

DOPPELERDSCHLUSS IN MITTELSPANNUNGSNETZEN

Martin Procházka

1 ABSTRACT

Dieser Eintrag beschreibt die Problematik von Doppelerdschlüssen in einem Mittelspannungsnetzen. Es wurde eine Messung an einem Netzmodell mit eingebauter Distanzschutz durchgeführt, und der Eintrag enthält Beschreibung und die Ergebnisse von der Modelation.

2 EINLEITUNG

Die meisten distribuierte Energiequellen sind in Mittelspannungsnetzen eingesetzt, die als Vermaschte Netze betrieben würden. Eine wichtige Frage für die Versorgungsstabilität ist die schnelle und richtige Abschaltung von Fehlern. Da ein einfacher Erdschluß keine Abschaltung benötigt, muss man sich auch mit dem Doppelerdschluß beschäftigen.

Mit Zusammenarbeit von Westböhmer Universität in Pilsen wurde an der Fachhochschule Regensburg ein Projekt „Distanzschutzrelais beim Erdfehler in Mittelspannungsnetzen“ gelöst. Ein Motiv dazu waren Probleme mit falschen Reaktionen der Distanzschutzgeräte bei Doppelerdschlüssen. Es wurden Doppelerdschlüsse an dem Modell des Mittelspannungsnetzes durchgeführt. Dabei wurde ein Distanzschutz ins Modell geschaltet.

Die Ergebnisse von diesen Projekten können auch zur Diskussion um die Einsetzung von distribuierten Energiequellen beitragen.

3 FEHLERARTEN IN ISOLIERTEN NETZEN

3.1 ERDSCHLUSS

Von einem isolierten Netz spricht man bei einer leitfähigen Verbindung zwischen einem Phasenleiter und Erde vom Erdschluß. Einpolige Erdschlüsse stellen in den isolierten Netzen keinen Kurzschluß dar, da nur ein kleiner kapazitiver Erdstrom fließt. Dieser Strom hängt nur von der Erdkapazität des Netzes gegen Erde ab. Deshalb kann das Netz mit dem Erdschluß noch einige Stunden weiter betrieben werden, bis der Erdschluß gefunden und durch Abschaltung der fehlerhaften Leitung beseitigt ist. Für die Anzeige des Erdschlusses werden empfindliche Erdschlußrichtungsrelais verwendet.

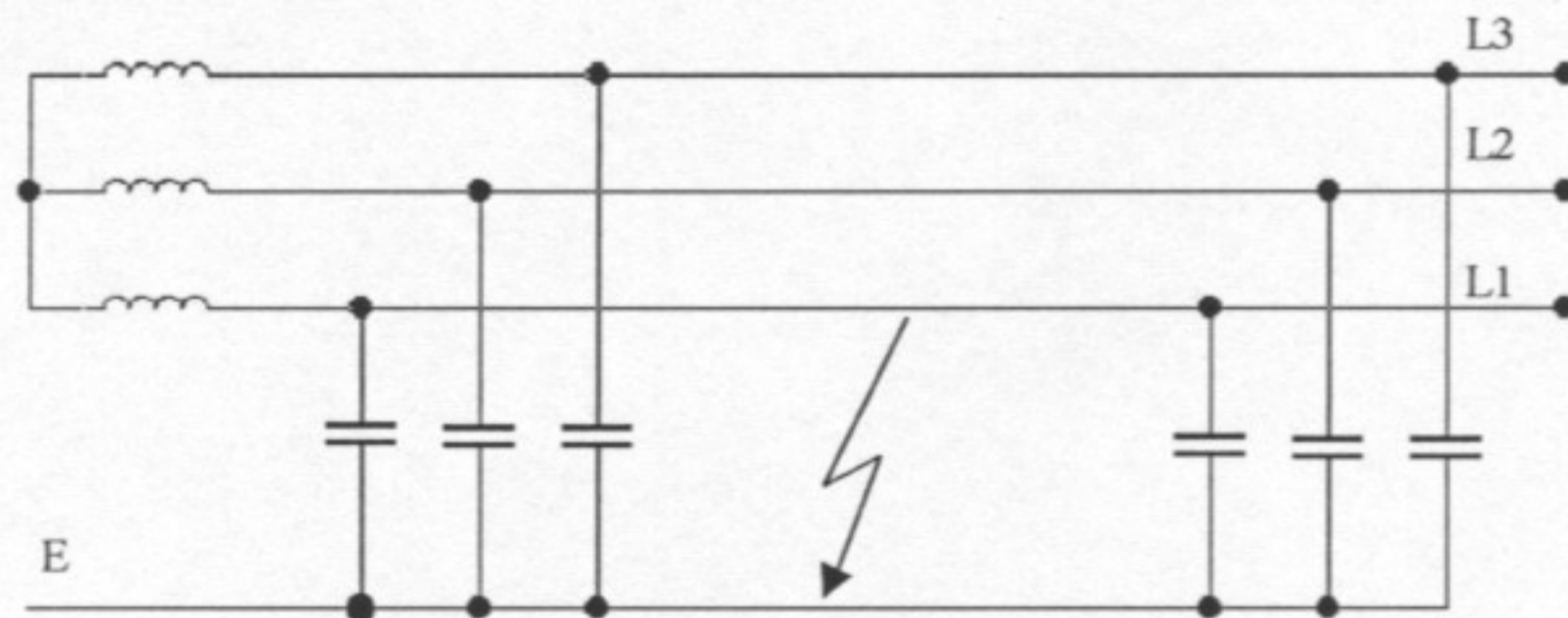


Bild 1 Erdschluß

3.2 DOPPELERDSCHLUSS

Durch die Anhebung der Phase-Erde Spannung in gesunden Phasen beim Erdschluß auf der $\sqrt{3}$ -fachen Wert steigt die Gefahr, dass an einer anderen Stelle im Netz ein weiterer Erdschluß auftritt. Der bisher einpolige Fehler weitet sich dann zu einem Doppelerdschluß aus. Die Auswirkungen sind dem zweipoligen Kurzschluß vergleichbar, wobei der Kurzschlußstrom von einem Erdschlußpunkt (Fußpunkt) dem anderen über Erde erfolgt. In diesem Fall spricht der Netzschutz an und löst die zugehörigen Leitungsschalter aus.

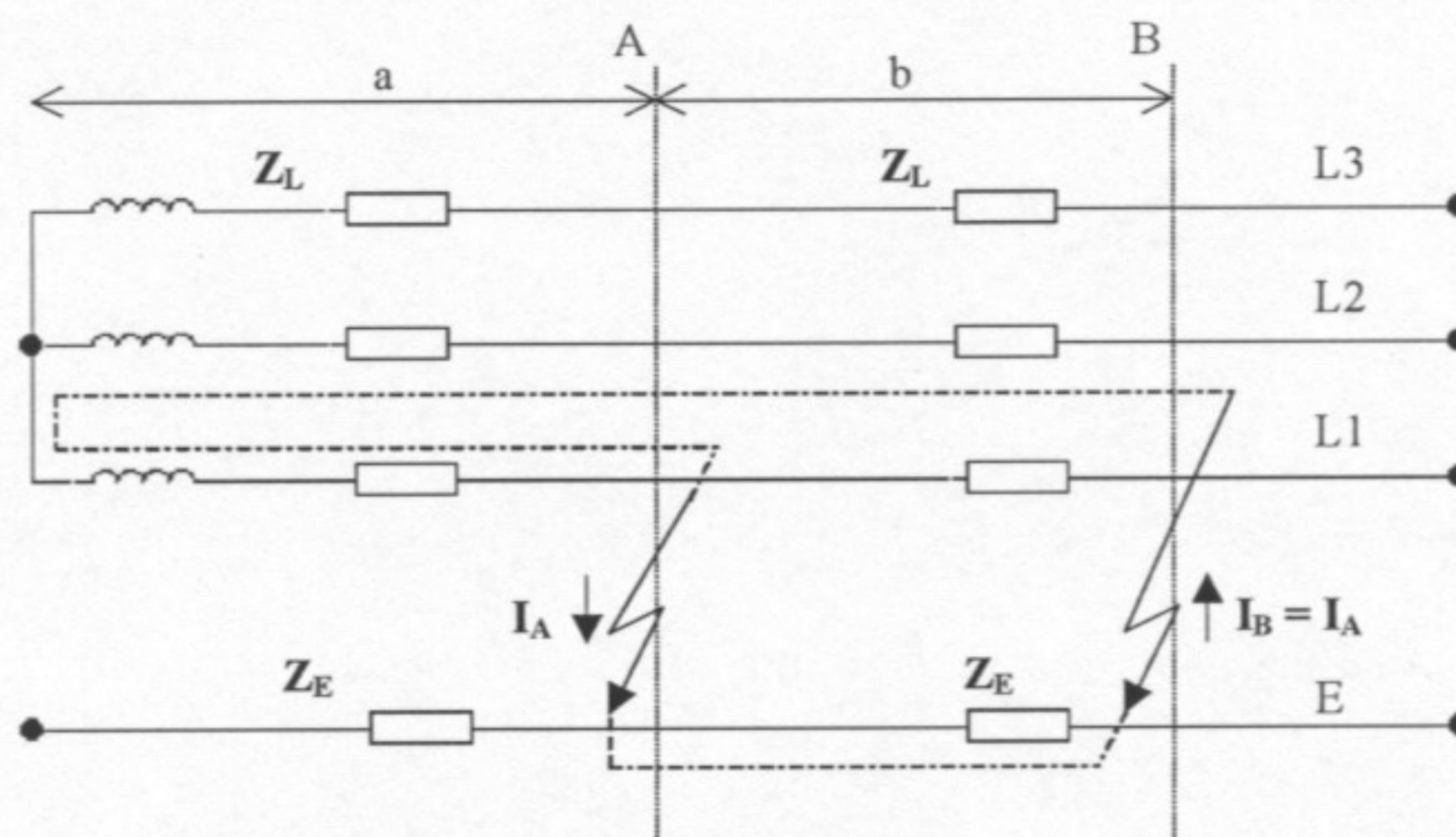


Bild 2 Doppelerdschluß

Im Unterschied zu zwei- und dreipolige Kurzschlüssen ohne Erdberührung ist die Ausschaltung eines Doppelerdschlusses jedoch mit Komplikationen verbunden. Der üblicherweise verwendete Netzschutz ist nämlich nur in der Lage, den vom Schutzrelais weiterentfernten Fehler zu erfassen und auszuschalten. Der andere Fehler bleibt bestehen, da der Ort eines einzelnen Dauererdschlusses meßtechnisch schwer zu ermitteln ist. Dadurch ist die Gefahr eines erneuten Durchschlags an einer weiteren Stelle gegeben. Dieser Vorgang kann zu Mehrfacherdschlüssen führen, die Leitung Ausschaltungen zur Folge haben und damit die Netzsicherheit gefährden [6].

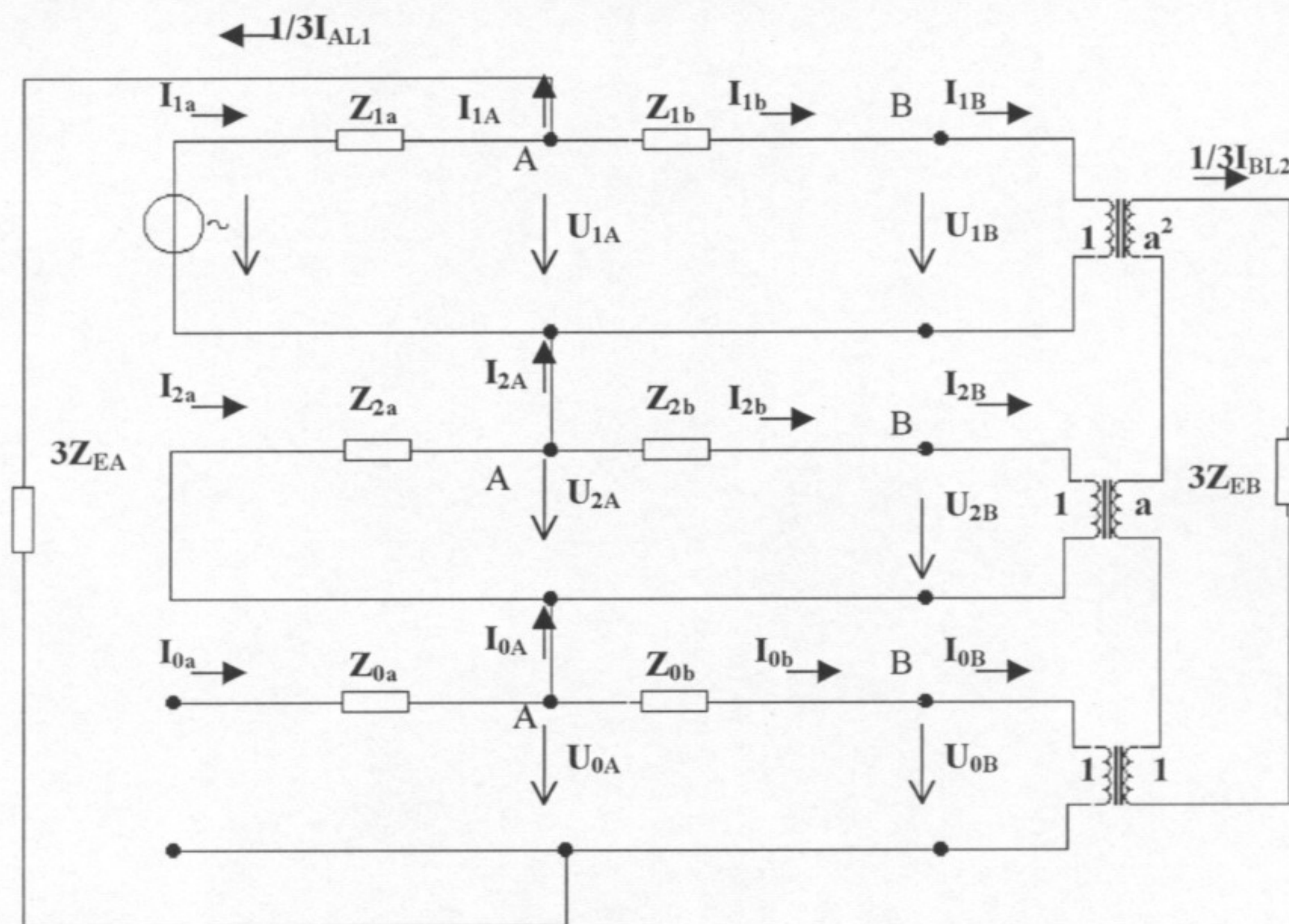


Bild 3 Berechnungsschaltung bei Anwendung von symmetrischen Komponenten [5]

Die Berechnung eines Doppelerdschlusses ist ziemlich kompliziert. Bild 3 zeigt die Ersatzschaltung bei Anwendung von symmetrischen Komponenten mit komplexen Übertragern. Oft kann bereits günstiger sein, auf die Transformation zu verzichten und direkt im L1, L2, L3 System zu rechnen. Die Koeffizienten der Systemgleichungen im L1, L2, L3 System ermittelt man am zweckmäßigsten aus den Mit- Gegen- und Nullimpedanzen.

Eine weitere Möglichkeit, um die Verhältnisse beim Doppelerdschluß zu ermitteln, ist Verwendung von einem Netzmodell. Dort lassen sich verschiedene Situationen einfach zu modellieren und die Fehlerströme bzw. -spannungen zu messen. Diese Methode wurde benutzt, weil sie direkte Verknüpfungen mit einem Schutzgerät ermöglicht.

4 MODELATION EINES DOPPELERDSCHLUSSES

4.1 NETZMODELL

Zur Modellation von Fehlerfällen 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.

Bei unseren Untersuchungen wurde das Modell einer 20kV Kabelleitung mit isolierten Sternpunkt benutzt. In die Tabelle 1 sind die Maßstäbe, die Modellnennwerte und die natürlichen 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 L1, L2, L3 und die Erdrückleitung E nachgebildet. Wie sie aufgebaut sind, zeigt das Bild 4, die Werte von Widerständen, Kapazitäten und Reaktanzen sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

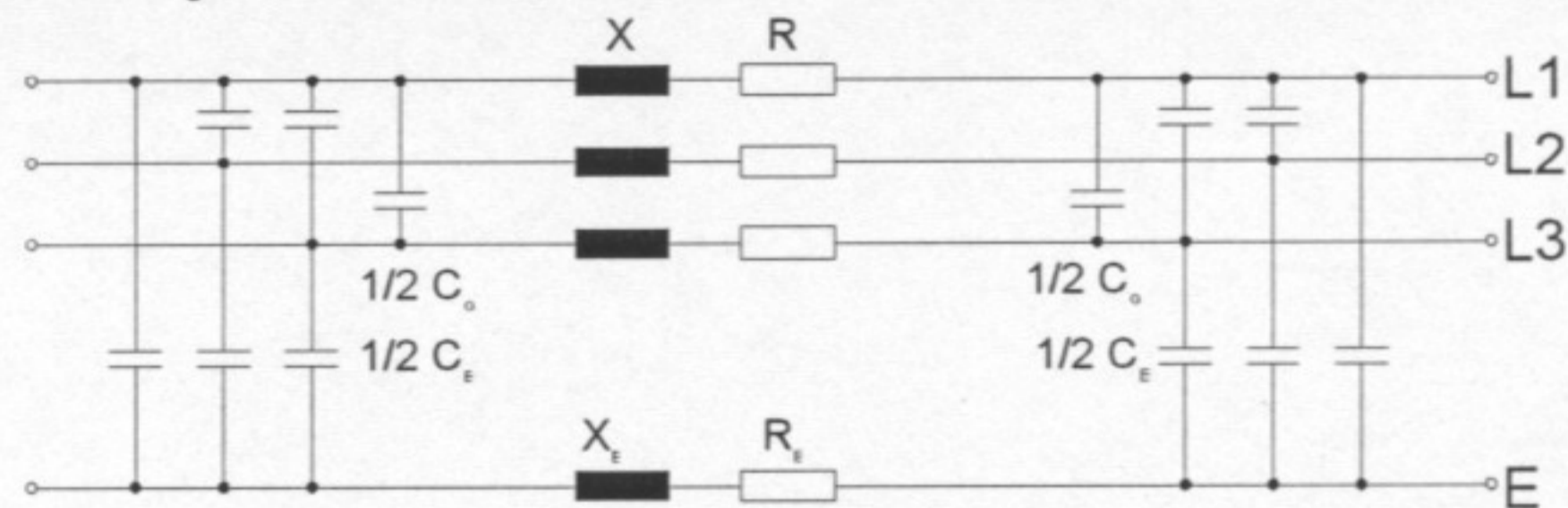


Bild 4 Kabelleitungsnachbildung

| | 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.

4.2 EINSEITIG GESPEISTE LEITUNG

Der einfachste Fall von Doppelerdschluß kann an der einseitig gespeisten Leitung auftreten. Eine theoretische Berechnung wäre in diesem Fall sehr einfach. Dazu ist sogar keine Transformation in symmetrische Komponenten notwendig.

4.2.1 MODELLSCHALTUNG

Die Doppelerdschlüsse wurden an einer einfachen dreiphasigen Leitung nach Bild 5 durchgeführt. Bei Versuchen wurden die Einspeisung- und die Leitungsmodule benutzt. Im 0. bzw. im 12. km wurde das Schutzgerät SIPROTEC 7SA510 eingebaut. Die Fußpunkte des Doppelerdschlusses haben am 8. und am 16. km gelegen. Die Fehlerströme und -spannungen wurden aus der Störschreibung des Schutzes ermittelt. Das hatte den Vorteil, daß keine zusätzliche Meßgeräte gebraucht werden mußten. Nur als Kontrollmessung wurden Ströme an den Fehlerorten gemessen.

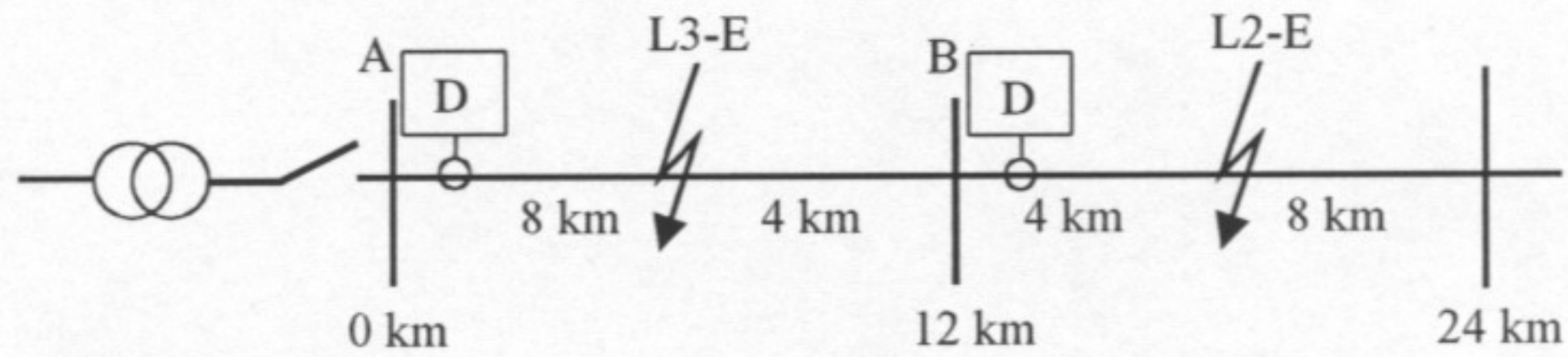


Bild 5 Modellschaltung

4.2.2 VERSUCHVERLAUF

Weil nur ein Distanzschutz zu Verfügung war, musste der Versuch zweimal durchgeführt werden. Einmal wurde der Schutz in die Stelle A eingebaut, bei zweiter Durchführung wurde der Schutz in die Stelle B eingebaut.

Im fehlerfreien Zustand wurde die Leitung zur Netzeinspeisung eingeschaltet. Dann konnte der Doppelerdschluß auftreten. Als Distanzschutz ausgelöst hat (durch eine Lampe signalisiert), wurde die Leitung sofort abgeschaltet. Der Kurzschluß darf nicht lange dauern, sonst spricht ins Modell eingebaute Schutzeinrichtung an. Aus der Distanzschutz wurden Störmeldungen und Störschreibungen ins Rechner übertragen und dort verarbeitet.

| | | Schutz im A | Schutz im B | |
|-------------|--|---------------------------------------|----------------|------------|
| g | Störmeldun | Distanzanregung im Phasen | L2 - L3 | |
| | 369x | | | |
| | 370x | Distanz ausgewählte Phasen | L23 vorwärts | |
| | 1116 | FO Fehlerortberechnungsschleife | L2 - L3 | |
| | 1119 | FO Errechnete Fehlerdistanz | D = 16,9 km | |
| | 1118+1117 | FO Errechnete Fehlerimpedanz sek. Z | 24,74 + j28,73 | |
| 1114+1115 | FO Errechnete Fehlerimpedanz prim. Z | 4,95 + j5,75 | | |
| Störschrieb | U1 (kV) | | 16,57∠133° | 16,05∠137° |
| | U2 (kV) | | 9,12∠52,1° | 2,84∠58° |
| | U3 (kV) | | 3,59∠-135,4° | 1,28∠-101° |
| | I1 (A) | | 0 | 0 |
| | I2 (A) | | 837∠0° | 849∠0° |
| | I3 (A) | | 837∠0° | 0 |
| | I _E (A) | | 0 | 849∠0° |

Tabelle 3 Schutzreaktionen bei Doppelerdschluß an einer einseitig gespeisten Leitung

Als Fehlerstrom nehmen wir die mittlere Wert $I_k = 843$ A. Die Fehlerstromschleife könne jetzt ins Schema 6 gezeigt werden.

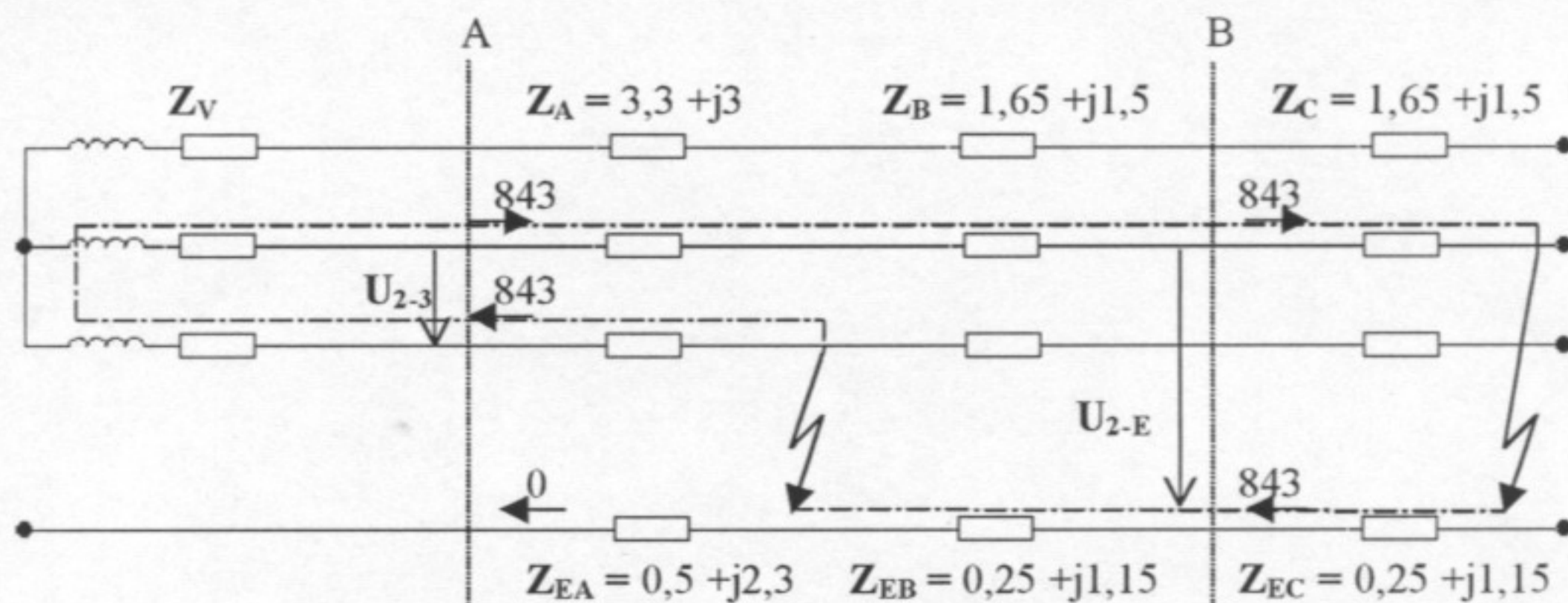


Bild 6 Doppelerdschluß an einem einseitig gespeiste Leitung

4.2.3 THEORETISCHE UND PRAKTISCHE FEHLERORTBESTIMMUNG

Leiten wir jetzt ab, welchen Fehlerimpedanz der Schutz theoretisch ausgeben soll. Mit dem Fehlerwiderstand wurde nicht berechnet, weil am Netzmodell auch kein verwendet wurde. Der Reaktanzbelag X'_{prim} kann man aus der Impedanz Z_A (8 km) ermitteln.

$$X'_{\text{prim}} = X_A / 8 \text{ km} = 3 \Omega / 8 \text{ km} = 0,375 \Omega / \text{km} \quad (1)$$

Einbautort A

Die Fehlerströme fließen nur in Phasen L2 und L3. Es kommt also zur Distanzanregung in diesen Phasen (L2 – L3) und zu der Fehlerortberechnung werden auch diese Phasen gewählt. (Schleife L2 – L3). In den Phasen L2 und L3 fließt derselbe Strom und gilt dann:

$$I_{L2} = -I_{L3} = I_k \quad (2)$$

$$U_{2-3} = I_k (Z_A + Z_A + Z_B + Z_C + Z_{EC} + Z_{EB}) \quad (3)$$

Die Fehlerimpedanz wurde ermittelt als:

$$Z_{2-3A} = \frac{U_{2A} - U_{3A}}{I_{L2} - I_{L3}} = \frac{U_{2-3}}{I_{L2} - I_{L3}} \quad (4)$$

Setzen wir jetzt (2) und (3) in (4) ein und bekommen wir die Fehlerimpedanz

$$Z_{2-3A} = \frac{U_{2-3}}{2I_k} = \frac{I_k (Z_A + Z_A + Z_B + Z_C + Z_{EC} + Z_{EB})}{2I_k} = Z_A + \frac{Z_B + Z_C}{2} + \frac{Z_{EC} + Z_{EB}}{2} \quad (5)$$

Das ist eine mittlerer Impedanz bezogen auf die Entfernung zu beiden Fußpunkten. Das Impedanz hat Wert von $Z_{2-3A_{\text{prim}}} = 7,1 + j8,3 \Omega$. Und die Fehlerentfernung wurde berechnet:

$$l = \frac{X}{X'} = \frac{8,3}{0,375} = 15,06 \text{ km} \quad (6)$$

Einbautort B

Der Fehlerstrom fließt nur in Phase L2 und in Erde. Es kommt also zur Distanz Anregung in diese Phase L2 und in Erde (L2-E). Zu der Fehlerortberechnung wird Schleife L2 – E gewählt. In Phase L2 und in Erde fließt derselbe Strom und gilt dann:

$$I_{L2} = -I_E = I_k \quad (7)$$

$$U_{2-E} = I_k (Z_C + Z_{EC}) \quad (8)$$

Die Fehlerimpedanz wurde ermittelt als:

$$Z_{2B} = \frac{U_{2-E}}{I_{L2} - K_E \cdot I_E} \quad (9)$$

Und wenn K_E richtig eingestellt wird $K_E = Z'_E / Z'_L = Z_{CE} / Z_C$, dann ergibt der Distanzschutz die richtige Impedanz. Setzen wir jetzt (7) und (8) ins (9) ein, bekommen wir das Fehlerimpedanz

$$Z_{2B} = \frac{U_{2-E}}{I_k + K_E \cdot I_k} = \frac{I_k (Z_C + Z_{EC})}{I_k \left(1 + \frac{Z_{EC}}{Z_C} \right)} = Z_C \frac{Z_C + Z_{EC}}{Z_C + Z_{EC}} = Z_C \quad (10)$$

Das Impedanz hat Wert von $Z_{C_{\text{prim}}} = 1,65 + j1,5 \Omega$. Und die Fehlerentfernung wurde berechnet

$$l = \frac{X}{X'} = \frac{1,5}{0,375} = 4 \text{ km} \quad (11)$$

Es ist interessant zu berechnen, was für eine Fehlerimpedanz hätte der Distanzschutz in A für ausgewählte Schleife L3-E berechnet. Damit zu diesem Fall kommen könnte, müßte die Anregung auch im Erde entstanden und die Bevorzugung müßte an die Phase L3 eingestellt werden. Dieser Fall tritt aber nie, weil in A kein Erdstrom fließt.

Die Spannung U_{3-E} berechnet sich:

$$U_{3-E} = I_k \cdot Z_A \quad (12)$$

Die Fehlerimpedanz wurde ermittelt als:

$$Z_{3A} = \frac{U_{3-E}}{I_k - K_e \cdot 0} \quad (13)$$

Das Distanzschutz ergibt die richtige Impedanz. Setzen wir jetzt (12) ins (13) ein, bekommen wir die Fehlerimpedanz

$$Z_{3A} = \frac{U_{3-E}}{I_k} = \frac{I_k \cdot Z_A}{I_k} = Z_A \quad (14)$$

Das Impedanz hat Wert von $Z_{Aprim} = 3,3 + j3 \Omega$. Und die Fehlerentfernung wurde berechnet:

$$l = \frac{X}{X'} = \frac{3}{0,375} = 8 \text{ km} \quad (15)$$

Für diesen Fall würde also der Distanzschutz eine richtige Fehlerentfernung ermitteln. Aber wie schon gesagt wurde, dieser Fall kann nicht eintreten.

4.2.4 DISTANZSTUFEN

Diskutieren wir jetzt, in welchen Stufen die Schutze ansprechen. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Widerstandswerte in derselben Zone wie die Reaktanzwerte fallen. Die Staffelzeiten sind bei allen Schutzrelais gleich eingestellt.

Der erste Abschnitt (A-B) ist 12 km lang, der zweite ebenso 12 km lang.
Es ergeben sich für den Schutz A folgende Zonengrenze:

$$\begin{aligned} \text{Zone 1} & \quad 85 \% \text{ der Leitungsstrecke} \\ l_1 & = 0,85 \cdot l_{A-B} = 0,85 \cdot 12 \text{ km} = 10,2 \text{ km} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{Zone 2} & \quad 80 \% \text{ bis Z1 der nächsten Leitung} \\ l_2 & = 0,8(l_{A-B} + 0,85 \cdot l_{B-C}) = 0,8(12 \text{ km} + 0,85 \cdot 12 \text{ km}) = 17,76 \text{ km} \end{aligned} \quad (17)$$

Für den Schutz B sind die Zonengrenze gleiche wie bei A. Nur die erste Zone gilt auch für Richtung „rückwärts“

$$\begin{aligned} \text{Zone 1} & \quad 85 \% \text{ der Leitungsstrecke} \\ l_1 & = 0,85 \cdot l_{B-C} = 0,85 \cdot 12 \text{ km} = 10,2 \text{ km} \end{aligned} \quad (18)$$

Die Zonengrenze können ins Staffelplan gezeichnet werden:

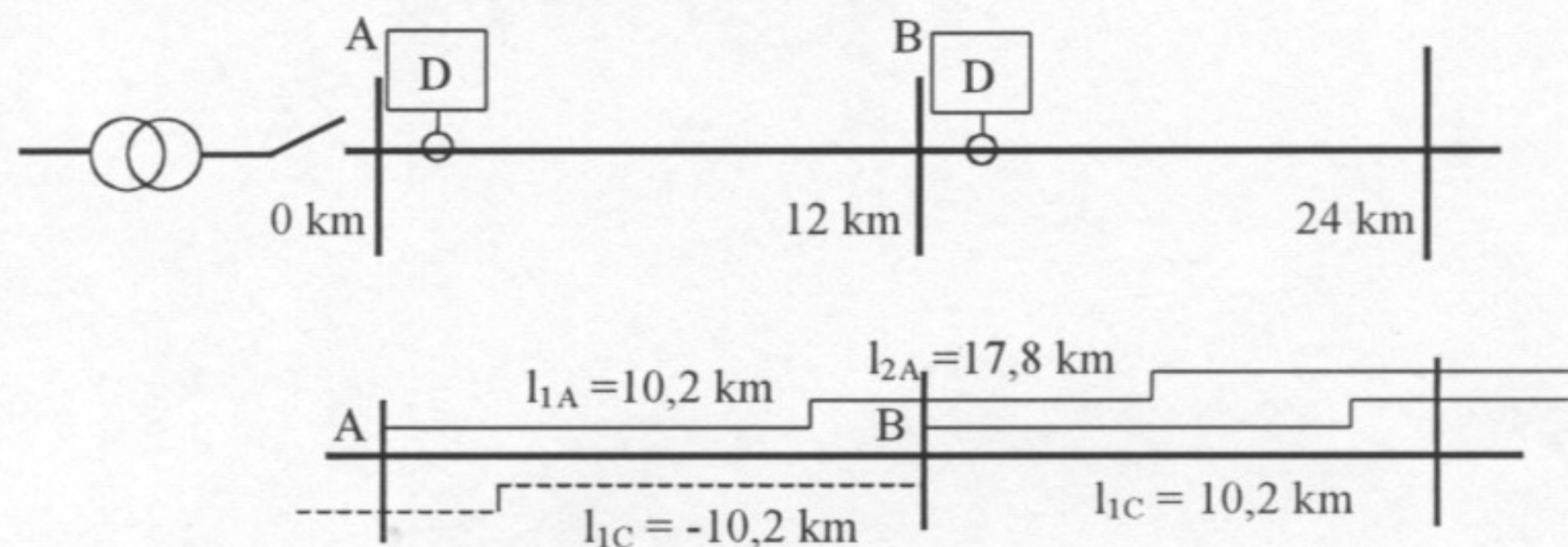


Bild 7 Einstellung der Distanzstufen (Staffelplan)

Wenn die berechneten bzw. aus der Störmeldung bekommenen Fehlerentfernungen mit dem Staffelplan verglichen werden, kann man bestimmen, in welcher Distanzzone der Fehler liegt.

| | Störmeldung | Berechnung | Distanzzone |
|-------------|-------------|------------|-------------|
| Einbauort A | 16,9 km | 15,06 km | Z2 |
| Einbauort B | 4,7 km | 4 km | Z1 |

Tabelle 4 Theoretische und praktische Schutzreaktionen

Als erste spricht der Schutz B an. Der Schutz A stellt eine Reserveschutz dar. Es kommt also zur selektiven Abschaltung eines Fehlers. Der zweite Fehler sollte dann möglichst schnell erfunden werden, um die Drohung den weiteren Doppelerdschluß zu verzichten.

In Tabelle 5 ist die Zusammenfassung von Reaktionen den einzelnen Schutze in erster Stufe.

| Schutz A | Schutz B |
|----------|----------|
| - | + |

+ Schutz auslöst - Schutz nicht auslöst

Tabelle 5 Auslösung in 1. Stufe

5 SCHLUSS

Es wurde Doppelerdschußmodellation durchgeführt. Zu dem Modell wurde digitaler Distanzschutz SIPROTEC 7SA510 angeknüpft. Dabei wurde das größte Interesse der Fehlerortung des Schutzes gewendet. Ziel dieser Arbeit war, zeigen, wo die Probleme auftreten und ob der verwendete Modell zu Doppelerdschußmodellation gut geeignet ist.

Bei Modellation der einseitig gespeisten Leitung hat (bez zvratného zájmena sich!) kein Problem aufgetaucht. Ein Fehler wurde selektiv abgeschaltet.

In der Praxis sind meiste Mittelspannungsnetze nicht als isoliert sondern als gelöschte betrieben. Eine E-Spule in einem Sternpunkt hat sicher ein Einfluß an die Fehlerströme und anschließend an die Schutzreaktionen. Auch die Fehler sind nicht widerstandlose. Der Fehlerwiderstand hat meistens den unvernachlässigen Wert und hat auch einen Eifluß an die Fehlerströme. Das sind wichtige Dinge, die in Bezug werden müssen.

LITRATURVERZEICHNIS

- [1] VANCATA, P.:Distanzschutzrelais bei Erdfehler in Mittelspannungsnetzen – Problem, Simulation; Rigorosearbeit, ZČU Pilsen, 2000
- [2] Digitaler Distanzschutz für Mittelspannungsnetze SIPROTEC 7SA510; Gerätehandbuch; Siemens AG, 1997
- [3] GRÖHN:Handbuch zum Netzmodell; Siemens AG
- [4] ZIGLER, G.: Digitaler Distanzschutz - Grundlagen und Anwendung; Siemens AG, 1999
- [5] RÖPER, R.: Kurzschlußströme in Drehstromnetzen – Zeitlicher Verlauf und Berechnung der Größen, Siemens AG, 1984
- [6] HEUCK, K.: Elektrische Energieversorgung; VIEWEG, 1995
- [7] Procházka, M: Doppelerdschluss in Mittelstannungsnetzen, FH Regensburg, 2000

Autors adresse:

Ing. Martin Procházka
 Department of Power Systems and Enviromental Engineering
 University of West Bohemia in Pilsen
 Univerzitní 26
 306 14 PLZEN Czech Republic
 E-mail: prochazk@kee.zcu.cz