Möglichkeiten der Messungen bei Simulationen am Modell der Mittelspannungsnetzen

(Possibilities of the Measurements during Simulations on the Model of the Middlevoltage Grid)

Petr Vančata

ABSTRAKT

The article is focused on some problems with measurements during simulations of some kinds of fault on the model of the middlevoltage grid.

1 Einleitung

An der FH Regensburg wird ein Projekt „Distanzschutzrelais bei Erdfehler in Mittelspannungsnetzen“ gelöst. Bei der Arbeit an diesem Projekt wurden Erdfehlersimulationen am Modell der Mittelspannunngsnetzen durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden wichtige Begrenzungen der Messungs- und Simulationsmöglichkeiten gezeigt, die nicht nur bei diesem konkreten Fall gelten, sondern auch verallgemeinert werden können.

In diesem Artikel kann man nur die wichtigsten Messungserkenntnisse der Erdschlußversuche finden. Die ausführlichen Ergebnisse werden in der Arbeit „Distanzschutzrelais bei Erdfehler in Mittelspannungsnetzen – Problem, Simulation“ angeführt.

1.1 Erdfehler in Mittelspannungsnetzen

Bei einem Erdfehler, das heißt bei einer leitfähigen Verbindung zwischen elektrischem Netz und Erde, können deutlich unterschiedliche Situationen entstehen. Alles hängt von der Sternpunktbehandlung des Netzes ab. Man unterscheidet vor allem zwischen Netzen mit direktgeerdetem Sternpunt und Netzen, die den Sternpunkt isoliert, bzw. über eine Petersenspule oder über einen Widerstand indirekt geerdet haben.

1.1.1 Erdkurzschluß

In einem direkt geerdeten Netz entsteht bei einer leitfähigen Verbindung zwischen einem Phasenleiter und Erde ein Erdkurzschluß. Bei dieser Fehlerart ist der Fehlerstromwert relativ hoch und der vom Fehler betroffene Netzteil muß deshalb in kürzester Zeit abgeschaltet werden.

Mit der Methode der symmetrischen Komponenten [1] kann man den Wert des Anfangs-Kurzschlußstromes ableiten:

$$\underline{I}_k'' = \frac{3\underline{U}_{stern}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}$$

Z_1, Z_2 und Z_0 sind hier die Mit-, Gegen- und Null-Impedanzen des Netzes zwischen dem Einspeisungspunkt und der Fehlerstelle.

1.1.2 Erdschluß

In einem isolierten Netz spricht man bei einer leitfähigen Verbindung zwischen einem Phasenleiter und Erde von sogenanntem Erdschluß. Der Fehlerstromwert ist in diesem Fall deutlich kleiner als beim Erdkurzschluß und hängt von der Kapazität des Netzes gegen Erde ab. Diese Netze können auch mit einem Erdschluß betrieben werden, weil der Wert der Leiter-Leiter-Spannungen sich nicht ändert. Für die Größe des Erdschlußstromes kann man ableiten:

$$I_E = 3 \cdot U_{stern} . \cdot \omega \cdot C_E \ ,$$

wobei C_E die Querkapazität des Leiters gegen Erde ist.

Die Leiter-Erde-Spannungen in den vom Erdschluß nicht-betroffenen Phasen steigen auf den verketteten Wert und deshalb droht ein Isolations-Durchschlag, der dann zu einem sogenannten Doppelerdschluß führt. Beim Erdschluß in Phase R gilt:

$$U_{R-E} = 0 \ ; U_{S-E} = U_{T-E} = \sqrt{3} \cdot U_{stern}$$

Dabei entsteht auch zwischen dem Netzsternpunkt und der Erde die Verlagerungsspannung, die den Wert der normalen Leiter-Erde-Spannung hat:

$$U_{0-E} = U_{stern}$$

Die meisten Mittelspannungsnetze werden mit sogenannter Erdschlußlöschung betrieben. Zwischen dem Sternpunkt des Einspeisungstransformators und Erde wird in diesem Fall eine Spule eingeschaltet. Dank der Verlagerungsspannung zwischen diesem Punkt und Erde wird durch diese sogenannte Petersenspule dem kapazitiven Erdschlußstrom ein entsprechender induktiver Strom überlagert. Das heißt, daß der kapazitive Strom an der Fehlerstelle kompensiert wird.

Durch die Petersenspule fließt beim Erdschuß Strom:

$$I_D = \frac{U_{stern}}{\omega \cdot L_D} \ ,$$

wobei L_D die Induktivität der Spule ist. Für den Fall der vollständigen Kompensation muß gelten $I_E = I_D$, daß heißt:

$$L_D = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_E}$$

2 Erkennung von Erdfehlern

Wie unterschiedlich Erdfehler in direkt geerdeten und isolierten bzw. kompensierten Netzen sind, so unterschiedlich müssen auch die Methoden sein, die für ihre Erkennung die Schutzgeräte benutzen.

2.1 Erkennung von Erdkurzschlüsse

Für die Fehler mit hohen Kurzschlußströmen ist eine Überstromanregung ausreichend. Die Ströme in jeder Phase müssen dabei auf Überschreiten eines eingestellten Betrages überwacht werden. Das gilt für alle Kurzschlüsse. Dazu kommt noch die Erkennung eines Erdkurzschlusses.

Für die Bestimmung der fehlerbehafteten Leiterschleifen ist es sehr wesentlich zu erkennen, ob es sich um einen Erdfehler handelt oder nicht. Das Gerät kann über eine Erdstromerfassung verfügen. Die Erdstromerfassung überwacht die Summe der Phasenströme ($I_E = 3.I_0$). Diese Summe kann auch mit einem besonderen Stromwandler gemessen werden.

2.2 Erkennung von Erdschlüssen

In isolierten oder kompensierten Netzen fließt beim einfachen Erdschluß kein Kurzschlußstrom. Da der Netzbetrieb durch einen Erdschluß nicht unmittelbar beeinträchtigt ist, ist eine schnelle Abschaltung auch nicht erwünscht. Der Erdschluß sollte nur erkannt, gemeldet und geortet werden.

2.2.1 Erdschlußerfassung

Weil in diesen Netzen kein Kurzschlußstrom fließt, ist die Überstromanregung für die Erdschlußerkennung nicht ausreichend. Dazu wird die Verlagerungsspannungserfassung benutzt. Die Verlagerungsspannungserfassung überwacht die Verlagerungsspannung ($U_E = 3.U_0$) auf Überschreiten eines eingestellten Betrages und die Anregung erfolgt dann, wenn die Verlagerungsspannung diese einstellbare Schwelle überschreitet.

Beim Erdschluß kann auch die von Fehler betroffene Phase durch einzelne Messungen der Leiter-Erde-Spannung bestimmt werden. Erdschlußbehaftet ist die Phase, deren Spannung zu Null sinkt, in beiden übrigen Phasen steigen dann die Leiter-Erde-Spannungen auf verkettete Werte.

2.2.2 Erdschlußrichtungbestimmung

Die Erdschlußrichtung kann aus der Richtung des Erdschlußstromes bzw. Erdschlußreststromes ermittelt werden. Dieser Strom wird dann auf die Verlagerungsspannung bezogen.

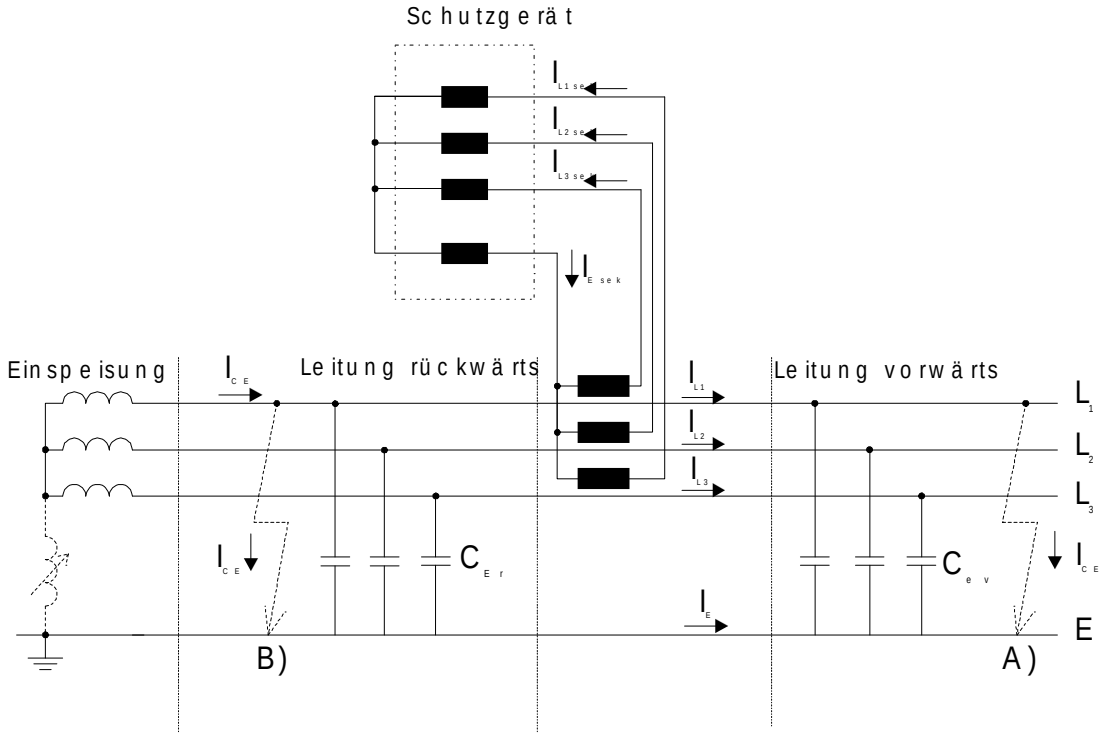

Bild 1: Erdschlüsse vorwärts (A) und rückwärts (B) vom Schutzeinbauort aus.

Zwei einfache Situationen zeigt das Bild 1. Wenn alle Längsparameter vernachlässigt werden, ist aus diesem Bild ist gut zu sehen:

Beim Erdschluß vorwärts (Fall A) sollte für den Erdstrom I_E gelten:

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{CE} \quad ; \quad \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = -\frac{C_{Ev}}{C_{Er} + C_{Ev}} \cdot \underline{I}_{CE}$$

$$\underline{I}_E = -\frac{C_{Er}}{C_{Er} + C_{Ev}} \cdot \underline{I}_{CE}$$

Beim Erdschluß rückwärts sollte für den Erdstrom I_E gelten:

$$\underline{I}_{L1} = 0 \quad ; \quad \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = -\frac{C_{Ev}}{C_{Er} + C_{Ev}} \cdot \underline{I}_{CE}$$

$$\underline{I}_E = +\frac{C_{Ev}}{C_{Er} + C_{Ev}} \cdot \underline{I}_{CE}$$

In isolierten Netzen fließt der Erdschlußstrom I_{CE} als fast rein kapazitiver Strom. Für die Richtung ist demnach der kapazitive Blindanteil des Erdstromes I_E maßgebend.

Bei kompensierten Netzen wird aber ein induktiver Strom von der Petersenspule dem kapazitiven Erdschlußstrom überlagert. Je nach Meßstelle im Netz kann jedoch der resultierende Meßstrom I_E induktiv oder kapazitiv sein. Deshalb sollte der Wirkanteil des Erdstromes I_E zur Richtungsbestimmung herangezogen werden.

3 Simulieren von Erdschlüssen

3.1 Beschreibung des Modells

Zum Modellieren von Erdschlüssen wurde ein Netzmodell benutzt. Dieses Modell wurde als Drehstrommodell ausgeführt und besteht aus einer Kraftwerksnachbildung, dreiphasigen Freileitungsnachbildungen für 220kV bzw. dreiphasigen Kabelleitungen für 20kV, einer Netzeinspeisung und Verbrauchsnachbildungen.

Zum Simulieren von Erdschlüssen wurde das Modell auf eine Nennspannung von 20kV umgeschaltet. In Tabelle 1 sind die Maßstäbe, die Modellnennwerte und die naturlichen Werte zusammengestellt.

	Maßstab	Modellnennwerte	natürliche Werte
Leistung	1 : 9100	1,6 kVA	14,5 MVA
Spannung	1 : 91	220 V	20 kV
Strom	1 : 100	4,22 A	422 A
Impedanz	1 : 0,91	30,3 Ω	27,6 Ω

Tabelle 1: Maßstäbe, Modellnennwerte und natürliche Werte bei 20 kV Nennspannung.

Die Kabelleitungen für 20 kV mit Teillängen von 8 km und 4 km werden durch dreiphasige Π-Glieder für die Phasen R, S, T und die Erdrückleitung E nachgebildet. Wie sie aufgebaut sind, zeigt das Bild 2, die Werte von Widerständen, Kapazitäten und Reaktanzen sind in Tabelle 2.

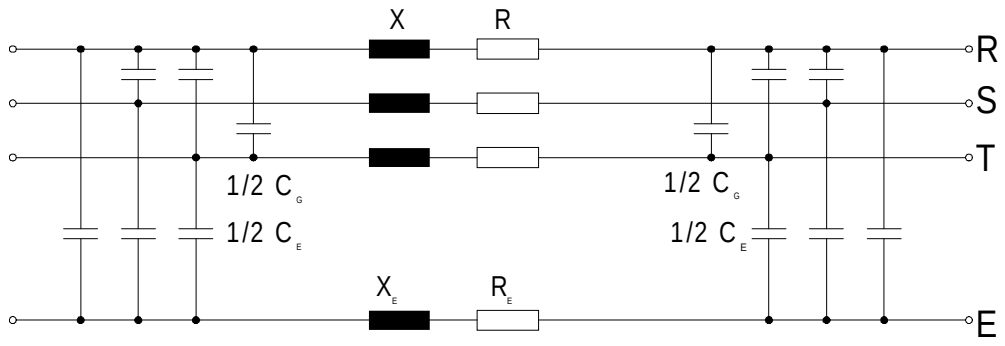

Bild 2: Kabelleitungsnachbildung

	Abschnitt 8 km	Abschnitt 4 km
R [Ω]	3,3	1,65
R_E [Ω]	0,5	0,25
X [Ω]	3,0	1,5
X_E [Ω]	2,3	1,15
C_E [nF]	35	17,5
C_G [nF]	7	3,5

Tabelle 2: Kennwerte der Leitungsnachbildungen, mit dem Modellmaßstab umgerechnet.

3.2 Modellschaltung

Die Erdschlüsse wurden an einer einfachen dreiphasigen Leitung nach Bild 3 durchgeführt

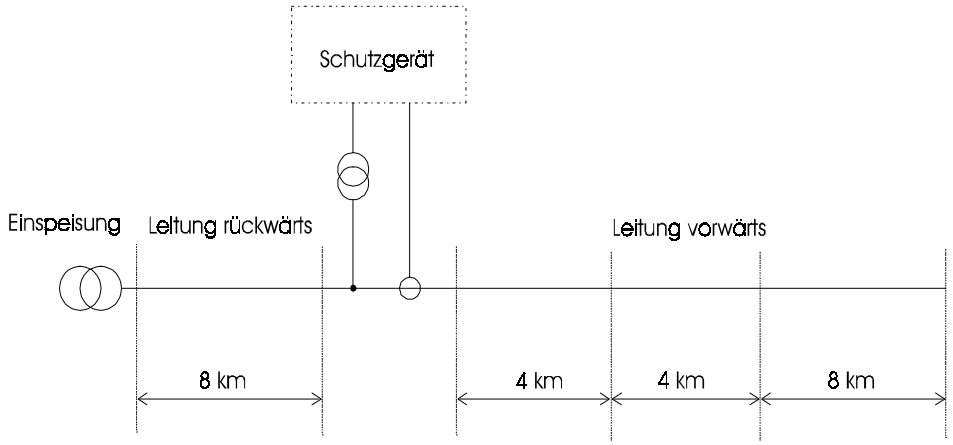

Bild 3: Versuchschaltung

Bei den Versuchen wurden nur die Leitungsmodule, die Einspeisung und die eingebauten Spannungswandler benutzt. Keine andere Modellteile wurden aus Gründen möglichst größter Einfachheit eingeschaltet. Als Stromwandler wurden drei einphasige Transformatoren 10/5A benutzt. Sie wurden nach Bild 4 eingeschaltet, das heißt, daß der Erdstrom von der Summe der Phasenströme abgeleitet wird. Beim Strommaßstab 1:100 wurde im Schutzgerät der Stromwandler-Nennstrom 1000 A eingestellt.

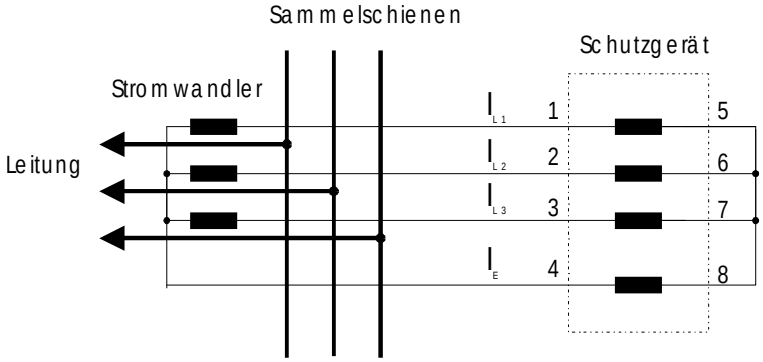

Bild 4: Anschluß an 3 Stromwandler mit I_E-Sternpunkt

Die Spannungswandler waren schon im Modell in den Ausgängen der Sammelschiene zu jeder Leitung eingebaut. Deshalb wurde ein Ausgang der Sammelschiene abgeschaltet und die in Stern geschalteten Spannungswandler zur Spannungsmessung im Schutzgeräteinbauort benutzt.

Das Schutzgerät Siemens SIPROTEC 7SA510 wurde mit einem Personalcomputer direkt verknüpft und über das Programm DIGSI V3.32 gesteuert. Der Sternpunkt des Einspeisungstransformators wurde isoliert, im Schutzgerät wurde Parameter 1102 „Sternpunktbehandlung des Netzes“ demnach der Wert „isoliert“ eingestellt.

3.3 Versuchsverlauf

3.3.1 Erdschlußversuche am Netzmodell – Teil 1

Die Reaktionen des Schutzes auf Erdschlüsse waren zunächst unbefriedigend. Die Richtung zum Erdschluß wurde vom Schutzgerät nicht richtig bestimmt. Beim Erdschluß rückwärts meldete das Schutzgerät Richtung vorwärts. Beim Erdschluß vorwärts meldete das Schutzgerät Richtung undefiniert.

In weiterer Untersuchung wurde festgestellt, daß der Erdstrom beim Erdschluß vorwärts deutlich kleiner als bei der Richtung rückwärts vom Schutzgerät gemessen wurde. Das war die wahrscheinlichste Ursache der Bestimmung von „undefinierter Richtung“ beim Erdschluß vorwärts.

3.3.2 Direkte Messung der Erdschlußströmen am Netzmodell

Weil das Schutzgerät bei Erdschlüssen am rein kapazitiven Modell richtig reagierte, wurde eine direkte Messung der Stromgrössen bei Erdschlüssen am Netzmodell durchgeführt.

Zuerst wurden bei der Messung nur vier Leitungsabschnitte nach dem Bild 3 eingeschaltet. Die Stromgrößen wurden in fünf Meßorten für einen Fehlerfreien Stand der Leitung und für die Kurzschlüsse in drei Punkten gemessen. Beim Erdschluß am Ende der Leitung floß der Erdstrom I_E entlang der Leitung gleichmäßig über die Leiter-Erde-Kapazitäten in Leiter L_2 und L_3 und sinkt deswegen in Richtung zum Einspeisungstransformator. Der Strom I_{L1} fließt genauso gleichmäßig über die Leiter-Leiter-Kapazitäten und sinkt in Richtung zum Erdschluß. Diese Messung erfüllte die Erwartungen und deshalb wurden ihre Ergebnisse als richtig betrachtet.

Bei der nächsten Messung wurden nun zur Leitung die Spannungswandler eingeschaltet. Die Stromgrößen haben sich danach sehr deutlich geändert. Es war gut zu sehen, daß der Erdstrom von der Fehlerstelle zum Einbauort der Wandler stieg! Für eine Erklärung dieser Änderungen wurden die Ergebnisse der Messungen ohne Spannungswandlern benutzt. Setzen wir voraus, daß der Erdstrom in der Schaltung ohne Spannungswandlern rein kapazitiv ist, dann fließt er über die Leiter-Erde-Kapazitäten in Leiter L_2 und L_3. Diese Querströme sollten sich nicht ändern.

Wenn dann nach dem Abfließen dieser kapazitiven Querströme der Erdstrom nach jedem Leitungsabschnitt steigt, muß er teilweise induktiv sein. Wenn er kapazitiv gewesen wäre, würde seine Größe nach dem Abfließen

eines kapazitiven Querstroms sinken. Wenn er aber rein induktiv gewesen wäre, müßte seine Größe nach dem Abfließen dieses kapazitieven Querstroms um dieselbe Größe steigen.

Zur Bestätigung dieser Ergebnissen war es leider unmöglich direkte Messungen der Phasenverschiebung zwischen Ströme und Spannungen durchzuführen. Zur Disposition waren nur cosϕ–Messer und Watt-Messer mit relativ großem Selbstverbrauch und kleiner Empfindlichkeit. Der Selbstverbrauch der Messgeräte war vergleichbar mit den gemessenen Strömen und die Situation bei der Simulierung wurde durch diese Selbstverbrauch völlig geändert.

Aus den Messungsergebnissen war auch klar, daß der größte Teil des Erdstromes zwischen dem Spannungswandlereinbauort und der Fehlerstelle floß. Die Erdströme zwischen Wandlereinbauort und Einspeisung und vor der Fehlerstelle waren gleich groß wie die Erdströme bei der Messung ohne Spannungswandler.

Aus allen diesen Erkenntnissen kann man ableiten, daß beim Einschalten der Spannungswandler das Netzmodell durch ihre Induktivität überkompensiert wurde. Das Modell verhält sich nicht wie ein isoliertes Netz, sondern wie ein überkompensiertes Netz, der Erdstrom hatte den induktiven Blindanteil.

Wie in Kapitel 2.2.2 gesagt wurde, ist für die Richtungbestimmung im isolierten Netz der Blindanteil des Erdstromes I_E maßgebend, weil er immer kapazitiv ist. In kompensierten (gelöschten) Netzen kann aber nach Meßstelle im Netz der resultierende Meßstrom I_E jedoch induktiv oder kapazitiv sein. Deshalb sollte der Wirkanteil des Erdstromes I_E zur Richtungsbestimmung herangezogen werden. Die Reaktionen des Schutzes auf Erdschlüsse waren unbefriedigend, weil der Parameter „Sternpunktbehandlung des Netzes“ im Schutzgerät auf den Wert „isoliert“ eingestellt wurde.

3.3.3 Erdschlußversuche am Netzmodell – Teil 2

Nach dem Einstellen des Parameters „Sternpunktbehandlung des Netzes“ auf den Wert „gelöscht“, wurden neue Erdschlußversuche durchgeführt. Die Reaktionen des Schutzgerätes verbesserten sich sehr deutlich. Die Erdschlußrichtung wurde nie mehr umgekehrt bestimmt.

Vergleichung der Versuchsergebnissen mit verschiedenen Einstellungen des Parameters 1102 ist in Tabelle 3.

Parameter 1102		„isoliert“			„gelöscht“		
SW-Einbauort	Erdschlußrichtung	I_{EW} [mA]	I_{EB} [mA]	Meldung	I_{EW} [mA]	I_{EB} [mA]	Meldung
rückwärts	Rückwärts	0	**-4**	ES undefiniert	**0**	-4	ES undefiniert
	Vorwärts	+15	**-6**	**ES rückwärts!**	**+15**	-4	**ES vorwärts!**
vorwärts	**Rückwärts**	-16	**+7**	**ES vorwärts!**	**-16**	+8	**ES rückwärts!**
	Vorwärts	0	**+1**	ES undefiniert	**0**	+1	ES undefiniert

Tabelle3: Vergleichung der Versuchsergebnissen

Wie schon gesagt, der größte Teil des Erdstromes floß zwischen dem Spannungswandlereinbauort und der Fehlerstelle. Wenn die Spannungswandler zwischen dem Stromwandlereinbauort und der Fehlerstelle eingebaut wurden, konnte das Schutzgerät aus diesem Grund die Erdschlußrichtung nicht richtig bestimmen, weil die Größe des Erdstromes am Stromwandlereinbauort zu klein war. In diesem Fall meldete das Schutzgerät „Richtung undefiniert“. Wenn der Parameter „Sternpunktbehandlung des Netzes“ als „isoliert“ eingestellt wurde, war für Richtungsbestimmung der Blindanteil des Erdstromes I_{EB} maßgebend, bei Einstellung auf den Wert „gelöscht“ war der Wirkanteil I_{EW} maßgebend.

3.4 Abschluß von durchgeführten Messungen

Bei Messungen bei der Erdfehlersimulationen am Mittelspannungsnetzmodell wurden wichtige Begrenzungen gezeigt. Wegen dem Einfluß der eingeschalteten Spannungswandlern war es unmöglich das Verhalten des isolierten Netzes beim Erdschluß zu simulieren.

3.5 Vorschlag zur Problemlösung

Wegen der Benutzung der Spannungswandler mit Induktivem Charakter war das isolierte Modell kompensiert. Wenn statt induktiven Wandler kapazitieve benutzt würden, wäre dieses Problem gelöst. Mann muß dann aber mit der Wandlerkapazität rechnen, weil diese Kapazität dann die Leitungskapazität vergrößert und das Modell simuliert dann das Verhalten einer längeren Leitung.

4 Abschluß

Bei Messungen am Modell des Mittelspannungsnetzes entsprechen die Messungsergebnisse bei allen Kurzschluß- und Erdkurzschlußversuche den Erwartungen. Nur bei der Erdschlußsimulation verhält sich das Modell ganz anders als ein isoliertes Netz wegen dem Einfluß der eingebauten Spannungswandler. Aus diesem Grund kann dieses Modell zur Erdschlußsimulation nicht benutzt werden. Zur Problemlösung müßten diese eingebaute Spannungswandler abgeschaltet und andere Spannungswandler mit kapazitiven Prinzip benutzt werden.

Bei allen technischen Messungen ist es sehr wichtig den Einfluß der Messgeräte und ihrer Wandler zu beschränken. Bei der Messungen an Modellen mit sehr kleinen Messgrößen ist es noch viel wichtiger als bei den Messungen an realen Elektroenergieanlagen. Je größer dabei der Modellmaßstab ist, desto größer ist der Einfluß der Meßgeräte. Die Messergebnisse am Modell können dann ganz andere Erkenntnisse als in der Praxis liefern, im ungünstigsten Fall können sich die Ergebnisse in der Praxis und am Modell widersprechen. Deshalb kann man sagen, daß bei jedem Benutzung eines Modells das Risiko steigt, daß die Messergebnisse verzerrt sind.

Literatur:

[1] Birkmann, Gerhart: Vergleich der Sternpunkt-Behandlung in 110 kV-Netzen; Abschlußarbeit FH Regensburg 1985

[2] Digitaler Distanzchutz für Mittelspannungsnetze SIPROTEC 7SA510; Gerätehandbuch; Siemens AG 1997

[3] Vančata, Petr: Distanzschutzrelais bei Erdfehler in Mittelspannungsnetzen – Problem, Simulation; FH Regensburg 2000

Článek byl zpracován v rámci výzkumného záměru MSM 23 22 00008, ZČU v Plzni

Ing. Petr Vančata, Ph.D. student

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita,

Sady Pětatřicátníků 14, 306 14 PLZEŇ, P. O. box 314, Česká Republika

E-mail: VANCATA3@kee.zcu.cz

TEL: 00420/19/7237461-5/172, FAX 00420/19/7220019