



Till Sybel
Michael Fette

Sonderdruck
Ausgabe
03/2009

Netzdynamiken Veränderungen messen und bewerten

Reprint aus Energy 2.0 Kompendium 2009

Netzdynamiken – Veränderungen messen und bewerten

Liberalisierung und Ausbau erneuerbarer Energien stellen Grundprinzipien des lastgeführten Betriebs von Stromnetzen immer mehr in Frage

Die Energieversorgungssysteme der Zukunft müssen „intelligent“ sein, um Extremsituationen vorherzusehen, frühzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten und Zusammenbrüche zu verhindern. Um auch weiterhin eine hohe Versorgungssicherheit garantieren zu können, ist es nötig, sogenannte „Smart grids“ zu entwickeln.

Till Sybel, Michael Fette

Mit wirtschaftlichem Wachstum ist unweigerlich ein steigender Energieverbrauch verknüpft. Blackouts in asiatischen Wachstumsregionen, in den USA und Kanada, aber zuletzt auch in Europa sind Vorboten, die auf Grenzen und Risiken der globalen Energieversorgung aufmerksam machen. In Deutschland führte eine Allerweltshandlung – die Abschaltung einer Hochspannungsleitung für die Unterquerung eines Kreuzfahrtschiffes – für einen kurzen Moment halb Europa in einen spannungslosen Zustand.

Es ist an dieser Stelle wesentlich, das System der Stromerzeugung, der Stromverteilung, des Stromverbrauchs und deren wechselseitige Abhängigkeiten zu kennen. Damit diese Systeme stabil funktionieren, ist eine exakte Planung und Kontrolle erforderlich. Kenntnisse typischer Verbrauchsmaxima sind dabei wichtig.

Für den Zeitraum eines vorhersehbaren Mehrbedarfs muss auch eine höhere Kraftwerksleistung zur Verfügung gestellt werden. Als entscheidendes Kriterium wird sich aber die Beobachtung der dynamischen Situation der Netze herausstellen, denn der dynamische Blackout wird zukünftig früher eintreten als der thermische Blackout.



*Frühwarnsystem CPSys:
Ein Collapse Prediction System besteht aus der Basiseinheit CPR-D, einem Industrie-PC und oft auch aus einem Protokoll-Interface REG-PE zur Anbindung an moderne Stationsleittechnik.*

■ Nichtlinearitäten erkennen

Aus Sicht der elektrischen Energieversorgung hat längst ein neues Zeitalter begonnen. Die Grundprinzipien der Erzeugung und des lastgeführten Betriebs werden durch die Liberalisierung und den stetigen Ausbau erneuerbarer Energien zunehmend in Frage gestellt. Es gilt, Nichtlinearitäten zu erkennen, kritisch zu beobachten und frühzeitig Maßnahmen

zur Aufrechterhaltung der Stromversorgung einzuleiten.

Die Erkennung von Netzdynamiken ist elementar, damit Störungen und Netzausfälle vermieden werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Investitionen nötig. Kraftwerks- und Transportnetzbetreiber müssen dafür das Investitionsrisiko bewerten, auf Verteilnetzebene muss das Betriebsrisiko abgeschätzt werden und Industrieunternehmen sollten das Verfügbarkeitsrisiko ihrer Anlagen identifizieren und so gut wie möglich gegensteuern.

■ Frühwarnsystem gegen den Blackout

Im Bereich der Hochspannungsnetze geht es im Wesentlichen um den Handel und überregionalen Transport von Strom. Die Erfahrungen, auch aus den bisherigen Blackouts, zeigen, dass sich moderne Netze nicht allein mit klassischen Werkzeugen betreiben lassen. Es werden zusätzlich neuartige, der veränderten Situation angepasste Einrichtungen benötigt, die auch künftigen Anforderungen gerecht werden.

Ein „Collapse Prediction System (CP-Sys)“ ist eine Überwachungseinrichtung zur Früherkennung von Blackouts, zur Identifikation von Schwachstellen im Netz und dient zudem der Gewinnung unerlässlicher Daten zur sicheren Netzführung. Diese Daten werden aus einer kontinuierlichen Erfassung der Netzdynamiken gewonnen. Das System wurde nicht für die Vorhersage, sondern für die Vermeidung von Netzzusammenbrüchen durch frühzeitiges Eingreifen entwickelt. Natürlich kann auch die Netzauslastung durch Berücksichtigung der physikalischen Grenzen mit den gewonnenen Erkenntnissen erhöht werden. Das System beobachtet folgende

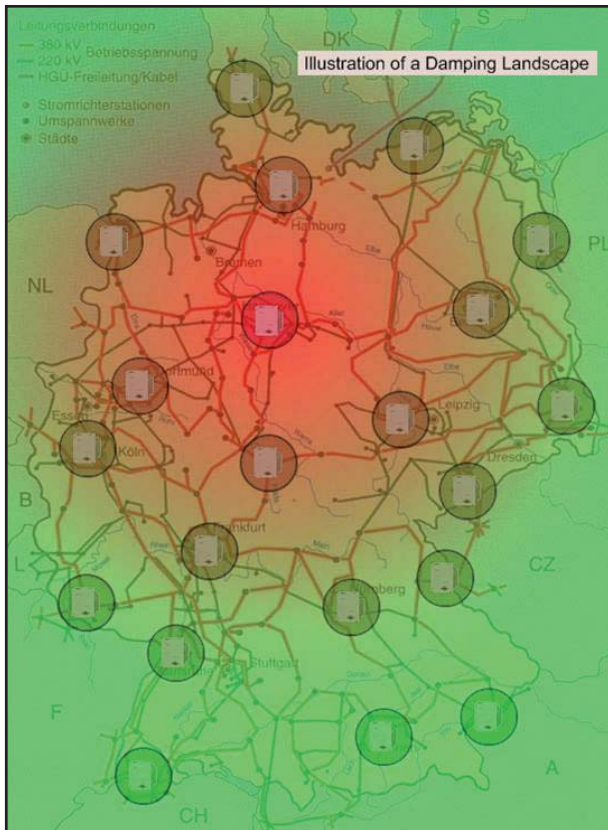
physikalische und mathematische Größen, die auch in gegenseitiger Abhängigkeit stehen können:

- Spannungsdrift (ein Phänomen, das als Vorbote eines jeden Blackouts zu beobachten ist),
- Dämpfung (ein Maß der Stabilitätsreserve),
- Frequenz-Fingerprints (die „50Hz-Welt“ ist hier vernachlässigbar) und
- Ljapunov-Exponent (ein mathematisches Stabilitätskriterium).

■ Ein Messgerät für Amplitudenänderungen der Netzspannung

Das Messgerät CPR-D (Collapse Prediction Relais – Digital) benutzt als Eingangsgrößen zwei Außenleiterspannungen. Die Auswertungen der Messwerte erfolgt durch Spektralanalyse und konzentriert sich auf Amplitudenänderungen der Netzspannungen (Einhüllende). Somit ist die gezielte Erkennung eines Spannungsdrifts über einen kürzeren oder längeren Zeitraum kein Problem. Neben der Überwachung der Spannung erfolgt eine kontinuierliche und genaue Messung aller Frequenzen im Bereich von 0,005 Hz bis 98 Hz, um zusätzliche Lastdynamiken als Maß für die Stabilitätsreserve des Netzes zu erfassen. Das Gerät arbeitet mit einer höchsten Auflösung von 5 mHz, womit es in der Lage ist, die Funktionsweise der vorhandenen Regeleinrichtungen zu überwachen. Es bietet damit auch die Möglichkeit verbesserte Einstellparameter zu ermitteln, um das Netz sicher zu führen.

Im normalen Betriebsalltag geben die Dämpfungswerte einen sehr guten Einblick in das dynamische Verhalten eines Netzes. Es lassen sich „Dämpfungskarten“ (siehe Abb. Seite 4) einzelner Netzbereiche



Veränderte Lastdynamiken im bundesweiten Überblick: Ergebnisse der Wirkung einer Gegenmaßnahme können schnell bewertet werden.

erzeugen, die im Vergleich zu bereits verfügbaren Daten – aber auch zeitgleich untereinander – die Einflüsse der Veränderungen von Netztopologie und Netzreaktionen aufgrund veränderter Lastdynamiken darstellen. Regenerative Einspeisungen und Handelsaktivitäten, die zur Instabilität des Netzes beitragen, können so leichter beobachtet und kontrolliert werden.

Außerdem lassen sich typische Frequenzkombinationen, sogenannte „Fingerprints“ erkennen, die im Wesentlichen durch Nichtlinearitäten der Betriebsmittel erzeugt werden. Zur Ermittlung der Fingerprints werden im CPR-D zwei unterschiedliche FFTs – Fast Fourier Transformation für die Fingerprints und Wavelet-Transformation für die Dämpfung – eingesetzt, die wiederum den Frequenzbereich von 0,005 Hz bis 98 Hz überdecken.

■ Vorhersage von Kollaps-Dynamiken mit Hilfe von Fingerprints

Wird ein Fingerprint erkannt, der bereits im Archiv vorhanden ist, ist eine Bedingung für die Vorhersage erfüllt. Gerade Kollaps-Dynamiken kündigen sich mit einem speziellen Muster der beteiligten Frequenzen im benannten Frequenzbereich an. Durch die frühzeitige Meldung an die Netzführung kann rechtzeitig reagiert werden. Ein weiteres Kriterium, der Ljapunov-Exponent, ist allgemeingültiger als die in der linearen Analyse elektrischer Netze verwendeten Verfahren, da er auch für nichtlineare und stochastische Systeme anwendbar ist.

Die Analyse und Bewertung der Messwerte auf Basis dieser vier unabhängigen Verfahren ermöglicht die Ermittlung von Indikatoren, um den Zustand eines Netzes



Fluktuierende Erzeugung: Eine steigende dezentrale Einspeisung erschwert den Netzbetrieb.

mit Blick auf die aktuelle Dynamik abschätzen zu können. Schwachstellen werden sofort identifiziert und in die Strategie der Netzführung eingebunden. Parallel dazu lassen sich sinnvolle Handlungsalternativen, wie zum Beispiel der gezielte Lastabwurf, die Einspeisung zusätzlicher Wirk- und Blindleistung, die Bildung von Netzeinseln sowie Kombinationen ableiten.

■ Stetige Optimierung unvermeidlich

Auf der Verteilnetzebene werden mit Blick auf die wirtschaftliche Betriebsführung in Kürze ebenfalls erhöhte Anforderungen entstehen, die stetig Optimierungen erfordern. Diese Maßnahmen müssen wiederum zu den bereits angelauten Prozessen der überlagerten Hochspannungsnetze passen. Auf Kundenseite werden neben den mittlerweile unzähligen Eigenerzeugungsanlagen neue, hochautomatisierte Produktionsanlagen eingesetzt. Auch die steigende Zahl von Anlagen zur Blindstromkompensation muss berücksichtigt werden.

■ Neuartige Belastungssituationen aufgrund von Netzdynamiken

In Summe ergibt sich für das heutige Mittelspannungsnetz eine komplett neuartige Belastungssituation, die vor allem auf Netzdynamiken zurückzuführen ist. Die elektrischen Systeme werden strukturell instabiler, wodurch natürlich auch die Betriebsführung erschwert wird. Es konnten bereits Netzsituationen aufgezeichnet werden, in denen sich ein Mittelspannungsnetz aufgrund von nichtlinearen

Oszillationen selbst zerstört hat, ohne dass die Schutztechnik reagiert hat.

Momentan verfügbare Schutzgeräte decken den 50-Hz-Bereich ab, andere Frequenzen werden nicht berücksichtigt.

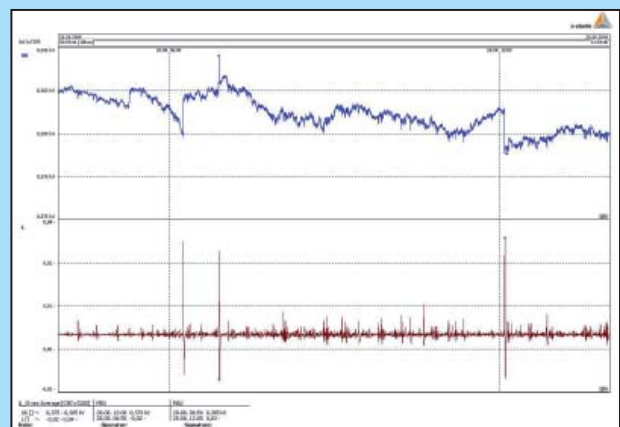
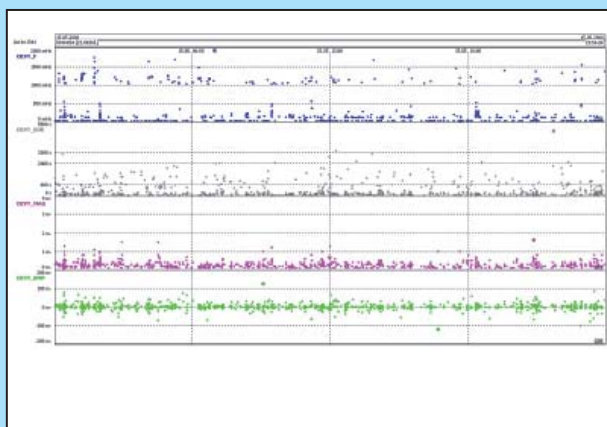
Mit Hilfe eines DMR-D (Dynamik Monitoring Relais – Digital), einer mobilen oder auch stationären Variante des CPR-D Gerätes speziell für Mittelspannungsnetze, besteht nun die Möglichkeit, Schwachstellen frühzeitig zu identifizieren und eine neue Form der Netzdienstleistung anzubieten. Im Wesentlichen werden die zeitliche Entwicklung von Dämpfungsmaßen und die des Ljapunov-Exponenten für die Überwachung der Netzdynamik verwendet. Die ermittelten Informationen finden zusätzlich Eingang in Szenarioplanungen und –steuerungen für Verteilnetze sowie für die strategische Netzentwicklung.

■ Zusammenfassung

Bei der Analyse von Energieversorgungssystemen sollten klassische Werkzeuge mit innovativen Methoden, die die Netzdynamik berücksichtigen, kombiniert werden. Das Dreiecksverhältnis zwischen den Betreibern der Hochspannungsnetze, denen der Mittelspannungsnetze und den Kunden muss im Sinne des Verursacherprinzips durchleuchtet werden, um jederzeit nachweisen zu können, wer Veränderungen vorgenommen hat, die zu Problemen, kritischen Netzsituationen oder erhöhten Aufwendungen bei der Betriebsführung führten. Der „Hot-Spot“ des Netzes wird auf allen Netzebenen ein Investitionsbrennpunkt, der Konsequenzen fordert, um Transparenz zu gewinnen und ein prädiktives, effizientes und stabiles Gesamtsystem aufzubauen.

Netzbetreiber müssen im regulierten Umfeld ihre aktuellen und vor allem die zukünftigen Kosten von Energieversorgungsnetzen gut vorhersagen können, um Netzinvestitionen als Risiko zu erkennen. Veränderungen im dynamischen Verhalten der Netze sind neue Risiken, die zu subs-

tantiellen Schwächen führen. Solche Netze haben einen erhöhten Investitionsbedarf, da normalerweise Netzdynamiken nicht zusätzlich betrachtet werden. Die Integration dezentraler Einspeiser, der Handel mit Energie sowie der Zwang, Netze besser auszunutzen als bisher, führen zu solchen Veränderungen. Die Reaktion des Netzes auf diese Veränderungsprozesse kann mit den Geräten der CPSys-Familie in den unterschiedlichen Spannungsebenen direkt gemessen und bewertet werden. Netzbetreiber können so ein aktives Risikomanagement aufbauen sowie Kosten vorzeitig erkennen und im Regulierungsprozess einstellen.



Kontinuierliche Auswertung der Daten eines Mittelspannungsnetzes: Abgebildet ist der Frequenzbereich von 0 bis 2 Hz über einen Tag, wobei Oszillationsereignisse wie die Dauer beziehungsweise Verzögerung, die Amplitude und die Dämpfung dargestellt sind. Signifikant sind die sich wiederholenden, kurzzeitigen Ereignisse zwischen 1 und 1,5 Hz, die aufgrund der geringen Amplituden hier zu keinen Ausfällen führten. Im Bild rechts ist die Entwicklung des Ljapunov-Exponenten zu sehen. Die kontinuierliche Auswertung der Relation „Spannungsschwankung – Ljapunov Exponent“ dient zur Überwachung der Netzdynamik.

■ WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

Literatur / Quellen

- [1] www.cprd.info und www.a-eberle.de
- [2] Shedding Light on Blackouts – From Prevention Through Restoration
IEEE Power & Energy, Volume 4, Number 5, September/October 2006
- [3] Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools, IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, 2002
- [4] I. Dobson; Chiang, H.-D.: Towards the theory of voltage collapse in electrical power systems; Systems & Control letters 13, 1989, pp. 253-262
- [5] M. Fette: Dynamik nichtlinearer Elektroenergiesysteme, Habilitationsschrift, Paderborn, 2001
- [6] R. Seydel: Assessing Voltage Collapse, Special issue on Bifurcation Control: Methodologies and Applications 31, 3, 2001, pp. 171 – 176
- [7] Russo, OSIssoft, Comments on the DOE Blackout report
- [8] M.L. Crow.: Dynamics of Voltage Instability and Collapse, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 16; No. 4; 1994; pp. 235 – 241
- [9] K.N. Srivastava, S.C. Srivastava: Elimination of Dynamic Bifurcation and Chaos in Power Systems Using Facts Devices; IEEE Transactions on Circuits & Systems I; Vol. 45; No. 1; Jan 1998; pp. 72 – 78
- [10] C.A. Canizares et.at.: On bifurcations, voltage collapse and load modeling, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No.1, pp. 512 – 522, Feb 1995
- [11] M. Fette, I. Winzenick: Bifurcation Analysis of Power System Load Characteristics with Continuation Methods; Journal Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Taylor & Francis, Vol. 11, No. 4, Dec 2005, pp. 425 – 445, ISSN Print 1387 – 3954
- [12] I. Winzenick, M. Fette, J. Horn: Identification of Critical Load Parameter in Power Systems Using Bifurcation Analysis, 5th International Conference on Control and Automation ICCA 2005, Budapest, June 26 – 29, 2005
- [13] W. Haussel, M. Hofbeck, T. Sybel, M. Fette: Collapse Protection System – Basics and Applications, Proceedings of the South African Power System Protection Conference 2004, Johannesburg, South Africa, Eskom Enterprises, pp. 113 – 120
- [14] UCTE Operating Handbook – Policy 3 – Operation Security – Section D – Stability
- [15] D.H. Wilson, K. Hay, J. Toal: Probability of Oscillatory Instability and its Implications, Bulk Power System Dynamics and Control – VI, August 22 – 27, 2004, Cortina d’Ampezzo, Italy

■ AUTOREN



Dipl.-Ing.
Till Sybel
Geschäftsführer
der A. Eberle GmbH & Co. KG
in Nürnberg
Tel.: +49 (0) 911 / 628108-70
Fax: +49 (0) 911 / 628108-99
Mail: Till.Sybel@a-eberle.de



Prof. Dr.-Ing. habil.
Michael Fette
Inhaber des
System & Dynamik
Beratungsunternehmens
in Paderborn
Tel.: +49 (0) 5251 / 4040-4
Fax: +49 (0) 5252 / 4040-5
Mail: fette@systemdynamik.de

A.Eberle GmbH & Co. KG

Aalener Str. 30/32
D-90441 Nürnberg
Tel.: +49 (0) 911 / 62 81 08-0
Fax: +49 (0) 911 / 62 81 08 96

<http://www.a-eberle.de>
info@a-eberle.de

überreicht durch: