

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 96 (2005)
Heft: 24-25

Artikel: Simulation für Schutz und Steuerung in Hochspannungsanlagen
Autor: Fromm, Wilhelm / Bertsch, Joachim
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857892>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Simulation für Schutz und Steuerung in Hochspannungsanlagen

Dynamisches Netzverhalten lässt sich mit Standardwerkzeugen komfortabel simulieren

Schutz und Steuerung spielen eine entscheidende Rolle bei der Automatisierung in der elektrischen Energieversorgung. Moderne Geräte sind Mikrorechner-gesteuert, und ihre korrekte Funktion wird bestimmt durch das Zusammenwirken ihrer Hardware und Software mit der Hochspannungsanlage. Zudem ist die Software für den individuellen Einsatz parametrierbar. Untersuchungen mit Schutz- und Steuerungseinrichtungen an realen Anlagen sind aufwändig und riskant. Betriebserfahrungen werden häufig erst nach einem Schadensereignis gewonnen. Simulationen ermöglichen hingegen breit abgestützte Untersuchungen von potenziellen Betriebs- und Fehlerfällen bereits im Voraus. Sie unterstützen damit nicht nur kurze Entwicklungs-, Projektierungs- und Inbetriebnahmezeiten, sondern tragen auch zur sicheren, zuverlässigen und kostengünstigen Stromversorgung bei.

Die Verwendung von Simulationen ist aus unterschiedlichen Blickwinkeln sinnvoll, etwa bei der Planung und Projektierung von Hochspannungsanlagen mit den zugehörigen Schutz- und Leitsystemen, oder für die Ereignis-genaue und präzise Analyse von Störungen wie beispiels-

weise nach einem Leitungsausfall oder einem Blackout. Weitere Anwendungen sind die Entwicklung von Schutz- und Steuergeräten sowie Schutz- und Steuerungssystemen einschliesslich Hard-, Soft- und Firmware und schliesslich Bereiche wie Ausbildung, Training und Beratung.

Wilhelm Fromm, Joachim Bertsch

weise nach einem Leitungsausfall oder einem Blackout. Weitere Anwendungen sind die Entwicklung von Schutz- und Steuergeräten sowie Schutz- und Steuerungssystemen einschliesslich Hard-, Soft- und Firmware und schliesslich Bereiche wie Ausbildung, Training und Beratung.

Bild 1 zeigt beispielhaft das Zusammenwirken der Hochspannungsanlage (Primärtechnik) mit den Schutz- und Steuergeräten (Sekundärtechnik). Für die Simulation müssen sowohl die Primärtechnik wie auch die Sekundärtechnik berücksichtigt werden.

Die Wirkung von Schutz- und Steuergeräten kann über die Vorgabe der zeitlichen Verläufe ihrer Ausgabegrössen – beispielsweise des Aus-Befehls –, durch

Die unterschiedlichen Ansätze bisheriger Simulationslösungen

Ansatz: Prüfgeräte¹⁾

Optimiert für Routineprüfungen von Schutz- und Steuergeräten können moderne Prüfeinrichtungen neben stationären Signalen auch fast beliebige Zeitverläufe ausgeben. Die Reaktion der zu prüfenden und erst recht weiterer Schutz- und Steuergeräte kann jedoch nur begrenzt berücksichtigt werden. Die Modellierung von Hochspannungsnetzen wird nicht unterstützt.

Ansatz: Netzberechnungsprogramme²⁾

Spezialisiert auf die Berechnung stationärer und transients Vorgänge in elektrischen Netzen unterstützen sie teilweise auch Echtzeitsimulationen zur Ansteuerung realer Schutzgeräte [1]. Die Fähigkeiten zur Erweiterung der Modelle, z.B.

zur Modellierung spezieller Schutzgeräte, sind begrenzt.

Ansatz: Analoge und digitale Netzmodelle

Auf Analogelektronik oder Analogrechner basierende Netzmodelle sind mittlerweile veraltet und werden kaum mehr eingesetzt. Modernere Lösungen basieren meist auf den oben genannten Netzberechnungsprogrammen mit Echtzeiterweiterungen.

Die bei Geräteherstellern, Energieversorgungsunternehmen und Ausbildungsstätten eingesetzten Systeme können zwar sehr leistungsfähig sein, sind aber entsprechend teuer in Anschaffung und Unterhalt und zudem unflexibel bei Konfigurationsänderungen. Begrenzt sind auch ihre Fähigkeiten zur Berücksichtigung von nicht hardwaremässig eingebundenen Schutz- und Steuergeräten.

Stand der Technik

Heute stehen Standard-Simulationswerkzeuge zur Verfügung, die sich im gesamten Bereich der Automatisierungstechnik einsetzen lassen. Das Softwarepaket Matlab/Simulink³⁾ beispielsweise

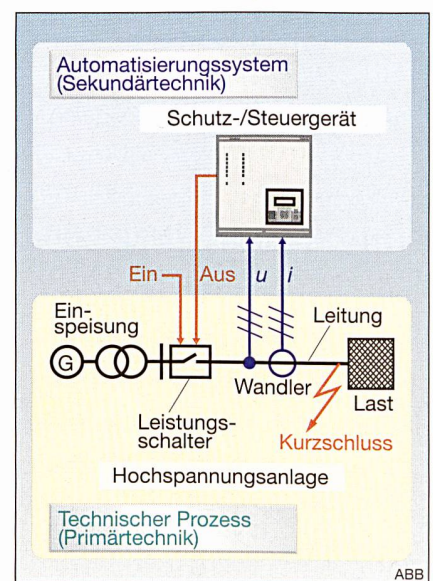


Bild 1 Primärtechnik und Sekundärtechnik beim Leitungsschutz

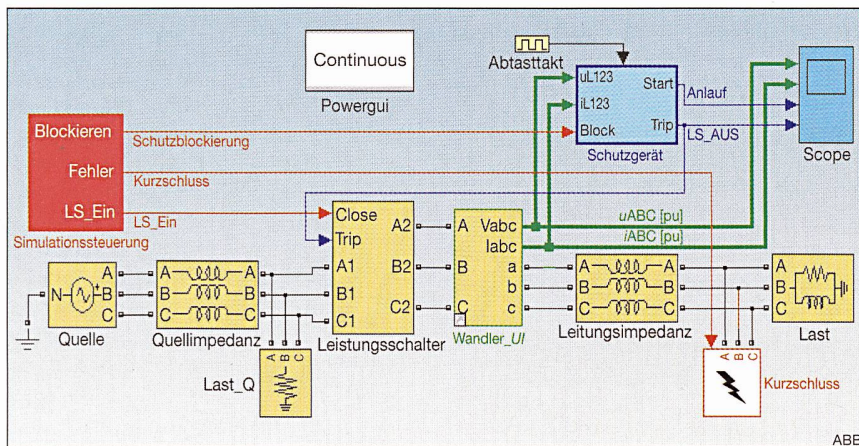


Bild 2 Modell einer Hochspannungsleitung mit Leitungsschutz

ist für breit gefächerte Anwendungen in Industrie und Hochschulen weit verbreitet und hat eine hohe Kundenakzeptanz gewonnen. Mit der Toolbox «SimPowerSystems»⁴⁾ können in Simulink-Modellen auch Systeme der elektrischen Energietechnik eingebunden werden.

Ferner sind heutige Personal Computer (PC) so leistungsfähig, dass sie Simulationen für Schutz und Steuerung in Hochspannungsanlagen auch in Echtzeit durchführen können. Mit Hilfe der Matlab/Simulink-Toolboxen «Real-Time Workshop» und «xPC Target» können Modelle für eine Echtzeitsimulation vorbereitet und in Echtzeit ausgeführt werden.

Im Folgenden wird der Einsatz von Matlab/Simulink für die Modellierung von Primär- und Sekundärtechnik unter folgenden Gesichtspunkten untersucht:

- da auf Grund der Simulation spezielle Hardware-Entwicklungen und -Fertigungen entfallen, entstehen niedrige Hardware-Kosten;
- da die Simulationen nicht auf energietechnische Aspekte begrenzt sind, ist das Simulationswerkzeug flexibel und universell einsetzbar;
- auf Grund der vielfältigen Werkzeuge sind Simulationen mit und ohne «Hardware-in-the-Loop» möglich;
- die vielfältigen Möglichkeiten der Simulink-Signalverarbeitung ermöglichen die Einbindung beliebiger Schutz- und Steuerungsfunktionalität;
- echte Geräte-Software kann in die Simulation (z.B. C-Programmcode) zur Optimierung der Entwicklungsprozesse eingebunden werden;
- da eine schnelle Einarbeitung möglich ist und die gewonnenen Kenntnisse häufig wieder verwendbar sind, ist eine grosse Benutzerfreundlichkeit gegeben;

- die geringen Abhängigkeiten von Umgebungseinflüssen und Alterung führt zu hoher Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität;
- die Simulationssoftware ist weit verbreitet und wird oft schon an den Hochschulen gelehrt: sie wird daher auch längerfristig angewendet werden.

Modellierung von Primär- und Sekundärtechnik

Die Anlagen der elektrischen Energietechnik werden mit Matlab/Simulink und der Toolbox SimPowerSystems komfortabel grafisch modelliert. Primärtechnik und sekundärtechnische Funktionen können nahtlos verbunden werden. Dabei steht die gesamte Palette der Matlab-Bibliotheken zur Verfügung. Bild 2 zeigt als einfaches Beispiel das Modell einer Hochspannungsleitung einschliesslich eines vollständigen Leitungsschutzes. Die Darstellung verbirgt dabei Subsysteme mit vom Anwender definierbarer Detailfunktionalität.

Zur Integration der Differenzialgleichungen werden zeitdiskrete oder kontinuierliche Integrationsverfahren verwendet. Entscheidung für die Modellierung der Schutz- und Steuergeräte ist dabei, dass innerhalb eines einzigen Modells auch unterschiedliche Zeitschrittweiten unterstützt werden.

Neben den hier betrachteten Zeitverläufen bei dynamischen Vorgängen können bei Bedarf auch stationäre Zustände untersucht werden.

Offline-Simulation

Nach der Modellbildung liefern die Simulationen alle gewünschten Modellgrössen im gewählten Zeitbereich. Beispielsweise zeigt Bild 3 die Ergebnisse für

den 2-poligen Erdkurzschluss aus Bild 2, wie sie vom Scope-Block aufgezeichnet und nach der Simulation ausgewertet wurden: Die von den Strom- und Spannungswandlern gelieferten Messgrössen bewirken einen Anlauf und einen Aus-Befehl des Schutzes mit der anschliessenden Unterbrechung der Ströme durch den Leistungsschalter.

Die von der Simulation gelieferten Ergebnisse stimmen mit den Erwartungen und auch den Resultaten anderer Berechnungsprogramme²⁾ überein.

Funktionalität der Schutz- und Steuergeräte

Zur Berücksichtigung von Schutz- und Steuergeräten in der Simulation («Software-in-the-Loop») sind je nach Anforderung folgende Vorgehensweisen möglich:

- Vorgabe des zeitlichen Verlaufs der Ausgangssignale
- Modellierung der Signalverarbeitung (z.B. analoge und digitale Filter) und Logik mit Simulink-Funktionen
- Einbindung von Geräte-Firmware in das Modell über das Simulink-Konzept der S-Funktion⁵⁾.

Das im Modell von Bild 2 simulierte Schutzgerätemodell beinhaltet eine reale Geräte-Firmware. Der Programmablauf wird über das mit der Abtastrate getriggerte Subsystem «Schutzgerät» zeitgerecht (bezogen auf die simulierte Zeit) abgearbeitet. Die Relais-Parametrierung (das Relais ist das Feld bzw. Schutzgerät, welches den Schaltbefehl an den Leistungsschalter initiiert) kann in gewohnter Weise ausgeführt werden, und es stehen dafür alle Debug-Möglichkeiten der eingesetzten C-Entwicklungsumgebung zur Verfügung.

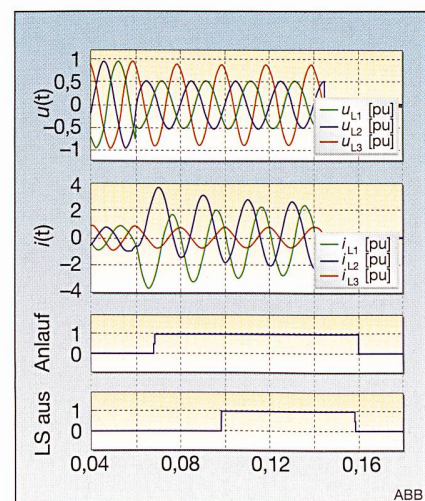


Bild 3 Spannungen und Ströme mit Schutz-Reaktion bei einem 2-poligen Erdkurzschluss

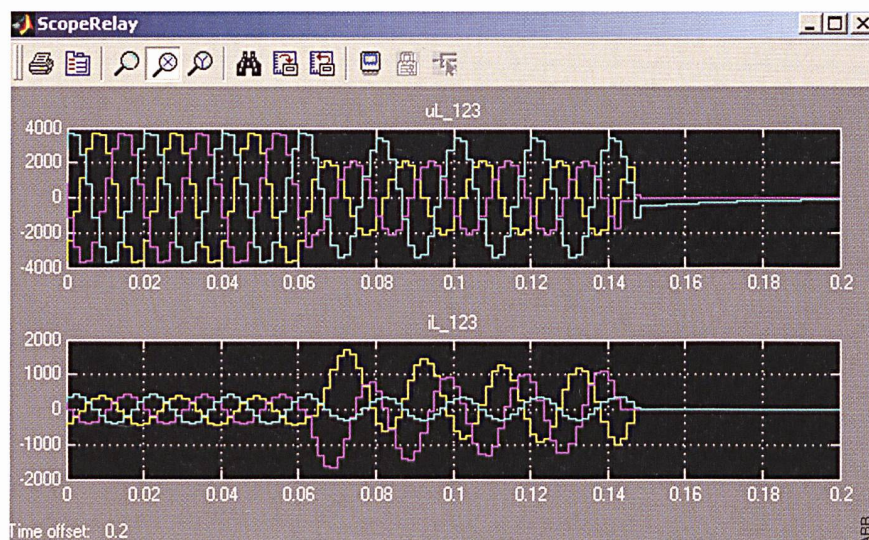


Bild 4 Abgetastete «Schutzgerät»-Analogeingänge beim Erdkurzschluss
Oben: abgetastete Spannungswerte; unten: abgetastete Stromwerte

Die Scope-Aufzeichnung von Bild 4 illustriert, auf welchen abgetasteten Spannungs- und Stromwerten die Reaktion der Schutzsoftware beruht.

«Hardware-in-the-Loop»-Echtzeitsimulation

Wenn reale Schutz-/Steuergeräte in die Simulation eingebunden werden (Hardware-in-the-Loop), muss die Simulation in Echtzeit durchgeführt werden, d.h. sie darf weder schneller noch langsamer als die reale Zeit ablaufen.

Zwischen Simulation und Schutz-/Steuergerät sind dazu geeignete Hardware-Schnittstellen erforderlich, z.B.

Verstärker für die Geräte-Analoggrößen mit Nennwerten von 100 V und 1 A sowie Signalanpassungen für die binären Ein- und Ausgänge. Bild 5 zeigt eine typische Konfiguration.

Die Simulation erfolgt auf einem so bezeichneten Target-Rechner. Dieser Standard-PC ist ausgestattet mit Interfacekarten zum Austausch der analogen und binären Signale mit dem Schutz-/Steuergerät. Er wird mit dem optimierten Betriebssystemkern xPC Target gebootet, so dass keinerlei Belastungen durch ein Windows-Betriebssystem auftreten. Monitor und Tastatur ermöglichen eine komfortable Beobachtung und Bedienung der Simulation.

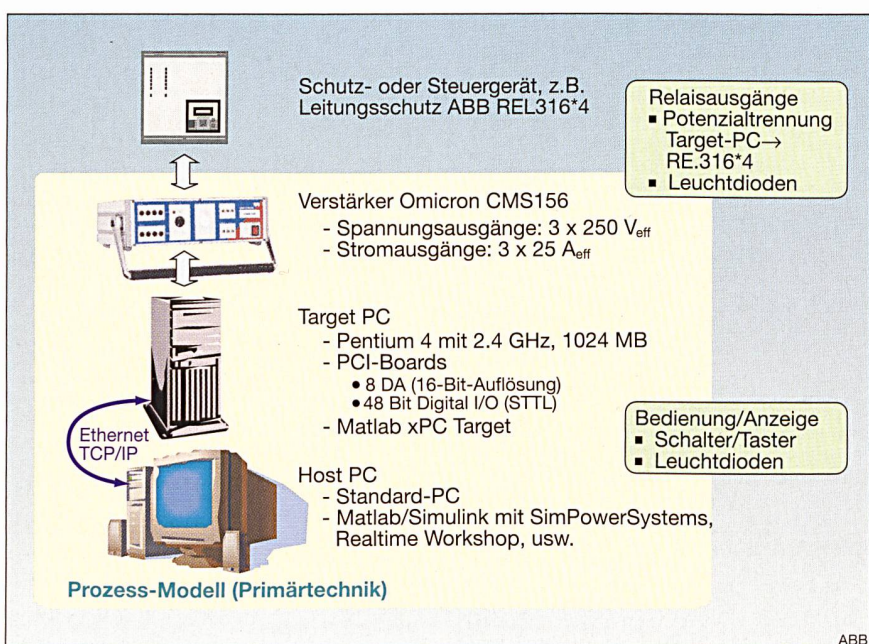


Bild 5 Komponenten bei der Echtzeitsimulation für eine Schutzeinrichtung

Das Modell wird auf einem so genannten Host-Rechner erstellt – wie bei der Offline-Simulation – oder von dort übernommen. Für die Kommunikation mit den analogen und digitalen Ein-/Ausgängen stehen Bibliotheksblöcke zur einfachen Konfiguration bereit.

Der auf dem Target-Rechner abgearbeitete Simulations-Programmcode wird von der Matlab/Simulink-Komponente Real-Time Workshop in Verbindung mit einem C-Compiler erzeugt. Die Kommunikation mit dem Target-Rechner läuft typischerweise über das lokale Netzwerk (z.B. LAN).

Als Schnittstelle zu den Schutz- und Steuergeräten dienen Strom-/Spannungsverstärker, und für die Potenzialanpassung der binären Signale werden Optokoppler eingesetzt.

Schalter/Taster erlauben manuelle Eingriffe, beispielsweise zum Aktivieren eines Kurzschlusses.

Das bereits gezeigte Leitungsmodell in Kombination mit einem realen Schutzgerät liefert praktisch gleiche Ergebnisse wie bei der Offline-Simulation. Die erreichbaren Zeitschrittweiten liegen deutlich unter 50 µs. Für grössere Netze wächst die benötigte Rechenzeit erfreulicherweise weit weniger als proportional an.

Netzschutz

Die für einfache Netz- und Schutzkonfigurationen gezeigte Simulationsmethodik lässt sich auch auf komplexere Anordnungen anwenden. So wurde ein Test von zwei Distanzschutzgeräten mit integrierter Wiedereinschaltung in einem vermaschten 110-kV-Netz durchgeführt. Bild 6 zeigt den Vorgang aus Sicht der Störschreiberfunktion eines der beteiligten Schutzgeräte.

Generatorschutz und Sammelschienen-Schnellumschaltung

Die Modellierung von elektrischen Maschinen (Synchrongeneratoren, Transformatoren, Asynchronmaschinen) ist mit den Standard-Bibliothekselementen von SimPowerSystems möglich. Eventuell fehlende Komponenten können über benutzerdefinierte Subsysteme berücksichtigt werden, beispielsweise für die Strom- und Spannungswandlerkreise mit Berücksichtigung der Nichtlinearitäten und Bürden. Die stationären Lastfluss-Anfangsbedingungen für dynamische Vorgänge lassen sich ebenfalls einfach finden.

Die Simulation einer Sammelschienen-Schnellumschaltung für den Kraft-

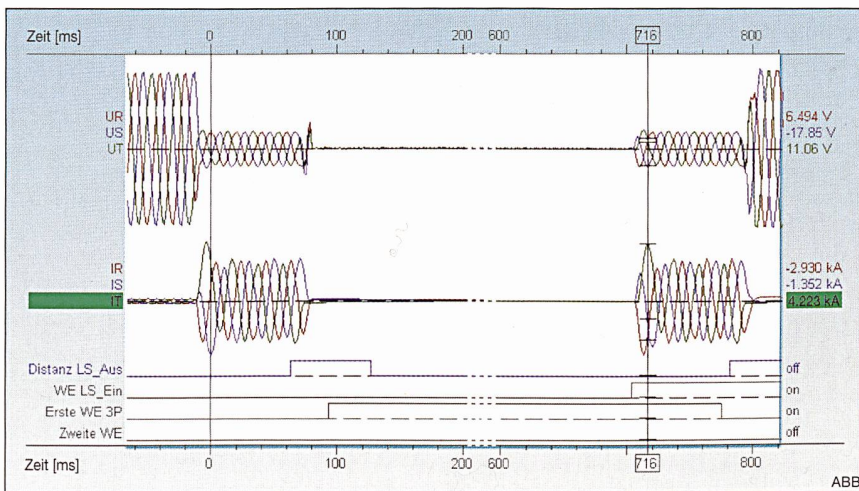


Bild 6 3-poliger Kurzschluss mit Schutz-Abschaltung und Wiedereinschaltungen (Störschreiber-Aufzeichnung)

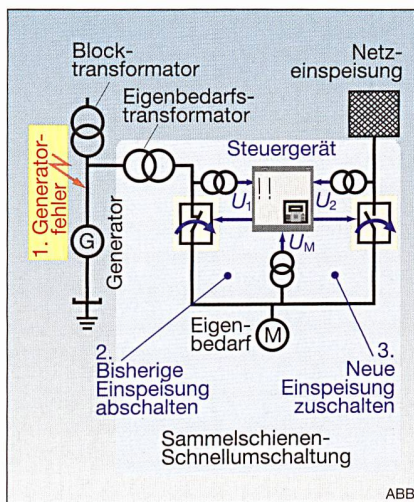


Bild 7 Anlagenkonfiguration und Steuergerät bei einer Sammelschienen-Schnellumschaltung

werks-Eigenbedarf zeigt, dass realistische Simulationen auch für komplexe Schalthandlungen mit Beteiligung diverser elektrischer Maschinen möglich sind (Bild 7).

Die Ergebnisse einer Offline-Simulation sind in Bild 8 dargestellt. Die Umschaltung erfolgt aus Anlagensicht zu einem ungünstigen Zeitpunkt mit rund 60° Phasenverschiebung zur neuen Netzeinspeisung und hat relativ grosse Motorströme und ein unerwünschtes negatives Drehmoment zur Folge.

Auch hier konnten «Hardware-in-the-Loop»-Tests mit einem realen Steuergerät erfolgreich und mit den erwarteten Ergebnissen durchgeführt werden.

Netzstabilität

Für Untersuchungen zur Netzstabilität und -sicherheit, aber auch für das Wide-Area-Monitoring müssen häufig Netze

mit Dutzenden von Knoten und Leitungen betrachtet werden [2, 3]. Dass dies mittels Simulationen erfolgen kann, wurde anhand des in Bild 9 dargestellten Netzes⁶⁾ gezeigt, mit welchem sich das dynamische Netzverhalten nach dem Ausfall einer Nord-Süd-Übertragungsleitung bestimmen lässt.

Die Handhabung des Modells wird erleichtert durch das Erstellen und durch die Nutzung geeigneter Bibliothekselemente für Knoten und Leitungen, die durch Matlab-Skript-Dateien systematisch parametrisiert und gegebenenfalls auch einheitlich verändert werden können.

Damit ist die Offline-Simulation problemlos möglich. Die bei der Echtzeitsi-

mulation erreichte Zeitschrittweite von etwa 400 μ s ist ausreichend für den Test von Schutzeinrichtungen, die im Wesentlichen auf betriebsfrequenten Messungen basieren.

Schlussfolgerungen

Die Verwendung von Matlab/Simulink erlaubt praxisgerechte Simulationen einfacher und komplexer dynamischer Vorgänge in elektrischen Energienetzen. Schutz- und Steuereinrichtungen für Netze, Transformatoren, Generatoren und Sammelschienen können nahezu beliebig in die Netzsimulation eingebunden werden, und zwar sowohl als Software-Modell – dies sogar mit der Original-Gerätesoftware («Software-in-the-Loop») –, als auch als reales Gerät in einer Echtzeitsimulation über entsprechende Schnittstellen («Hardware-in-the-Loop»). Auch können mehrere Schutz-/Steuereinrichtungen einschliesslich Kombinationen aus Software-Modell und realen Geräten verwendet werden.

Die erreichbare Genauigkeit hat sich in allen Fällen als ausreichend erwiesen: Ungenauigkeiten durch die Diskretisierung im Zeitbereich sowie die eingesetzten Hardware-Schnittstellen bei Frequenz, Amplitude und Phase lassen sich abschätzen; sie sind normalerweise bedeutungslos oder können kompensiert werden. Die stetig steigende Rechenleistung moderner Standardcomputer ermöglicht Echtzeitsimulationen mit noch vor wenigen Jahren undenkbar großen Netzgrößen und Zeitschrittweiten.

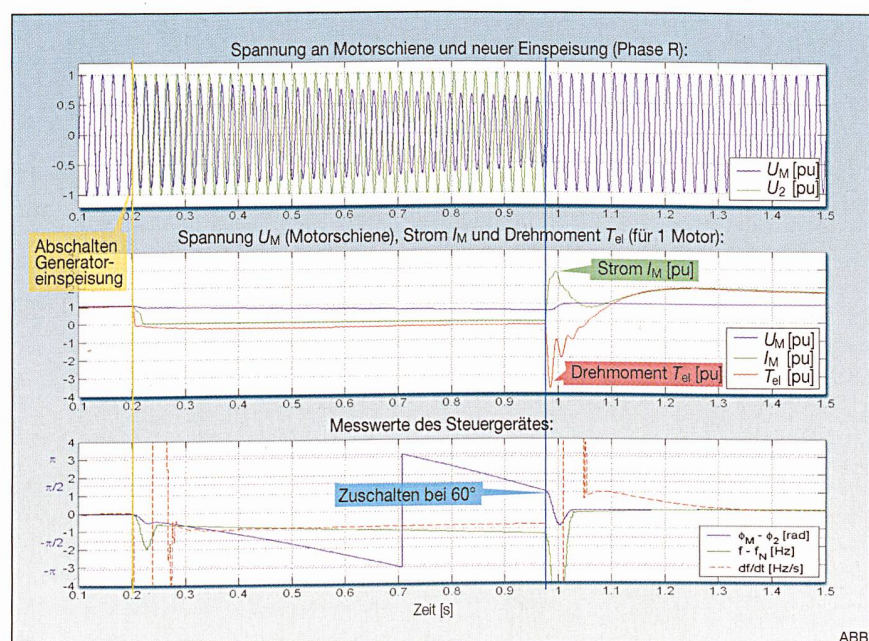


Bild 8 Zeitlicher Ablauf einer Sammelschienen-Schnellumschaltung

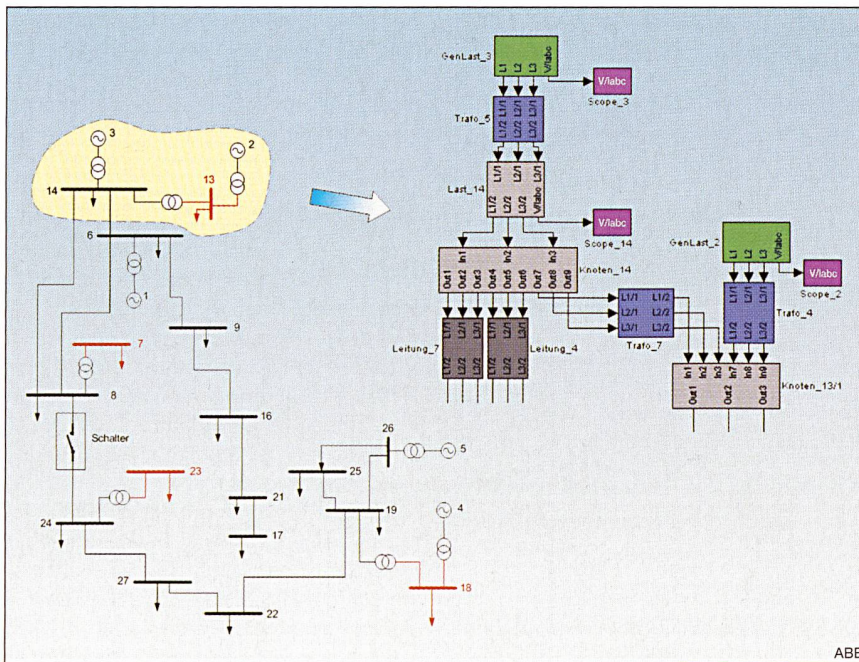


Bild 9 Simulierte Netzkonfiguration und Modell-Ausschnitt für Stabilitätsuntersuchungen

Bei der kosten-, qualitäts- und terminkritischen Softwareentwicklung von Schutz- und Leitsystemen sind besondere Vorteile wie höhere Qualität der Anwendungen bei gleichzeitiger Reduktion der Entwicklungs- und Testkosten offensichtlich, weil bereits in der Entwicklungsphase die endgültige Gerätesoftware mit den gewohnten Debug- und Testwerkzeugen zum Einsatz kommen kann. Für routinemässige Prüfungen der Schutzeinrichtungen in Anlagen der Energieversorgung sind die vielfältigen technischen Möglichkeiten meist nicht notwendig, so dass hier die bekannten portablen Prüfgeräte ihr Einsatzgebiet behalten.

Mit moderner Informations- und Signalverarbeitungstechnik vertraute Anwender dürften die hohe Leistungsfähig-

keit, Flexibilität und Offenheit des universell einsetzbaren Simulationswerkzeugs schätzen.

Die Kosten für die Simulationshardware sind für die gewählte PC-Plattform (Bild 5) als sehr günstig einzuschätzen und die Kosten für die Software-Lizenzen müssen alternativen Lösungen gegenübergestellt werden. Da ein Grossteil der Softwarefunktionalität in der gesamten industriellen Automatisierung zum Einsatz kommt, sind gegenüber spezialisierten Lösungen Kostenvorteile wie auch ein sicherer Support und eine effiziente Weiterentwicklung der Werkzeuge durch den Hersteller zu erwarten.

Die weite Verbreitung und universelle Einsetzbarkeit des Simulationswerkzeugs bei wachsender Bedeutung der Automati-

sierungstechnik lassen erwarten, dass gewonnene Erfahrungen und vor allem erarbeitete Simulationslösungen eine zukunftssichere Investition bedeuten.

Referenzen

- [1] S. Kaiser, B. Kulicke, E. Lerch, O. Ruhle, W. Winter: New Approach for PC-Based Interactive Real-Time Testing of Digital Relays and Controller Structures. 3rd ICDS '99, Västerås, Schweden, 25.-28.05.1999.
- [2] J. Bertsch, C. Carnal, P. Korba, L. Broski, W. Sattlinger: Experiences and Benefits of Systems for Wide Area Monitoring. Western power Delivery Automation Conference, Spokane, USA, 6.-8. April 2004.
- [3] C. Rehtanz, J. Bertsch: Intelligenz verhindert Stromunterbrüche – Weitbereichsschutz ermöglicht höhere nutzbare Übertragungsleistung. Bulletin SEV/VSE, Ausgabe 1/02, 2002.
- [4] M. Larsson, C. Rehtanz, J. Bertsch: Real-Time Voltage Stability Assessment of Transmission Corridors. IFAC Symposium on PP & PSC 2003, Seoul, Korea.

Angaben zu den Autoren

Prof. Dr.-Ing. **Wilhelm Fromm** vertritt an der Fachhochschule Konstanz das Lehrgebiet Automatisierungstechnik mit Schwerpunkt in der elektrischen Energietechnik. Bis 1996 leitete er die Entwicklung für Schutz- und Stationsleittechnik bei ABB Schweiz. Fachhochschule Konstanz, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Braunergerstr. 55, D-78462 Konstanz, fromm@fh-konstanz.de

Dr.-Ing. **Joachim Bertsch** leitet bei ABB Schweiz die Gruppe «Power Systems and Testing». Zusätzlich lehrt er Energiesysteme an der Hochschule für Technik in Rapperswil. ABB Schweiz AG, Utility Automation Systems, CH-5400 Baden, joachim.bertsch@ch.abb.com

¹ Prüfgerät Omicron CMC 156. Omicron electronics GmbH: www.omicron.at

² DigSILENT PowerFactory: www.digsilent.de

³ Matlab/Simulink: www.mathworks.com

⁴ Frühere Bezeichnung: Power System Blockset

⁵ Eine S-Funktion (system function) ist die Beschreibung eines Simulink-Blockes in Matlab oder Maschinen-Code, wobei der Maschinen-Code zurzeit aus C, C++, Ada oder Fortran erzeugt werden kann, für höhere Programmiersprachen (z.B. «C», ADA).

⁶ Vereinfachtes Modell des 400/130-kV-Netzes aus [4].

Ethernet bis an die Maschine

Ein Kommunikationsnetz für das gesamte Unternehmen

Ethernet erschien für den industriellen Einsatz lange Zeit ungeeignet. Inzwischen hat sich diese Technologie im Automatisierungsbereich etabliert. Industrielles Ethernet hat allerdings nur noch wenig mit der über 25 Jahre alten Ursprungstechnologie zu tun. Die Priorisierung von Daten, kombiniert mit dem Ethernet-Standard für Sechsbitt-10-Mbps-Übertragung und die Möglichkeit der Skalierung der Bandbreite von 10 Mbps auf 100 Mbps oder 1000 Mbps und Meistern in der industriellen Kommunikation. Neue Technologien wie echtzeitfähiges Ethernet erhöhen die Stabilität der Automatisierungssysteme zusätzlich.

Ethernet-Netzwerkumgebung: Für industrielle Anwendungen müssen nicht nur die in der Netzwerkumgebung festgelegten Standards, sondern auch die Hardware, die die Kommunikation ermöglicht, angepasst werden. Dies ist bei der Entwicklung von industriellen Ethernet-Netzwerken zu berücksichtigen.

Industrielles Ethernet

Industrielles Ethernet ist eine Variante des Ethernet, die für die Kommunikation in industriellen Umgebungen geeignet ist. Es ist für die Kommunikation zwischen Maschinen und Anlagen in der Industrie geeignet.

Feldbussysteme

Feldbussysteme sind eine Variante des Ethernet, die für die Kommunikation zwischen Maschinen und Anlagen in der Industrie geeignet ist.

Industrielles Ethernet

Industrielles Ethernet ist eine Variante des Ethernet, die für die Kommunikation zwischen Maschinen und Anlagen in der Industrie geeignet ist.



Fachartikel auf dem Internet

www.electrosuisse.ch/v
(Rubrik Bulletin)

BULLETIN