Online-Überwachung des europäischen Netzpendelverhaltens

Autor(en): **Zima, Marek / Sattinger, Walter / Korba, Petr**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **98 (2007)**

Heft 9

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857445

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

Online-Überwachung des europäischen Netzpendelverhaltens

Wide-Area Monitoring als Massnahme zur Vermeidung von Netzpendelungen

Damit Europa weiter von der Verbindung der Netze wie beispielsweise Reservenaufteilung und Wettbewerb in der Energieversorgung profitieren kann, müssen Netzpendelungen ernst genommen und frühzeitig bereits bei der Entstehung vermieden werden. Die Anwendung des Wide-Area Monitorings für die richtige Einstellung von PSS-Parametern und Regelung der FACTS-Geräte[1)] gehört zu den am geeignetsten Massnahmen, die dafür heute zur Verfügung stehen.

Landeselektrizitätsversorgungssysteme wurden ursprünglich als selbstständige Systeme projektiert, mit eigenen Reserven, um mögliche Kraftwerksausfälle und Netzstörungen ausgleichen zu können. Als Folge der gestiegenen Erwartungen an eine höhere Versorgungssicherheit wurden vermehrt Betriebs- und Planungsreserven eingesetzt. Diese sind jedoch mit negativen wirtschaftlichen Auswirkungen bzw. hohen Kosten verbunden. Deshalb entstanden Verbundsysteme, um die Reserven in einer wirtschaftlichen Art aufzuteilen und je nach Bedarf Leistung importieren oder exportieren zu können.

Marek Zima, Walter Sattinger, Petr Korba, Mats Larsson

In der letzten Dekade wurden die Verbindungen zwischen den Systemen intensiver für den Energiehandel genutzt, was auch eine viel wirtschaftlichere Energieversorgung der Grundlast in mehrere Länder ermöglicht hat. Typisches Beispiel dafür ist Italien, wo der Import einen sehr wesentlichen Anteil an der Versorgung hat. Innerhalb der letzten 50 Jahre wurden schrittweise mehr und mehr Systeme zum kontinentalen UCTE-System[2)] zusammengeschlossen. Das letzte grosse Ereignis in dieser Hinsicht war der Zusammenschluss von UCTE-Synchronzone 1 (West und Mitteleuropa) und UCTE-Synchronzone 2 (Albanien, Bulgarien, Griechenland, Republik Mazedonien, Rumänien, Serbien und Montenegro) im Oktober 2004 [1]. Die wachsende Grösse des UCTE-Netzes und die stärkere Kopplung zwischen seinen Teilen durch grösseren Energieaustausch haben das Risiko für Netzpendelungen erhöht.

Was sind Netzpendelungen?

In einem grossen Verbundnetz wie dem UCTE-Netz arbeiten Hunderte bis Tausende Kraftwerke zusammen, um die Gesamtlast des Netzes mit Energie zu versorgen. Die Maschinen der einzelnen Kraftwerke werden dabei durch die Zusammenkopplung über eine Vielzahl von Stromleitungen bei synchroner Frequenz – und somit mit synchroner Drehzahl – betrieben. Wenn ein Generator langsamer als der Mittelwert der Frequenz läuft, wird Rotationsenergie automatisch erbracht, und zwar als elektrische Energie von den anderen Kraftwerken, die im gleichen Stromnetz betrieben werden. Das Drehmoment, das auf eine Generatorwelle aufgebracht wird, um den Generator synchron zu halten, nennt man synchronisierendes Moment. Dieses Drehmoment wirkt selbststabilisierend an den Generatoren und macht es möglich, landes- oder

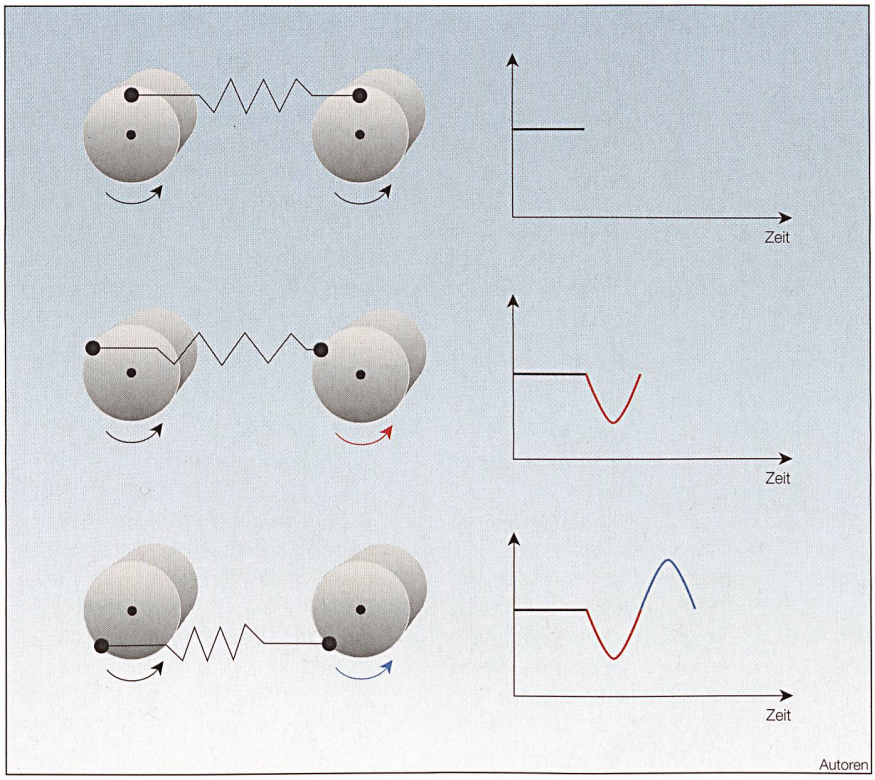


Bild 1 Die mechanische Analogie der Netzpendelungen
Dem linken Rad entspricht eine grosse Masse, und es dreht sich mit nahezu konstanter Drehzahl. Die Drehzahl des rechten Rads weicht ab.

Bild 2 Europakarte mit den wichtigsten Pendelmodi: Nord-Süd und West-Ost

kontinentweit Übertragungsnetze miteinander zu verbinden.

Dieses synchronisierende Drehmoment macht es leider auch möglich, dass sich Frequenzschwankungen im Verbundnetz verbreiten können. Diese Netzpendelungen können direkt als Drehzahlvariationen an der Generatorwelle oder aber als pulsierende Leistungsflüsse auf Leitungen im Verbundnetz gemessen werden.

Netzpendelungen können ziemlich einfach mithilfe einer mechanischen Analogie erklärt werden (Bild 1). In dieser Analogie entsprechen rotierende Räder den rotierenden Generatorwellen und Federn, die normalerweise sicherstellen, dass die Räder mit synchroner Rotationsgeschwindigkeit rotieren. Doch wenn ein Rad gebremst wird, kann dessen Rotationsgeschwindigkeit aufgrund der Elastizität der Federn ein wenig schwanken. Die Kraft, die dabei an den Federn wirkt, entspricht dem synchronisierenden Drehmoment, und die Steifheit der Federn entspricht der Stärke des Verbundnetzes zwischen den beiden Generatoren. Wenn die Drehzahl eines Rads zu stark schwankt, reisst die Feder. Dieses Phänomen wäre analog zu einem Synchronisationsverlust durch die Überschreitung einer Stabilitätsgrenze im Verbundnetz. Zweitens: Wegen der Elastizität der Federn wird die Drehzahl der Räder pendeln, falls eines der Räder abgebremst wird. Dieses Phänomen entspricht den Netzpendelungen.

Normalerweise sind diese Pendelungen gedämpft und verschwinden wenige Minuten nach einer Störung. Leicht gedämpfte elektromechanische Schwingungen (Netzpendelungen) in elektrischen Energienetzen bleiben nach deren Erregung (typischerweise durch Störungen jeglicher Art wie etwa Zu-/Abschalten von einzelnen Leitungen oder Generatoren) sehr lange im Netz erhalten und klingen nur sehr langsam ab (Bild 2). Ungedämpfte Schwingungen klingen gar nicht ab (Bild 3). In Abhängigkeit von der Stärke der Störung kann dies zum Verlust von Synchronismus zwischen einzelnen Generatoren oder sogar zu deren Beschädigung führen. Klassische Schutzsysteme für einzelne Systemkomponenten, z.B. Distanzschutzrelais, können unter diesen Betriebsbedingungen auch unbeabsichtigt auslösen. Die Übertragungskapazität des ganzen Energienetzes sinkt, und das Risiko der Destabilisierung des ganzen synchronisierten Systems steigt, was letztlich zu einer Systemtrennung und/oder einem Blackout führen kann.

Massnahmen gegen Netzpendelungen

Wegen der möglichen schwerwiegenden Konsequenzen der Netzpendelungen ist es sehr wichtig, eine angemessene Dämpfung von allen für jedes Energiesystem charakteristischen Schwingungen zu gewährleisten. Die dazu am besten geeigneten Stellglieder sind Pendeldämpfungsgeräte (PSS) und FACTS-Geräte.

PSS wirken auf das Erregungssystem eines Generators und basieren auf einer Rückführung der elektrischen Leistung oder der Rotorgeschwindigkeit – lokal oder direkt an den Generatorklemmen gemessen. Typischerweise werden PSS nur für die Dämpfung lokaler Modi benutzt, da nur diese eine gute modale Beobachtbarkeit in den oben erwähnten Messsignalen aufweisen.

Für die Dämpfung von kontinentalen Modi sind eher neuartige schnelle FACTS-Geräte nötig. Diese werden (geografisch gesehen) mitten im Energienetz installiert, typischerweise um die Spannung (SVC[3]) oder den Leistungsfluss (TCSC[4]) zu regeln. In den letzten Jahren wurden Studien gemacht und erste Versuche unternommen, diese Geräte mit einer zusätzlichen sekundären Funktion (POD[5]) für die Dämpfung von kontinentalen Schwingungen aus-

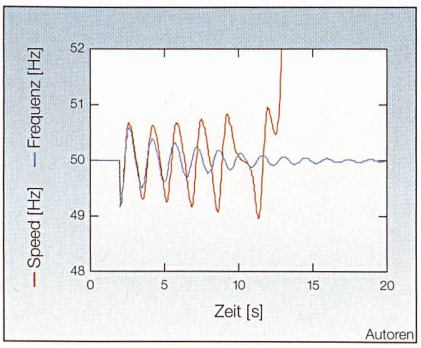


Bild 3 Pendelungen Generatorfrequenz nach einer Störung
Die blaue Line zeigt einen Fall mit gedämpften Pendelungen und die rote einen Fall mit ungedämpften Pendelungen, die zu einem Synchronisationsverlust führen

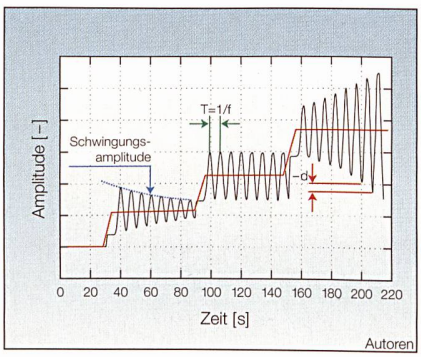


Bild 4 Beispiel einer elektromechanischen Schwingung im Energienetz mit allen charakteristischen Parametern
f: Frequenz; d: Dämpfung und Schwingungsamplitude

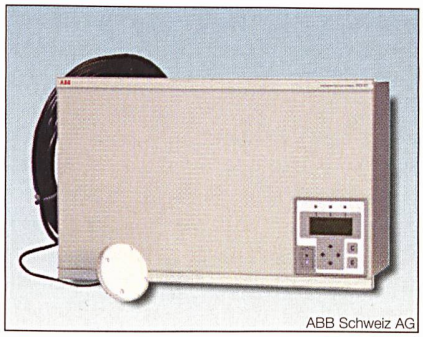


Bild 5 Eine PMU
Die weisse «Muschel» im Vordergrund ist die Antenne für das GPS-Zeitsignal

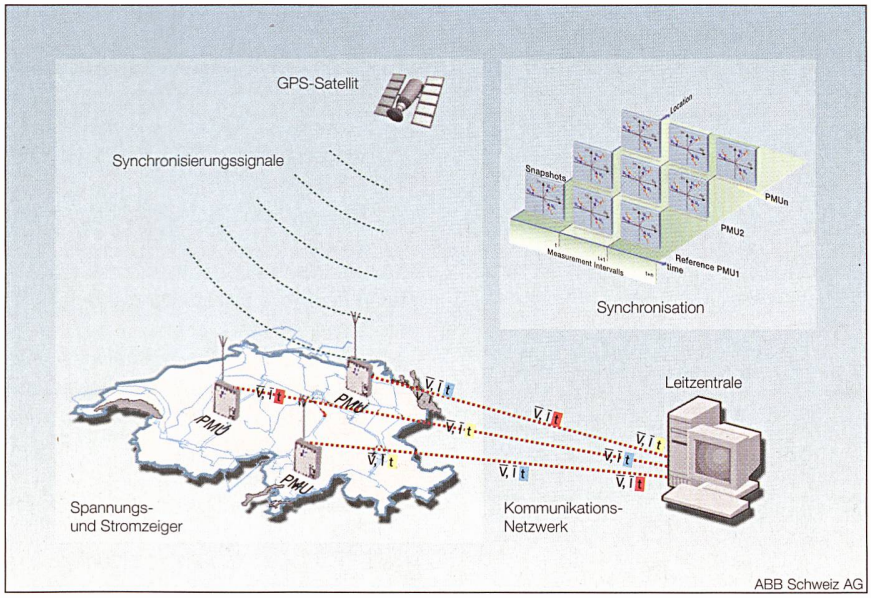


Bild 6 Darstellungen des Weitbereichsmessschemas
PMUs senden laufend Daten zu einer Zentraleinheit, die eine vollständige Momentanaufnahme des Netzzustandes berechnet und die Stabilität des Netzes beurteilt

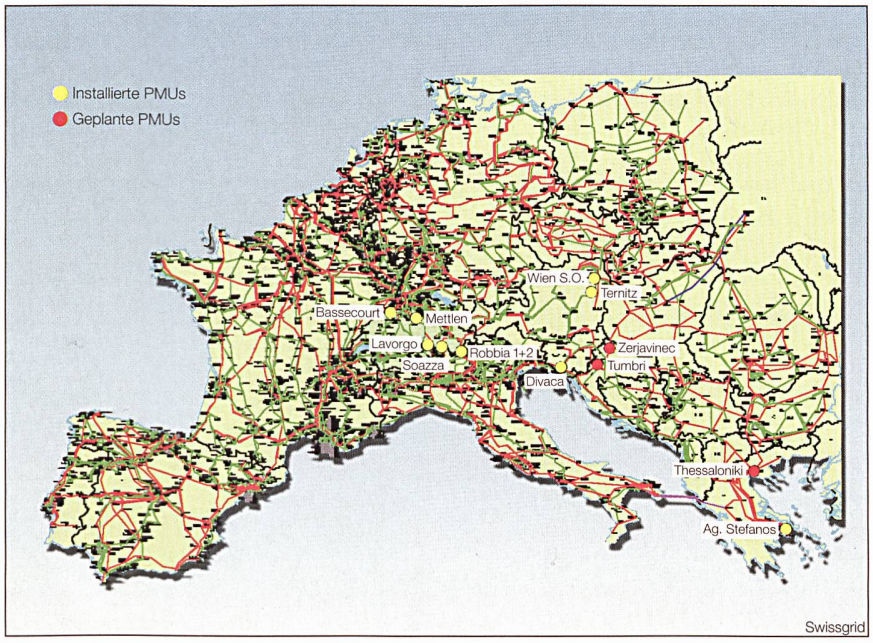


Bild 7 Am Swissgrid-Datenkonzentrator angeschlossene PMUs

zustatten [2]. Dabei hat sich unter anderem gezeigt, dass nicht nur die genauen Parameter der Schwingungen selbst, sondern auch der geografische Ort im Netz, wo diese Geräte (primär zu einem anderen Zweck) installiert wurden, eine wichtige Rolle spielen (Bild 4).

Die Wirkung von Dämpfungssystemen kann sehr stark durch ihre Regelungseinstellung beeinflusst werden. Um dies effizient durchführen zu können, müssen jedoch zuerst die aktuellen Parameter der Schwingungen bekannt sein. Diese Parameter können eine Schwingung im Zeitbereich (Amplitude, Phase) oder im Frequenzbereich (Frequenz, Dämpfung) beschreiben, wobei die hier betrachteten Schwingungen (und deren Parameter) mit der Zeit beträchtlich – je nach Netztopologie und -belastung – variieren können. Im UCTE-Netz sind gegenwärtig charakteristische Netzpendelungen in Ost-West- bzw. Nord-Süd-Richtung mit Frequenzen von 0,2 bis 0,5 Hz und Dämpfungen von unter 10% für einige Periodendauern immer häufiger zu beobachten. Dies führt dazu, dass die Ergebnisse einer Offline-Analyse wenig zu gebrauchen sind. Ein für die Planung verfügbares Modell ist oft zu komplex, um Parameter der charakteristischen Schwingungen für alle möglichen Kombinationen von Ausfällen a priori zu berechnen. Aus Erfahrung weiss man, dass die Parameter von verfügbaren Modellen oft zu wenig genau bekannt sind, um diese Art von Berechnungen mit vertretbarem Aufwand durchführen zu können.

Aus diesem Grunde wurde ein neues Verfahren entwickelt, das es möglich macht, aus den WAM&C-System-Messdaten die aktuellen Parameter der charakteristischen Schwingungen in Echtzeit zu bestimmen. Dieses Verfahren basiert auf einer rekursiven Parameterschätzung mithilfe eines adaptiven Kalman-Filters und wurde in [3] beschrieben und im Betrieb getestet.

Was ist ein WAM&C-System?

Seit 2001 wird an einer neuen Generation von Weitbereichsüberwachungs- und Steuerungssystemen (WAM&C) für elektrische Energieübertragungsnetze gearbeitet [4]. Das entwickelte System kann die Ausfallsicherheit und die Übertragungskapazität des Netzes erhöhen, und zwar bei bereits bestehender Netzstruktur, also ohne den Zubau von neuen Übertragungsleitungen.

Dieses Überwachungssystem basiert auf sogenannten Phasor Measurement Units (PMU, Bild 5). Diese verwenden satellitengestützte GPS-Zeitsignale mit sehr hoher Genauigkeit, um die Strom- und Spannungsmessungen sowie Phasenverschiebungen aus örtlich weit entfernten Gebieten zeitlich zu synchronisieren. PMUs senden laufend Daten zu einer Zentraleinheit, welche eine vollständige Momentanaufnahme des Netzzustands berechnet und die Stabilität des Netzes beurteilt (Bild 6). Die Weitbereichsüberwachungssysteme können den Zustand des Netzes mit einer Auflösung im Millisekundenbereich überwachen. Die höhere Zeitauflösung ermöglicht es, schnelle dynamische Vorgänge, die häufig für Blackouts verantwortlich sind – z.B. Frequenzabweichungen oder Netzpendelungen –, zu erfassen und darzustellen. Demgegenüber arbeiten herkömmliche Überwachungssysteme mit Auflösungen von Sekunden oder Minuten.

Der «Kampf» gegen Netzpendelungen im UCTE-Netz

Innerhalb des UCTE-Netzes erfolgt der Netzbetrieb gegenwärtig weitgehend dezentral. Das heisst: In Bezug auf die Netzsicherheit ist jeder Netzbetreiber nur für das eigene Netzgebiet zuständig. Allerdings sind dafür einheitliche und verbindliche Standards gemeinsam erarbeitet worden

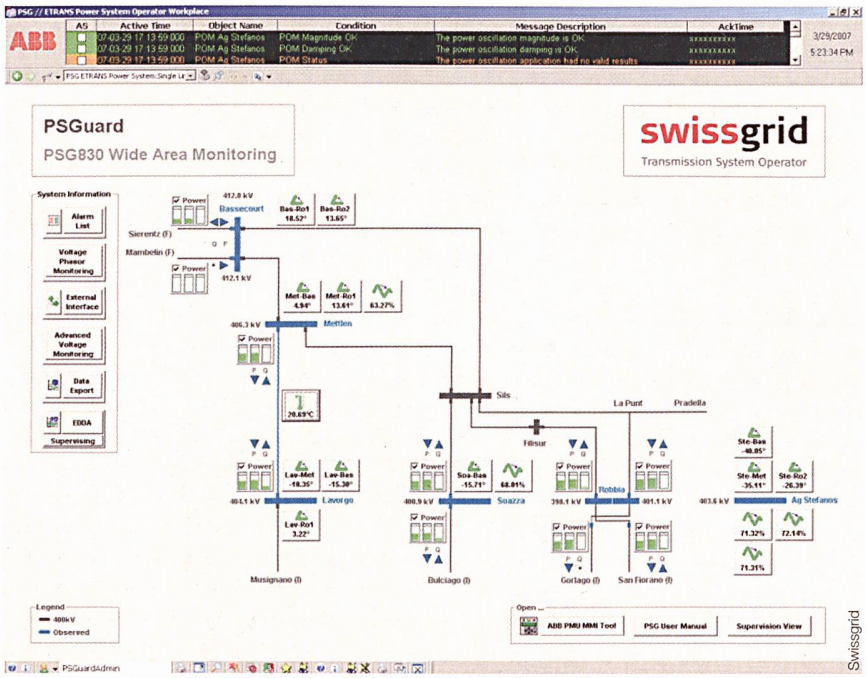


Bild 8 WAM-System-Benutzeroberfläche

[5]. Desgleichen findet auf der Ebene der Abstimmung der Fahrpläne und der nachgelagerten Abrechnung eine zentrale Koordination statt. So ist Swissgrid[7] für die Koordination des Südnetzes und RWE[8] für das Nordnetz zuständig (Bild 7).

Seit 2003 betreibt Swissgrid ein modernes System zur Weitbereichsmessung. Dieses System erfüllt im Wesentlichen zwei Aufgaben:

- Zusätzliches Hilfsmittel zum Netzleitsystem zur raschen Erkennung von Gefahrensituationen und Hilfe im Störungsfall, da auf eigenständigen Messungen basierend.
- Überwachung der Dämpfung im europäischen Verbundnetz.

Die detaillierten Beschreibungen der einzelnen Funktionen des Systems können [6] entnommen werden (Bild 8).

Die Auswertung der Spannungswinkeldifferenz zwischen zwei Schaltanlagen entlang des Nord-Süd-Korridors durch die Schweiz gibt gleichzeitig über zwei Dinge Aufschluss:

- Die Belastung der Achse (also Höhe des Wirkleistungsflusses).
- Die Topologie, also die Struktur bzw. die Impedanz des gesamten geschalteten Leitungsnetzes zwischen den Schaltanlagen im vermaschten Verbundnetz.

Somit können über die Online-Auswertung dieser Grösse, die aus nur zwei Messungen gebildet wird, mehrere Informationen gewonnen werden. So kann beispielhaft nach entsprechender Eichung bei einem Sprung der Spannungswinkeldifferenz ein Alarm erzeugt werden, der auf eine

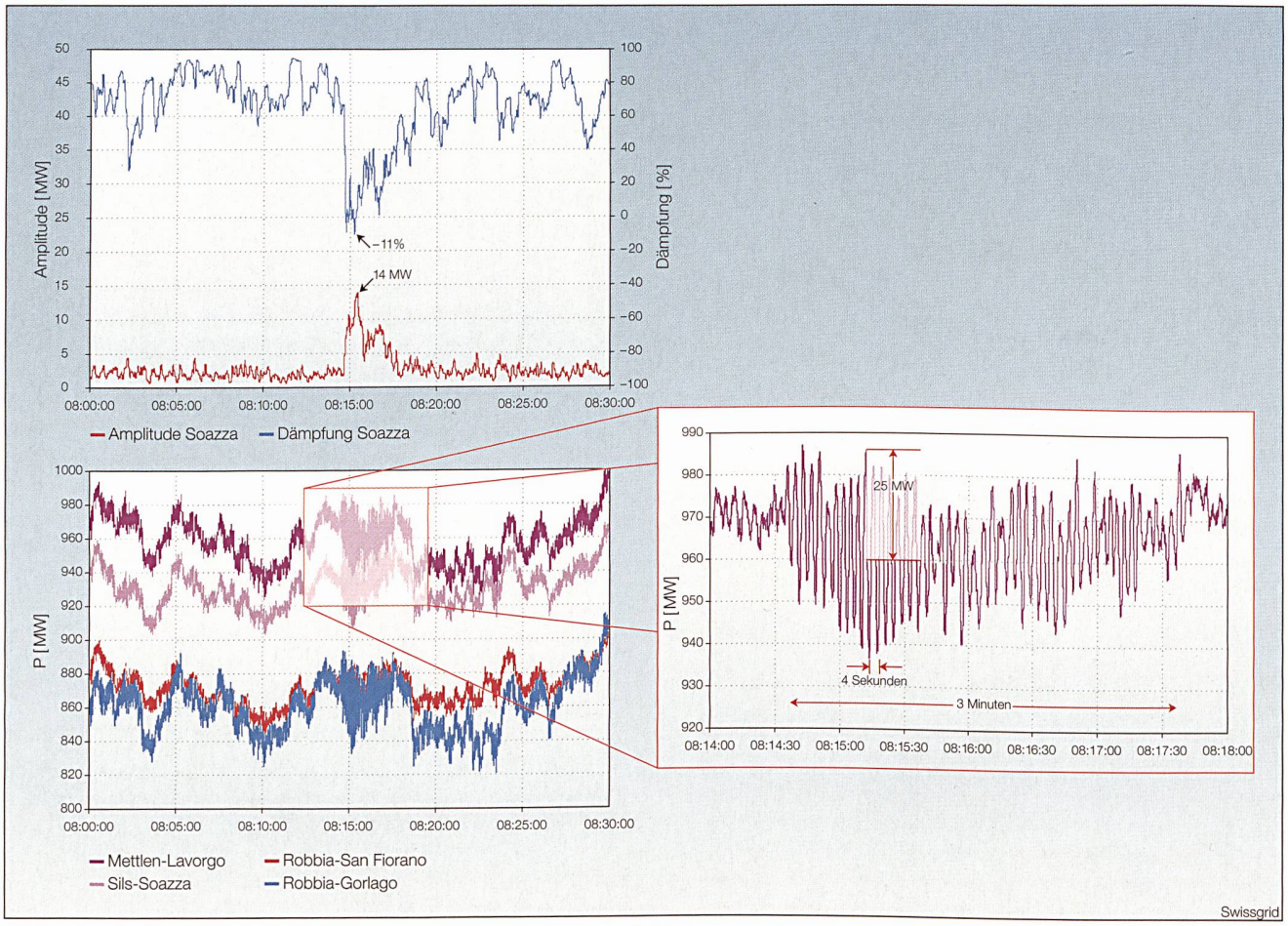


Bild 9 Ergebnisse Modalanalyse/Zeitverlauf der Netzpendelung vom 1. April 2007

störfallbedingte Erhöhung der Netzbelastung aufmerksam macht.

Um die Netzdämpfung im europäischen Verbundnetz zu ermitteln, wird entweder eine der Wirkleistungen auf einer der Nord-Süd-Leitungen als Eingangsgrösse verwendet oder aber die Netzfrequenz in Griechenland bzw. die Spannungswinkeldifferenz zwischen Griechenland und der Schweiz, um die Dämpfung der West-Ost-Achse online zu ermitteln. Durch die Korrelation dieser permanenten Aufzeichnungen mit dem Netzschaltzustand, der Netzbelastung bzw. des Kraftwerkseinsatzes werden Korrelationen gefunden, die auf Einflüsse bezüglich der Netzpendelung Rückschlüsse ermöglichen.

Die jüngste Netzpendelung, die mithilfe des Systems aufgedeckt wurde, ist in Bild 9 dargestellt. Bild 9a zeigt die Ausgangsgrössen der Modalanalyse (Dämpfung und Amplitude der Schwingung), während Bild 9b die Wirkleistung auf den vier parallelen 380-kV-Nord-Süd-Leitungen durch die Schweiz zeigt. Bild 9c zeigt die Vergrösserung des Verlaufs einer der Leitungen.

Es gibt mehrere vorbereitende Untersuchungen und Studien über die Erweiterung des UCTE-Netzes mit dem Anschluss der Nachbarnetze (die Verbindung mit der Türkei wird wahrscheinlich bald umgesetzt werden). Diese Erweiterung kann weitere wirtschaftliche Vorteile bringen, aber auch ein erhöhtes Risiko hinsichtlich ungedämpfter Netzpendelungen. Das kann zur Beeinträchtigung der Netzsicherheit oder zur Einschränkung des Energieaustauschs bzw. zu Handelsreduktionen führen.

Referenzen

[1] P. Reinhard, C. Carnal, W.Sattinger: West- und Südosteuropa wurden zusammengeschaltet. Bulletin SEV/VSE Nr. 3/2005

[2] A.B. Leirbukt, P. Korba, J.O. Gjerde, K. Uhlen, L.K. Vormedal, L. Warland: Wide-Area Monitoring Experiences in Norway. Power Systems Conference and Exposition (PCSE), Atlanta, Oktober, 2006.

[3] P. Korba: Real-Time Monitoring of Electromechanical Oscillations in Power Systems. IEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution, vol. 1, pp. 80–88, Januar 2007.

[4] M. Zima, M. Larsson, P. Korba, C. Rehtanz, G. Andersson: Design Aspects for Wide-Area Monitoring and Control Systems. Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 5, Mai 2005.

[5] Online verfügbar: www.ucte.org/ohb/cur_status.asp

[6] R. Baumann, Ph. Rothermann, W. Sattinger: Practical Results of On-Line Stability Monitoring for the UCTE Power System. Cigré-Symposium, Zagreb, 18–20. April, 2007.

Angaben zu den Autoren

Dr. *Marek Zima* arbeitet seit 2007 im Bereich Netzwirtschaft bei Atel Netz AG. Seit 2006 ist er gleichzeitig teilzeitlich an der ETH Zürich tätig, wo er in der Forschungskoordination aktiv ist und Vorlesungen hält.
Atel Netz AG, 4601 Olten, marek.zima@atel.ch

Dr.-Ing. *Walter Sattinger* ist seit 2003 bei der Etrans – heute Swissgrid – an der Nahtstelle zwischen Netzplanung und Netzbetrieb tätig.
Swissgrid, 5080 Laufenburg, walter.sattinger@swissgrid.ch

Dr. *Petr Korba* arbeitet seit 2001 bei ABB im Forschungszentrum in Baden-Dättwil als Principal Scientist auf dem Gebiet Power System Dynamics and Control.
ABB Schweiz AG, Forschungszentrum, 5405 Baden-Dättwil, petr.korba@ch.abb.com.

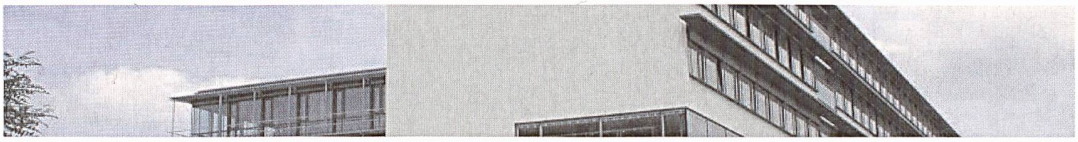
Dr. *Mats Larsson* ist seit 2001 Wissenschaftler für Energieübertragungssysteme am ABB Forschungszentrum in Baden-Dättwil. Seit 2003 koordiniert er die Weitbereichsüberwachungs- und Steuerungssysteme innerhalb des Corporate Research.
ABB Schweiz AG, Forschungszentrum, 5405 Baden-Dättwil, mats.larsson@ch.abb.com

Résumé

La surveillance en ligne du comportement oscillant du réseau européen

Le Wide-Area Monitoring comme mesure d'évitement des oscillations de la roue polaire sur le réseau. Afin que l'Europe puisse continuer à profiter des avantages de l'interconnexion des réseaux, comme le partage des réserves et la concurrence dans le domaine de la fourniture d'énergie, les oscillations de la roue polaire doivent être prises au sérieux et évitées dès leur apparition. L'application du Wide-Area Monitoring pour le réglage des paramètres corrects de stabilisation (PSS) et des appareils FACTS[1] sont parmi les mesures les plus appropriées actuellement à disposition.

[1] FACTS: Flexible AC Transmission Systems. Technologien, die die Sicherheit, Kapazität und Flexibilität von Übertragungssystemen verbessern.
[2] UCTE ist die Organisation der Netzbetreiber im kontinentalen Europa. Aktuelle Zahlen (2005): 450 Mio. Einwohner, Spitzenlast 350–400 GW, Stromverbrauch/Jahr 2540 TWh. Zum Vergleich aktuelle Zahlen der Schweiz: 7,4 Mio. Einwohner, 9,7 GW, Stromverbrauch/Jahr 59 TWh, 3% Stromverbrauch, 10% grenzüberschreitender Stromverkehr.
[3] SVC: Static VAR Compensator
[4] TCSC: Thyristor-gesteuerte Serienkompensation
[5] POD: Power-Oscillation Damping
[6] WAM&C: Wide-Area Monitoring and Control Concepts (Weitbereichsüberwachungs- und Steuerungssysteme)
[7] Swissgrid (früher Etrans): www.swissgrid.ch
[8] RWE: www.rwe.de



iimt
University of Fribourg
international institute of management in technology

Executive MBA in Utility Management

Das **international institute of management in technology (iimt)** der Universität Fribourg ist ein Kompetenzzentrum im Weiterbildungsbereich und bietet einzigartige **Executive MBA, Executive Diploma, offene und firmenspezifische Lehrgänge** im Bereich Strom-, Wasser und Gas (Utility) an. Eine flexible und modulare Ausbildungsstruktur, welche individuell auf Ihre persönlichen Wünsche und Befürfnisse eingeht.

Sind Sie bereit für Ihren nächsten Karriereschritt? Gerne präsentieren wir Ihnen unsere Kurse während eines **Informationevenings** in Ihrer Nähe.

Weitere Informationen finden Sie unter **www.iimt.ch**

The iimt Executive Programmes - a smart investment in your future

accredited by the Swiss University Conference

international institute of management in technology
University of Fribourg
Bd de Pérolles 90
CH-1700 Fribourg
Phone: +41 26 300 84 30
Fax: +41 26 300 97 94
e-mail: info@iimt.ch

www.iimt.ch

UNIVERSITAS FRIBURGENSIS

aqua metro

Zählerfernauslesung

Sicher - zuverlässig - schnell

Skalierbare Zählerfernauslesung, damit Sie Ihre Verbrauchsdaten auch über grosse Distanzen wirtschaftlich erfassen können.

Für Gross und Klein.
Für Wasser-, Strom-, Gas- und Wärmezähler.

Zusammen mit unseren Partnern bieten wir Ihnen die Kompetenz und Erfahrung für eine umfassende Beratung bis zur Installation des Systems und der Erstellung der nötigen Schnittstellen.

Solutions for your future.

Aquametro AG
Ringstrasse 75
4106 Therwil
Tel. 061 725 11 22
Fax 061 725 15 95
info@aquametro.com
www.aquametro.com