Sturmzeichen im Netz

Autor(en): **Fritsch, Thomas**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **97 (2006)**

Heft 15

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857704

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

Sturmzeichen im Netz

Vorboten von Blackouts rechtzeitig erkennen

Wer die Vorboten eines Netzzusammenbruchs rechtzeitig erkennt, kann einen Blackout vermeiden. Denn die charakteristischen Frequenzveränderungen, die ein solches Ereignis ankündigen, lassen sich mit modernen Messgeräten erkennen. Zusammen mit nichtlinearen mathematischen Modellen könnten die Netzbetreiber berechnen, wie nahe das Netz vor dem Zusammenbruch steht – und die notwendigen Massnahmen einleiten.

Vom «Deep Impact» des Hurrikans Katrina hat sich New Orleans bis heute nicht erholt. Der Hurrikan hat im Golf von Mexiko aber auch 58 von 645 Ölförderstationen losgerissen; bis zu 30 blieben einfach verschwunden. Das Öl aus dem Golf, immerhin ein Viertel des

Thomas Fritsch

Verbrauchs in den USA, wird in Raffinerien direkt vor Ort zu Benzin verarbeitet. So war eine der Folgen des Hurrikans eine Verknappung des weltweiten Erdölangebots und somit eine Erhöhung des Benzinpreises, der in Deutschland zeitweilig die magische Grenze von 1,50 Euro erreichte.

Es ist offenkundig, dass der weltweite Hunger nach Energie zu Krisen führt, die sich zu Katastrophen entwickeln können. Der heutige Primärenergieverbrauch übertrifft bei Weitem die Prognosen, die man zwischen 1970 und 1980 für das Jahr 2000 machte. Das industrielle Wachstum ist direkt mit dem steigenden Bedarf nach elektrischer Energie gekoppelt. Bei einem Wirtschaftswachstum von 10% pro Jahr sowohl in China als auch Indien führte dies in diesen Ländern zu einem ständigen Mangel an elektrischer Energie. In Indien wird seit 2004 die Stromversorgung ganzer Bundesstaaten regelmässig ausgeschaltet. Auch in den letzten Wochen brach die Stromversorgung in Israel, Neuseeland und Kambodscha fast vollständig und unvermittelt zusammen.

Es erhebt sich daher die Frage, ob wir derartige Katastrophen voraussehen oder zumindest deren Vorboten erkennen und richtig deuten können. An Vorhersagen eines Hurrikans wie Katrina und an realistischen Abschätzungen der Folgen für New Orleans hatte es nicht gemangelt; die letzte kam nur wenige Monate vor der Katastrophe. Aber gilt dies auch für Blackouts?

Ein gutes Beispiel für die Grenzen der Vorhersagbarkeit ist das Wetter. Nur für fünf bis sechs Tage sind Wetterprognosen überhaupt verlässlich. Denn bereits kleinste Veränderungen in den Ausgangsbedingungen der Modellberechnungen bewirken völlig unterschiedliche Resultate. Das liegt wesentlich an der chaotischen Struktur des Systems «Wetter». Um eine halbwegs verlässliche langfristige Prognose zu erstellen, müssen daher äusserst leistungsfähige Computer alle Variationen für ein bestimmtes Klimamodell durchrechnen.

Kollaps der Tacoma-Narrows-Brücke

Ein mittlerweile klassisches Beispiel für die Grenzen des Glaubens an die technische Machbarkeit ist der Kollaps der Tacoma-Narrows-Brücke (Bild 1). Am 1. Juli 1940 wurde im U.S.-Bundesstaat Washington die Brücke von Tacoma Narrows vollendet und für den Verkehr freigegeben. Schon vom ersten Tag an begann die Brücke immer stärker auf und ab zu schaukeln. Aber seltsamerweise wuchs der Brückenverkehr gewaltig an. Hunderte Meilen reisten die Leute an, um sich dem Nervenkitzel auszusetzen, über eine schwankende Brücke gefahren zu sein. Das Vertrauen der Behörden in die Zuverlässigkeit dieser Brücke wuchs indes umso mehr, sodass allen Ernstes geplant wurde, die für die Brücke abgeschlossene Versicherungspolice zu kündigen. Am Morgen des 7. November 1940 begann die Brücke sich wellenförmig zu bewegen und schwang etwa drei Stunden lang hartnäckig weiter. In der folgenden Stunde vollführte die Brücke schier unglaublich anmutende Schwingungsbewegungen und brach schliesslich um 11.10 Uhr ganz zusammen.

Ursache des Brückeneinsturzes von Tacoma Narrows war letztlich das Nicht-zu-Ende-Denken ihrer aerodynamischen Eigenschaften. Da die Brücke bautechnisch zu weich konstruiert wurde, geriet sie durch die kontinuierlich wirkende Windkraft in einen Selbsterregungs-Modus mit negativer Dämpfung, der zu den bekannten Verdrillungen und schliesslich zum Kollaps der Brücke führte.

Der Einsturz der Brücke entbehrte nicht einer Reihe lustiger Begleitumstände. Der Gouverneur des Staates Washington gab nach dem Einsturz kund: «Genau die gleiche Brücke werden wir wieder bauen, genau so wie zuvor.» Der bekannte Ingenieur von Karman telefonierte unverzüglich zurück: «Wenn Sie genau die gleiche Brücke genau so bauen wollen wie die vorige, dann wird sie mit derselben Genauigkeit auch in genau denselben Fluss fallen.»

Der Blackout

Am 14. August 2003 fand im Nordosten der USA und Kanadas der bislang grösste Blackout der Geschichte statt. Innerhalb kürzester Zeit brach das Stromnetz für 50 Millionen Menschen zusammen; darunter Metropolen wie New York und Toronto. Nahezu 65 GW Leistung fehlten zur Versorgung eines für die USA massgeblichen Wirtschaftsraumes.

Blackouts waren bereits aus der Energiekrise Kaliforniens im Jahre 2001 bekannt. Man verständigte sich dort darauf, im Falle eines unmittelbar bevorstehenden Versorgungsmangels einen kontrollierten, rotierenden Blackout einzurichten. Bei diesem Vorgehen werden Verbrauchsblöcke, zum Beispiel Stadtviertel, ab-

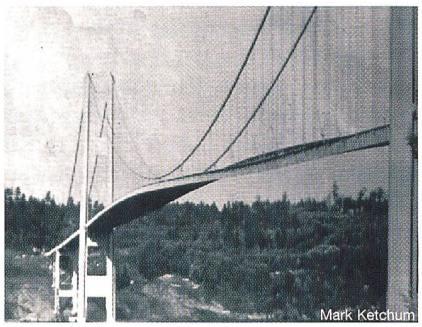

Bild 1 Die schwingende Tacoma-Brücke

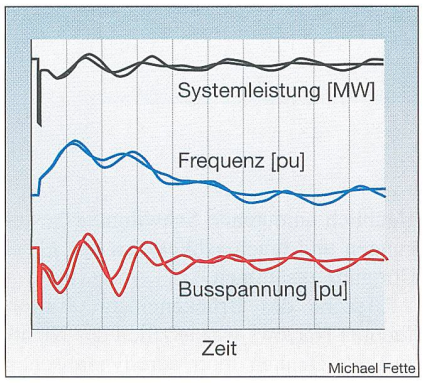

Bild 2 Oszillationen im Versorgungsnetz unmittelbar nach dem Ereignis, das den Kollaps auslöst

wechselnd vom Stromnetz genommen. Dies kann mit dem Weiterreichen einer heissen Kartoffel verglichen werden.

Zum Verständnis von Blackouts gilt es, sich das gesamte System der Stromerzeugung, Stromverteilung und des Stromverbrauchs und deren wechselseitige Abhängigkeiten vor Augen zu führen. Es muss zu jedem Zeitpunkt genau so viel elektrische Leistung bereitgestellt werden, wie verbraucht wird. So muss eine höhere Kraftwerksleistung für den Zeitraum eines vorhersehbaren Mehrbedarfs gut geplant bereitgestellt werden.

Die deutsche Energiewirtschaft versicherte, dass sich in Europa Blackouts wie in den USA aufgrund der Sicherheitsreserven im «nicht voll ausgelasteten europäischen Verbundsystem» nicht ereignen könnten. Dennoch fanden Ende Sommer 2003 drei Blackouts statt; am 28. August in London, am 23. September in Schweden und Dänemark und der schwerwiegendste am 28. September in Italien. Bei diesem konnte die Versorgung erst nach 20 Stunden wieder vollständig eingeschaltet werden; insgesamt waren 50 Millionen Einwohner betroffen.

Als offizielle Ursachen wurden von Seiten von UCTE die ungenügenden Stabilitätsreserven des italienischen Stromnetzes benannt, in dessen Infrastruktur in den letzten Jahren nur wenig investiert worden sei. Des Weiteren wurde der Ausfall einer hochbelasteten 380-kV-Leitung nach Frankreich aufgrund einer Baumberührung genannt, dem der Ausfall einer weiteren Leitung in die Schweiz wegen Überlast folgte. Nach der offiziellen Erörterung der Ursachen bleibt das schale Gefühl einer zufälligen Störung zurück, über deren Vor- und Verlauf man letztlich völlig im Dunkeln tappt.

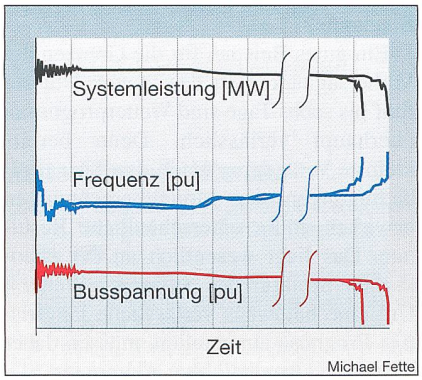

Bild 3 Langfristige Drift bis zum Kollaps

Wie werden Blackouts in der Wissenschaft erklärt?

Im Bericht «Voltage Stability Assessment» des IEEE (Institute of Electrical and Electronical Engineers) aus dem Jahre 2002 haben rund 30 Wissenschaftler die möglichen Ursachen von Blackouts zusammengefasst. Demnach finden unmittelbar nach der Systemstörung, die als die den Kollaps auslösende Ursache angesehen wird, starke Oszillationen der Systemleistung, der Systemfrequenz und der Spannung im Sekundenbereich statt (Bild 2). Nach einer sich anschliessenden längeren Driftphase mit einem langsamen Abfall aller drei Grössen steigt die Systemfrequenz plötzlich in extremer Weise an und verursacht den abrupten Zusammenbruch der Systemleistung (Bild 3).

Es handelt sich hierbei jedoch um eine Simulation, der nur eingeschränkte Modellannahmen zugrunde liegen. Es existieren zwar theoretische Modelle zur Erklärung von Blackouts und deren Dynamik, aber es gibt bislang keine umfassende Theorie des Kollapses. Man ist sich des nichtlinearen Charakters des Systems wohl bewusst. Es wird in diesem Zusammenhang gerne von «Chaos im Netz» gesprochen und es werden dabei auch die Erkenntnisse der Chaostheorie und der

Interview:

Sind Vorhersagen möglich?

Dr. Michael Fette von der Universität Paderborn modelliert seit 15 Jahren Energieversorgungssysteme mithilfe von Methoden aus der nichtlinearen Dynamik sowie der Chaos- und Katastrophentheorie.

Thomas Fritsch: *Herr Dr. Fette, Sie behaupten, mit Ihrer Theorie Blackouts vorhersagen zu können. Was macht Sie dabei so sicher?*

Michael Fette: Wenn wir uns überlegen, welches Wissen wir über die charakteristischen Parameter der Betriebsmittel in elektrischen Energieversorgungssystemen haben, ergibt sich eine Abstufung. Nur im Hochspannungsbereich liegen detaillierte Kenntnisse über einzelne Betriebsmittel vor. Im Mittelspannungsbereich wird das Wissen schon recht dürftig. Und auf Verbraucherseite, wo sehr viele verschiedene Geräte betrieben werden, können wir über deren Charakteristik nur wenig sagen. Die für die Planung von Stromnetzen angewandten Rechenmodelle berücksichtigen die Nichtlinearitäten, die im System auftreten, üblicherweise nur in einer punktuellen Form, die es nicht gestattet, deren Zusammenspiel als Ganzes zu analysieren. Die Nichtlinearitäten entstammen nun aber gerade dem Bereich des Verhaltens der Verbraucher. Über deren Dynamik wissen wir bisher leider nur wenig. Um dieses Defizit auszugleichen, haben wir mathematische Modelle auf Basis der Theorie nichtlinearer Systeme entwickelt, die sich an der Beschreibung der im elektrischen Energieversorgungssystem auftretenden physikalischen Effekte orientieren. Dadurch ist es uns möglich, die Entfaltung der Nichtlinearitäten gerade im Lastbereich zu beobachten und deren charakteristische Eigenschaften zu bestimmen.

Können Sie uns Ihre Theorie für den Blackout schildern?

Legt man die heute existierende technische Infrastruktur als übergeordneten Basisparameter zugrunde, dann ergibt sich, wie die grafische Darstellung unserer Berechnungen zeigt (Bild 5), das bekannte Verhalten, dass die Spannung mit steigender Last abfällt. Allerdings existieren auf dieser Kurve zwei Bereiche vor und nach einer so genannten Hopf-Bifurkation, also einem Gabelungspunkt. Die Lage dieses Punktes hängt von der nichtlinearen Charakteristik des Systems

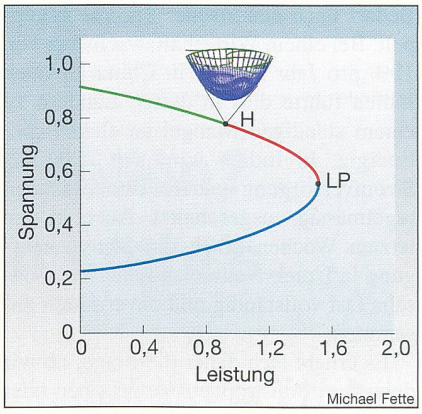

Bild 5 Nasenkurve

Die Nasenkurve zeigt die Spannung V abhängig von der Leistung Q. Die zwei Zustandsregionen sind grün (stabil) und rot (instabil) gekennzeichnet. Die Hopf-Bifurkation liegt beim Punkt H.

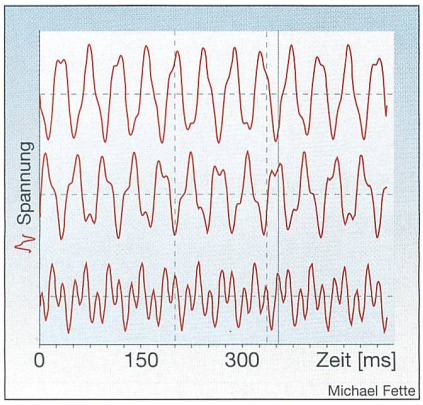

Bild 4 Signalmuster während des Blackouts in den USA 2003

nichtlinearen Dynamik bemüht. Diese haben sich bei Naturphänomenen wie dem Wetter oder Turbulenzphänomenen als Erklärungsansatz bewährt.

Die theoretischen Analysen des IEEE, zum Beispiel hinsichtlich der Veränderungen der Dynamik der Spannungssignalform während eines Blackouts, unterscheiden sich jedoch erheblich von den 2003 in den USA tatsächlich gemessenen Signalverläufen, die von denen einer normalen Wechselspannung (Sinus) deutlich sichtbar abweichen (Bild 4).

Für Planung und Betrieb eines Stromnetzes wären klare Aussagen über Ursache und Verlauf eines Blackouts hilfreich. Die vorhandenen Planungsinstrumente wurden auf Basis von Modellannahmen konzipiert, die auf den klassischen Methoden der Mathematik beruhen. Deren Linearisierungen können die nichtlineare Dynamik des Kollapses nicht in angemessener Weise berücksichtigen.

Die erste zentrale Forderung ist die nach frühzeitiger Erkennung von spezifischen Mustern eines Kollapses. Im Unterschied zum Auslöser ist der Kollaps selbst kein zufälliges Ereignis, sondern besitzt eine Vorgeschichte und eine mit mathematischen Methoden beschreibbare Verlaufsform, die sich als signifikante «Fingerabdrücke» zeigen und als Vorboten des Kollapses gedeutet werden können (Bild 6).

Die zweite zentrale Forderung betrifft eine möglichst realistische theoretische Abbildung der tatsächlichen Infrastruktur des Netzwerks aus Generatoren, Reglern, Transformatoren, Leitungen und der Vielfalt von Verbrauchern. Es werden hierfür praktisch handhabbare Ersatzmodelle benötigt, die das dynamische Geschehen im Netz möglichst korrekt widerspiegeln. Dies sei möglich, sagt Michael Fette von der Universität Paderborn im Interview unten auf dieser Seite.

Technisch wäre es möglich

Es gibt heute die Möglichkeit, ein Gerät zu entwickeln, das in der Lage ist, einen Blackout vorherzusagen. Der praktische Nutzen liegt auf der Hand: Die Stabilitätsgrenze im Netz der elektrischen Energieversorgung kann ermittelt werden – zumindest in der Annäherung. Mit anderen Worten: Es können Aussagen getroffen werden, wie weit sich ein System vom Kollaps entfernt befindet, indem dessen Vorläuferereignisse im Frequenzbereich analysiert werden.

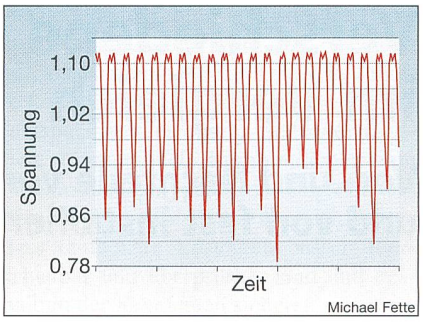

Bild 6 Frequenzmuster kurz vor dem Blackout

Aus den Ergebnissen dieser Analysen lassen sich die notwendigen Handlungsalternativen ableiten. Die jeweils zu ergreifende Massnahme hängt dabei von der Netztopologie und anderen Randbedingungen ab. Das beginnt üblicherweise mit dem Lastabwurf, der nun aber frühzeitig eingeleitet werden könnte, und endet bei der Inselung einzelner Netzbereiche. Die Strategie wird von Fall zu Fall anders aussehen. Aber im Unterschied zu früher steht dann mehr Zeit zur Verfügung, die eine angemessene, gegebenenfalls präventive Reaktion auf ein extremes Ereignis wie einen Blackout erlauben würde.

ab und ändert sich mit dessen Dynamik. Nähert man sich diesem Punkt von der stabilen Seite her an, treten immer häufiger Frequenzveränderungen auf, die aber noch gutartig sind. Wird allerdings durch Veränderung des Lastverhaltens dieser Punkt überschritten, werden diese Frequenzveränderungen mehr und mehr bösartig und verstärken sich in zunehmendem Masse. Während der längeren Phase des Driftens des Systems verändert sich auch dessen nichtlineare Dynamik, bekommt diese eine andere strukturbedingte Ausprägung und gerät in Konsequenz hiervon mehr und mehr in Konflikt mit der vorhandenen physischen Infrastruktur, die ja schlussendlich diese Transformation aushalten muss. Dies führt dazu, dass bei weiteren Änderungen des Lastverhaltens zwangsläufig der Systemkollaps eintritt.

Das klingt recht kompliziert. Ist da die technische Umsetzung nicht schwierig?

Es kommt darauf an, die richtigen Signale so früh zu erkennen, dass man rechtzeitig geeignete Massnahmen ergreifen kann. Wir können mit neuen Geräten sehr hochauflösend einen Frequenzbereich beobachten, in dem signifikante «Fingerabdrücke» derjenigen Frequenzen auftreten, die einen kommenden Blackout ankündigen. Diese Frequenzanalyse muss jedoch immer gemeinsam mit der permanenten Analyse der Veränderungen der nichtlinearen Dynamik des Gesamtsystems erfolgen. Das detaillierte Bild, das wir dadurch erhalten, gibt uns die Möglichkeit, die Wirksamkeit sämtlicher Reglereinrichtungen im Netz im Zusammenspiel zu beobachten. Das Dämpfungsverhalten aller technischen Elemente im Netz könnte daher mit hochauflösender Frequenzanalyse ermittelt werden. Das wäre ein echter Fortschritt, denn das tatsächliche Dämpfungsverhalten im Netz ist uns nicht einmal annähernd bekannt. Für die Betreiber würde dies in der Praxis eine «rote Lampe» für deren Planungsvorhaben darstellen. Die Lampe könnte immer dann aufleuchten, wenn eine Handlung ausgeübt werden soll, die im Stromnetz zu diesem Zeitpunkt gar nicht möglich ist.

Angaben zum Autor

Dr. Thomas Fritsch ist selbstständiger Berater und Entwickler in den Bereichen Umwelt, Medizin und Energie. Er promovierte am Lehrstuhl für Informatik III (Verteilte Systeme) der Universität Würzburg mit Schwerpunkt Neuronale Netze. Der Artikel ist eine gekürzte Fassung eines Sonderdrucks, dessen vollständige Version einschliesslich der Literaturnachweise unter http://www.a-eberle.de/sonderdr/pdf/sturmzeichen_d.pdf heruntergeladen werden kann.
BRAIN² – Soft Computing & Consulting, D-97286 Sommerhausen, tfritsch@brainn.de

Résumé

Des signes d'orage sur le réseau

Savoir reconnaître à temps les signes avant-coureurs de pannes. En reconnaissant à temps les signes avant-coureurs d'un effondrement du réseau, on peut éviter une panne. Car les variations caractéristiques de fréquence annonçant un tel événement peuvent être détectées au moyen d'appareils de mesure modernes. Et sur la base de modèles mathématiques non linéaires, les exploitants de réseaux peuvent calculer de combien le réseau s'approche de la panne – et engager les mesures nécessaires.