Stauseen, Ausgleichsbecken, Freispiegel- und Druckleitungen sowie Generatoren und Pumpen. Manchmal muss die Höhen/Volumen-Charakteristik eines Stausees abgebildet werden. Für verschiedene Seestände können dann spezifische Wirkungsgradkurven definiert werden. Restwasser und Einschränkungen in Bezug auf das Schwall/Sunk-Verhältnis liefern weitere Bedingungen für die Optimierung. Revisionsintervalle und die Verfügbarkeiten der Anlagen müssen ebenso in Betracht gezogen werden. Oft gibt es eingeschränkte Leistungsbereiche, minimale Stillstands- und Laufzeiten, die abgebildet werden müssen.

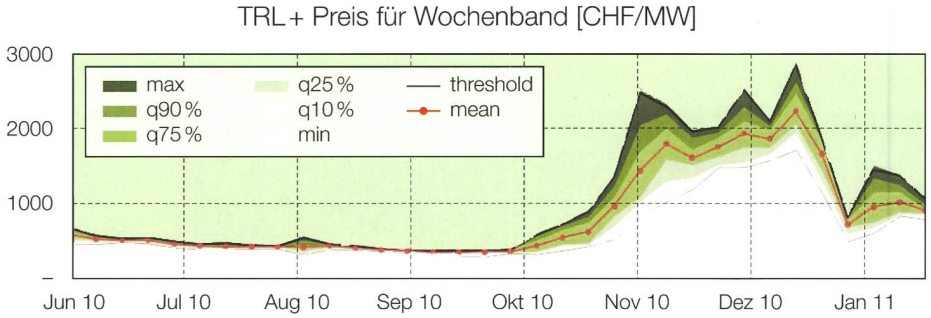


Bild 1 Auswertung der Preise für Tertiärregelleistung positiv (TRL+) von Juni 2010 bis Januar 2011.

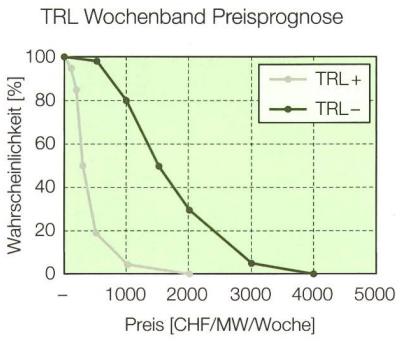


Bild 2 Wahrscheinlichkeitskurve für Preise eines bestimmten Wochenangebots für Tertiärregelleistung (TRL).

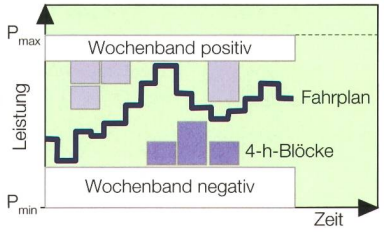


Bild 3 Mögliches Angebot mit positivem und negativem Wochenband, 4-h-Blöcken und optimalem Fahrplan.

Eine möglichst genaue Modellierung bildet oft Zielkonflikte mit dem Bedürfnis nach kurzen Rechenzeiten. Hier ist Expertenwissen gefragt, um für jede Situation die ideale Kombination zu finden.

Preisprognosen und -modelle

Für Fahrplanangebote können entweder historische Preiskurven mit stündlichen Werten oder erwartete Preise – sogenannte HPFC (hourly price forward curves) – verwendet werden. Oft werden die Preise mit einem Konfidenzintervall angegeben.

Schwieriger erscheint die Modellierung der Preise für Regelenergie. Je nach Anforderung an die Reaktionszeit bei einem Abruf unterscheidet man zwischen Primär-, Sekundär- und Tertiärregelleistung bzw. -energie. Für die unterschiedlichen Typen gibt es separate Ausschreibungen. Die Ausschreibungen für Regelenergie in der Schweiz basieren auf dem Pay-as-Bid-Prinzip.

Swissgrid schreibt Regelenergie pro Woche und pro Tag aus. Der Gewinner eines Wochenangebots muss die entsprechende Regelleistung während der ganzen Woche vorhalten und bei einem allfälligen Abruf die geforderte Regelenergie liefern (positiv) oder beziehen (negativ). Für Primär- und Sekundärregelenergie werden nur symmetrische Bänder ausgeschrieben. Positive und negative Tertiärregelenergien werden hingegen separat ausgeschrieben. Zusätzlich gibt es bei der Tertiärregelenergie sogenannte Tagesausschreibungen für 4-h-Blöcke. Seit dem 1. Januar 2011 publiziert Swissgrid alle Preise für Regelleistung.

Bild 1 wertet die Wochenangebote für Tertiärregelleistung (TRL) in der Schweiz im Zeitraum zwischen Juni 2010 und Januar 2011 aus. Der Mittelwert des Preises ist als rote Linie dargestellt. Die Quantilen zeigen den prozentualen Anteil der akzeptierten Angebote, der sich unterhalb eines bestimmten Preises befindet. Die Preise für ein Primär- und Sekundär-Wochenband liegen im Bereich von 6000 CHF/MW/Woche und damit deutlich höher als die Preise für Tertiärregelleistung. Aus den publizierten Preisen und den Quantilen kann mithilfe von Expertenwissen die Wahrscheinlichkeit abgeleitet werden, mit der ein Angebot zu einem bestimmten Preis akzeptiert wird **(Bild 2)**. Die Wahrscheinlichkeitskurven der Preise sind die Grundlage für die stochastische Optimierung. Diese liefert den besten Angebotspreis für maximale Erträge über längere Sicht. Ein solches System liefert komplette Angebote mit Leistungsblöcken und den zugehörigen besten Preisen.

Leistungs- und Energiereserven

Bild 3 zeigt ein mögliches Angebot mit Regel- und Fahrplanenergie. In Bezug auf die Regelenergie bzw. -leistung muss jederzeit das entsprechende Leistungsband vorgehalten werden. Zudem muss genügend Energie- bzw. Speicherreserve vorhanden sein, um auf Abruf die entsprechende Energie zu liefern oder zu beziehen.

Das Vorhalten der Leistungsreserve erscheint einfach. Falls Angebote für Regelenergie akzeptiert wurden, dürfen die betrieblichen Leistungsgrenzen der Maschinen nicht mehr vollständig für die Fahrpläne genutzt werden.

Schwieriger erscheint das Modell für die Energiereserve. Diese Reserve hängt stark mit der Charakteristik des Regelsignals bzw. des Abrufs von Regelenergie zusammen. So stellt sich die Frage, ob die Regelzone Schweiz eher «long» ist und vor allem negative Regelenergie abgefragt wird oder ob sie «short» ist und Regelenergie geliefert werden muss.

Bild 4 zeigt die erforderliche Energiereserve pro MW Regelleistung, um mit 95 % Sicherheit Regelleistung liefern zu können (rote Kurve). Die Kurve basiert auf einer empirischen Auswertung des Regelsignals für das Jahr 2010. Aus der Kurve können zwei Bedingungen für die Energiereserve abgeleitet werden:

Die langfristige Reserve entspricht dem Wert für einen Tag. Im Beispiel auf **Bild 4** wäre für ein Regelband von ±20 MW eine Energiereserve von ±20 MW · 3,92 MWh/MW = ±78,4 MWh erforderlich. Ein Tag als langfristige Reserve erscheint genügend. Falls die Reserve nach einem Tag aufgebraucht ist, besteht die Möglichkeit, über Fahrplanänderungen einzugreifen. Die langfristige Energiereserve muss in Summe über alle Becken des Kraftwerksparks jederzeit zur Verfügung stehen.

Zusätzlich wird eine kurzfristige Energiereserve definiert. Im Betrieb kann die Verteilung der Regelleistung auf die Turbinen laufend umdisponiert

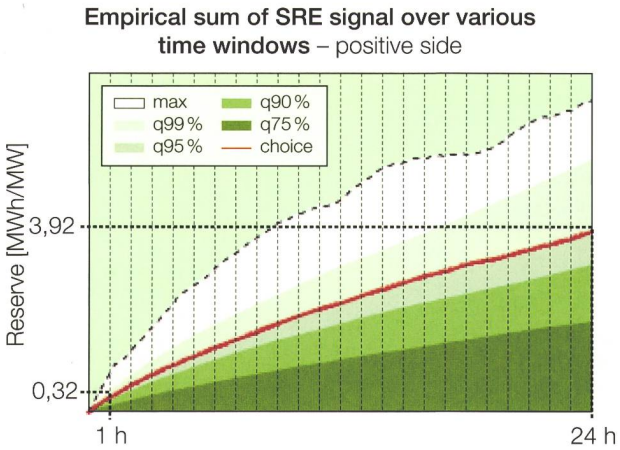


Bild 4 Energiereserve pro MW für ein Wochenband und 95 % Sicherheit für die Lieferung von Regelenergie.

werden (Betriebsoptimierung). Je nach disponierter Regelenergie pro Turbine und Zeitschritt verlangt die kurzfristige Reserve eine entsprechende Energiereserve im darüberliegenden Becken. Die kurzfristige Reserve stellt die Regelenergie beispielsweise für eine Stunde sicher. Für einen längerfristigen Horizont kann die Vorhaltung der Regelleistung innerhalb des Kraftwerksparks entsprechend umdisponiert werden. Im dargestellten Beispiel beträgt die kurzfristige Reserve ±5 MW · 0,32 MWh/MW = ±1,6 MWh.

Ungenaue Zuflüsse

Je nach Witterungsverhältnissen sind die Zuflussprognosen sehr ungenau. Bei Jahresoptimierungen wird oft von historischen Zuflüssen für ein spezifisches Jahr (z. B. trockenes oder nasses Jahr) oder von mehrjährigen Durchschnittswerten ausgegangen. Die Ungenauigkeit der Zuflüsse muss bei der Optimierung von Regelenergie berücksichtigt werden. Dabei spielt die Beckengrösse ebenfalls eine grosse Rolle. Kurzfristige Zufluss-Schwankungen sind für einen Jahresspeicher irrelevant. Für ein kleines Becken, das in wenigen Stunden voll bzw. leer ist, können dieselben Schwankungen von entscheidender Bedeutung sein.

Im Modell können Zufluss-Schwankungen mit einer bestimmten prozentualen Abweichung berücksichtigt werden (z. B. ±25 %) oder es werden definierte Szenarien betrachtet. In der Folge muss eine zusätzliche Volumenreserve der Becken eingeplant werden. Die Reserve wird mithilfe der sogenannten robusten Optimierung berechnet. **Bild 5** zeigt das Volumen am Beispiel eines Ausgleichsbeckens, das mit 99 % gegen Überlauf und Wassermangel abgesichert wird. Das für die Planung nutzbare Volumen (weisser Bereich) wird mit fortlaufender Zeit kleiner.

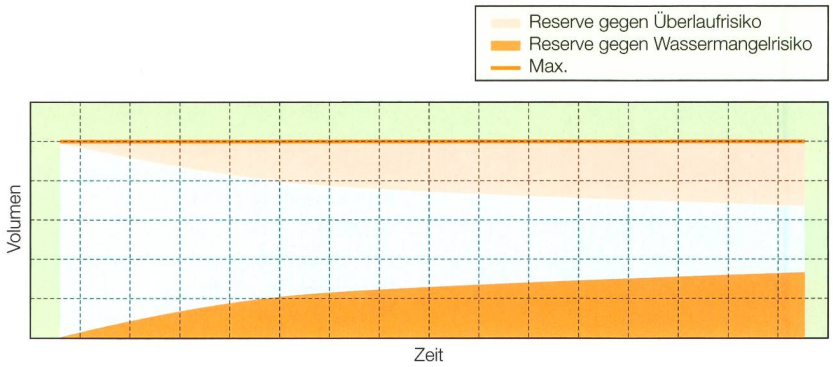


Bild 5 Beckenvolumen mit Reserve gegen Überlaufrisiko und Wassermangelrisiko mit 99 % Sicherheit.

Anwendungen der Optimierung

Der zweite Teil beschreibt die Anwendungsbereiche einer ganzheitlichen Optimierung von Regel- und Fahrplanenergie in drei Schritten.

Schritt 1: Bewertung von Regelenergie anhand eines Beispiels

Anhand eines Beispiels soll die Bewertung von Regelenergie dargestellt werden. Es handelt sich um die reale Anlage eines Kunden. Das EVU als Betreiber eines 1-stufigen Wasserkraftwerks mit 2 Generatoren à 82 MW nimmt bereits heute an den Tagesausschreibungen für Tertiärenergie teil. Es stellt sich die Frage, ob es sich lohnt, zusätzlich an den Wochenausschreibungen für Sekundär- und Tertiärenergie teilzunehmen.

Für das Beispiel werden alle Offerten zu einem bestimmten Preis (Swissix-Preise 2010) akzeptiert: Sekundärfahrplan: 4000 €/MW/Woche, Tertiär positiv: 300 €/MW/Woche, Tertiär negativ: 1500 €/MW/Woche.

Für die Tagesangebote der 4-h-Blöcke werden pro Block und Wochentag unterschiedliche Preise angenommen. Sie bewegen sich zwischen 0.60 und 4 €/MW/Block für positive Tertiärregelenergie und zwischen 2 und 20 €/MW/Block für negative Tertiärregelenergie. Die Energiereserve stellt sicher, dass die Regelenergie zu 99% geliefert werden kann. Eine zusätzliche Reserve wird benötigt, um das Risiko von zu viel oder zu wenig Zufluss (±25 % pro Woche) abzusichern.

Bild 6 zeigt eine grafische Auswertung der Resultate mit Wochenbändern und Erträgen pro Woche. Der Preis für Sekundärregelenergie erscheint im Sommer interessant, sodass viel Sekundärregelenergie eingesetzt wird. Wenn die Zuflüsse hoch sind, steigt zudem das Angebot an negativer Tertiärregelenergie, und umgekehrt dort, wo die Zuflüsse tief sind, steigt das Angebot für positive Tertiärregelleistung. Die **Tabelle** fasst die Resultate der Jahreserträge mit und ohne Wochenangebote zusammen.

Zwar verliert das EVU 2,8 Mio. € an Erträgen bei den Fahrplänen. Unter dem Strich bleibt aber ein jährlicher Zusatzertrag von netto fast 1,9 Mio. €, falls das EVU ins Regelenergiegeschäft einsteigt. Nach Abzug der zusätzlichen Investitions- und Betriebskosten kann eine definitive Bewertung durchgeführt werden.

Korrektur der Jahreserträge

Eine Jahresoptimierung liefert zu hohe Erträge, falls die Preise und die Zuflüsse für ein ganzes Jahr als bekannt angenommen werden (perfekte Prognosen).

Der Fehler der Jahreserträge kann geschätzt werden. Dabei spielen zwei Effekte eine wichtige Rolle:

- Kurzzeit-Effekt: Der Fahrplan für den Folgetag basiert auf kurzfristigen Prognosen für Preise und Zuflüsse.
- Langzeit-Effekt: Das Jahresprofil für die Becken basiert auf langfristigen Prognosen.

Beide Effekte spielen eine Rolle und reduzieren die Erträge im Vergleich mit perfekten Prognosen.

Für das Beispiel in **Bild 7** werden historische Daten für 2007 bis 2009 verwendet. Es liefert einerseits die Jahreserträge

	ohne	mit	Differenz
Fahrplan Swissix	24 877 TEUR	22 032 TEUR	–2845 TEUR
Tertiär positiv		42 TEUR	42 TEUR
Tertiär negativ		603 TEUR	603 TEUR
Sekundär		4056 TEUR	4056 TEUR
Total	**24877 TEUR**	**26 733 TEUR**	**1856 TEUR**

Tabelle Resultate der Jahreserträge mit und ohne Wochenangebote.

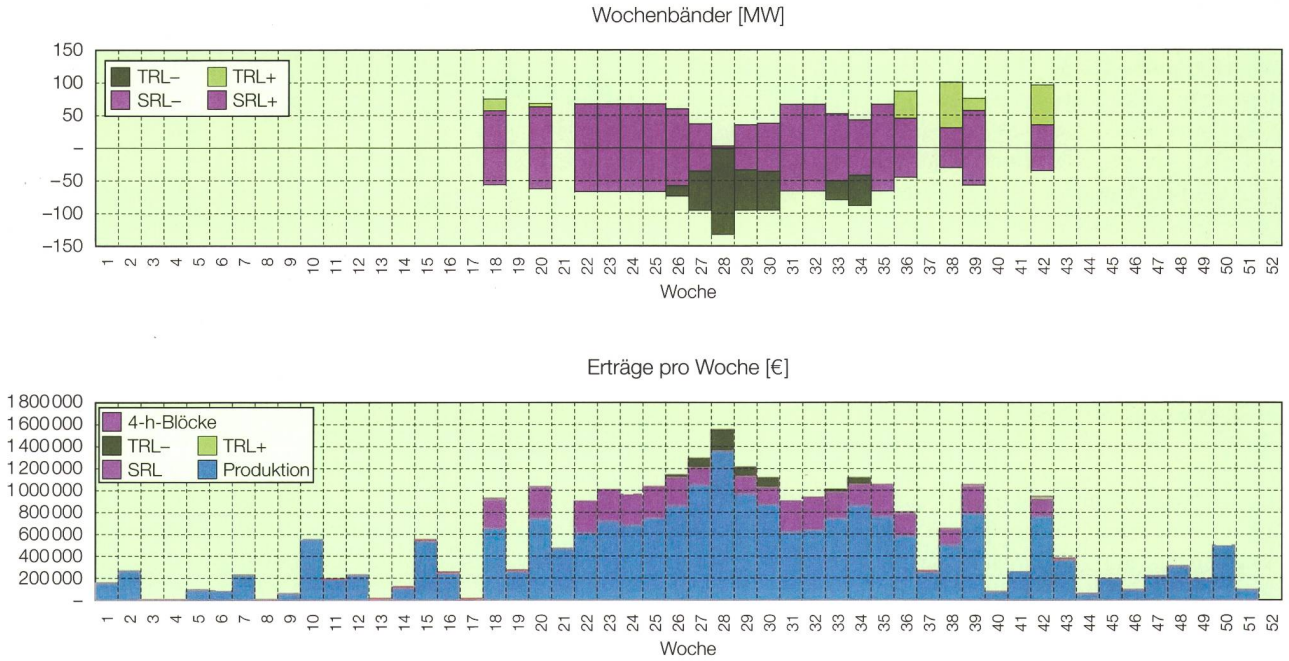


Bild 6 Wöchentliche Regelbänder und Erträge über ein ganzes Jahr gesehen mit Swissix (blau), Sekundärregelleistung (SRL violett), Tertiärregelleistung (TRL– dunkelgrün, TRL+ hellgrün).

mit den tatsächlichen Preisen und Zuflüssen (perfect knowledge) und andererseits die Jahreserträge basierend auf einem Prognosemodell unter Berücksichtigung der Kurzzeit- und Langzeit-Effekte (profit loss).

Die Ergebnisse sind in **Bild 7** grafisch dargestellt. Die absoluten Jahreserträge werden für das Beispiel 8–14 % zu optimistisch geschätzt. Das Beispiel basiert auf einem sehr simplen Prognosemodell für Zuflüsse und Preise. Auf dem Markt existieren heute bereits gute Prognosemodelle. Sie führen zu einer wesentlichen Verbesserung dieser Marge.

Schritt 2: Optimale Angebotsstrategie

Eine gut durchdachte und erprobte Angebotsstrategie ist Voraussetzung, um den optimalen Mix zwischen Fahrplan- und Regelenergie zu finden. Unterschiedliche Differenzen der Preisniveaus von Fahrplan- und Regelenergie können zu komplett verschiedenen Ergebnissen führen.

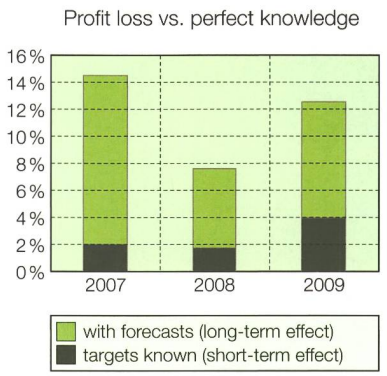
Das Optimierungsverfahren bildet die Basis für eine optimale Angebotsstrategie für Fahrplan- und Regelenergie. Die Bewältigung der im ersten Teil beschriebenen Risiken spielt eine zentrale Rolle für die Strategie. Die optimale Angebotsstrategie unterstützt den gesamten mehrstufigen Prozess entlang der Zeitachse. Jede Optimierung berücksichtigt das gesamte Spektrum von Fahrplanenergie, Primär-, Sekundär-, Tertiärregelleistung Wochenbändern bis zu den Tagesangeboten für 4-h-Blöcke. Die stochastische Optimierung basiert auf Wahrscheinlichkeitsannahmen für die diversen Risiken. Es werden Szenarien optimiert und die erwarteten Erträge maximiert. Typischerweise müssen viele Szenarien mit den dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten berechnet und ausgewertet werden.

Als erster Schritt werden die Angebote für die Wochenbänder erstellt. Der Handel für Wochenbänder erfolgt jeweils zwei Wochen im Voraus. Es ist nicht möglich, für diesen Zeithorizont Zuflussprognosen zu erstellen. Deshalb spielt hier die Ungenauigkeit des Zuflusses eine grosse Rolle. Nachdem die Wochenbänder (primär, sekundär und tertiär) fixiert sind, bilden sie eine Randbedingung für die Tagesangebote der 4-h-Blöcke. Sobald die 4-h-Blöcke bekannt sind, kann das Fahrplanangebot für den Folgetag gestaltet werden. Es folgen als letzter Schritt die Angebote für die Energielieferung der 4-h-Blöcke.

Der gesamte Prozess einer optimalen Angebotsstrategie für Fahrplan- und Regelenergie kann integral abgebildet und implementiert werden. Er unterstützt den Trader und Dispatcher entlang des gesamten Prozesses.

Schritt 3: Betriebsoptimierung

Früher waren die Anforderungen an den Betrieb von Kraftwerken viel weniger komplex. Heute werden die Anlagen mit Fahrplan- und Regelenergie (siehe oben) ausgereizt. Erschwerend dazu kommen betriebliche Störungen und unvorhergesehene Witterungseinflüsse (z. B. Gewitter). Alles in allem wird dadurch ein manueller Betrieb nahezu verunmöglicht. Es braucht eine Optimierung, welche alle Informationen inkl. Prognosen, erforderliche Reserven und Einschränkungen berücksichtigt.



Bilder: Misurio AG

Bild 7 Reduktion der Jahreserträge wegen zu optimistischen Prognosen mit einem Beispiel und Zuflussdaten von 2007, 2008 und 2009.

Résumé

Optimisation conjointe de l'énergie de réglage et du plan de production

Analyse et processus de décision pour centrales hydrauliques

L'énergie de réglage peut être très lucrative. Cependant, le caractère stochastique des signaux de réglage ainsi que la nature aléatoire des cours d'eau rendent la problématique complexe. Dans un premier temps, l'article décrit quelques aspects importants couverts par l'optimisation : modélisation de parcs électriques ; modèles et prévisions de prix ; réserves de puissance et d'énergie ; incertitude sur les cours d'eau.

Ensuite, l'article traite des 3 étapes du processus de décision : (1) la valorisation du potentiel de l'énergie de réglage permet au GDR de décider de sa participation à ce marché ; (2) la stratégie d'offres optimales permet au trader de trouver le meilleur mélange entre énergie de réglage et production ; (3) l'optimisation de l'exploitation permet de contrôler les centrales en temps réel.

No

Die Betriebsoptimierung verteilt die Fahrpläne und Regelbänder optimal innerhalb eines Kraftwerksparks. Die Situation wird laufend an die herrschenden Verhältnisse angepasst. Das heisst, die Optimierung wertet aktuelle Messdaten und Fahrplanänderungen aus und liefert ständig neue Sollwerte für die einzelnen Maschinengruppen. Es geht also darum, die Speicher optimal zu bewirtschaften, indem die Sollwerte typischerweise alle paar Minuten neu berechnet und an das Prozessleitsystem übergeben werden. Die Betriebsoptimierung ist deshalb in Echtzeit in den Prozess integriert.

Eine weitere Aufgabe im Echtzeit-Prozess ist die kontinuierliche Überwachung der Trends und die frühzeitige Ausgabe von Log-Meldungen, Warnungen und Alarmen.

Die Betriebsoptimierung unterstützt den Dispatcher in der Netzleitstelle. Dieser behält die Oberaufsicht und muss zu jeder Zeit die Möglichkeit haben, adäquat ins System einzugreifen.

Fazit

Die Bewertung von Regelenergie, die optimale Angebotsstrategie und die betriebliche Umsetzung stellen heute eine grosse Herausforderung dar. Mit ganzheitlichen Optimierungssystemen sowie dem Know-how für die Modellierung der Kraftwerksanlagen und der Risiken können leistungsfähige Werkzeuge implementiert werden, welche die gesamte Prozesskette von der Bewertung, dem Handelsgeschäft bis zum Betrieb unterstützen. EVUs erhalten fundierte Grundlagen und entscheiden selber über eine risikofreudige oder konservative Strategie.

Angaben zu den Autoren

Karl Werlen, Dr. sc. Techn. ETH, CEO Misurio AG.
Misurio AG, 3930 Visp, karl.werlen@misurio.ch

Lucien Epiney, Mathematiker EPFL, Projektentwickler Misurio AG.
Misurio AG, 3930 Visp, lucien.epiney@misurio.ch

Anzeige

Führend in der Automatisierung von Wasserkraftwerken

rittmeyer
BRUGG

www.rittmeyer.com