

Distanzschutz mit Parallelleitungskompensation

Umwelt- und Kostenbewusstsein zwingen EVU's immer häufiger Parallelleitungen zu installieren. Durch die nahe räumliche Zuordnung der Übertragungsleitungen kommt es zu höheren Fehleraten und zur Beeinflussung der Messgrößen. Die deutliche Beeinflussung der Messgrößen von bis zu 30 % des Distanzschutzes durch Parallelleitungen und die Abhilfemaßnahmen sollen in diesem Applikationsbeispiel betrachtet werden.

1. Begriffsklärung Parallelleitung

1.1 Parallelleitungen mit gemeinsamen Mit- und Gegensystemen

Die beiden parallelen Leitungen haben die selben Sammelschienen an beiden Leitungsenden.

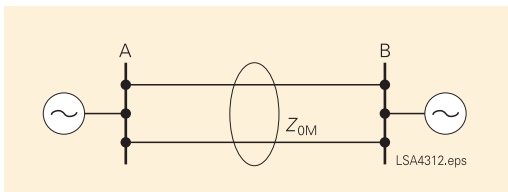


Bild 1 Parallelleitung mit gemeinsamer Einspeisung an den Leitungsenden

Bei dieser Anordnung, wo beide Systeme mit den gleichen Quellen verbunden sind, ist es für den Distanzschutz möglich den Einfluss der Parallelleitung zu kompensieren.

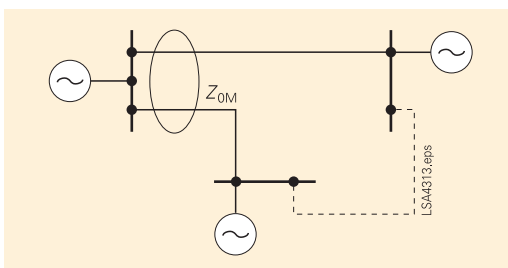


Bild 2 Parallelleitung mit nur einer gemeinsamen Sammelschiene

Bei dieser Anordnung der Parallelleitungen kann der Effekt nur auf einer Seite kompensiert werden.



Bild 3 Parallelleitungen über den Bosphorus

1.2 Parallelleitungen mit gemeinsamen Mit- und unabhängigem Nullsystem

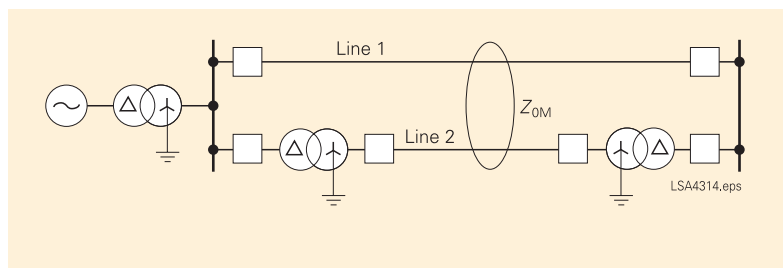


Bild 4 Parallelleitung mit gemeinsamer Einspeisung auf einem gemeinsamen Mast

Diese Anordnung der Parallelleitung beeinflusst die Distanzmessung nicht.

1.3 Parallelleitungen mit isoliertem Mit- und Nullsystem

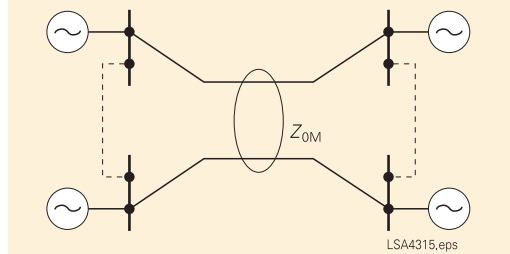


Bild 5 Parallelleitungen mit separat gespeisten Sammelschienen

Dies ist die ungünstigste Anordnung für den Distanzschutz. Eine Kompensation der induktiven Kopplung der Stromkreise ist nicht möglich. Diese Anordnung verursacht eine komplizierte Fehlerstromverteilung durch die induktive Kopplung.

2. Allgemein

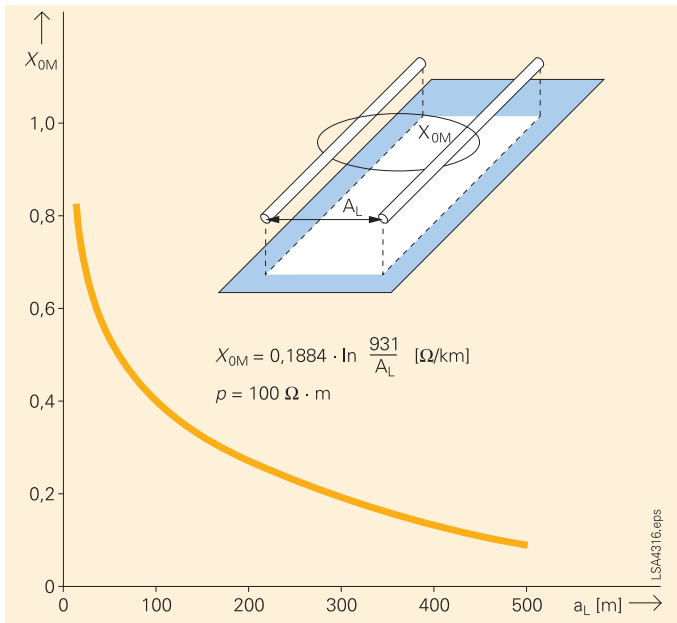


Bild 6 Induktive Kopplung von Parallelleitungen

Bei parallel geführten Leitungen kommt es zu einer induktiven Kopplung der Stromkreise. Dabei kann bei verdrehten Leitungen die Beeinflussung im Mit- und Gegensystem praktisch vernachlässigt werden. (Kopplungsimpedanz kleiner als 5 % der Selbstimpedanz). Das heißt, bei Lastfluss und bei allen Fehlern ohne Erdbeteiligung können die Leitungen als unabhängig betrachtet werden.

Bei Erdkurzschlüssen addieren sich die Leiterströme jedoch nicht zu Null, sondern es entsteht ein Summenstrom der dem fließenden Erdstrom entspricht. Für diesen Summenstrom kann man sich das Dreiphasensystem ersetzt denken durch einen

fiktiven Summenleiter in der geometrischen Mitte der Phasenleiter.

Für die Koppel Impedanz Z_M' einer Doppelleitung erhalten wir dann zwei parallele Einzelleiter mit Erdrückweg. Die Kopplungsimpedanz kann wie folgt berechnet werden:

$$Z_M' = \frac{\pi \cdot \mu_0}{4} \cdot f + j_{\mu_0} \cdot f \cdot l_n \frac{\vartheta}{D_{ab}} \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4} \left[\frac{\Omega \cdot \text{s}}{\text{km}} \right]$$

$$\vartheta = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

ϑ = Eindringtiefe in den Boden

f = Frequenz in Hz

ρ = spezifischer Widerstand in Ω / m

D_{ab} = Leiterabstand in Metern zwischen den beiden Leitern

Für einen typischen Wert des spezifischen Erdwiderstands von $\rho = 100 \Omega / \text{m}$, einer Systemfrequenz von 50 Hz, einem Leiterabstand von 20 m und einem Erdkurzschluss von $I_a = 1000 \text{ A}$ bekommen wir folgendes Ergebnis.

$$Z_M' = 0,05 + j 0,24 \Omega / \text{km}$$

Damit kann man die induzierte Spannung im Parallelleiter mit $U_b = Z_M \cdot I_a$ berechnen und wir bekommen 250 V pro km.

Bei einer Parallelleitung von 100 km würde das eine induzierte Spannung im Parallelleiter von 25 kV ergeben.

3. Berechnung der Messfehler des Distanzschutzes durch eine Parallelleitung bei Erdfehler

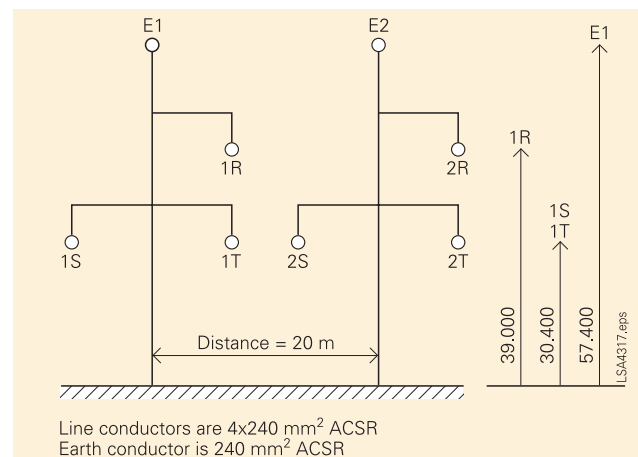


Bild 7 Mastbilder

Erdwiderstand
100 Ω / m

Mitimpedanz (Ω / km)	0,032 + j 0,254
Nullimpedanz (Ω / km)	0,139 + j 0,906
Koppelimpedanz (Ω / km)	0,107 + j 0,488
R1 =	0,032 Ω / km
X1 =	0,254 Ω / km
R0 =	0,139 Ω / km
X0 =	0,906 Ω / km
R _{0M} =	0,107 Ω / km
X _{0M} =	0,488 Ω / km

$$\frac{Z_E}{Z_L} = \frac{Z_0 - Z_1}{3 \cdot Z_1} = 0,86$$

$$\frac{Z_M}{Z_L} = \frac{Z_0 - Z_1}{3 \cdot Z_1}$$

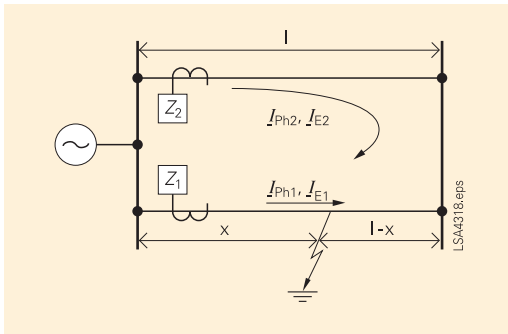


Bild 8 Parallelleitung mit einer Einspeisung, ohne Parallelleitungskompensation

Für das Distanzrelais Z₂ ist die gemessene Impedanz Z_B

$$Z_2 = (2 \cdot l - x) \cdot Z_L + \underbrace{\frac{x \cdot \frac{Z_{0M}}{3 \cdot Z_L}}{1 + \frac{Z_E}{Z_L}}}_{\text{Messfehler}}$$

Durch Einsetzen der Werte in die Gleichungen können wir für diese Doppelleitung die Messfehler bei einseitiger Einspeisung berechnen. Die Ergebnisse sind im folgenden Diagramm dargestellt:

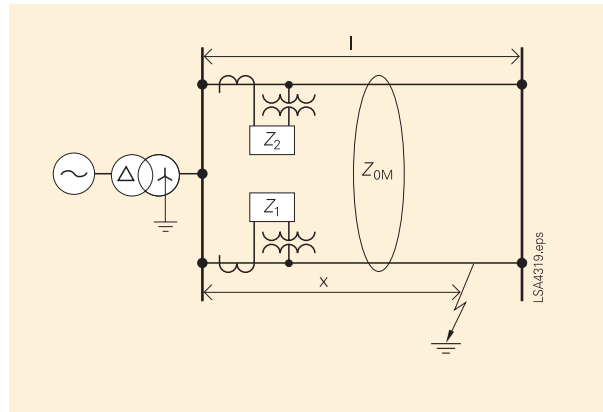


Bild 9 Doppelleitung mit einseitiger Einspeisung

Phasenstrom :

$$I_{LA} = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} \quad I_{LB} = I_{B1} + I_{B2} + I_{B0}$$

Erdstrom:

$$I_{EA} = 3 I_{A0} \quad I_{EB} = 3 I_{B0}$$

$$K_0 = (Z_{L0} - Z_{L1}) / 3 Z_{L1}$$

$$K_{0M} = Z_{0M} / 3 Z_{L1}$$

$$I_{C0} / I_{A0} = x / 2 - x$$

Für das Distanzrelais Z₁ ist die gemessene Impedanz Z_A

$$Z_1 = \frac{x}{l} \cdot Z_L + \underbrace{\frac{x}{l} \cdot \frac{Z_{0M}}{3 \cdot Z_L} \cdot \frac{x}{2l - x}}_{\text{Messfehler}} \cdot \frac{1 + \frac{Z_E}{Z_L}}{1 + \frac{Z_E}{Z_L}}$$

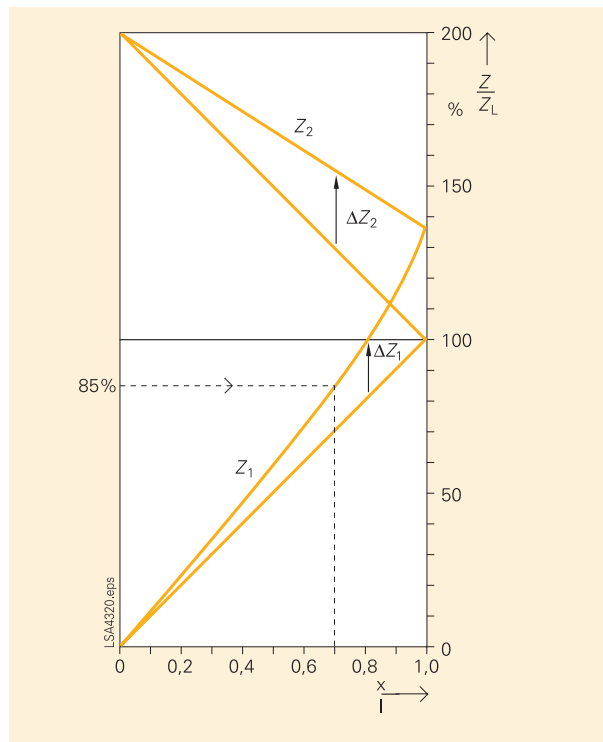


Bild 10 Distanzmessfehler auf einer Doppelleitung mit einseitiger Einspeisung

Die größte Messabweichung (35 %) tritt bei einem Fehler am Leitungsende auf, da die eingekoppelte Länge bis zur Fehlerstelle maximal wird.

Aus diesem Beispiel ist zu erkennen, dass die Zonenreichweite auf 70 % zurückgenommen werden muss, um bei Erdfehlern keine Überreichweite zu erzielen.

3.1 Resultat

- Der Fehler ist proportional zum $K_{OM} = Z_{OM} / 3 Z_{L1}$
- Der Fehler erhöht sich mit dem Verhältnis des Erdstromes der Parallelleitung I_{EP} zum Erdfehlerstrom des Relais.
- Das Relais hat eine Unterreichweite wenn der Erdfehlerstrom der Parallelleitung und der Erdstrom des Relais in Phase sind (gleiche Richtung).
- Das Relais hat eine Überreichweite wenn der Erdfehlerstrom der Parallelleitung und der Erdstrom des Relais entgegengesetzte Phasenlage haben (entgegengesetzte Richtung).

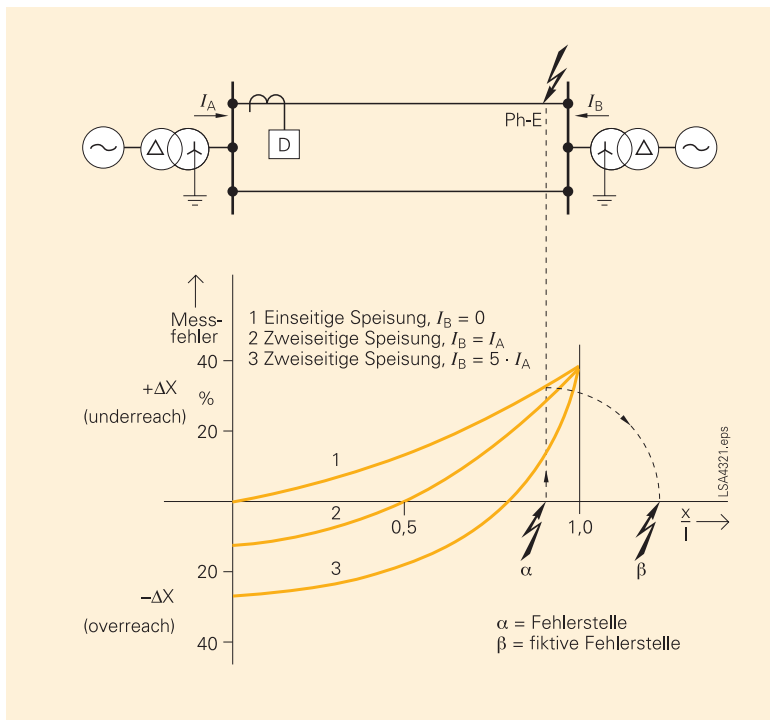


Bild 11 Erdkurzschluss auf einer Doppelleitung bei zweiseitiger Einspeisung

Der Messfehler des Relais auf der fehlerhaften Leitung bei zweiseitiger Einspeisung ist im obigen Diagramm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Fehler negativ wird bei Fehlern auf den ersten 50 % der Leitung bei gleichen Einspeiseverhältnissen. Dies ist genau der Bereich, wo der Erdstrom auf der Parallelleitung in entgegengesetzter Richtung fließt.

Auf den nächsten Bildern ist ersichtlich, dass der Parallelleitungseinfluss sich mit dem Schaltzustand der Parallelleitung stark ändert. Der Grund ist die unterschiedliche Erdstromverteilung.

$$Z_{ph-E} = \frac{U_{ph-E}}{I_{ph-E} + k_E \cdot I_E + k_{EM} \cdot I_{EP}}$$

$$\text{mit } k_{EM} = \frac{Z_{OM}}{3 \cdot Z_{L1}}$$

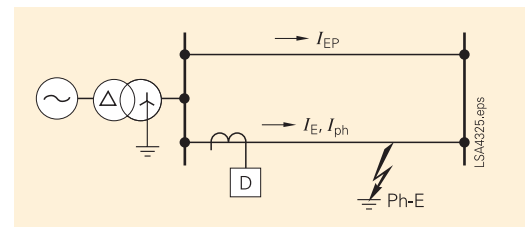


Bild 12 Fehler am Leitungsende

$$\Delta Z = \frac{k_{EM}}{1 + k_E} \cdot Z_L \triangleq 24 \% \text{ von } Z_L$$

Fehler am Leitungsende (Bild 12):
Einspeisequellen für Mit- und Nullsystem am gleichen Leitungsende

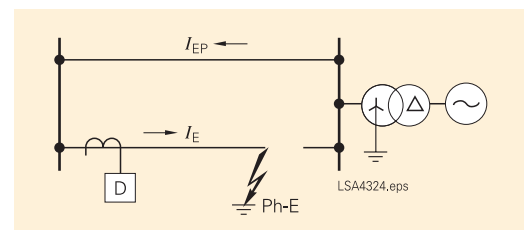


Bild 13 Fehler am Leitungsende mit geöffnetem Leistungsschalter

$$\Delta Z = -\frac{k_{EM}}{1 + k_E} \cdot Z_L \triangleq 24 \% \text{ von } Z_L$$

Fehler am Leitungsende (Bild 13):
Ein Schalter offen, Sternpunktterdung und Relais an entgegengesetzten Enden.

$$\Delta Z = \frac{3 \cdot k_{EM}}{1 + k_E} \cdot Z_L = \frac{Z_{0M}}{Z_0} \cdot Z_L \triangleq 40 \% \text{ von } Z_L$$

Fehler am Leitungsende (Bild 14):

$$\Delta Z = -Z_L \cdot \frac{k_{EM} \cdot \frac{Z_{0M}}{Z_{0L}}}{1 + k_E} \triangleq -10 \% \text{ von } Z_L$$

Fehler am Leitungsende (Bild 15):

4. Paralleleitungs-kompensation

Damit der Distanzschutz mit Paralleleitungs-kompensation arbeiten kann, wird vorausgesetzt, dass er den I_{EP} der Paralleleitung als Messgröße bekommt.

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{U}_A}{I_{ph} + k_E \cdot I_E}$$

$$= \frac{\underline{Z}_{1L} \left(I_{ph} + \frac{Z_{EL}}{Z_{1L}} \cdot I_E + \frac{Z_{0M}}{3 \cdot Z_{1L}} \cdot I_{EP} \right)}{I_{ph} + k_E \cdot I_E}$$

Aus der Gleichung ist ersichtlich dass die Fehlerimpedanz richtig gemessen wird, wenn wir im Nenner den Term $\frac{Z_{0M}}{3 \cdot Z_{1L}} \cdot I_{EP}$ addieren. Mit der normalen

Einstellung $k_E = Z_E / Z_L$ kürzt sich dann der Nenner gegen den Klammersausdruck im Zähler und wir erhalten als Messergebnis \underline{Z}_{1L} .

Der Distanzschutz besitzt einen weiteren Messeingang an dem der Erdstrom der Paralleleitung angeschlossen wird. Die Addition erfolgt numerisch. Es ist zu beachten, dass das Relais auf der gesunden Leitung durch die Einkopplung des Erdstromes der Paralleleitung den Fehler in zu kurzer Entfernung sieht. Würde die Zone1 der nicht fehlerbehafteten Leitung auf 85 % eingestellt sein, würde der Distanzschutz durch den zugeführten Parallelfehler zu einer Überreichweite führen. Der Distanzschutz würde noch Fehler auf der Paralleleitung bis 55 % Leitungslänge in Zone 1 sehen.

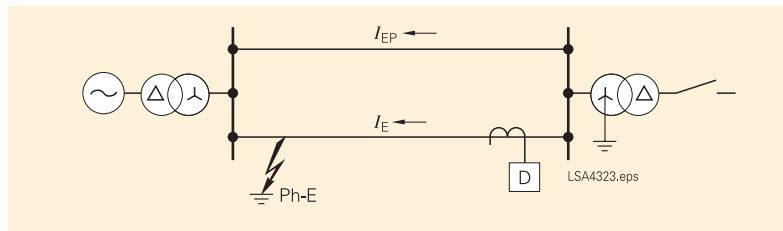


Bild 14 Einspeisequellen des Mit- und Nullsystems an entgegengesetzten Leitungsenden

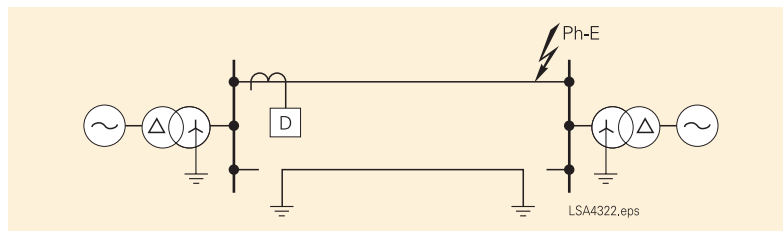


Bild 15 Paralleleitung abgeschaltet und beidseitig geerdet

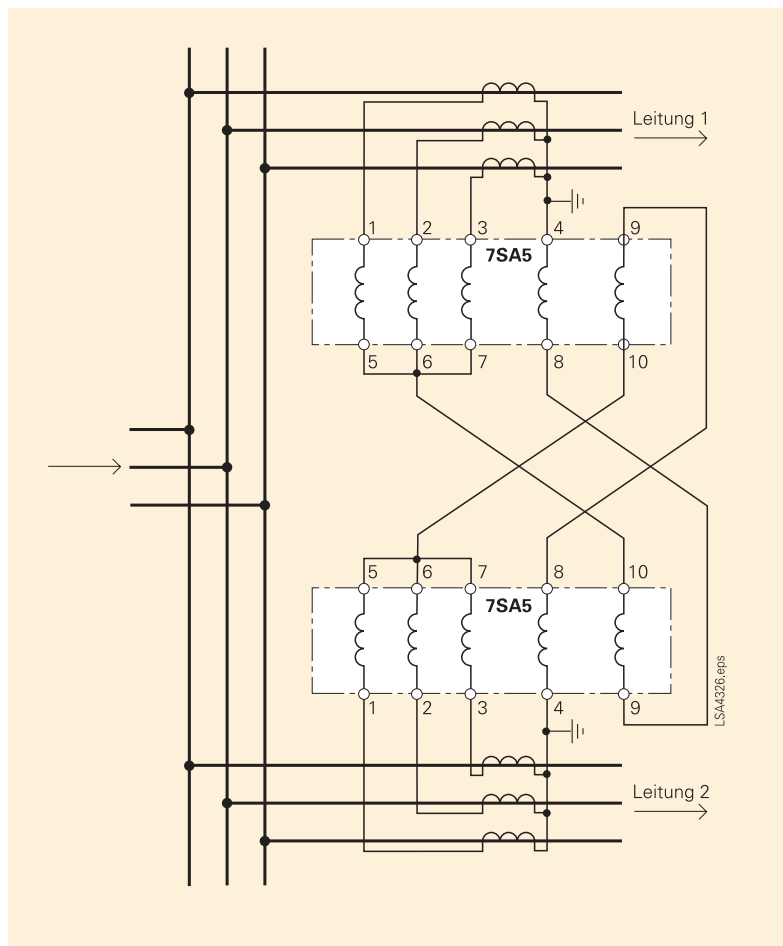


Bild 16 Anschluss der Paralleleitungs-kompensation

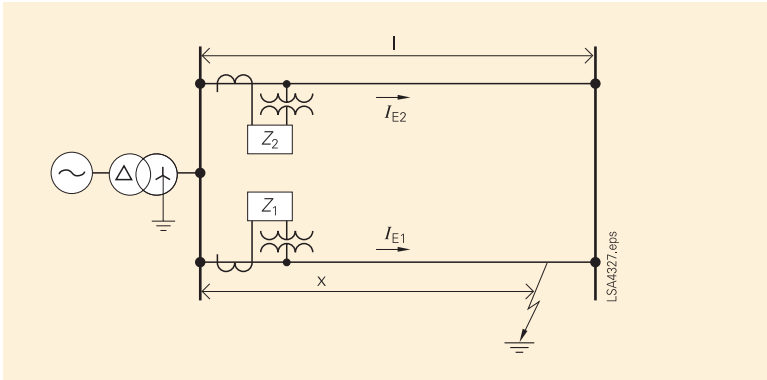


Bild 17 Distanzmessung mit Parallelleitungs-kompensation

$$\left(\frac{Z_E}{Z_L} = 0,86 / \frac{Z_{0M}}{3 \cdot Z_L} = 0,65 \right)$$

Z_L = Leitungsimpedanz

Zum Verhindern dieser Überfunktion wird die sogenannte Erdstromwaage benutzt. Sie vergleicht die Erdströme der beiden Leitungssysteme und sperrt die Parallelleitungs-kompensation, wenn der Erdstrom der Parallelleitung den Erdstrom der eigenen Leitung um einen einstellbaren Faktor überschreitet.

$$\frac{I_{E1}}{I_{E2}} = \frac{2 \cdot l - x}{x} = \frac{2 - \frac{x}{l}}{\frac{x}{l}}$$

Bei einer Einstellung von x/l von 85 % wirkt die Parallelleitungs-kompensation bei Fehlern auf der eigenen Leitung und noch 15 % in die Parallelleitung. Daraus ergibt sich ein Faktor von $I_{E1} / I_{E2} = 1,35$ als Standardwert für die Erdstrom-waage.

Einstellhinweise für die Parallelleitungs-kompensation

- Die Kompensation ist nur möglich wo die beiden Leitungen in der gleichen Station enden
- Beim Distanzschutz wird die Kompensation nur dort eingesetzt, wo ohne Kompensation keine ausreichende Reservezone möglich ist. Dies ist der Fall, wenn auf die Doppelleitung kurze Leitungen folgen.

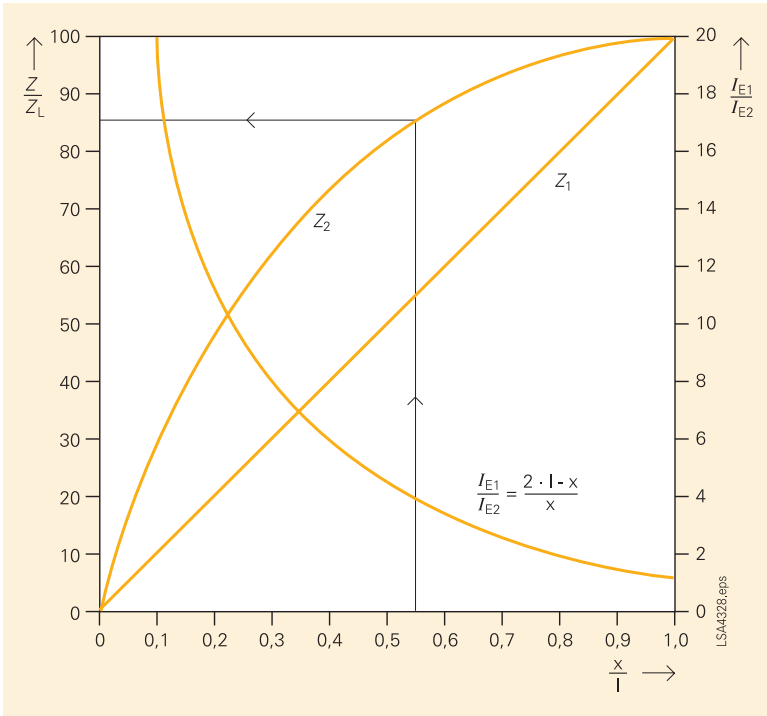


Bild 18 Wirkung der Parallelleitungs-kompensation

Beispiel:

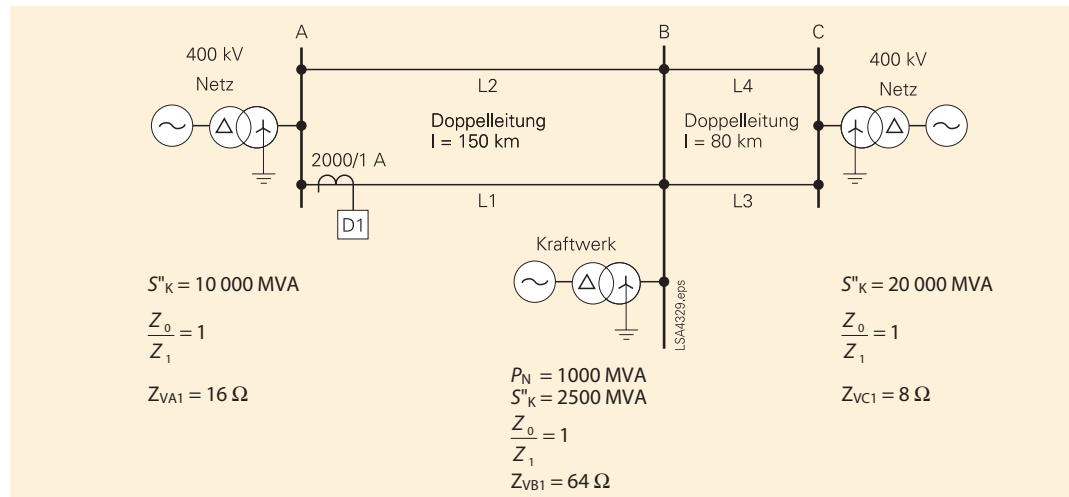


Bild 19 Anlagenbeispiel einer Doppelleitung

5. Berechnungsbeispiele

Das Vorgehen bei der Einstellung einer normalen Einfachleitung ist in den Gerätehandbüchern an Hand eines Beispiels erläutert. An dieser Stelle werden noch besondere Anwendungsfälle behandelt.

5.1 Doppelleitung im geerdeten Netz

Die Kopplung im Nullsystem erfordert eine eingehende Betrachtung der Zoneneinstellung bei Erdfehlern.

5.1.1 Allgemeines Vorgehen

Es wird empfohlen, zunächst die Staffelung der Distanzzonen für Phasenfehler festzulegen, ohne Berücksichtigung der Parallellleitungskopplung. Im zweiten Schritt werden dann die Zonenreichweiten für Erdkurzschlüsse überprüft und ein passender Erdstromkompensationsfaktor gewählt. Der Einsatz der Parallellleitungskompensation muss in Betracht gezogen werden, damit bei Erdkurzschlüssen ein ausreichender Fernreserve-schutz gewährleistet werden kann.

5.1.2 Staffelung der Distanzzonen für Phasenkurzschlüsse

Die Zonen sind gemäß den Grundregeln für Staffelpläne einzustellen. Bei den Reservezonen ist dabei der parabelförmige Verlauf der Impedanz, abhängig vom Fehlerort, von Bedeutung. Bei der Reihenschaltung von Doppelleitungen ergeben sich außerdem unterschiedliche Reichweiten der Reservezonen, abhängig vom Schaltzustand und von der Einspeisung am Gegenende. Theoretisch betrachtet ergibt sich damit ein relativ hoher Aufwand für die Erstellung des Staffelplans von Doppelleitungen.

In der Praxis wird in der Regel einfacher vorgegangen. Für die praktische Staffelung der zweiten Zone kann die halbe Impedanz der folgenden Parallellleitung angesetzt werden (Doppelleitung folgt auf Einfachleitung). Wir erhalten damit:

$$Z_{2A} = SF2 \cdot (Z_{A-B} + 0,5 \cdot Z_{B-C})$$

Bei der dritten Zone ist entsprechend der gewählten Reserveschutz-Strategie zu staffeln. Eine für alle Schaltzustände selektive Staffelung führt zu relativ kurzen dritten Stufen, die kaum länger werden, als die entsprechende 2. Stufe.

Im Hoch- und Höchstspannungsnetz wird man versuchen, dass die dritte Stufe bei normalem Parallellleitungsbetrieb die folgende Doppelleitung abdeckt. In diesem Fall erhalten wir die Stufeneinstellung:

$$Z_{3A} = 1,1 \cdot (Z_{A-B} + Z_{B-C})$$

Bei der Anregezone sollen die Folgeleitungen im ungünstigsten Schaltzustand (Einfachleitung folgt auf Parallellleitung) im Schutzbereich liegen. Dafür ist folgende Einstellung zu wählen:

$$Z_{+AA} = 1,1 \cdot (Z_{A-B} + 2 \cdot Z_{B-C})$$

In der Regel sind in den Zwischenstationen der Doppelleitung auch Einspeisungen vorhanden, die bei der Staffelung der Reservezonen zu berücksichtigen sind. Dies wird mit dem folgenden Beispiel veranschaulicht (siehe Bild 19):

Doppelleitung.

Einstellung des Distanzzonen für Phasenkurzschlüsse

Gegeben:

100-kV-Doppelleitung

Leistungsdaten:

Konfiguration gemäß

l_1 und $l_2 = 150$ km, l_3 und $l_4 = 80$ km

$Z_{1L}' = 0,0185 + j 0,3559 \Omega/\text{km}$

$Z_{0L}' = 0,2539 + j 1,1108 \Omega/\text{km}$

$Z_{0M}' = 0,2354 + j 0,6759 \Omega/\text{km}$

$P_{\text{nat.}} = 518$ MW je Leitung

Stromwandler: 2000/1 A

Spannungswandler: 400/0,1 kV

Aufgabe:

Berechnung der Zoneneinstellung für Relais D1.

Lösung:

Zur Vereinfachung wird bei der Kurzschlussberechnung nur mit X-Werten gerechnet:

$$X_{L1} = X_{L2} = 0,3559 \Omega/\text{km} \cdot 150 \text{ km} = 53,4 \Omega$$

$$X_{L3} = X_{L4} = 0,3559 \Omega/\text{km} \cdot 80 \text{ km} = 28,5 \Omega$$

Wir verwenden generell einen Staffelfaktor von 85 %.

Die Zonenreichweiten berechnen sich wie folgt:

$$X_1 = 0,85 \cdot 53,4 \Omega$$

Für die selektive Staffelung der 2. Stufe wird angenommen, dass die Parallellleitung L2 offen ist, dass aber von der Zwischeneinspeisung in B immer mindestens die halbe Kurzschlussleistung ansteht. Es wird selektiv zum Ende der 1. Zone der Distanzrelais der Folgeleitungen 3 und 4 gestaffelt. Das heißt, wir können etwa die halbe Leitungsimpedanz einsetzen. Es ergibt sich damit eine vereinfachte Ersatzschaltung.

Für einen dreipoligen Fehler in C errechnen wir die im Bild eingezeichneten Kurzschlussströme.

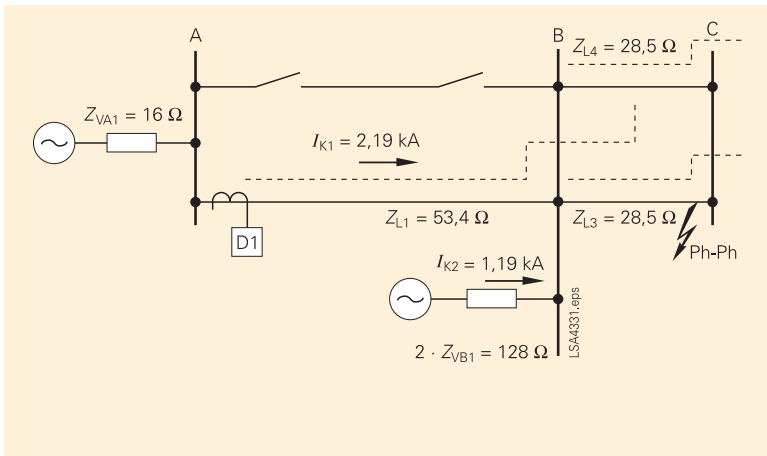


Bild 20 Schutzeinstellung bei Doppelleitungen: Netzdaten zum Berechnungsbeispiel

Unter Berücksichtigung des Zwischeneinspeiseeffektes erhalten wir:

$$X_2 = \left[53,4 + \frac{28,5}{2} \cdot \left(1 + \frac{1,19}{2,19} \right) \right] \cdot 0,85 =$$

$$64 \Omega = 120 \% X_{L1}$$

Gemäß oben genannter Empfehlung erhalten wir für Zone 3

$$X_3 = (53,4 + 28,5) \cdot 1,1 = 90,1 \Omega = 169 \% X_{L1}$$

und für die Anregezone:

$$X_{+A} = (53,4 + 2 \cdot 28,5) \cdot 1,1 = 121 \Omega = 226 \% X_{L1}$$

Die Reichweite der Zonen in R-Richtung stimmen wir auf die Impedanz der natürlichen Leistung ab:

$$Z_{\text{Nat.}} = \frac{U_{\text{N}^2}}{P_{\text{Nat.}}} = \frac{400^2}{518} = 309 \Omega$$

Wir gehen davon aus, dass eine neue Leitung kurzzeitig die doppelte Leistung übertragen muss und lassen zusätzlich einen Sicherheitsabstand von 30 %. Damit ergibt sich die maximale R-Reichweite der Anregung zu:

$$RA1 = 0,7 \cdot \frac{309}{2} = 108 \Omega$$

Wir wählen weiter $\varphi_A = 50^\circ$ und
 $RA2 = 2 \cdot RA1 = 208 \Omega$

Für die Distanzzonen bietet ein R/X-Verhältnis von 1 eine ausreichende Kompensation für Fehlerwiderstände.

5.1.3 Zonenreichweite bei Erdkurzschlüssen

Bei den Ph-E-Messsystemen ist der Erdstromkompensationsfaktor k_E maßgebend. Bei Einfachleitungen wird dieser auf den entsprechenden Z_F/Z_L -Wert der Leitung eingestellt. Der Schutz misst dann für Ph-Ph und Erdkurzschlüsse die gleiche Impedanz.

Bei Doppelleitungen ergibt sich durch die Nullsystemkopplung ein Messfehler bei Erdkurzschlüssen. Mit der Parallelleitungskompensation ist eine Korrektur der Messung möglich. Diese Funktion ist in den Relais 7SA optional enthalten. Es muss nur der Erdstrom der Parallelleitung an das Relais angeschlossen und die Koppelimpedanz eingestellt werden. Die Erdstromwaage kann auf dem Standardwert $x/l = 85 \%$ belassen werden. Der Erdstromfaktor ist in diesem Fall an die Einfachleitung anzupassen.

5.1.4 Einstellung des k_E -Faktors (Betrieb ohne Parallelleitungskompensation)

Für den Fall, dass die Parallelleitungskompensation nicht benutzt wird, muss ein k_E -Faktor gefunden werden, der für die möglichen Betriebszustände der Doppelleitung einen ausreichenden Schutz garantiert (siehe Tabelle 1).

a) Diese Formel gilt für $\frac{x}{l} \leq 1$

Für $\frac{x}{l} > 1$ gilt:
$$\frac{SF1(1 + k_{XER}) + k_{XEM} \cdot \frac{X'_{0M}}{X'_{0L}}}{1 + k_{XEL}}$$

b) $k_{XEL} = \left(\frac{X'_{EL}}{X'_{1L}} \right)_{\text{Leitung}}$

c) $k_{XEM} = \left(\frac{X'_{0M}}{3 \cdot X'_{0L}} \right)_{\text{Leitung}}$

Die Anpassung der Einstellung an einen Betriebszustand bewirkt eine Über- oder Unterreichweite bei den jeweils anderen Zuständen. SF1 in % ist dabei der gewählte Staffelfaktor für die 1. Zone (Reichweite bei Ph-Ph-Fehlern). x/l in % gibt dann an, wie weit die Zone 1 (Ph-E-Schleife) bei Erdfehlern reicht, bezogen auf die Leitungslänge.

Die Bestimmung des Relaisstellwertes k_{ER} wird an dem Beispiel Doppelleitungsbetrieb gezeigt: Die Spannung am Relaisbauort für einen Fehler in der Entfernung x/l ist:

$$U_{Ph-E} = \frac{x}{l} Z_L \cdot I_{Ph} + \frac{x}{l} Z_E \cdot I_E + \frac{x}{l} \frac{Z_{0M}}{3} \cdot I_{EP}$$

Dabei ist bei einseitiger Einspeisung:

$$I_{Ph} = I_E \text{ und } I_{EP} = \frac{\frac{x}{l}}{2 - \frac{x}{l}} \cdot I_E$$

Für die Messung an der Ph-E-Schleife erhalten wir damit:

$$Z_{Ph-E} = \frac{U_{Ph-E}}{I_{Ph} + k_{ER} \cdot I_E} = \frac{x}{l} \cdot \frac{Z_L + Z_E + \frac{Z_{0M}}{3} \cdot \frac{l}{2 - \frac{x}{l}}}{1 + k_{ER}}$$

Dabei ist k_{ER} der am Relais eingestellte komplexe Erdstromkompensationsfaktor.

Bei den digitalen Relais 7SA wird X und R getrennt berechnet. Dafür gelten vereinfachten Formeln, wenn Phasen und Erdströme gleiche Phasenlage haben.

Damit resultiert:

$$X_{Ph-E} = \frac{U_{Ph-E} \cdot \sin \varphi_k}{I_{Ph} + \left(\frac{X_E}{X_L} \right)_R \cdot I_E} = \frac{x}{l} \cdot X_L \cdot \frac{1 + \frac{X_E}{X_L} + \frac{X_{0M}}{3 \cdot X_L} \cdot \frac{l}{2 - \frac{x}{l}}}{1 + \left(\frac{X_E}{X_L} \right)_R}$$

$$R_{Ph-E} = \frac{U_{Ph-E} \cdot \cos \varphi_k}{I_{Ph} + \left(\frac{R_E}{R_L} \right)_R \cdot I_E} = \frac{x}{l} \cdot R_L \cdot \frac{1 + \frac{R_E}{R_L} + \frac{R_{0M}}{3 \cdot R_L} \cdot \frac{l}{2 - \frac{x}{l}}}{1 + \left(\frac{R_E}{R_L} \right)_R}$$

Für die Reichweite interessiert zunächst nur der gemessene X-Wert.

Mit $k_{XEL} = \frac{X_E}{X_L}$ und $k_{XEM} = \frac{X_{0M}}{3 \cdot X_L}$ ergibt sich:

$$X_{Ph-E} = \frac{x}{l} X_L \cdot \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM} \cdot \frac{l}{2 - \frac{x}{l}}}{1 + k_{XER}}$$

Das Ph-E-Messsystem und das Ph-Ph-Messsystem haben den gleichen Impedanz-Ansprechwert (gemeinsamen Einstellwert Z_1).

Damit gilt: $Z_{Ph-E} = Z_{Ph-Ph} = Z_1 = SF1 \cdot Z_L$,

wobei SF1 der Staffelfaktor der ersten Zone ist.

Für den Erdstromkompensationsfaktor, der am Relais einzustellen ist, erhalten wir schließlich folgende Formel:

$$k_{XER} = \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM} \cdot \frac{l}{2 - \frac{x}{l}} \cdot \frac{x}{l} - 1}{SF1}$$

Wir können von einer vorgegebenen Zonenreichweite für Phasenfehler (SF1 in % von Z_L) die Reichweite der Ph-E-Messsysteme variieren durch Verstellen des Faktors k_{XER} .

Wir können die vorherige Gleichung auch nach x/l auflösen und erhalten dann die Reichweite für eine gegebene k_{XER} -Einstellung.

$$\frac{x}{l} = \frac{[GF1 \cdot (1 + k_{XER}) + 2(1 + k_{XEL})] - \sqrt{[..]^2 - 8(1 + k_{XEL} - k_{XEM}) \cdot (1 + k_{XER}) \cdot SF1}}{2 \cdot (1 + k_{XEL} - k_{XEM})}$$

In gleicher Weise erhalten wir die in Tabelle 1 angegebenen Formeln für die Fälle „Parallelleitung offen“ und „Parallelleitung offen und beidseitig gerdet“.

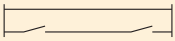
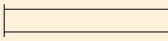
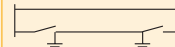
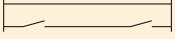
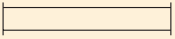
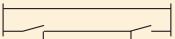
		Reichweite x/l bei Ph-E Kurzschlüssen		
				
		$\frac{x}{l} = SF1 \cdot \frac{1 + k_{XER}}{1 + k_{XEL}}$	$\frac{x}{l} =$ siehe Formel auf vorgehender Seite	$\frac{x}{l} = \frac{(1 + k_{XER}) \cdot SF1}{1 + k_{XEL} - k_{XEM} \cdot \frac{X'_{OM}}{X_{OL}}}$ a)
k_{XER}-Einstellung mit: $\frac{x}{l} = 0,85$ SF1 = 0,85 $k_{XEL} = 0,71$ b) $k_{XEM} = 0,64$ c) $X'_{OM} = 0,72 \Omega/\text{km}$ $X'_{OL} = 1,11 \Omega/\text{km}$ $X'_{IL} = 0,356 \Omega/\text{km}$		85 % (75 %)	71 % (64 %)	108 % (98 %)
	$k_{ER} = \frac{1 + k_{EL}}{SF1} \cdot \frac{x}{l} - 1 = 0,71 (0,5)$  $k_{XER} = \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM} \cdot \frac{x}{l}}{SF1 \cdot \left(2 - \frac{x}{l}\right)} - 1$ $k_{XER} = 1,18$	108 %	85 %	132 %
	 $k_{XER} = \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM} \cdot \frac{X'_{OM}}{X'_{OL}} \cdot \frac{x}{l}}{SF1} - 1 = 0,31$	65 %	56 %	85 %

Tabelle 1 Distanzmessung bei Erdkurzschlüssen: Reichweite (in x-Richtung) abhängig von der Relaiseinstellung $k_{XER} = \left(\frac{X_E}{X_L} \right)_{\text{Relais}}$ und dem Schaltzustand

Die Wahl der Einstellung von k_{XER} erfordert einen Kompromiss, der alle drei Betriebsfälle berücksichtigt. (Tabelle 1)¹ Bei einem Staffelfaktor von SF1 = 85 % bietet die Anpassung an die Einfachleitung meist eine akzeptable Lösung. Die beidseitige Abschaltung einer Leitung mit beidseitiger Erdung tritt nur bei Wartungsarbeiten auf, so dass das kurze Übergreifen von 8 % nur selten wirksam wird, da in der Regel das Übergreifen durch Zwischenspeisungen verkürzt wird.

Bei Betrieb mit einpoliger KU würde das Übergreifen sowieso nur zu einer überzähligen KU, und zu keiner endgültigen Abschaltung führen, vorausgesetzt, dass es sich um einen transienten Kurzschluss handelt (etwa 90 % der Fehler).

Alternativ kann die Reichweite bei Erdfehlern durch Einstellen eines niedrigeren k_{XER} -Faktors etwas verkürzt werden. Bei einer Reduzierung von $k_{XER} = 0,71$ auf $k_{XER} = 0,5$ würde sich bei dem Beispiel gerade kein Übergreifen mehr ergeben. Die Reichweite bei Doppelbetrieb wäre dann allerdings nur noch 64 %, wobei zu bedenken ist, dass sich die Parallelleitungskopplung nur bei dem Worst-Case-Fall der einseitigen Einspeisung voll auswirkt. Im Normalfall der zweiseitigen Einspeisung ist bei Fehlern nahe der Leitungsmittle der Erdstrom auf der Parallelleitung wesentlich geringer und die Zonenreichweite entspricht fast der

der Einfachleitung. Zudem hat die Parallelleitungskopplung am anderen Leitungsende immer die entgegengesetzte Wirkung, d.h. eine Zonenverlängerung. Durch eine Mitnahmeschaltung kann deshalb stets eine sichere Schnellabschaltung gewährleistet werden. Bei der Reduktion des k_{XER} -Faktors muss allerdings bedacht werden, dass sich auch die Reichweite der Reservezonen bei Erdfehlern entsprechend verkürzt. Statt einer Verkleinerung des k_{XER} -Faktors ist deshalb auch eine Zonenreduzierung (z.B. SF1 = 0,8) in Betracht zu ziehen.

5.1.5 Einstellung der Übergreifzone

Die Zone Z_{1B} sollte auf 120 - 130 % Z_L eingestellt werden. Bei Betrieb mit Parallelleitungskompensation würde diese Reichweite auch bei Erdfehlern gelten.

¹ Die Zahlenwerte in der Tabelle 1 wurden mit den Leistungsbelägen des vorhergehenden Beispiels gerechnet. Die komplexen Faktoren $k_{EL} = 71 - j0,18$ und $k_{EM} = 0,64 - j0,18$ wurden dabei zur Vereinfachung nur mit ihren Realanteilen berücksichtigt, die in erster Näherung den Werten $k_{XEL} = X_E/X_L$ und $k_{XEM} = X_M (3 \cdot X_L)$ entsprechen. Dies ergibt für das Höchstspannungsnetz eine ausreichende Genauigkeit.

Die Anpassung der Einstellung an einen Betriebszustand bewirkt eine Über- oder Unterreichweite bei den jeweils anderen Zuständen. SF1 in % ist dabei der gewählte Staffelfaktor für die 1. Zone (Reichweite bei Ph-Ph-Fehlern). x/l in % gibt dann an, wie weit die Zone 1 (Ph-E-Schleife) bei Erdfehlern reicht, bezogen auf die Leitungslänge

Die Bestimmung des Relaisstellwertes k_{ER} wird an dem Beispiel Doppelleitungsbetrieb gezeigt: Die Spannung am Relaisbauort für einen Fehler in der Entfernung x/l ist:

$$\underline{U}_{Ph-E} = \frac{x}{l} Z_L \cdot I_{Ph} + \frac{x}{l} Z_E \cdot I_E + \frac{X}{l} \frac{Z_{0M}}{3} \cdot I_{EP}$$

Dabei ist bei einseitiger Einspeisung:

$$I_{Ph} = I_E \text{ und } I_{EP} = \frac{\frac{x}{l}}{2 - \frac{x}{l}} \cdot I_E$$

Für die Messung der Ph-E-Schleife erhalten wir damit:

$$\underline{Z}_{Ph-E} = \frac{\underline{U}_{Ph-E}}{I_{Ph} + k_{ER} \cdot I_E} = \frac{x}{l} \cdot \frac{Z_L + Z_E + \frac{Z_{0M}}{3} \cdot \frac{l}{2 - \frac{x}{l}}}{1 + k_{ER}}$$

Dabei ist k_{ER} der am Relais eingestellte komplexe Erdstromkompensationsfaktor. Bei den digitalen Relais 7SA wird X und R getrennt berechnet. Dafür gelten vereinfachte Formeln, wenn Phasen und Erdströme gleiche Phasenlage haben. Damit resultiert aus

$$X_{Ph-E} = \frac{U_{Ph-E} \cdot \sin \varphi_K}{I_{Ph} + \left(\frac{X_E}{X_L}\right)_R \cdot I_E} = \frac{x}{l} \cdot X_L \cdot \frac{1 + \frac{X_E}{X_L} + \frac{X_{0M}}{3 \cdot X_L} \cdot \frac{l}{2 - \frac{x}{l}}}{1 + \left(\frac{X_E}{X_L}\right)_R}$$

$$R_{Ph-E} = \frac{U_{Ph-E} \cdot \cos \varphi_K}{I_{Ph} + \left(\frac{R_E}{R_L}\right)_R \cdot I_E} = \frac{x}{l} \cdot R_L \cdot \frac{1 + \frac{R_E}{R_L} + \frac{R_{0M}}{3 \cdot R_L} \cdot \frac{l}{2 - \frac{x}{l}}}{1 + \left(\frac{R_E}{R_L}\right)_R}$$

Für die Reichweite interessiert zunächst nur der gemessene Wert:

Mit $k_{XEL} = \frac{X_E}{X_L}$ und $k_{XEM} = \frac{X_{0M}}{3 \cdot X_L}$ ergibt sich:

$$X_{Ph-E} = \frac{x}{l} X_L \cdot \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM} \cdot \frac{l}{2 - \frac{x}{l}}}{1 + k_{XER}}$$

Das Ph_E_Messsystem und das Ph-Ph-Messsystem haben den gleichen Impedanz-Ansprechwert (gemeinsamen Einstellwert Z_1). Damit ergibt sich: $Z_{Ph-E} = Z_{Ph-Ph} = Z_1 = SF1 \cdot Z_L$, wobei SF1 der Staffelfaktor der ersten Zone ist:

Für den Erdstromkompensationsfaktor, der am Relais einzustellen ist, erhalten wir schließlich folgende Formel:

$$k_{XER} = \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM} \cdot \frac{x}{l}}{SF1} \cdot \frac{x}{l} - 1$$

Ohne Parallelleitungskompensation muss die 120%-Reichweite für den Fall des Parallelleitungsbetriebes dimensioniert werden unter Berücksichtigung des vorher festgelegten k_{XER} -Faktors.

$$SF = \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM} \cdot \frac{x/l}{2 - x/l}}{1 + k_{XER}} \cdot x/l$$

Für einen Fehler am Ende der Leitung ($x/l = 100\%$) und einen Sicherheitszuschlag von 20 % erhalten wir folgende Formel für die Übergreifzone:

$$X1B = SF_{100\%} \cdot X_L \cdot \frac{120\%}{100} = \frac{1 + k_{XEL} + k_{XEM}}{1 + k_{XER}} \cdot X_L \cdot 1,2$$

Mit dem gewählten $k_{XER} = 0,71$ erhalten wir $X1B = 165\% X_L$.

Ohne Parallelleitungskompensation muss also die Übergreifzone sehr hoch eingestellt werden, damit bei Doppelleitungsbetrieb ein Sicherheitszuschlag von 20 % gewährleistet ist.

5.1.6 Reichweite der Reservezonen bei Erdfehlern

Wir betrachten das Verhalten der Distanzmessung mit und ohne Parallelleitungskompensation.

5.1.7 Distanzmessung ohne Parallelleitungskompensation

Für den einfachen Fall, dass auf die Parallelleitung eine Einfachleitung folgt (Bild 21, Leitung 4 abgeschaltet), können wir die gemessenen Impedanz wie folgt bestimmen:

Spannung am Relaiseinbauort:

$$\begin{aligned} U_{\text{Ph-E}} &= Z_{L1} \cdot I_{\text{Ph1}} + Z_{E1} \cdot I_{E1} + \frac{Z_{0M1-2}}{3} \cdot I_{E2} \\ &+ \frac{x}{l_2} Z_{L2} \cdot I_{\text{Ph3}} + \frac{x}{l_2} Z_{E2} \cdot I_{E3} \end{aligned}$$

Mit $I_{\text{Ph1}} = I_{E1} = I_{E2} = I_K$ und $I_{\text{Ph3}} = I_{E3} = 2 \cdot I_K$ erhalten wir für die Relaisreaktanz:

$$\begin{aligned} X_{\text{Ph-E}} &= \frac{U_{\text{Ph-E}} \cdot \sin \varphi_K}{I_{\text{Ph1}} + k_{\text{XER}} \cdot I_{E1}} = \\ &= \frac{1 + k_{\text{XEL1}} + k_{\text{XEM1-2}}}{1 + k_{\text{XER}}} \cdot X_{L1} + 2 \cdot \frac{x}{l_2} \cdot \frac{1 + k_{\text{XEL3}}}{1 + k_{\text{XER}}} \cdot X_{L2} \end{aligned}$$

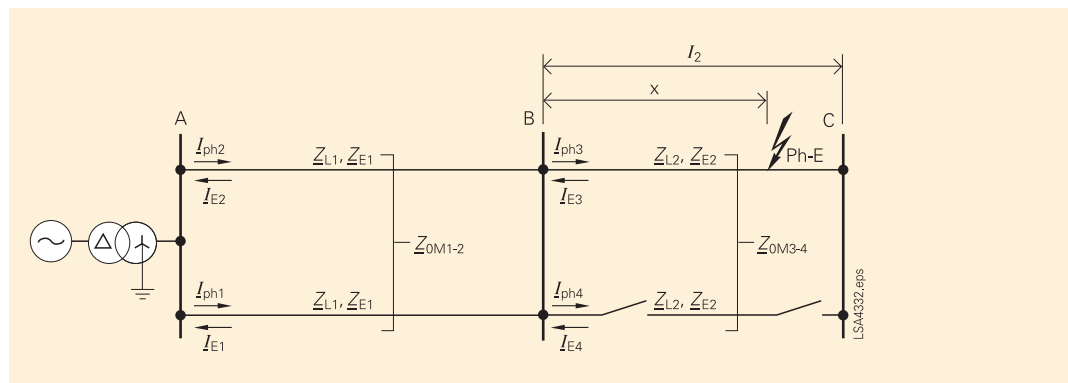


Bild 21 Distanzmessung auf Doppelleitungen: Fehler auf einer Folgeleitung

Wenn wir $x/l_2 = 0$ setzen, erhalten wir die gemessene Reaktanz bei einem Fehler in der Gegenstation. Für das gerechnete Beispiel ergibt sich der Wert

$$X_{\text{Ph-E}} = \frac{1 + 0,71 + 0,64}{0,71} = 1,37 \cdot X_{L1}$$

Daraus ersehen wir, dass im vorliegenden Fall die Reservezonen erst dann über die nächste Station reichen, wenn sie größer als 137 % Z_{L1} eingestellt sind. Dies trifft bei der gewählten Einstellung nicht für die 2. Zone zu.

Bei der auf Basis der Phasenkurzschlüsse gewählten Staffelung (120 %) würde die 2. Zone im Parallellitungszustand bei Erdfehlern nur bis 91 % Z_{L1} reichen.

Dieses Problem tritt besonders dann auf, wenn die folgende Leitung nach der die 2. Zone gestaffelt werden muss, wesentlich kürzer ist als die eigene Leitung und nur eine kleine Zwischeneinspeisung vorhanden ist.

$$\underline{U}_{\text{Ph-E}} = \underline{Z}_{L1} \cdot \underline{I}_{\text{Ph1}} + \underline{Z}_{E1} \cdot \underline{I}_{E1} + \frac{\underline{Z}_{0M1-2}}{3} \cdot \underline{I}_{E2} + \frac{x}{l_2} \underline{Z}_{L2} \cdot \underline{I}_{\text{Ph3}} + \frac{x}{l_2} \underline{Z}_{E2} \cdot \underline{I}_{E3} + \frac{x}{l_2} \frac{\underline{Z}_{0M3-4}}{3} \cdot \underline{I}_{E4}$$

Mit $\underline{I}_{\text{Ph1}} = \underline{I}_{E1} = \underline{I}_{E2} = \underline{I}_k$ sowie

$$\underline{I}_{\text{Ph3}} = \underline{I}_{E3} = \left(2 - \frac{x}{l_2}\right) \cdot \underline{I}_k \text{ und } \underline{I}_{E4} = \frac{x}{l_2} \cdot \underline{I}_k$$

erhalten wir:

$$\underline{X}_{\text{Ph-E}} = \frac{1 + k_{\text{XEL1}} + k_{\text{XEM1-2}}}{1 + k_{\text{XER}}} \cdot \underline{X}_{L1} + \frac{\frac{x}{l_2} \left(2 - \frac{x}{l_2}\right) \cdot (1 + k_{\text{XEL2}}) + \left(\frac{x}{l_2}\right)^2 \cdot k_{\text{XEM3-4}}}{1 + k_{\text{XER}}} \cdot \underline{X}_{L2}$$

Durch die Auflösung nach x/l_2 gewinnen wir wieder die Formel für die Reichweite der Zonen:

$$\frac{x}{l_2} = \frac{2(1 + k_{\text{XEL2}}) - \sqrt{4(1 + k_{\text{XEL2}})^2 - 4(1 + k_{\text{XEL2}} - k_{\text{XEM3-4}}) \cdot \Delta}}{2 \cdot (1 + k_{\text{XEL2}} - k_{\text{XEM3-4}})}$$

mit

$$\Delta = \frac{\underline{X}_{L1}}{\underline{X}_{L2}} \cdot \left[(1 + k_{\text{XER}}) \cdot \frac{\underline{X}_{\text{Zone}}}{\underline{X}_{L1}} - (1 + k_{\text{XEL1}} + k_{\text{XEM1-2}}) \right]$$

Für die Zone 3 (169 % \underline{X}_{L1}) erhalten wir $x/l_2 = 33$ %, d.h. nur geringfügig mehr als bei der Einfachleitung. Für die Anregezone (226 % \underline{X}_{L1}) wird der Ausdruck unter der Wurzel negativ, weil die Zone knapp über die übernächste Station hinausreicht. Die Grenze (Wurzel = 0) liegt bei 223 % \underline{X}_{L1} .

5.1.8 Distanzmessung mit Parallelleitungskompensation

Bei Anwendung der Parallelleitungskompensation werden Fehler auf der eigenen Leitung distanzrichtig gemessen.

Für Fehler hinter der nächsten Station ergibt sich eine Erweiterung der Zonen um den Faktor:

$$k = \frac{1 + k_{\text{XER}} + k_{\text{XEMR}}}{1 + k_{\text{XER}}}$$

entsprechend den am Relais eingestellten Kompensationsfaktoren.

In den Gleichungen auf den Seiten 12 und 13 ist der Term $1 + k_{\text{XER}}$ durch $1 + k_{\text{XER}} + k_{\text{XEMR}}$ zu ersetzen.

Damit erhalten wir für die 2. Zone eine Reichweite bis zu 71 % \underline{Z}_{L2} , d.h. die Zone reicht bis dicht an das Ende der ersten Zone der Folgeleitung, die auf 85 % \underline{Z}_{L2} eingestellt ist.

Unter Berücksichtigung der Zwischeneinspeisung in Station B wird sich noch eine Verkürzung der 2. Stufe ergeben, so dass sich der Sicherheitsabstand noch erhöht.

Die 3. Zone ($169 \% Z_{L1}$) reicht mit der Parallelleitungskompensation knapp, und die Anregezone ($226 \% Z_{L1}$) sicher über die übernächste Station (C). (Einen Fehler in C würde $162 \% Z_{L1}$ entsprechen). Für die endgültige Festlegung der Einstellung wäre auch hier noch die Zwischeneinspeisung zu berücksichtigen.

■ 6. Zusammenfassung

Die Zoneneinstellung kann für die Doppelleitungen an Hand der aufgezeigten Rechengänge und den abgeleiteten Formeln abgeschätzt werden. In praktischen Fall sind die Zwischeneinspeisungen zu berücksichtigen, damit die zweite Zone bei Einhaltung der Selektivität sicher über die nächste Station gestaffelt werden kann und auf jeden Fall Sammelschienenfehler noch sicher erfasst werden.

Bei nicht unterschiedlichen Leitungslängen lässt sich meist auch ohne Parallelleitungskompensation ein akzeptabler Kompromiss für die Relais-einstellung finden. Bei kurzen Folgeleitungen ist jedoch eine Parallelleitungskompensation in Betracht zu ziehen.

Für die relativ aufwendige Überprüfung der Reservezonen und der Anregung stehen heute Rechenprogramme zu Verfügung.