

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 98 (2007)
Heft: 9

Artikel: Online-Überwachung des europäischen Netzpendelverhaltens
Autor: Zima, Marek / Sattinger, Walter / Korba, Petr
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857445>

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: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://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 Reservenauflistung 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-Geräte¹⁾ 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 ver-

tenegro) 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.

Marek Zima, Walter Sattinger,
Petr Korba, Mats Larsson

mehr 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.

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-System²⁾ 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 Mon-

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

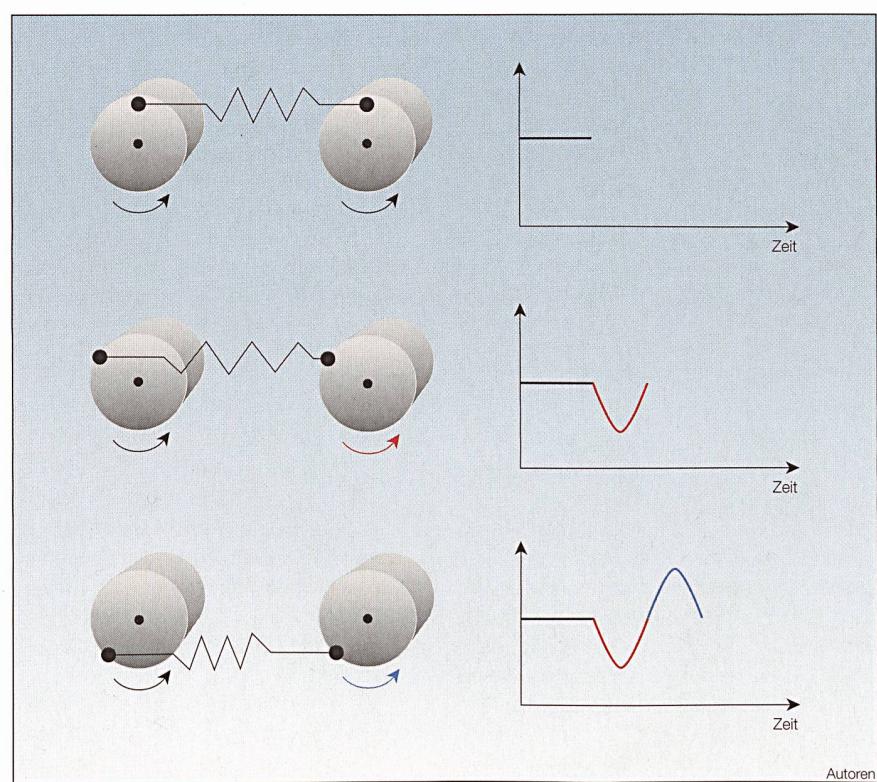


Bild 1 Die mechanische Analogie der Netzpendelungen
Dem linken Rad entspricht eine grosse Masse, und es dreht sich mit nahezu konstanter Drehzahl. Die Drehzahl des rechten Rads weicht ab.



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 Netzpendedelungen können direkt als Drehzahlvariationen an der Generatorwelle oder aber als pulsierende Leistungsflüsse auf Leitungen im Verbundnetz gemessen werden.

Netzpendedelungen 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 Netzpendedelungen.

Normalerweise sind diese Pendelungen gedämpft und verschwinden wenige Minuten nach einer Störung. Leicht gedämpfte elektromechanische Schwingungen (Netz-

pendedelungen) 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 Netzpendedelungen

Wegen der möglichen schwerwiegenden Konsequenzen der Netzpendedelungen 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 (SVC³) oder den Leistungsfluss (TCSC⁴) zu regeln. In den letzten Jahren wurden Studien gemacht und erste Versuche unternommen, diese Geräte mit einer zusätzlichen sekundären Funktion (POD⁵) für die Dämpfung von kontinentalen Schwingungen aus-

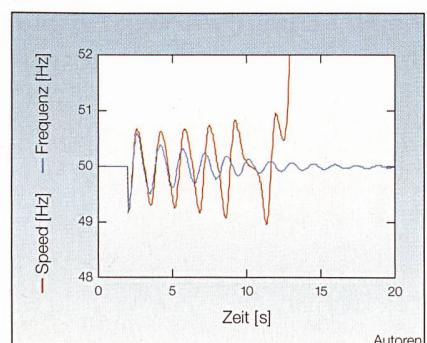


Bild 3 Pendelungen Generatorfrequenz nach einer Störung

Die blaue Linie zeigt einen Fall mit gedämpften Pendelungen und die rote einen Fall mit ungedämpften Pendelungen, die zu einem Synchronisationsverlust führen

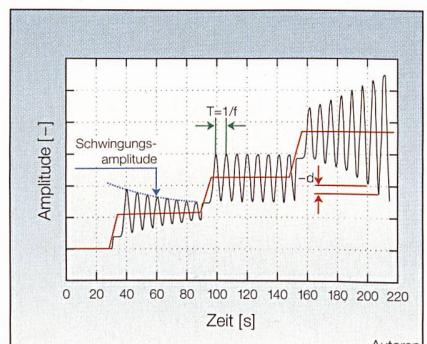


Bild 4 Beispiel einer elektromechanischen Schwingung im Energienetz mit allen charakteristischen Parametern

f: Frequenz; d: Dämpfung und Schwingungsamplitude



Bild 5 Eine PMU

Die weiße „Muschel“ im Vordergrund ist die Antenne für das GPS-Zeitsignal

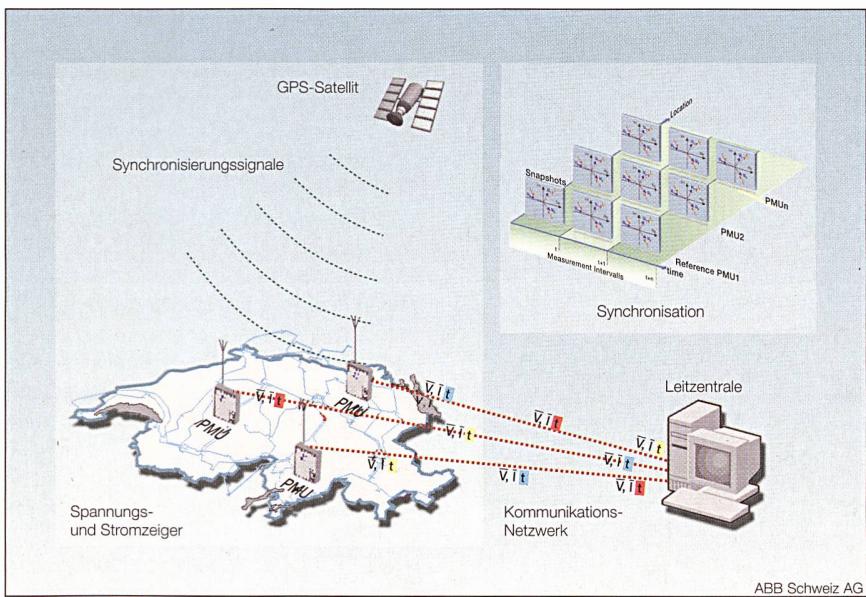


Bild 6 Darstellungen des Weitbereichsmesssschemas

PMUs senden laufend Daten zu einer Zentraleinheit, die eine vollständige Momentanaufnahme des Netz- zustandes berechnet und die Stabilität des Netzes beurteilt

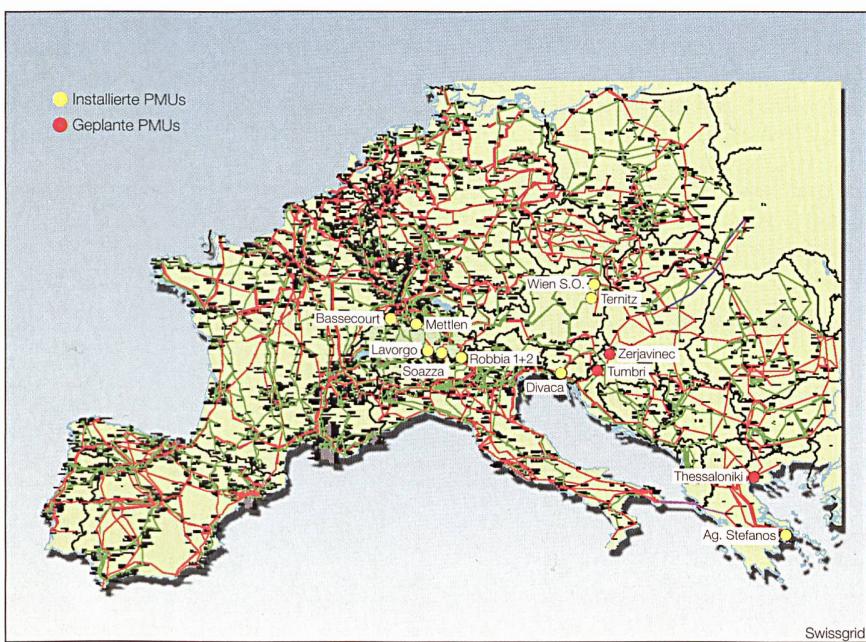


Bild 7 Am Swissgrid-Datenkonzentrator angeschlossene PMUs

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 Zeit-

bereich (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 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

Übertragungsnetze

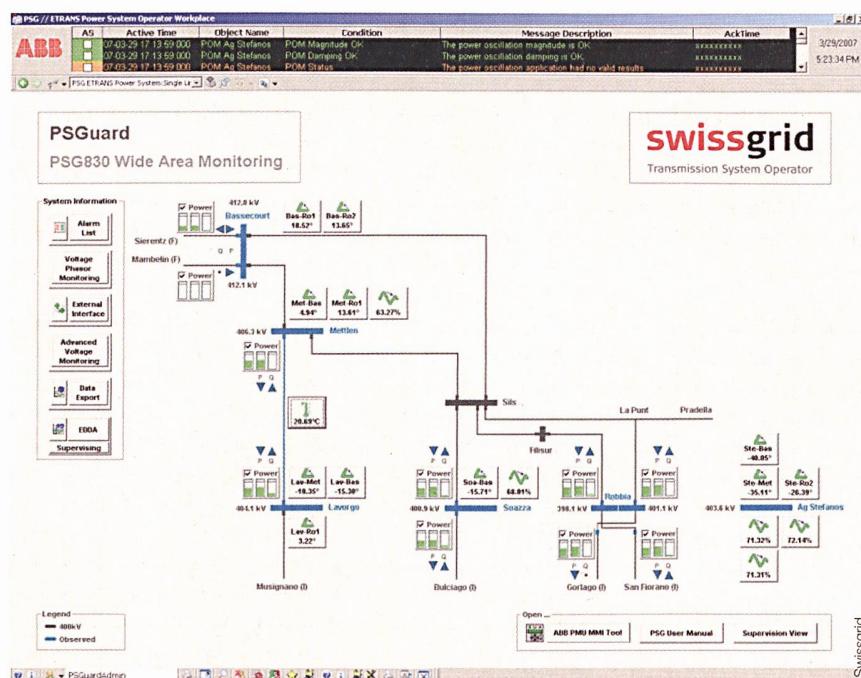


Bild 8 WAM-System-Benutzeroberfläche

[5]. Desgleichen findet auf der Ebene der Abstimmung der Fahrpläne und der nachgelagerten Abrechnung eine zentrale Koordination statt. So ist Swissgrid⁷⁾ für die Ko-

ordination des Südnetzes und RWE⁸⁾ 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 Spannungswinkel-differenz 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-Auswer-tung dieser Grösse, die aus nur zwei Mes-sungen gebildet wird, mehrere Infor-mationen gewonnen werden. So kann beispiel-haft nach entsprecher Eichung bei einem Sprung der Spannungswinkeldiffe-renz ein Alarm erzeugt werden, der auf eine

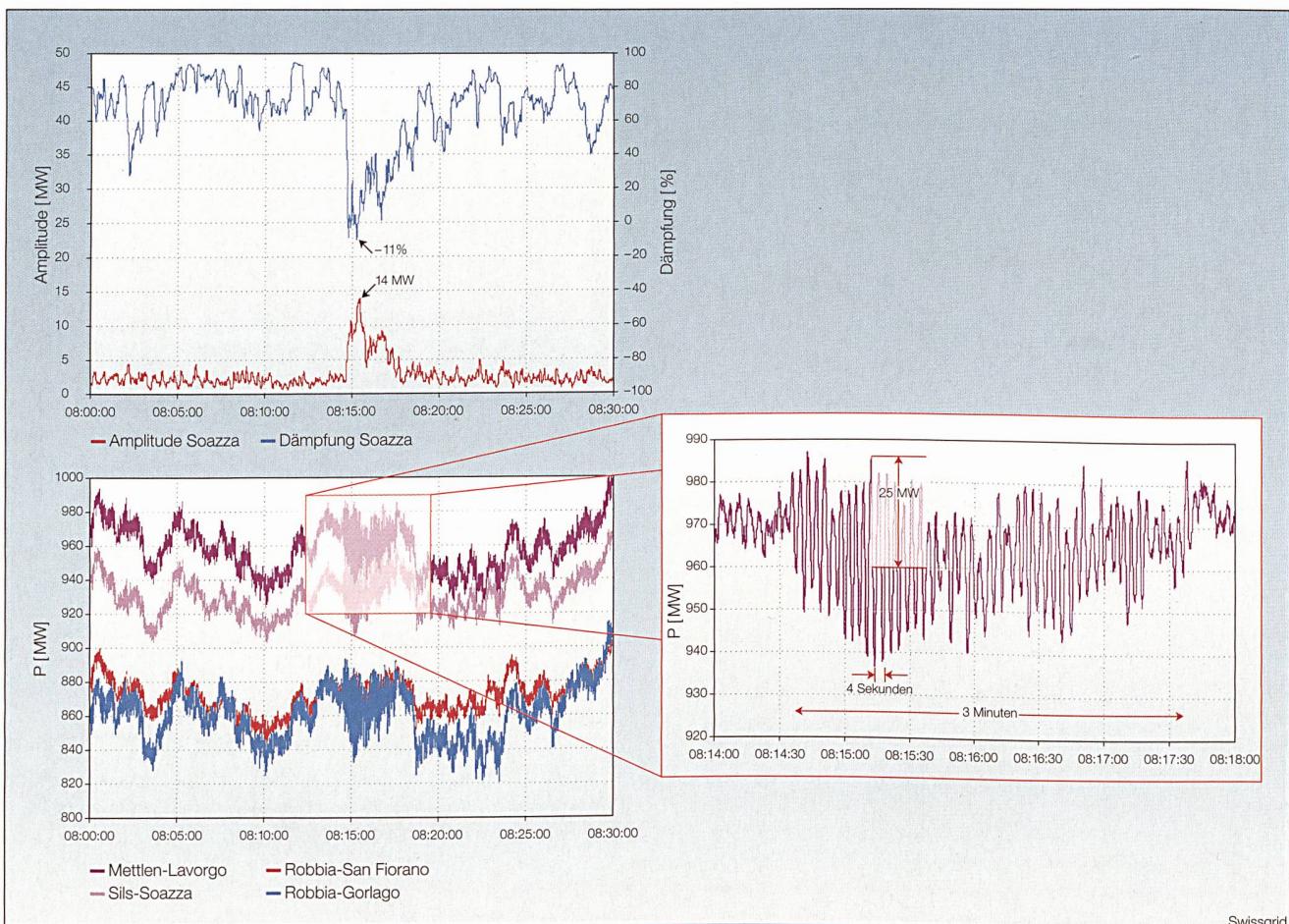


Bild 9 Ergebnisse Modalanalyse/Zeitverlauf der Netzpendelung vom 1. April 2007

störfallbedingte Erhöhung der Netzbela-
tung 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 Netzfreqenz 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 Netzschatzzustand, der Netzbela-
tung 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 Unter-
suchungen und Studien über die Erweite-
rung 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 ungedämpf-
ter Netzpendelungen. Das kann zur Beein-
trächtigung der Netzsicherheit oder zur Ein-
schränkung 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 Electro-
mechanical 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 Moni-
toring for the UCTE Power System. Cigré-Sym-
posium, 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 Vor-
lesungen 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 zwi-
schen Netzplanung und Netzbetrieb tätig.
Swissgrid, 5080 Laufenberg,
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 For-
schungszentrum in Baden-Dättwil. Seit 2003 ko-
ordiniert er die Weitbereichsüberwachungs- und
Steuerungssysteme innerhalb des Corporate Re-
search.

ABB Schweiz AG, Forschungszentrum,
5405 Baden-Dättwil, mats.larsson@ch.abb.com

¹⁾ FACTS: Flexible AC Transmission Systems. Technolo-
gien, die die Sicherheit, Kapazität und Flexibilität von
Übertragungssystemen verbessern.

²⁾ UCTE ist die Organisation der Netzbetreiber im konti-
nentalen Europa. Aktuelle Zahlen (2005): 450 Mio. Ein-
wohner, 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

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 FACTS¹⁾ sont parmi les mesures les plus appropriées actuellement à disposition.




Executive MBA in Utility Management

Das international institute of management in technology (iiimt) 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.iiimt.ch

The iiimt Executive Programmes - a smart investment in your future



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