Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 92 (2001)

Heft: 4

Artikel: Funktioniert der Netzwiederaufbau nach einem Black-out?

Autor: Imhof, Karl / Zimmermann, Daniel / Weber, Harald

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855672

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: 12.07.2025

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

Funktioniert der Netzwiederaufbau nach einem Black-out?

Das PSEL-Projekt DynaSim hat zum Ziel, ein dynamisches Modell des Höchstspannungsnetzes der Schweiz zu erstellen und damit den Netzwiederaufbau Schweiz zu simulieren, um exemplarisch die Durchführbarkeit eines solchen Vorhabens zu demonstrieren. Im vorliegenden Beitrag werden die vorläufigen Erkenntnisse aus dem inzwischen abgeschlossenen Teilprojekt «Messung/Identifikation» präsentiert: Die Kraftwerksbetreiber konnten durch die Messungen wertvolle Erfahrungen sammeln. Es wird empfohlen, die heute gültigen Netzwiederaufbauszenarien zu optimieren und zu prüfen, wo das Netz mit Francis- anstatt mit Peltonturbinen aufgebaut werden könnte. Solche Modelle können bei dem im liberalisierten Umfeld nötigen Nachweis für die Erbringung von Systemdienstleistungen wertvolle Dienste leisten.

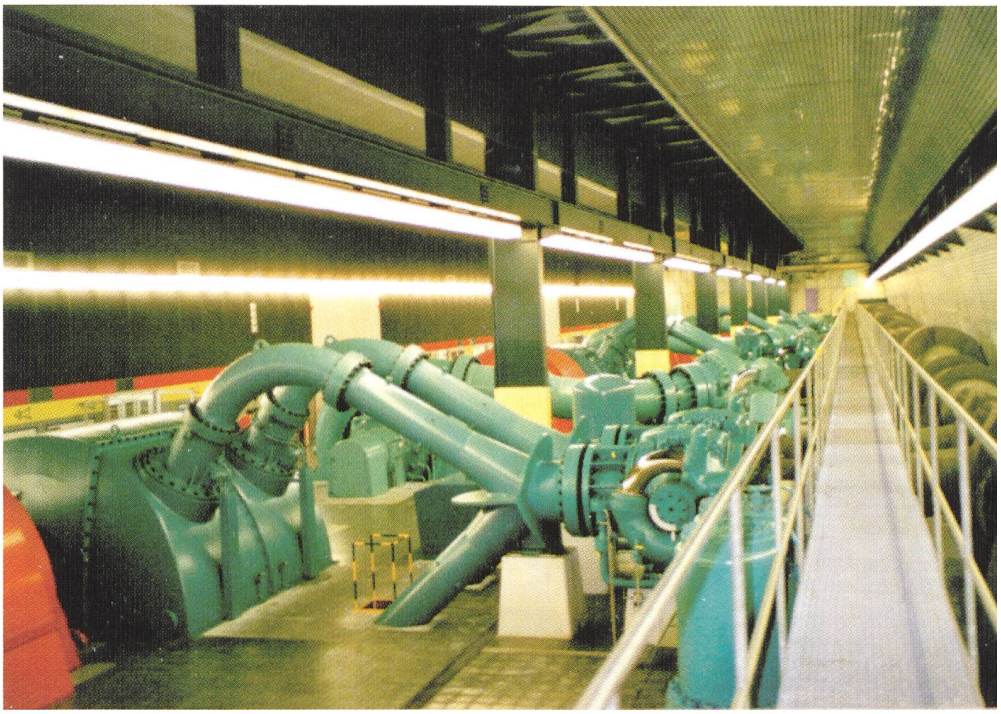
■ Karl Imhof, Daniel Zimmermann und Harald Weber

Einleitung

Das PSEL[1]-Projekt DynaSim geht der im Titel gestellten Frage nach. Ursprung des Projektes war eine Störung im Kraftwerk Filisur, die mit Hilfe eines von EGL[2] entwickelten dynamischen Modells des Kraftwerks untersucht wurde. Dabei hat sich gezeigt, dass solche Modelle für sehr viele Untersuchungen gute Dienste leisten können. Deshalb wurde anschliessend für das Kraftwerk Bärenburg von EGL und NOK[3] gemeinsam ebenfalls ein dynamisches Modell erstellt. Die Publikation [1]–[3] dieser Arbeit hat das Interesse weiterer Gesellschaften geweckt. 1998 starteten Atel[4], BKW[5], EGL, EOS[6] und NOK zusammen das PSEL-Projekt Nr. 141 «Messung und Simulation zum Verhalten des Schweizerischen Netzes» (DynaSim). Ziel des Projektes ist es, einerseits für acht grosse und für den Netzwiederaufbau wichtige Wasserkraftwerke mit Hilfe von Messungen dynamische Modelle zu entwickeln und zu identifizieren. Andererseits soll ein dynamisches Modell des Höchstspannungsnetzes der Schweiz erstellt werden, in das die zuvor identifizierten Kraftwerksmodelle integriert werden, um damit das zeitliche Verhalten des Netzes im Falle eines Netzwiederaufbaus nach einem Netzzusammenbruch zu demonstrieren. Demzufolge wurde das Projekt auch in zwei Teilprojekten «Messung/Identifikation» und «Gesamtmodellierung» organisiert. Dieser Artikel befasst sich ausschliesslich mit dem Teilprojekt «Messung/Identifikation», das inzwischen abgeschlossen werden konnte.

DynaSim-Teilprojekt Messung/Identifikation

Zu Beginn des Projektes wurden die mit Messungen zu identifizierenden Kraftwerke so bestimmt, dass eine möglichst breite Palette von verschiedenen Kraftwerks- und Reglertypen vom Fliehkraft- bis zum elektronischen Regler abgedeckt werden kann, um damit eine



Eines der im Rahmen des Projekts DynaSim gemessenen Peltonkraftwerke. Links sind die Turbinen mit den Wasserzuleitungen zu erkennen. In der Bildmitte (links vom Laufsteg) befinden sich die Kugelschieber. Rechts vom Laufsteg ist die Druckleitung, die das vom Stausee kommende Wasser auf die einzelnen Turbinen verteilt.

[1] Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft
[2] Elektrizitätsgesellschaft Laufenburg
[3] Nordostschweizerische Kraftwerke
[4] Aare-Tessin AG für Elektrizität
[5] BKW FMB Energie AG
[6] énergie ouest suisse

Adresse der Autoren
Dr. *Karl Imhof*
Dr. *Daniel Zimmermann*
ETRANS
Werkstrasse 12
5080 Laufenburg

Prof. Dr. *Harald Weber*
Universität Rostock
Universitätsplatz 1
D-18051 Rostock

Kraftwerk	Leistung	Turbinentyp	Reglertyp	Bemerkungen
Löntsch	2 × 37,5 MVA	Francis	BBC ERW 101	1)
Innertkirchen 1	5 × 52 MVA	Pelton	Fliehkraftregler	
Biasca	4 × 80 MVA	Pelton	BBC ERW 101	1)
Stalden	2 × 100 MVA	Pelton	Hydro Vevey mipreg 520/S	2)
Limmern	3 × 100 MVA	Pelton	BBC ERW 101	1), 3)
Innertkirchen 2	2 × 37,5 MVA	Francis	Sulzer-Hydro DTL 595	
Veytaux	4 × 75 MVA	Pelton	Hydro Vevey mipreg 600/C	
Lucendro	2 × 30 MVA	Pelton	Sulzer-Hydro DTL 595	

1) Elektrischer Turbinenregler (Magnetverstärker)
2) Strahlablenker nicht kontinuierlich geregelt
3) In erster Linie wird der Strahlablenker geregelt, dessen Position die Düsenöffnung bestimmt

Tabelle I Breite Palette von verschiedenen Kraftwerks- und Reglertypen.

möglichst gute Grundlage für die Modelle der nicht identifizierten Kraftwerke zu haben. Die identifizierten Kraftwerke sind in Tabelle I zusammengestellt.

Bei der Erstellung und Identifikation der dynamischen Kraftwerksmodelle wurde so vorgegangen, dass zunächst auf Grund der Anlagendokumentation eine Modellstruktur erstellt wurde, welche problemorientiert mit einem Minimum an Differenzialgleichungen ein Maximum an Nachbildungsgüte erzielen kann. Diese Modellstruktur enthält im Allgemeinen bei nur etwa 10 Zustandsgrössen rund 40 Parameter (Zeitkonstanten, Reibungskoeffizienten, Verstärkungen usw.), welche mit Hilfe der Messungen identifiziert wurden. Eine Messung besteht aus der Aufzeichnung (rund 2 Minuten mit einer Auflösung von 0,1 s) verschiedener Ein- und Ausgangsgrössen des Kraftwerks während eines unsteten Übergangs von Verbund auf Inselbetrieb mit Restlast. Der Übergang von Verbund auf Inselbetrieb muss unstet sein, das heisst, es muss ein plötzlicher Leistungssprung stattfinden, damit das dynamische Verhalten des Kraftwerks angeregt wird. Ausserdem wird im Inselbetrieb mit Restlast das dynamische Regelverhalten bei zeitlich veränderlicher Netzfrequenz aufgezeichnet. Im Verbundbetrieb ist die Frequenz unabhängig vom Verhalten eines einzelnen Kraftwerkes nahezu konstant, das heisst, die Regeleinrichtungen eines Kraftwerks arbeiten gegen ein starres Netz. Aus diesen Gründen ist es auch nicht möglich, die für die Identifikation eines dynamischen Modells erforderlichen Messungen im Normalbetrieb durchzuführen. Der gewünschte Leistungssprung wird mit Abschalten von Import- oder Exportleistung realisiert und ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

Die Identifikation besteht dann darin, die Modellparameter so lange zu variieren, bis die gemessenen Ausgangsgrössen des Kraftwerks mit den vom Modell auf Grund der gemessenen Eingangsgrössen berechneten Werten übereinstimmen (Bild 2).

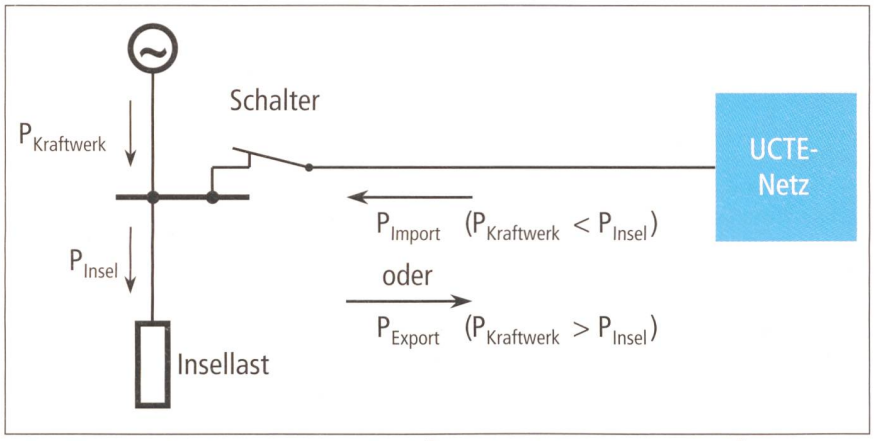


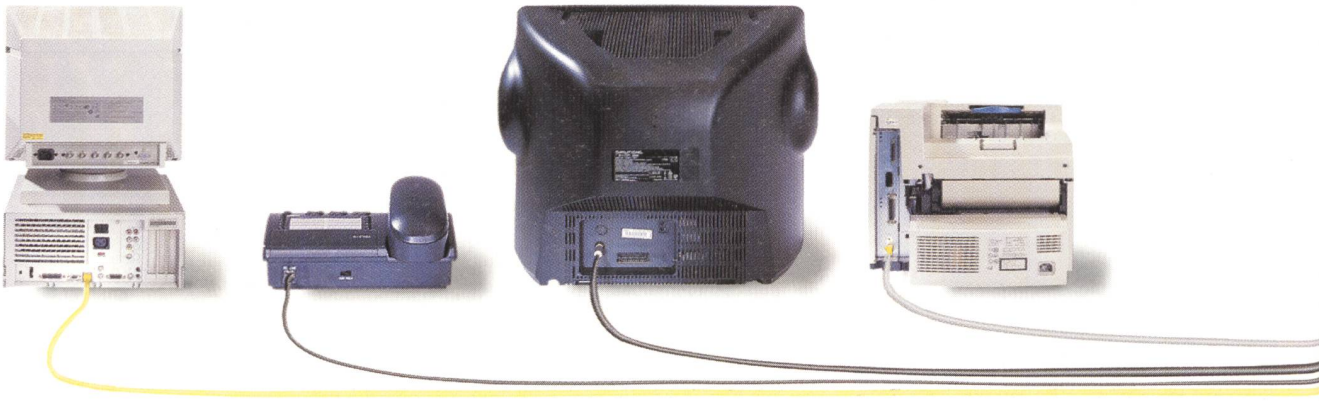
Bild 1 Prinzipschaltbild der Messanordnung. Durch Öffnen des Schalters wird der unstete Übergang realisiert.

Erste Erkenntnisse aus den Messungen

Gutes Training für die Kraftwerksoperateure

Bei den Messungen in den Kraftwerken hat sich immer wieder gezeigt, dass die Kraftwerksoperateure mit einer unge-

Die Hintergründe von Multimedia.



wohnten und selten auftretenden Situation (Inselbetrieb) konfrontiert waren, die von ihnen als willkommene Gelegenheit genutzt wurde, ihr Kraftwerk in unüblichen Betriebszuständen zu betreiben. Durch die gründliche Vorbereitung der Messungen war es möglich, den Betrieb der Kraftwerke in Extremsituationen zu üben, ohne dass dabei Störungen oder unerwartete Situationen aufgetreten wären. Beispielsweise haben es viele Kraftwerksoperateure geschätzt, das Synchronisieren eines Inselbetriebes an das Verbundnetz üben zu können. Bei den Messungen wurde nämlich stets darauf geachtet, dass die Insellast nie spannungslos gesetzt werden musste. Dazu ist es nötig, die Leistung des Kraftwerks im Inselbetrieb manuell so zu regeln, dass Frequenz, Phasenwinkel und Spannung im Insel- und im Verbundnetz gleichzeitig innerhalb der für die Synchronisierung geforderten Toleranzgrenzen liegen. Erst dann kann der Schalter wieder zugeschaltet und die Insellast vom Verbundnetz her versorgt werden. Dies ist viel schwieriger als die Synchronisation des Kraftwerks alleine (Insel ohne Last), da eine Insel mit Last viel träger reagiert und die Last auch nicht a priori konstant ist.

Es war durch diese Messungen aber auch möglich, einzelne Fehler in den Anlagen, in den Dokumentationen oder falsch eingestellte Parameter zu entdecken, die sich auf den reinen Verbundbetrieb nicht auswirken. Im Fall eines durch eine Störung bedingten Inselbetriebes könnten solche Fehler aber gravierende Folgen haben. Beispielsweise konnte so in einem Fall ein nicht optimal eingestellter Parameter gefunden werden, der im Verbundbetrieb keine nachteiligen Folgen hat und deshalb auch nicht festgestellt werden kann. Im Inselbetrieb hat er sich aber so ausgewirkt, dass die Frequenz zu pendeln begann und die Amplitude immer grösser wurde. Das System begann ungedämpft zu schwingen und schaukelte sich auf. Durch die spezielle Situation, dass es sich um eine Messung handelte und die Operateure das Geschehen vor Ort beobachteten, konnten sie rasch eingreifen und die Pendelung mit der Öffnungsbegrenzung der Stellorgane dämpfen und die Frequenz stabilisieren. Bei einem durch einen Störungsfall sich bildenden Inselnetz könnte nicht so schnell reagiert werden. Die Folge wären Versorgungsunterbrüche und allenfalls Defekte bei Kunden oder im Kraftwerk.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle Beteiligten von diesen Messungen viel gelernt haben.

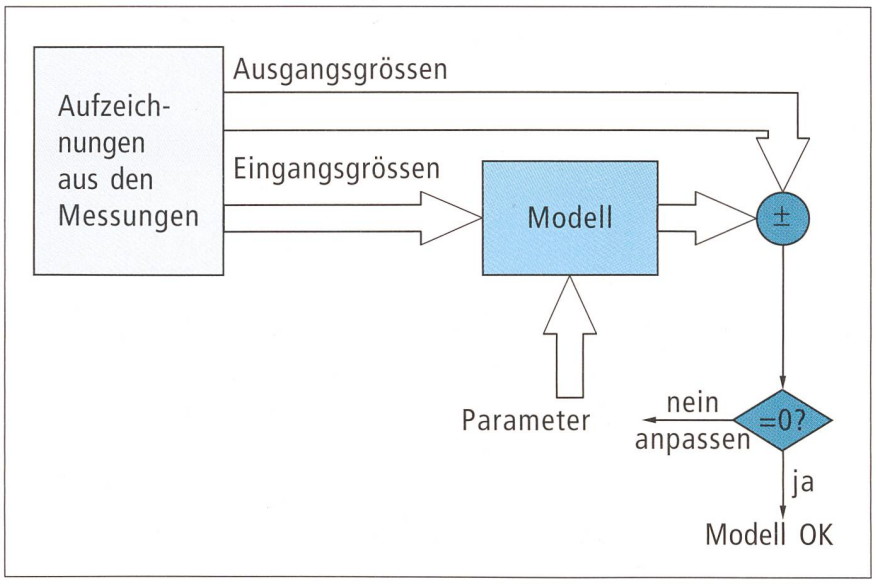


Bild 2 Prinzip der Identifikation.

Francisturbinen haben bessere dynamische Eigenschaften als Peltonturbinen

Für den Netzwiederaufbau, bei dem die Kraftwerke die Last stufenweise übernehmen müssen, ist man auf Turbinen angewiesen, die möglichst schnell geregelt werden können. Dies ist wichtig, da bei einer sprungartigen Änderung der Last, wie sie bei einem Netzwiederaufbau vorkommt, die Differenz zwischen Produktion und Verbrauch möglichst schnell wieder ausgeglichen werden muss. Im ersten Moment beträgt die Frequenzänderung pro Sekunde für einen Lastsprung von 10% bei einem Generator mit einer Anlaufzeitkonstante von 6 s (typisch für grosse hydraulische Hochdruckkraftwerke) rund

$$1{,}7\% \left(\frac{df/dt}{dP} = \frac{0{,}17\%/s}{\%} \right),$$

MMC3000 von BKS.

- Kategorie Multimedia
- 4 Paare
- Übertragungsrate >1,2 GHz
- Weltweit über 2 Mio Anschlüsse installiert
- einfache Montage
- für alle Anwendungen ausser Strom
- Einsatz im Eigenheim, wie im Konzerngebäude.

BKS Kabel-Service AG
Fabrikstrasse 8
CH-4552 Derendingen
Tel: +41/32-681 54 54
Fax: +41/32-681 54 59
e-mail: homenet@bks.ch
www.bks.ch

BKS Kabel-Service AG
Rue de Galilée
CH-1400 Yverdon-les-Bains
Tel: +41/24-423 94 09
Fax: +41/24-423 94 10
e-mail: romandie@bks.ch
www.bks.ch

BKS
Plug in High-Tech!

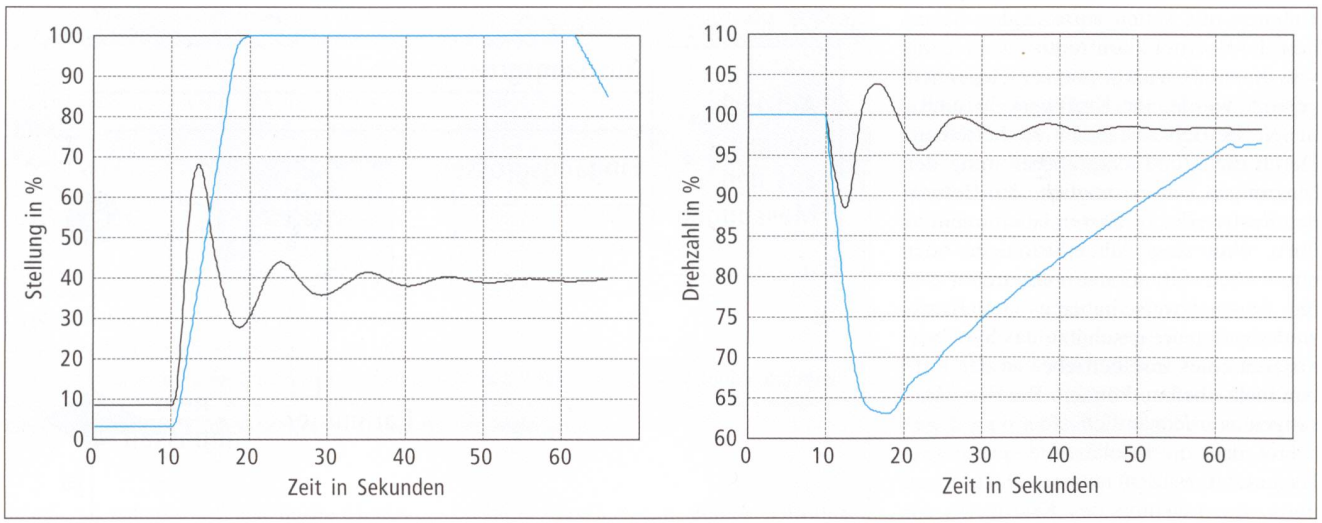


Bild 3 Stellung der Peltondüse bzw. des Leitapparates und Drehzahl bei einem Lastsprung von 0% auf 40% bei einer Peltonturbine und einer Francisturbine.

wobei diese Frequenzänderung mit der Zeit zunimmt. Nimmt beispielsweise ein Generator mit Nennleistung 40 MW eine sprungartige Last von 15 MW auf, sinkt die Frequenz bei Nichteingreifen der Regelung in der ersten Sekunde von 50 Hz auf etwa 46,8 Hz ab. Dies zeigt deutlich, dass eine schnelle Regelung der Stellorgane (Düsennadel bei der Peltonturbine bzw. Leitapparat bei der Francisturbine) von entscheidender Bedeutung ist, um die Frequenzabweichung in akzeptablen Grenzen halten zu können.

Bei den im Rahmen des Projektes DynaSim durchgeführten Messungen konnte eine in Netzleitstellen weit verbreitete Meinung, Peltonturbinen würden schneller regeln als Francisturbinen, klar widerlegt werden. Bei Lastreduktionen ist zwar praktisch kein Unterschied festzustellen, da der Strahlablenker einer Peltonturbine ebenfalls sehr schnell eingreifen kann, währenddem die Düse relativ langsam schliesst. Bei Lastaufnahme hingegen ist die Öffnungsgeschwindigkeit einer Peltondüse nur etwa halb so gross wie jene einer Francisturbine. Im Beispiel in Bild 3 ist ein Lastsprung von 0% auf 40% für eine Pelton- und eine Francisturbine simuliert. Dabei ist zu erkennen, dass die Öffnungsgeschwindigkeit der Peltondüse 8,1 s/100% beträgt, jene der Francisturbine hingegen nur 3,5 s/100%. Demzufolge sinkt auch die Frequenz bei der Peltonturbine viel stärker ab (auf 31,5 Hz) als bei der Francisturbine (44,3 Hz).

Auf Grund dieser Erkenntnisse sollten die heute gültigen Szenarien für einen Wiederaufbau des schweizerischen Höchstspannungsnetzes, bei welchen in der Anfangsphase fast ausschliesslich Peltonkraftwerke zum Einsatz kommen, überprüft werden.

Die heute gültigen Szenarien für einen Netzwiederaufbau nach einem Netzzusammenbruch sind auf ihre statische Machbarkeit hin hinlänglich überprüft. Das heisst, es ist sichergestellt, dass genügend Kraftwerksleistung zur Deckung der zu erwartenden Last bei den Zuschaltungen zur Verfügung steht. Das dynamische Verhalten während des Netzwiederaufbaus ist bis jetzt aber noch nicht überprüft worden. Der Abschluss des Projektes DynaSim wird den Nachweis für die Machbarkeit des Netzwiederaufbaus auch im dynamischen Bereich zu erbringen versuchen. In diesem Sinne muss für eine Überprüfung der Szenarien für einen schweizerischen Netzwiederaufbau der Abschluss des Projektes abgewartet werden. Auf Grund des Teilprojektes Messung/Identifikation kann aber jetzt schon festgestellt werden, dass ein Netzwiederaufbau mit Francisturbinen sicher einfacher zu bewerkstelligen ist als mit Peltonturbinen.

Dynamische Modelle und Liberalisierung

Es hat sich gezeigt, dass mit den im Rahmen des Projektes DynaSim erstellten dynamischen Kraftwerksmodelle praktisch beliebige Situationen in allen möglichen Arbeitspunkten simuliert werden können und diese Simulationen die Realität sehr gut wiedergeben. Deshalb könnten solche Modelle im Rahmen der Liberalisierung des Elektrizitätsmarktes gute und wichtige Dienste leisten. Bis heute (im regulierten Elektrizitätsmarkt) liegen die Verantwortung für den Betrieb der Netze und der Kraftwerke weitgehend bei den selben Gesellschaften. Es ist deshalb eine Selbstverständlichkeit, dass viele Systemdienstleistungen (Frequenzregelung, Spannungsregelung, Bereitstellen von Wirk- und Blindleistungsreserven, Schwarzstartfähigkeit, Inselfähigkeit usw.) von den Kraftwerken unentgeltlich dem Netz zur Verfügung gestellt werden. Wenn künftig im liberalisierten Elektrizitätsmarkt das Unbundling konsequent durchgeführt sein wird, werden die Kraftwerksgesellschaften diese Dienstleistungen nicht mehr unentgeltlich erbringen. Es ist davon auszugehen, dass auch für die Systemdienstleistungen ein Markt entstehen wird. Die Netzbetreiber werden für diese Zusatzdienstleistungen aber nur etwas entgelten, wenn die Kraftwerksgesellschaften nachweisen können, dass sie diese Zusatzdienstleistungen auch tatsächlich erbringen. Und genau dabei können dynamische Kraftwerksmodelle sehr hilfreiche Dienste leisten, indem eine beliebige Störung simuliert und damit überprüft werden kann, ob die geforderten Eigenschaften und Grenzwerte eingehalten werden können.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes DynaSim wurden von acht für den Netzwiederaufbau wichtigen hydraulischen Kraftwerken detaillierte dynamische Modelle erstellt. Bei den dazu notwendigen Messungen haben nicht nur die Projektmitglieder, sondern auch die Kraftwerksbetreiber viel gelernt. Sowohl bei den Messungen als auch bei den anschliessenden Modellidentifikationen wurden die unterschiedlichen Eigenschaften von Pelton- und Francisturbinen offensichtlich, was aus Sicht der Projektverantwortlichen zu einer Überarbeitung der

heute gültigen Netzwiederaufbauszenarien führen sollte. Durch die enorme Bandbreite, in der diese Modelle angewendet werden können, sind sie prädestiniert, um im liberalisierten Elektrizitätsmarkt den Nachweis erbringen zu können, dass ein Kraftwerk die geforderten Zusatzdienstleistungen bereitstellen kann.

Als Abschluss des Projektes DynaSim wird nun noch ein dynamisches Netzmodell des schweizerischen Höchstspannungsnetzes erstellt, in das diese Kraftwerksmodelle integriert werden. Damit wird dann der Netzwiederaufbau des Schweizer Netzes gemäss den heute gültigen Szenarien simuliert. In diesem Sinne kann die im Titel gestellte Frage erst beantwortet werden, wenn auch das Teilprojekt «Gesamtmodellierung» des Projektes DynaSim abgeschlossen ist. Trotz der im Rahmen des Teilprojektes «Messung/Identifikation» gemachten Feststellung, dass die Netzwiederaufbauszenarien überarbeitet werden sollten, ist nicht ausgeschlossen, dass ein Netzwiederaufbau Schweiz gemäss den heute gültigen Szenarien funktionieren würde. Er kann aber auf alle Fälle verbessert werden.

Es wäre sinnvoll, in den GridCodes der verschiedenen Länder festzuschreiben, dass jeder Kraftwerksbetreiber, der für Zusatzdienstleistungen entschädigt werden möchte, mit Hilfe dynamischer Modelle den Nachweis für diese Leistungen erbringen muss. Dabei müsste das Verfahren, wie die Modelle strukturiert und identifiziert werden müssen, detailliert beschrieben werden.

Literatur

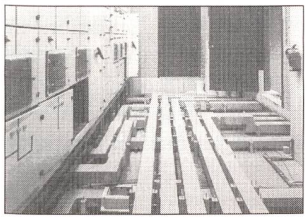
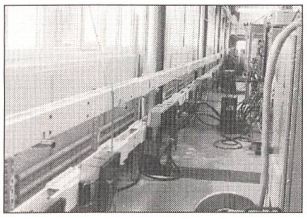
[1] *Weber, H.; Zimmermann, D.*: Inselbetriebsversuche im Kraftwerk Bärenburg (KHR). Bulletin VSE/SEV 2/96.

[2] *Weber, H.; Zimmermann, D.*: Dynamikmodell für ein Hochdruck-Wasserkraftwerk. etz Elektrotechnik und Automation 7/96.

[3] *Weber, H.; Zimmermann, D.*: Investigation of the dynamic behavior of a high pressure hydro power plant in the Swiss Alps during the transition from interconnected to isolated operation. 12th Power Systems Computation Conference (PSCC), Dresden, August 19–23, 1996.

La reconstitution du réseau fonctionne-t-elle suite à un black-out?

L'objectif du projet DynaSim du PSEL est d'établir un modèle dynamique du réseau très haute tension de la Suisse, et de simuler ainsi la reconstitution du réseau en Suisse, pour démontrer de manière exemplaire la faisabilité d'un tel projet. Dans cet article sont présentées les connaissances provisoires acquises tirées du projet partiel «Mesure/identification», clôturé entre-temps: Grâce aux mesures, les exploitants de centrale ont pu collecter de précieuses expériences. Il est recommandé de vérifier et de remanier les scénarios de reconstitution du réseau actuellement en vigueur. Dans le contexte libéralisé, de tels modèles peuvent rendre de précieux services concernant la preuve nécessaire à la fourniture de services auxiliaires du système.

LANZ Stromschienen zur Stromübertragung und -verteilung

in Büro-, Gewerbe-, Zweck- und Industriebauten von 25 – 6'000 A/1'000 V bzw. 630 – 8'000 A/245 kV EN/IEC-normenkonform IP 20, IP 54 und IP 68.

- Kompakt, z. B. 2'000 A nur 100 x 160 mm Aussenmass
- Zentimetergenau montierbar für beste Platzausnützung in Schaltschränken, Steigzonen, Decken, Unterflur etc.
- Maximaler Personenschutz. Hohe Kurzschlußfestigkeit. Wartungsfrei. Schweizer Produkt ISO 9001-zertifiziert.

Rufen Sie an:
lanz oensingen ag Tel. 062 388 21 21 Fax 062 388 24 24

Bitte senden Sie Unterlagen über LANZ Produkte:

- ☐ **LANZ Verteil-Stromschienen 25 – 6'000 A/1'000 V**
- ☐ **LANZ Übertragungs-Stromschienen 630 – 8'000 A/245 kV**
- ☐ **LANZ Kabelträger aus Stahl/Inox/Polyester**
- ☐ **LANZ G-Kanäle (pat.) und plastifizierte Gitterbahnen**
- ☐ **LANZ Installationsmaterial für Doppelböden**
- ☐ **LANZ Brüstungskanäle**
- ☐ **kb-Brüstungskanal-Stromschienen**
- ☐ **MULTIFIX Schienen-montagesystem und MULTIFIX Rohrschellen für koordinierte Installationen**
- ☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

SS 01

Name/Adresse/Tel. _____

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen · Telefon ++41/62 388 21 21