

Jahresbericht 2005, 9. Dezember 2005

Projekt Vision of Future Energy Networks

Autor und Koautoren	Prof. Fröhlich / Prof. Andersson (B. Klöckl, P. Favre-Perrod, M. Geidl, G. Koeppel)
beauftragte Institution	ETH Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie
Adresse	Physikstrasse 3, 8092 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	044 – 632 2777 / froehlich@eeh.ee.ethz.ch , www.eeh.ee.ethz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100669 / 151068
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Juli 2004 bis 30. Juni 2008

ZUSAMMENFASSUNG

Der zweite Jahresplan des Projektes „Vision of Future Energy Networks“ war der Verfeinerung der theoretischen Grundlagen für die Systemsynthese von zukünftigen Energiesystemen gewidmet. Es wurde während dieses Berichtszeitraums Schwerpunkte auf folgende Themen gelegt:

- Modularisierung der Gesamt-Methodik, damit die Ermöglichung der Aufteilung von Arbeitspaketen auf Partner
- Verfeinerung der Optimierungsverfahren für die gewünschten Verknüpfungen in hybriden Energieknoten
- Integration der projektinternen Notation in Konventionen für Zuverlässigkeitsbeurteilungen
- Ausarbeitung eines Gesamt-Konzepts für die Bewertung von hybriden Energieübertragungselementen
- Einführung von probabilistischen Konzepten zur systematischen Behandlung der Energiespeicherproblematik

Projektziele

Das Projekt „Vision of Future Energy Networks“ hat als Hauptziel die Erstellung von „Greenfield Szenarien“ für zukünftige Energiesysteme. Für das Jahr 2005 wurden die Teilziele in [1] unter dem Stichwort „Refinement“ zusammengefasst und folgendermassen angegeben:

Spezifikation von Betriebsmoden, Komponenten (Anforderungen / Technologie / Machbarkeit), Steuerung / Schutz, Kommunikation, Nutzer / Laststrukturen; Beurteilung von Umweltaspekten, Verfügbarkeit, Funktionalität, Abwärtskompatibilität mit dem bestehenden System, Schrittweise ökonomische und ökologische Beurteilung

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Systemmodellierung und -optimierung (M. Geidl, Power Systems Laboratory)

Die bis Ende 2004 entwickelten Modelle zur operativen Systemoptimierung wurden bedeutend weiterentwickelt. Die bislang getrennte Optimierung der Hub-Energiebezüge und der Netzwerkk Flüsse wurde in einem Modell kombiniert. Das Ergebnis ist ein Tool zur integrierten Optimierung von Energieumwandlung und -verteilung, eine Art „Optimal Power Flow“ [2] mit mehreren Energieträgern. Das Netzwerkmodell wiederum wurde, ausgehend von einem Transportkostenmodell, weiter verfeinert. Neben dem ursprünglichen Modell sind jetzt auch verlustbehaftete Netzflussmodelle [3] und detaillierte, statische Lastflussmodelle (für elektrische [4] und hydraulische [5, 6] Systeme) in den Optimierungsansatz integriert.

Neben diesen beiden Erweiterungen wurde eine weitere Art der Optimierung implementiert, und zwar die topologische/strukturelle Optimierung des Systems [7]. Dabei geht es nicht um die operative Optimierung der Leistungsflüsse in einem gegebenen System, sondern um die Bestimmung der optimalen Struktur des Systems. Mit diesem Tool kann z.B. die optimale Position eines Energy Hubs sowie seine optimale Besetzung mit Energiekonvertern bestimmt werden.

In einer Zusammenarbeit mit der TU Delft wurden die für den Energy Hub entwickelten Optimierungsmodelle auf „Multi-Source Multi-Product“-Brennstoffzellensysteme angewandt. Mit Hilfe der Optimierungsmethode können solche Systeme optimal geregelt und betrieben werden.

Zuverlässigkeitsanalysen (G. Koeppel, Power Systems Laboratory)

Die im Jahresbericht 2004 erwähnten Untersuchungen mit verschiedenen Methoden, haben dazu geführt, dass sich die Arbeit in diesem Jahr vor allem auf die Modellierung mit probabilistischen Methoden beschränkte [8], [9]. Prinzipiell kann jeder Ort im Netz, an welchem Umwandlungen von Energieträgern stattfinden, als Energy Hub modelliert werden. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die Energieträger, die nach der Umwandlung zur Verfügung stehen (d.h. die Ausgänge des Energy Hubs) von mehreren Energieversorgungssystemen abhängen oder versorgt werden können. Ähnlich den Kopplungsmatrizen lassen sich Ausfall- und Wiederherstellraten-Matrizen definieren, die helfen, verschiedene probabilistische Untersuchungen durchzuführen. Eine Methode wurde entwickelt, bei der die Verfügbarkeit der Lasten jedes Hubs mit einer Gleichung dargestellt werden kann. Dies reduziert die Anzahl möglicher Systemzustände deutlich, was vor allem bei Betrachtungen grösserer Modelle hilfreich ist.

Unter anderem lässt sich modellieren, inwiefern sich die Versorgungszuverlässigkeit einer Last verändert, wenn sie von mehreren unabhängigen Energieversorgungssystemen versorgt wird – entweder direkt, durch eine Leitung oder indirekt über einen Konverter, beispielsweise aus dem chemischen Netz. Die Methode lässt sich auch anwenden, um minimale Anforderungen an

Konverter in Bezug auf Verfügbarkeit und Reparaturzeit zu definieren. Zudem kann damit auch bestimmt werden, ob und wie stark die Verfügbarkeit der elektrischen Verbindung reduziert werden könnte, wenn der Kunde mit Konvertern an andere Versorgungssysteme angebunden ist. Die verschiedenen Elemente werden im Juni 2006 an einer Konferenz präsentiert werden.

Zudem wurden zwei Studien durchgeführt, die den Einfluss von Energiespeichern auf die Verfügbarkeit untersuchten. Beide Studien befassten sich mit netzgekoppelten stochastischen Erzeugern (z.B. Wind-, Photovoltaiksysteme) und untersuchten, ob mit Hilfe von Energiespeichern prognostizierte Einspeisepprofile besser erfüllt werden können. Die Resultate geben vor allem darüber Aufschluss, ob es bereits mit kleinen Energiespeichern - verglichen mit der installierten Leistung des stochastischen Erzeugers -, möglich ist, die angestrebten Produktionsprofile zuverlässig zu erfüllen, respektive inwiefern das Produktionsverhalten angepasst werden sollte, um bereits mit kleinen Energiespeichern etwas bewirken zu können. Dies wiederum lässt dann Abschätzungen zu, in welchen Energy Hubs Energiespeicher sinnvoll sein könnten und unter welchen Voraussetzungen.

Integration der Energiespeicherungs-Theorie (B. Klöckl, High Voltage Laboratory)

Nachdem im Jahr 2004 die wichtigsten Parameter identifiziert worden waren, mit denen Energiespeicher im Rahmen der für die Projektausführung notwendigen Methodik beschrieben werden sollen [10], waren die Arbeitspakete des Jahres 2005 gekennzeichnet von theoretischen Analysen. Insbesondere folgende Punkte wurden behandelt:

- Wenn an einem Energie-Einspeisepunkt (oder Energie-Ausleitungspunkt) eines allgemeinen Systems eine vollständig bekannte Leistungslinie auftritt (eine deterministische Grösse), wie kann dann unter Kenntnis des nichtlinearen Verlustcharakteristik eines an dieser Stelle installierten Energiespeichers die garantierte Einspeiseleistung des zeitlich nichtkonstanten Netzteilnehmers berechnet werden?
Die Beantwortung dieser Frage gelang in zufriedenstellender Weise. Es wurden zu diesem Zweck einfache Hilfsmittel zur Berechnung definiert. Anzumerken ist darüber hinaus, dass jede vollständig bekannte Leistungslinie als deterministische Grösse betrachtet werden muss, auch dann, wenn sie den Leistungsbeitrag eines sog. „stochastischen Netzteilnehmers“ repräsentiert.¹
- Wenn jedoch ein Netzteilnehmer nur teilweise bekannter Charakteristik auftritt (vor allem ein solcher, bei dem die genaue Abfolge der Leistungswerte nicht im vorhinein bekannt ist, also ein stochastischer Netzteilnehmer) stellt sich die Frage nach dem Nutzen einer Energiespeicherinstallation. Diese Frage wurde in den vergangenen Jahren in der Literatur wiederholt intuitiv so beantwortet, dass ein Speicher den stochastischen Netzteilnehmer tendenziell „deterministischer“ machen kann. Diese Aussagen wurden in einer Publikation 2005 (Cigré Symp. Athen) untersucht und daraufhin die Methodik der Applikation von willkürlich gewählten Zeitreihen für unzureichend befunden. In den hier vorgestellten Arbeitspaketen wurde eine differenziertere Formulierungsweise eingeführt, die auf der folgenden Systematik beruht:

Die gängigen Methoden zur Beschreibung von stochastischen Signalen wurden bewertet und für die Zwecke der vorliegenden Untersuchung angepasst. Darunter fallen sowohl analytische als auch synthetische Methoden. Die Leistungssignale von gemessenen stochastischen Netzteilnehmern wurden auf lineare Abhängigkeitsstruktur im Allgemeinen und auf ihre Autokorrelation im Speziellen hin untersucht. Daraus ergeben sich unter Zuhilfenahme einer Reihe von Konzepten aus der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie verschiedene Möglichkeiten zur Beantwortung

¹ Als stochastische Netzteilnehmer können gegenwärtig typischerweise eine Reihe von Energieeinspeisungen aus erneuerbaren Primärenergiequellen (Wind, Solar,...), zukünftig u.U. auch marktgetriebene Verbraucher oder Verbraucher/Erzeuger auftreten.

der Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein nichtlinear verlustbehafteter Energiespeicher seine ihm zugedachte Aufgabe im System erfüllen kann. Zum Zeitpunkt des Berichts konnten zufriedenstellende Aussagen zu den folgenden Inhalten gemacht werden:

- Es ist theoretisch möglich, die Wahrscheinlichkeit des Speichers, einen gewissen Füllstand aufzuweisen, aus Kenntnis von wenigen wichtigen Parametern der stochastischen Grösse zu bestimmen (siehe auch [11]). Damit wird es möglich, den Leistungsbeitrag zu System-Leistungsbalance auf probabilistischem Weg zu schätzen. Die Unsicherheit, die aus der Unkenntnis über die genaue Realisierungssequenz des stochastischen Prozesses entsteht, wird damit über die Unschärfe im gemeinsamen Leistungsbeitrag von stochastischem Netzteilnehmer und Energiespeicher ausgedrückt.
- Falls diese Parameter unzugänglich oder aus mathematischen Gründen nicht geeignet sind (z.B. bei sogenannten "Fat Tail-Verteilungen"), müssen komplexere Modelle für die Erstellung der zu erwartenden Dichteverteilung im Energiespeicher verwendet werden. Diese sind mit Methoden zur Beschreibung von komplexen Abhängigkeiten zwischen Variablen in der Finanztheorie verwandt. Die Berteilung der Verhältnismässigkeit dieser Erweiterung in der Modellierung steht z.Zt. noch aus.

Kombinierte Übertragung von Strom und Gas (P. Favre-Perrod, High Voltage Laboratory)

In der Betrachtung von Energiesystemen mit verschiedenen Energieträgern nimmt die Energieübertragung eine Besondere Bedeutung an. Neben der Möglichkeit Energie wie heute in getrennten Netzen zu übertragen, wird auch die Lösung untersucht, mehrere dieser Energieträgern in einem einzigen Medium zu übertragen. Mögliche Kombinationen sind z.B. Gas und Strom, oder Gas, Wärme und Strom.

Das Konzept der gemeinsamen Übertragung mehrerer Trägern wirft einige Fragen auf:

- Welche Kombinationen von Energieträgern sind möglich? Bei welchen Geometrien?
- Gibt es grundsätzliche Kopplungen zwischen den verschiedenen Energieflüssen (oder sind sie immer unabhängig voneinander)?
- Wie soll ein gesamtes Übertragungssystem inklusive der Hilfsbetriebe (Leistungselektronik, Kühlung, Kompressoren) gestaltet werden?
- Wie sind die Eigenschaften und die Performance eines gemischten Übertragungssystems?

Nachdem im letzten Jahr die grundsätzlichen Kombinationen und Gestaltungsmöglichkeiten des so genannten Interconnectors studiert wurden, ist in diesem Jahr die Grundsätzliche Modellierung eines Sonderfalls, die Kombination von Strom und Gas erfolgt. Diese Lösung wird als eine der meistversprechenden betrachtet. Es handelt sich dabei um ein Konzept, welches noch nicht umgesetzt wurde.

Beim Interconnector mit gemischter chemischer und elektrischer Energieübertragung wird ein gasförmiges Medium durch ein Rohr geschickt, welches ebenfalls einen elektrischen Strom führt. Aufgrund der elektrischen Verluste im Leiter wird das Gas erwärmt. Da diese Erwärmung ein zentrales Merkmal des Interconnectors darstellt musste sie auch richtig modelliert werden. Dazu war eine Erweiterung verschiedener Modelle aus der Literatur notwendig, da üblicherweise von isothermem Gasfluss ausgegangen wird. Der nächste Schritt lag in der Modellierung der Kompressoren und Wärmetauscher am Leitungsanfang und -ende.

Nach diesem Modellierungsschritt können Wirkungsgrade von Gesamtsystemen ausgewertet werden. Dies bildet die Basis für die weiteren Untersuchungen: die Bewertung der Kopplungen unter den Energieträgern sowie der Auslegung von Übertragungssystemen für mehrere Energieträger.

Projektbezogene Publikationen 2005

B. Klöckl, P. Stricker, G. Koeppel. On the properties of stochastic power sources in combination with local energy storage. CIGRÉ symposium on power systems with dispersed generation. Athen, Griechenland, April 2005.

M. Geidl, G. Andersson: A modeling and optimization approach for multiple energy carrier power flow. IEEE PowerTech, St. Petersburg, Russland, Juni 2005.

P. Favre-Perrod, M. Geidl, G. Koeppel, B. Klöckl: A Vision of Future Energy Networks. IEEE PES Inaugural 2005 Conference and Exposition in Africa, Durban, Südafrika, Juli 2005.

B. Klöckl, M. Korpaas (NTNU Trondheim): A generalized energy storage model for the investigation of non-constant efficiency. Submitted to IEEE Transactions on Energy Conversion, Juli 2005.

M. Geidl, G. Andersson: Optimal power dispatch and conversion in systems with multiple energy carriers. 15th Power Systems Computation Conference (PSCC), Liège, Belgium, August, 2005.

B. Klöckl, K. Fröhlich, K. Kaltenegger: New energy technologies, new requirements on electricity and an unresolved transition problem towards sustainability: Is there need for basic academic research? Cigré 5th Southern Africa Regional Conference "Meeting Today's Challenges for Tomorrow's Power Industry", Kapstadt, Südafrika, Oktober 2005.

M. Geidl, G. Andersson: Operational and topological optimization of multi-carrier energy systems. International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, The Netherlands, November 2005.

B. Klöckl, G. Papaefthymiou (TU Delft): An effort to overcome the chronological modelling methods for energy storage devices. International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, The Netherlands, November 2005.

K. Hemmes, J. L. Zachariah (TU Delft), M. Geidl, G. Andersson: Towards multi-source multi-product energy systems. 2nd European Hydrogen Energy Conference (EHEC), Zaragoza, Spanien, November 2005.

G. Koeppel, P. Favre-Perrod, M. Geidl, B. Klöckl: Die Vision eines zukünftigen Energieversorgungsnetzwerkes, Bulletin SEV/AES 19/05, pp. 22-26, Zürich, 2005.

Geplante projektbezogene Publikationen 2006

M. Geidl, P. Favre-Perrod, G. Koeppel, B. Klöckl: A Greenfield Approach for Future Energy Systems. Cigre Session 41, Paris, France, August 2006

K. Hemmes (TU Delft), M. Geidl: Integration of Fuel Cells in Multisource Multiproduct Energy Systems. 4th International ASME Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, Irvine, USA, Juni 2006

K. Hemmes, J. L. Zachariah (TU Delft), M. Geidl, G. Andersson: Towards multi-source multi-product energy systems. Submitted to International Journal of Hydrogen Energy (IJHE)

G. Koeppel, G. Andersson. The influence of combined power, gas, and thermal networks on the reliability of supply, submitted for IEEE PMAPS 2006, Stockholm, Schweden, Juni 2006

G. Koeppel, M. Korpaas (NTNU Trondheim) und G. Andersson. Using storage devices for compensating uncertainties caused by stochastic generators, submitted for IEEE PMAPS 2006, Stockholm, Schweden, Juni 2006

P. Favre-Perrod, A. Bitschi: A concept for dual gaseous and electric energy transmission. IEEE PES General Meeting, Montreal, Kanada, Juni 2006

B. Klöckl, P. Favre-Perrod, M. Geidl, G. Koeppel: Methods for a greenfield development of energy delivery systems. To be submitted to IEEE Transactions on power delivery.

B. Klöckl, M. Korpaas: The expected power contribution of a stochastic source with a lossy energy storage device (vorläufiger Arbeitstitel, als Journalpublikation geplant)

B. Klöckl, P. Kesselring: The influence of the autocorrelation function of stochastic sources on the value of energy storage (vorläufiger Arbeitstitel, als Journalpublikation geplant)

Schlussbericht CIGRÉ WG C6.05: Technical and Economic impact of DG on Transmission and Generation Systems. Cigre Session 41, Paris, France, August 2006 (B. Klöckl)

Nationale Zusammenarbeit

Industrielle Projektpartner:

- ABB Medium Voltage Technology (Zürich). Die Zusammenarbeit schliesst sowohl finanzielle Unterstützung als auch die Bereitstellung fachlicher Ansprechpartner ein.

Als akademische Ansprechpartner mit Aussicht auf eine spätere vollwertige personelle Beteiligung in Form zusätzlicher Doktoranden treten an der ETH Zürich folgende Institute auf:

- Professur für Leistungselektronik und Messtechnik (Prof. Kolar)
- Institut für Automatik (Prof. Morari)
- CEPE – Centre for Energy Policy and Economics (Prof. Spreng)

Internationale Zusammenarbeit

Die folgenden ausländischen Firmen sind als vollwertige Partner in das Projekt integriert und gewähren sowohl finanzielle als auch fachliche Unterstützung:

- Siemens AG (Deutschland), vormals VA Tech Hydro AG (Österreich)
- Areva (Frankreich)

Projektbezogene akademische Kooperationen und Gremienarbeit:

- Verschiedene Zusammenarbeiten mit NTNU Trondheim, siehe Publikationsliste (B. Klöckl, G. Koeppel)
- Zusammenarbeit mit TU Delft, siehe Publikationsliste (B. Klöckl, M. Geidl)
- Austausch und für 2006 geplante gemeinsame Publikation mit RWTH Aachen (B. Klöckl)
- Mitwirkung in der CIGRÉ Arbeitsgruppe WG C6.05 (B. Klöckl)

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Die in [1] angegebenen Teilziele für das Berichtsjahr 2005 wurden zum Teil erfüllt. Vom dort definierten Überbegriff „Refinement“ können jene Teilaufgaben als erfüllt gelten, die eine Eingrenzung von fehlenden theoretischen Tools zu einer umfassenden Systemsynthese, sowie die Strategien, diese zu erstellen, zum Ziel hatten. Der letzte theoretische Schritt zu einer situationsbezogenen Synthese eines fiktiven Energiesystems nur unter der Randbedingung einer bekannten Versorgungsaufgabe steht jedoch vorerst noch aus. Nichtsdestotrotz konnten Arbeitspakete für Kooperationen mit akademischen Partnern und studentischen Hilfskräften in grosser Zahl definiert und bearbeitet werden, womit die Strukturierung dieser umfangreichen Forschungsaufgabe wesentlich voranschreiten konnte. Im Jahr 2006 wird als zentraler Meilenstein die Anwendung der vorge-

schlagenen theoretischen Konzepte auf die Fallstudie einer realen Kleinstadt (Baden AG) anstehen, welche die Stärken und Schwächen der vorgeschlagenen theoretischen Tools aufzeigen wird. Nicht in befriedigendem Ausmass erfüllt werden konnten jene Teilaufgaben, die mit direkter technologischer Implementation von theoretischen Konzepten in Verbindung stehen; der Grund dafür liegt im unterschätzten Zeitaufwand für die Erstellung umfangreicher theoretischer Grundlagen.

Referenzen

- [1] **BfE-Projektantrag Vision of Future Energy Networks**, Juni 2004
- [2] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, **Power Generation, Operation, and Control**, 2nd ed. New York: Wiley, 1996.
- [3] F. Glover, D. Klingman, and N. V. Phillips, **Network Models in Optimization and Their Applications in Practice**. New York [etc.]: Wiley, 1992.
- [4] A. R. Bergen and V. Vittal, **Power Systems Analysis**, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.
- [5] J. P. Modisette and J. L. Modisette, **Physics of Pipeline Flow**, Pipeline Simulation Interest Group (PSIG) Report 0302, 2003.
- [6] A. J. Osiadacz, **Simulation and analysis of gas networks**. London: E. & F.N. Spon, 1987.
- [7] J. Söderman and F. Pettersson, **Structural and operational optimisation of distributed energy systems**, *Applied Thermal Engineering*, vol. In Press, Corrected Proof, 2005.
- [8] Billinton, R. and R.N. Allan, **Reliability Evaluation of Power Systems**. 2nd ed. 1996, New York: Plenum Press.
- [9] Rausand, M. and A. Høyland, **System reliability theory: models, statistical methods, and applications**. 2nd ed. Wiley series in probability and statistics. Applied probability and statistics. 2004, Hoboken, NJ: Wiley-Interscience. xix, 636 p.
- [10] T. Christen, C. Ohler: **Optimizing energy storage devices using Ragone plots**, *Journal of Power Sources* 110 (2002), 107-116
- [11] P. Kesselring and A. Duppenhaler: **The layout of solar hot water systems, using statistical meteo- and heat demand data**, *Proceedings of the International Solar Energy Society Silver Jubilee Congress*, Atlanta, Mai 1979