

# Aus der Forschung

## Möglichkeiten für einen digitalen Leitungsdifferentialschutz mit Symmetrischen Komponenten

G. Hosemann, T. Łobos\*)

Ein neues Verfahren für den digitalen Leitungsdifferentialschutz wird vorgestellt. Der Schutz vergleicht die Zeitvorgänge der Symmetrischen Strom-Mitkomponenten am Leitungsein- und -ausgang. Die Symmetrische Mitkomponente wird nach dem SD4c-Algorithmus aus vier aufeinanderfolgenden Abtastwerttripeln ermittelt. Die ersten Untersuchungsergebnisse werden gezeigt. Durch zusätzliche Ermittlung der orthogonalen Zeitfunktion nach dem SD4s-Algorithmus ist es möglich, phasenunabhängige Ansprechzeiten unter einer halben Periode zu erreichen.

A new method for a digital line differential protection is presented. The protection compares the time function of the symmetrical positive-sequence component at the input and output of a transmission line. The symmetrical positive-sequence component is calculated according to SD4c-algorithm from four successive sampled triplets. The first results of investigation are shown. Additional determination of the orthogonal time function according to SD4s-algorithm enables to obtain phase-independent operating time of less than half a period.

### 1 Einführung

Das Prinzip des Leitungsdifferentialschutzes beruht auf dem Vergleich von Meßwerten, die am Anfang und Ende einer zu schützenden Leitung gewonnen werden. Er soll bei einem Fehler innerhalb des Schutzbereichs auslösen, sobald eine vorgegebene Differenzschwelle überschritten wird. Die bei einem Fehler außerhalb dieses Bereichs ablaufenden Vorgänge bedeuten für den Vergleichsschutz selbst im Kurzschlußfall normale Vorgänge. Jeder Vergleichsschutz ist somit zwischen den beiden Meßorten absolut selektiv, kann aber selbst keinen Reserveschutz bilden.

Bei einem Leitungsdifferentialschutz wird in den meisten Fällen die Stromdifferenz als Vergleichsgröße gewählt. Die Anwendung des Stromdifferentialschutzes beschränkt sich auf kurze Leitungen, da die Sekundärkreise der Stromwandler durch Hilfsleitungen über die ganze Länge der Leitung verbunden werden müssen. Um die Anzahl der Hilfsadern zu begrenzen, werden in den meisten Fällen Mischwandler verwendet [1, 2, 3], die an jedem Ende der Leitung aus drei Sekundärströmen einen Mischstrom bilden. Das Windungsverhältnis auf der Primärseite des Mischwandlers ist so gewählt, daß die drei- und zweipoligen Kurzschlüsse möglichst mit gleicher Empfindlichkeit übersetzt werden. Dies kann grundsätzlich nur recht unvollkommen gelingen, wenn man an die unterschiedlichen Außenleiterströme beim zweipoligen Kurzschluß mit Erdberührung denkt. Einpolige Fehler werden mit erhöhter Empfindlichkeit übersetzt, wobei es nicht möglich ist, die Außenleiter gleichzubehandeln.

\*) Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hosemann, VDE, ist Ordinarius des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgung der Universität Erlangen-Nürnberg, und Dr.-Ing. habil. Tadeusz Łobos war z. Z. der Abfassung dieser Arbeit Gastwissenschaftler an derselben Universität. Manuskripteingang: 11. 9. 1986

Die digitale Signalverarbeitung bietet neue Anwendungsmöglichkeiten der Modalkomponenten in der Schutztechnik. Zur Erfassung der Symmetrischen Komponenten wurden bisher analoge RC-Schaltungen angewandt, die sich bei nichtstationären Vorgängen ungünstig verhalten. Die neuen Methoden zur digitalen Bestimmung der Symmetrischen Komponenten [4, 5] weisen bessere dynamische Eigenschaften auf. Sie erlauben es, auf die bisherigen Mischwandler zu verzichten und alle Außenleiter gleichzubehandeln, was der Ansprechempfindlichkeit zugute kommt.

### 2 Leitungsdifferentialschutz mit Symmetrischen Komponenten

Im ungestörten Zustand einer Leitung oder bei einer äußeren Störung unterscheiden sich die zu vergleichenden Ströme nur durch den Lade- und Ableitstrom. Im gestörten Zustand überschreitet der Differenzstrom die Ansprechschwelle des Stromvergleichsschutzes und führt zur Ausschaltung. Der Schwellenwert muß weit über die Lade- und Ableitströme gelegt werden, weil die zur Strommessung verwendeten Stromwandler nicht ideal gleich sind, vor allem, wenn sie bei hohen Stromstärken gesättigt werden. Für den Schwellenwert ist derjenige Außenleiter maßgebend, dessen Meßeinrichtung die größte Empfindlichkeit aufweist. Für die anderen Außenleiter wird die Auslösegrenze dadurch zwangsläufig aber unnötig erhöht.

Vergleicht man jedoch die Symmetrischen Stromkomponenten am Leitungsein- und -ausgang nach Bild 1 miteinander, so werden alle Außenleiter gleichbehandelt. Die Meßwerte werden über Abtasthalteglieder den AD-Wandlern

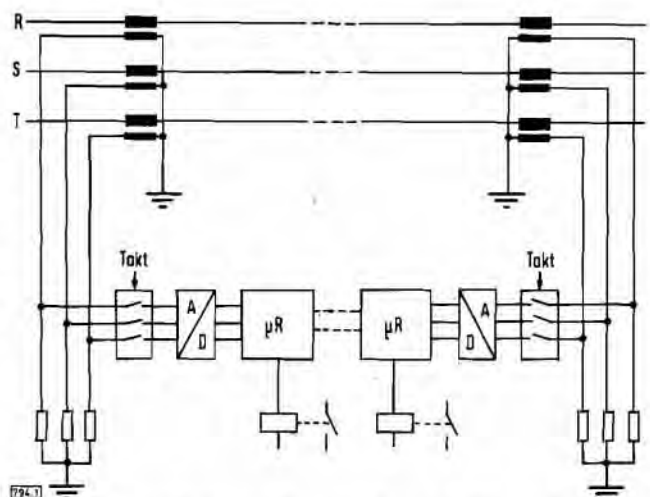


Bild 1. Digitaler Leitungsdifferentialschutz ( $\mu R$  Mikrorechner)

zugeführt, deren Ausgänge mit Mikrorechnern verbunden sind, welche die Mitkomponente nach den im Abschnitt 3 aufgeführten Algorithmen berechnen.

### 3 SD4-Algorithmen zur Berechnung der Symmetrischen Komponenten

Aus der Klasse der in [4] vorgestellten direkten Algorithmen SD für zeitveränderliche Symmetrische Komponenten weisen die Ausführungen mit vier Abtastwerten je Außenleiter die vorteilhaftesten Eigenschaften auf: sie sind schnell und weisen zugleich günstige Filtereigenschaften auf. Sie werden in [5] weiterentwickelt und untersucht. Dabei wird zwischen Algorithmen SD4c und SD4s unterschieden, denen Cosinus- oder Sinusfunktionen zugrunde liegen. Für die Momentanwerte der Symmetrischen Komponenten zum Zeitpunkt  $t_k$  gelten die folgenden Beziehungen [4, Gln. (24a) bis (24c)] für den SD4c-Algorithmus:

$$3g_{0k}^c = [1/(2 \sin^2 \Delta)] [g_{Rk} - g_{Rk-2} + g_{Sk} - g_{Sk-2} + g_{Tk} - g_{Tk-2} - (g_{Rk+1} - g_{Rk-1} + g_{Sk+1} - g_{Sk-1} + g_{Tk+1} - g_{Tk-1}) \cos \Delta],$$

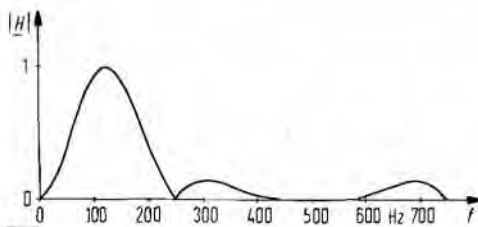
$$3g_{1,2k}^c = [1/(2 \sin^2 \Delta)] [g_{Rk} - g_{Rk-2} - (g_{Rk+1} - g_{Rk-1}) \cos \Delta - 0,5 (g_{Sk} - g_{Sk-2} + g_{Tk} - g_{Tk-2}) + (g_{Sk+1} - g_{Sk-1}) \cos (\Delta \mp \pi/3) + (g_{Tk+1} - g_{Tk-1}) \cos (\Delta \pm \pi/3)],$$

mit

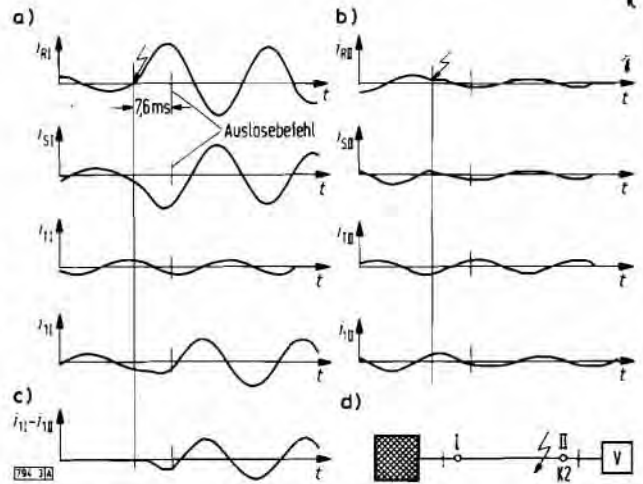
$$\Delta = 2\pi/N \quad \text{Abtastintervall,}$$

$$N \quad \text{Anzahl der Abtastwerte pro Periode.}$$

Die Übertragungsfunktion der Algorithmen weist Nullstellen bei der Frequenz  $f=0$  Hz sowie bei halber und voller Abtastfrequenz [4, 5] auf. Für den Leitungsdifferentialschutz wird die Abtastfrequenz des Algorithmus  $f_{AA} = 500$  Hz gewählt. Dadurch wird neben dem Gleichglied auch die 5. Oberschwingung ausgefiltert. Das Abtastfenster ist also 8 ms und läßt eine Ansprechzeit des Schutzes unter diesem Wert erhoffen. Um die störenden Größen im Frequenzbereich von 250 Hz bis 750 Hz auszublenden, wird ein rekursiver Bessel-Tiefpaß mit der Grenzfrequenz  $f_g = 120$  Hz und der Abtastfrequenz  $f_{AB} = 1000$  Hz vorgeschaltet. Am Filterausgang werden die letzten – um je zwei Abtast Schritte voneinander entfernten – Abtastwerte-



**Bild 2.** Amplitudenspektren der Übertragungsfunktion einer Kombination aus einem Bessel-Tiefpaß 2. Ordnung ( $f_g = 120$  Hz;  $f_{AB} = 1000$  Hz) und dem SD4c-Algorithmus ( $f_{AA} = 500$  Hz) für den Außenleiter R (die Spektren für die Außenleiter S und T sind sehr ähnlich)



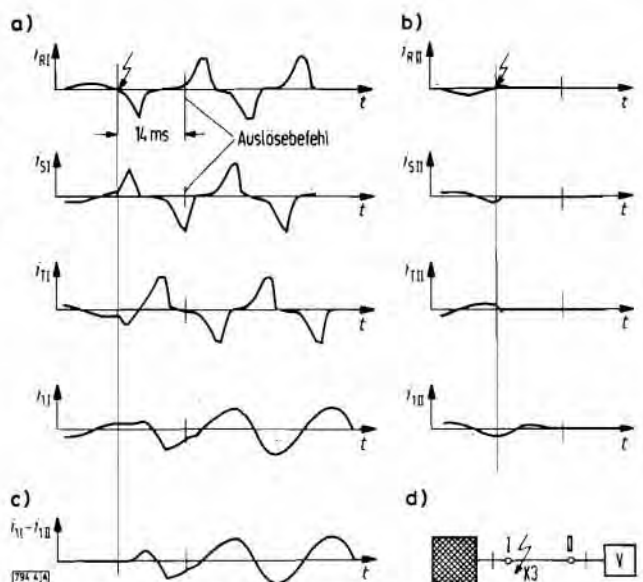
**Bild 3.** Zweipoliger Kurzschluß (K2) auf einer einseitig gespeisten Leitung

- a) Außenleiterströme und Mitkomponente am Leitungsanfang I  
 b) Außenleiterströme und Mitkomponente am Leitungsende II  
 c) Differenz der Strom-Mitkomponenten  
 d) Schaltbild (V Vorbelastung)

tripel zur Berechnung der Mitkomponente verwendet. Als Endergebnis zeigt Bild 2 das Amplitudenspektrum der Kombination aus Tiefpaß und SD4c-Algorithmus. Der Tiefpaß verzögert das Ausgangssignal um etwa 2 ms.

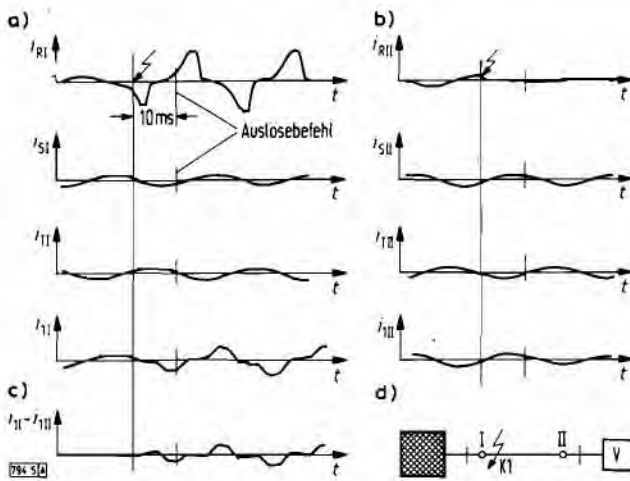
### 4 Untersuchungsergebnisse

Ein Versuchsmuster des Leitungsdifferentialschutzes wurde mit einem Mikroprozessor Intel-8088 für jedes Leitungsende entwickelt und am Drehstrommodell für Netz- und Kraftwerkbetrieb untersucht. Hierzu wurden verschiedene Kurzschlüsse bei einseitiger und zweiseitiger Einspeisung an beiden Enden einer 50 km langen 220-kV-Freileitung simuliert. Der Auslösebefehl kann vom Schutz ausgegeben werden, sobald der Differenzstrom dreimal (im Abstand von je 2 ms) nacheinander die Ansprechschwelle überschritten hat. Die Kommandozeiten sind nicht konstant,



**Bild 4.** Dreipoliger Kurzschluß (K3) auf einer einseitig gespeisten Leitung (Stromwandler am Leitungsanfang I gesättigt)

- a), b), c) und d) wie im Bild 3



**Bild 5.** Einpoliger Erdkurzschluß (K1) auf einer einseitig gespeisten Leitung (Stromwandler am Leitungsanfang I gesättigt) a), b), c) und d) wie im Bild 3

sondern hängen von der Fehlerart und vom Kurzschlußzeitpunkt ab. Der SD4c-Algorithmus legt dem Zeitvorgang der Mitkomponente die Cosinus-Funktion zugrunde. Wenn aber kurz nach dem Kurzschlußeintritt der Differenzstrom einen Nulldurchgang aufweist, werden die Kommandozeiten verlängert. Der ähnlich aufgebaute SD4s-Algorithmus verwendet stattdessen die Sinus-Funktion. Aus SD4c und SD4s lassen sich leicht Betrag und Phase der Symmetrischen Strom-Mitkomponente bilden und der Gegenstation übermitteln. Dadurch werden die Kommandozeiten kürzer und von Stromnulldurchgängen unabhängig.

**Bild 3** zeigt als Beispiel die Vorgänge bei einem zweipoligen Kurzschluß am Ende einer einseitig gespeisten Leitung, mit Vorbelastung. In diesem Fall wurde eine Auslösezeit von etwa 7,6 ms erreicht.

Um das Verhalten des Schutzes bei Wandler-Sättigung am Modell untersuchen zu können, wurden die Stromwandler überbürdet. **Bild 4** und **5** zeigen die Vorgänge bei einem dreipoligen bzw. einpoligen Kurzschluß mit gesättigten Stromwandlern. Beim dreipoligen Kurzschluß ist die Mitkomponente wegen des im **Bild 2** gezeigten Spektrums fast sinusförmig, da die 3. Oberschwingung im Mitsystem nicht vorkommt. Sie ist aber beim einpoligen Erdkurzschluß im **Bild 5** deutlich ausgeprägt.

Die Beispiele sind so gewählt, daß der Mitkomponentenstrom zu einem ungünstigen Zeitpunkt durch Null geht. Dies verlängert die Auslösezeiten auf 10 ms bis 14 ms.

## 5 Ausblick

Die digitale Signalverarbeitung bietet viele neue Möglichkeiten, die sich mit analoger Technik bisher nicht verwirklichen ließen. Die in den letzten Jahren entwickelten Algorithmen zur Ermittlung der Symmetrischen Komponenten verknüpfen die Filterung und Modaltransformation zur selben Zeit.

Aus der Klasse der direkten Algorithmen SD für zeitveränderliche Symmetrische Komponenten weisen die Ausführungen mit vier Abtastwerten Eigenschaften auf, die für die Schutztechnik besondere Vorteile bieten: sie sind schnell und haben zugleich günstige Filtereigenschaften. Alle Außenleiter werden gleichbehandelt. Durch die kurze

Einschwingzeit des Algorithmus ist es möglich, Ansprechzeiten des Schutzes unter einer halben Periode zu erreichen. Dies setzt voraus, daß die Mikrorechner orthogonale Funktionen mit SD4c und SD4s bilden, was mit dem hergestellten Labormuster noch nicht möglich war. Noch kürzere Ansprechzeiten sind denkbar, wenn man zwischen der höheren Abtastfrequenz von z.B. 1000 Hz und der Algorithmusfrequenz 500 Hz unterscheidet und wechselweise jedes zweite Wertetripel transformiert. Wünscht man bei einpoligen Fehlern die Empfindlichkeit zu erhöhen, so kann man mit entsprechenden Algorithmen  $i_0^c$  und  $i_0^s$  ermitteln und auf derselben Signalleitung wie  $i_1^c$  und  $i_1^s$  oder  $|i_1|$  und  $\text{arc}(i_1)$  zur Gegenstation übertragen.

Die Verfasser danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die gewährte Unterstützung.

## Schrifttum

- [1] *Clemens, H.; Rothe, K.: Relaischutztechnik in Energiesystemen. 2. Aufl., Berlin: VEB Verl. Technik, 1980*
- [2] *Statischer Leitungsdifferentialschutz mit zwei Hilfsadern 7SD22. München: Siemens-Gerätehandbuch Nr. C73000-G1100-C40-1*
- [3] *Zurowski, E.: Selektivschutz. In: Hütte (Kapitel 8): Elektrische Energietechnik. Bd. 3 (Netze). Berlin: Springer, 1987 (Veröff. in Vorbereitung)*
- [4] *Hosemann, G.; Lobos, T.: Ermittlung der symmetrischen Komponenten durch Abtastalgorithmen. Arch. f. Elektrotech. 68 (1985) S. 1-16*
- [5] *Hosemann, G.; Lobos, T.: Schnelle Algorithmen für zeitveränderliche symmetrische Komponenten. Arch. f. Elektrotech. 70 (1987) (Veröff. in Vorbereitung)*

## Die Autoren



Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hosemann (64), VDE, ist seit 1975 Ordinarius und Direktor des Instituts für Elektrische Energieversorgung der Universität Erlangen-Nürnberg. Davor war er von 1963 bis 1974 in derselben Funktion am gleichnamigen Institut der Technischen Hochschule Darmstadt tätig. Von 1973 bis 1983 war er Präsident des Technischen Komitees 73 „Kurzschlußströme“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC).

Er ist Ehrenmitglied des VDE-Bezirksvereins Frankfurt, Mitherausgeber des etzArchivs und betätigt sich intensiv in zahlreichen Gremien des Verbands Deutscher Elektrotechniker (VDE), der Deutschen Elektrotechnischen Kommission (DKE), des Deutschen Instituts für Normung (DIN) und anderer technisch-wissenschaftlicher Organisationen.



Dr.-Ing. habil. Tadeusz Łobos (48) ist Dozent am Institut für Energieelektrik der Technischen Hochschule (TH) Wrocław (Polen) und beschäftigt sich mit Netzen und Anlagen der elektrischen Energieversorgung. Er studierte Elektrotechnik an der TH Wrocław, wurde 1968 promoviert und habilitierte sich 1975. Von 1976 bis 1977 war er Stipendiat der Alexander-von-Humboldt-Stiftung an der TH Darmstadt und von 1982 bis 1986 – im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens – Gastwissenschaftler an der Universität Erlangen-Nürnberg.