

Inhalt

| | |
|---|----|
| Sternpunktbehandlung | 1 |
| Spannungen und Ströme bei Erdschluß | 10 |
| Übertragung der Primärgrößen durch die Wandler | 16 |
| Einrichtungen zur allgemeinen Erdschlußmeldung | 21 |
| Ermittlung der erdschlußbehafteten Leitung durch Erdschlußrichtungsrelais | 23 |
| Schnelle Richtungsmessung mit Hilfe der Zündschwingung | 27 |
| Die Bauformen der Erdschlußrichtungsrelais | 28 |
| Planen und Inbetriebsetzen des Erdschlußschutzes | 36 |

Sternpunktbehandlung

Die Behandlung des Netzsternpunktes hat auf die Übertragung der elektrischen Energie im gesunden Betrieb keinen Einfluß. In Bezug auf die Störanfälligkeit eines Netzes und die Anzahl der Auslösungen jedoch kommt der Schaltung des Netzsternpunktes gegen Erde große Bedeutung zu.

Der häufigste Fehler in allen Verteilernetzen ist der einpolige Erdfehler.

70 bis 90 % aller Netzstörungen beginnen als einpolige Fehler, d. h. als Durchschlag der Isolation eines Leiters gegen Erde (Bild 1).

Das Bild zeigt, daß die Anzahl der Störungen mit zunehmender Übertragungsspannung etwa quadratisch abnimmt.

Wenn man davon ausgeht, daß die Störanfälligkeit je übertragenem kW auf dem Wege von der Zentrale zum Verbraucher in allen Spannungsebenen etwa gleich sein soll, so muß die Netzisolation so bemessen werden, daß eine solche quadratische Kurve etwa eingehalten wird, da die über eine Leitung transportierte Leistung etwa mit dem Quadrat der Spannung wächst.

Die auf den Kilometer Leitungslänge bezogene Fehleranzahl muß also quadratisch mit steigender Spannung geringer werden.

Aus einpoligen Erdschlüssen entwickeln sich durch fortschreitende Zerstörung der Isolation häufig zwei- und dreipolige Kurzschlüsse.

Maßgeblich für die Geschwindigkeit der Isolationszerstörung ist die Größe des Stromes in der Fehlerstelle während des Erdschlusses.

Für die Größe dieses Erdschlußstromes ist bei geringem Widerstand zwischen Netzsternpunkt und Erde die Größe dieses Widerstandes maßgebend. Bei hohem Widerstand zwischen Netzsternpunkt und Erde bestimmen hauptsächlich Netzspannung und Größe (Erdkapazität) des galvanisch zusammenhängenden Netzes diesen Strom.

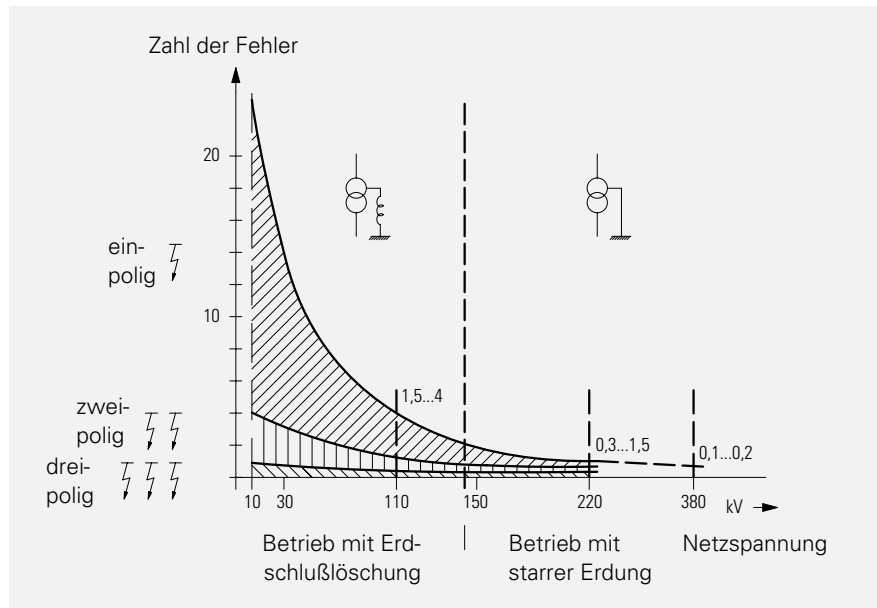


Bild 1 Fehlerzahl und Netzspannung

Im folgenden Abschnitt werden die im Energiesystem üblichen Erdungsarten vorgestellt und nach ihren wichtigsten Merkmalen beurteilt.

Eine die Wirksamkeit der Sternpunktterdung charakterisierende Größe ist die Höhe der zeitweiligen Spannungsüberhöhung infolge eines einpoligen Fehlers.

Die Erdungszahl ist von den absoluten Spannungswerten unabhängig und gibt Auskunft über die Begrenzung zeitweiliger Überspannungen. Neben der Erdungszahl Z_E wird heute mehr der Erdfehlerfaktor (c_f) verwendet. Beide Größen beziehen sich auf einen bestimmten Ort im Elektroenergiesystem.

$$Z_E = \frac{U_{LE \max}}{U_B}$$

$$c_f = \frac{\sqrt{3} U_{LE \max}}{U_B}$$

$U_{LE \max}$ = Effektivwert der Leiter-Erdespannung der gesunden Leiter

U_B = Betriebsspannungen

Die Kenngröße zur Bewertung transienter Überspannungen ist der Überspannungsfaktor k_t .

$$k_t = \frac{\sqrt{3} \hat{u}_{LE \max}}{\sqrt{2} U_B}$$

$\hat{u}_{LE \max}$ = max. Amplitude der Leiter-Erdespannung der gesunden Leiter

Freier Sternpunkt – isoliertes Netz (siehe Bild 2)

Betriebsverhalten:

- Ein Betrieb mit Erdfehler ist möglich, wenn das Isolationsniveau der Betriebsmittel in Ordnung ist.
- Fehlerlichtbogen müssen selbstständig verlöschen können
- Im Fehlerfall hat der Betreiber die Möglichkeit gezielter Netzsicherungen.

Isolationsniveau:

- Muß groß sein, da die transiente und stationäre Spannungserhöhung die Gefahr von Doppelerdschlüssen nach sich zieht.

Netzausdehnung:

- begrenzt durch Erdschlußstrom $I_{CE} < 60 \text{ A}$.

Aufwand bezüglich der Sternpunktbehandlung:

- keiner

Erdfehlerfaktor:

- $c_f = 1,7$

transiente Spannungsüberhöhung:

- $k_t \leq 3,5$

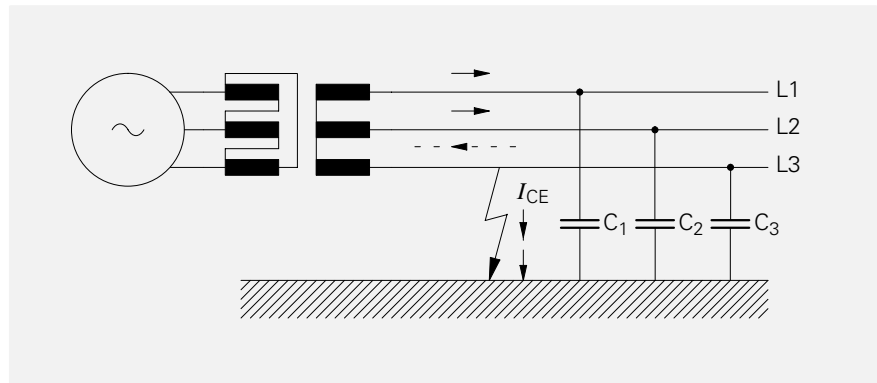


Bild 2
Freier Sternpunkt – isoliertes Netz

Fehlerstrom:

- Kapazitiver Erdschlußstrom

Schritt- und Berührungsspannungen:

- keine

Induktive Beeinflussung von Informationsanlagen:

- unbedeutend

Fehlererfassung:

- besondere Geräte zur selektiven Erfassung sind notwendig

Lichtbogen:

- brennen sehr unruhig mit zischender Flamme

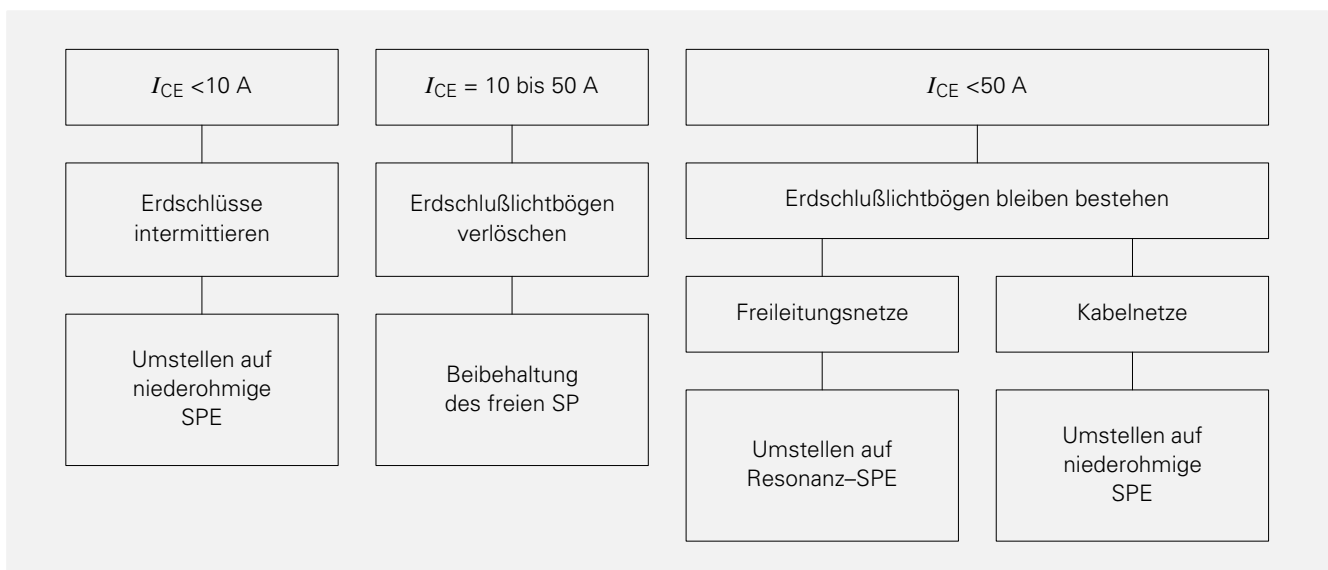
Wiederzündungsgefahr:

- groß, $k_t = 3,5$ bei intermittierenden Erdschlüssen (siehe Bild 3)

Verhalten nach Fehlerabschaltung:

- Möglichkeit von subharmonischen Schwingungen (Kippschwingungen)
- Ferroresonanzen

Grenzen der freien Sternpunkterdung (SPE)



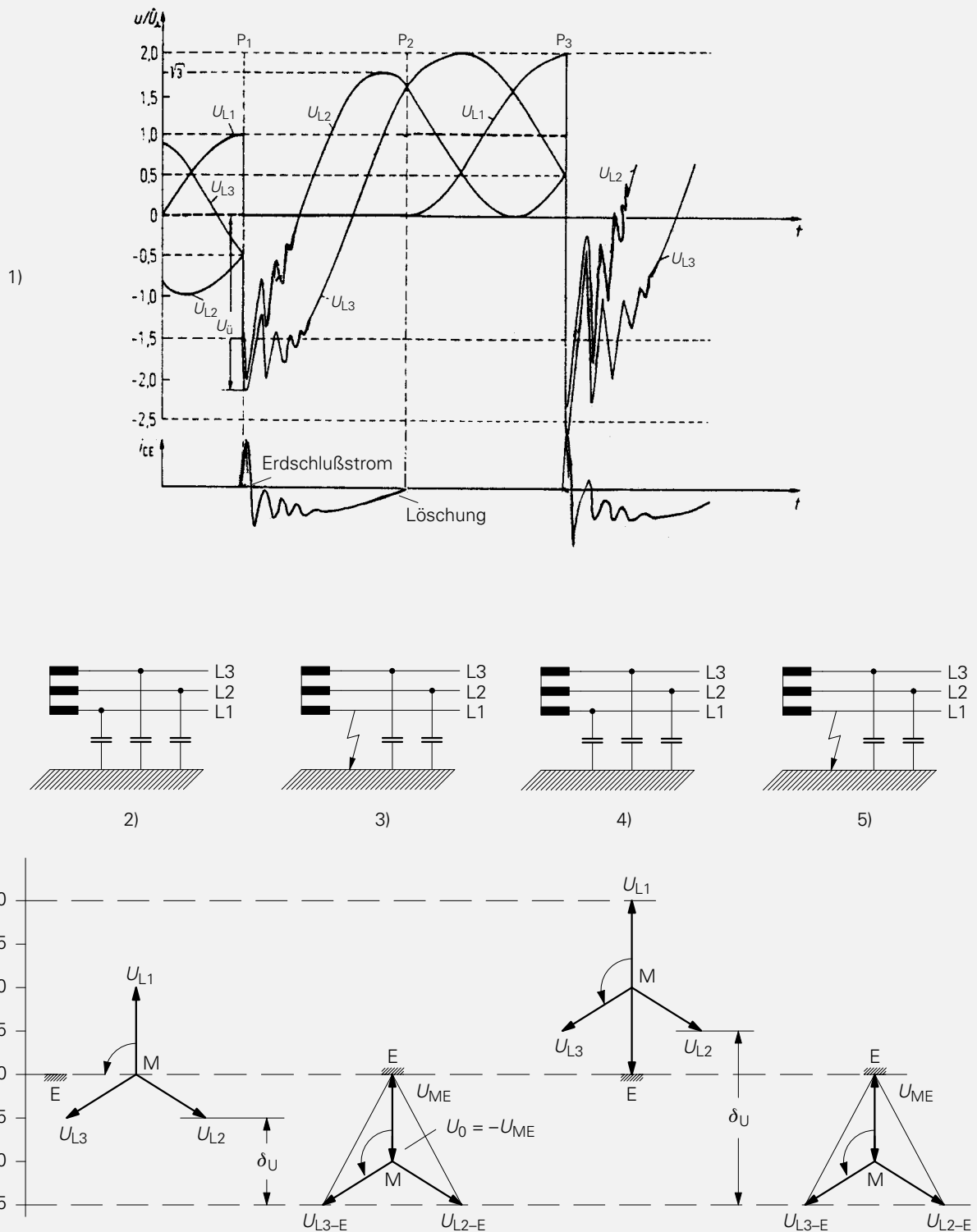


Bild 3
Intermittierender Erdschluß in einem Drehstromnetz mit freiem Sternpunkt

- 1) Zeitlicher Spannungsverlauf mit Dämpfung und Erdschlußstrom bei intermittierendem Erdschluß in Leiter L1
Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm:
- 2) vor dem Erdschluß (vor P_1)
- 3) direkt nach Erdschlußeintritt (nach P_1)
- 4) vor Wiederezündung des Erdschlusses (vor P_2)
- 5) nach Wiederezündung des Erdschlusses (nach P_3)

Zum Zeitpunkt des Stromnulldurchganges führen die gesunden Leiter den 1,5fachen Wert der normalen Leiter-Erdespannung. Die Nullspannung $U_0 = U_{ME}$ hat genau den Wert der Leiter-Erdespannung. Da sich die Spannung über den Kapazitäten nach Verlöschen des Stromes nicht sprunghaft ändern kann, bleibt dieser Zustand je nach Systemdämpfung einige Zeit bestehen. Zum Zeitpunkt P_3 besteht infolge des hohen Potentials im Leiter L1 und der ungenügend entionisierten Fehlerstelle erneut die Gefahr einer Wiederezündung. Die Spannung des Leiters L3 kann hierbei transiente Überspannungsfaktoren bis zu 3,5 erreichen, wogegen beim Erdschlußeintritt der Faktor $k_t \leq 2,7$ erreicht wird.

In Drehstromsystemen mit isoliertem Sternpunkt und geringer Ausdehnung, in denen einpolig geerdete induktive Spannungswandler benutzt werden, treten gelegentlich Kippschwingungen auf, welche die Spannungswandler thermisch zerstören können.

Anhand Bild 4 soll das Entstehen solcher Kippschwingungen erläutert werden.

Der Schwingkreis ist dann als kritisch zu bewerten, wenn die Dämpfung sehr gering ist, z. B. in Neuanlagen.

Im U/I -Diagramm sind neben nichtlinearen Kennlinien des Spannungswandlers die Kennlinien der Kapazität $U_C(I)$ und der aussteuernden Spannung U_a eingezeichnet.

Ausgangspunkt ist der Arbeitspkt. 1. Er ist stabil. Die Spannung über der Induktivität ist etwas größer als die erregende Spannung U_a . Ohne besondere Einflüsse kann dieser Punkt nicht verlassen werden. Er entspricht dem Betriebszustand. Durch transiente Spannungsbeanspruchung hervorgerufen, kann z. B. bei Erdschlüssen der Strom und die Spannung U_a auf größere Werte aufschwingen. Ist das Aufschwingen so groß, daß der Punkt 4 etwas überschritten wird, so kippt das System in den Arbeitspunkt 5. Der Arbeitspunkt 5 wird verlassen, wenn sich die erregende Spannung auf den vor der transienten Änderung vorhandene Größe wieder einstellt. Im Arbeitspunkt 3 schwingt das System nun mit sehr großen Strömen und Spannungen.

Der Arbeitspunkt 2 ist kein stabiler Arbeitspunkt.

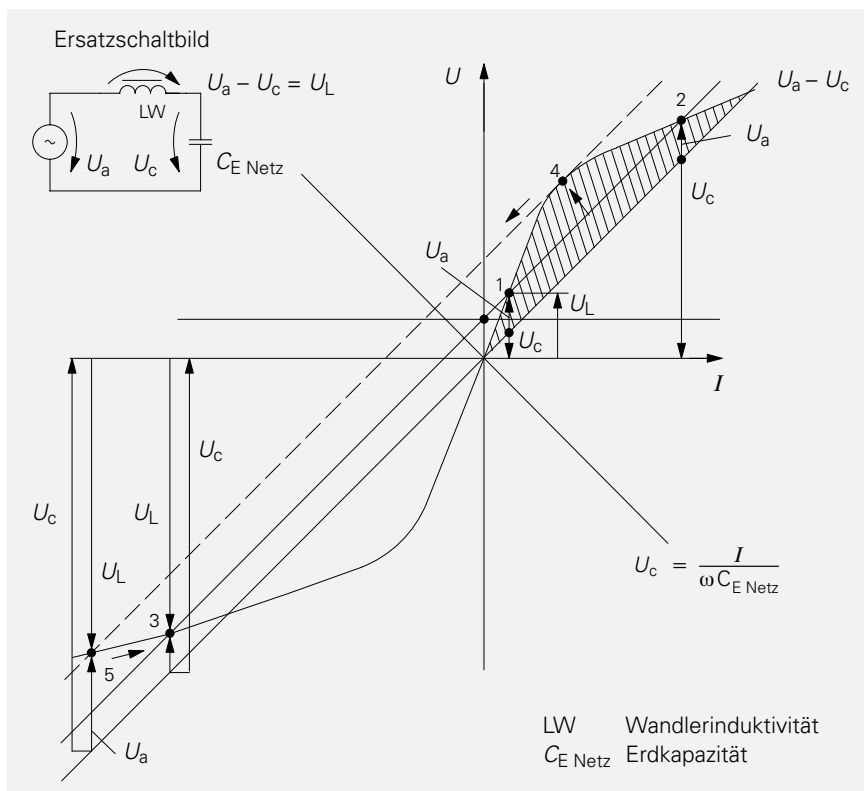


Bild 4 Harmonische Resonanz im nichtlinearen Kreis, kippen über der Spannung

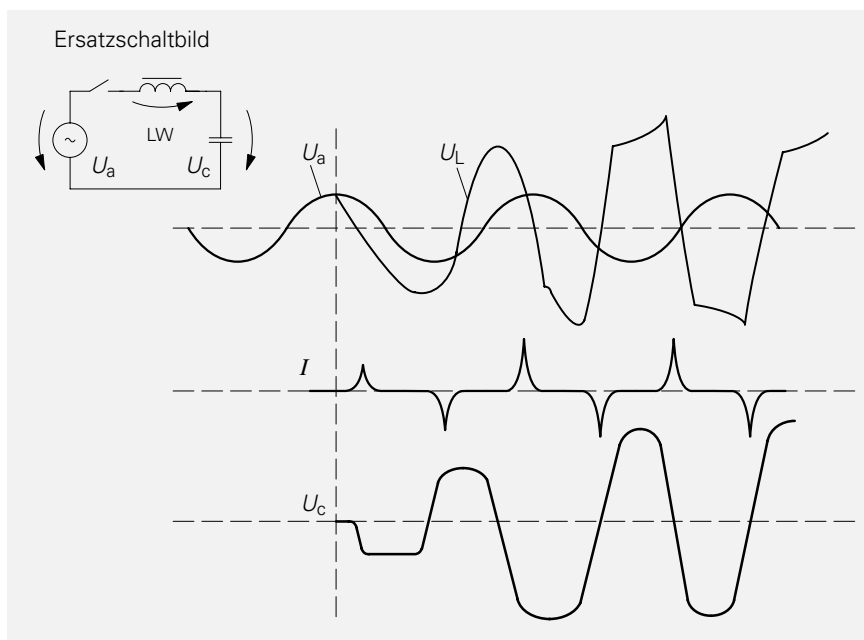


Bild 5 Kippschwingungen

Durch die Aussteuerung der Magnetisierungskennlinie im nichtlinearen Bereich entspricht der Strom nicht der Sinusform.

Es bilden sich vorwiegend ungeradzahlige Oberwellen aus 3. und 5. Harmonischen (Bild 5).

Dieser Zustand bleibt unter Umständen sehr lange bestehen, was durch Schwebungen der Zeiger der angeschlossenen analogen Instrumente

und einem starken Brummen des Spannungswandlers zu beobachten ist.

Abhilfe schafft die Bedämpfung des Systems mit einem ohmschen Widerstand parallel zu in Dreieck geschalteten Spannungswandlerwicklungen (Neuwicklung).

Als Richtwert wird ein Widerstand von ca. $50 \Omega/200$ Watt angegeben.

Resonanz – Sternpunktterdung

(siehe Bild 6)

Betriebsverhalten:

- Ein Betrieb mit Erdschluß ist möglich.
- Automatisches Löschen der Erdschlüsse bei ordnungsgemäßer Kompensation in wenigen Millisekunden.
- Induktiver Spulenstrom kompensiert kapazitiven Fehlerstrom an der Fehlerstelle.
- Erhöhte Betriebszuverlässigkeit gegenüber dem isolierten Netz.

Isolationsniveau:

- Gleiche Anforderungen wie beim isolierten Netz.

Netzausdehnung:

- größer als beim isolierten Netz
- durch Löschgrenze der Lichtbögen begrenzt:
 $U_N \leq 30 \text{ kV} \quad I_{\text{Rest}} \leq 60 \text{ A}$
 $U_N \leq 110 \text{ kV} \quad I_{\text{Rest}} \leq 120 \text{ A}$

Aufwand bezüglich der Sternpunktbehandlung:

- groß, Erdschlußspulen (Petersenspulen), Kompensationsgradüberwachung, Verstimmungsgradregler

Erdfehler:

- $c_f = 1,7$

transiente Spannungsüberhöhung:

- $k_f \leq 2,5$

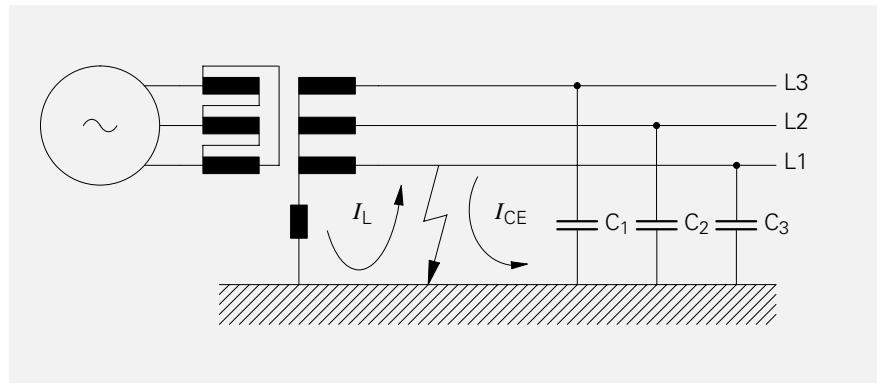


Bild 6
Resonanz – Sternpunktterdung

Fehlerstrom:

- Wirkanteil im Freileitungsnetz:
 - Verluste der Petersenspulen
 - Koronaverluste
- Wirkanteil im Kabelnetz:
 - Verluste der Petersenspulen
 - dielektrischen Verluste
- Blindanteil:
 - abhängig von Verstimmung und Länge des fehlerbehafteten Abzweiges

Schritt- und Berührungsspannungen:

- keine unzulässigen Beanspruchungen aufgrund des geringen Nullstromes

Induktive Beeinflussung von Informationsanlagen:

- unbedeutend

Fehlererfassung:

- besondere Geräte zur selektiven Erfassung sind notwendig

Lichtbogen:

- verlöschen größtenteils von selbst, brennen durch ohmschen Verhalten ruhig

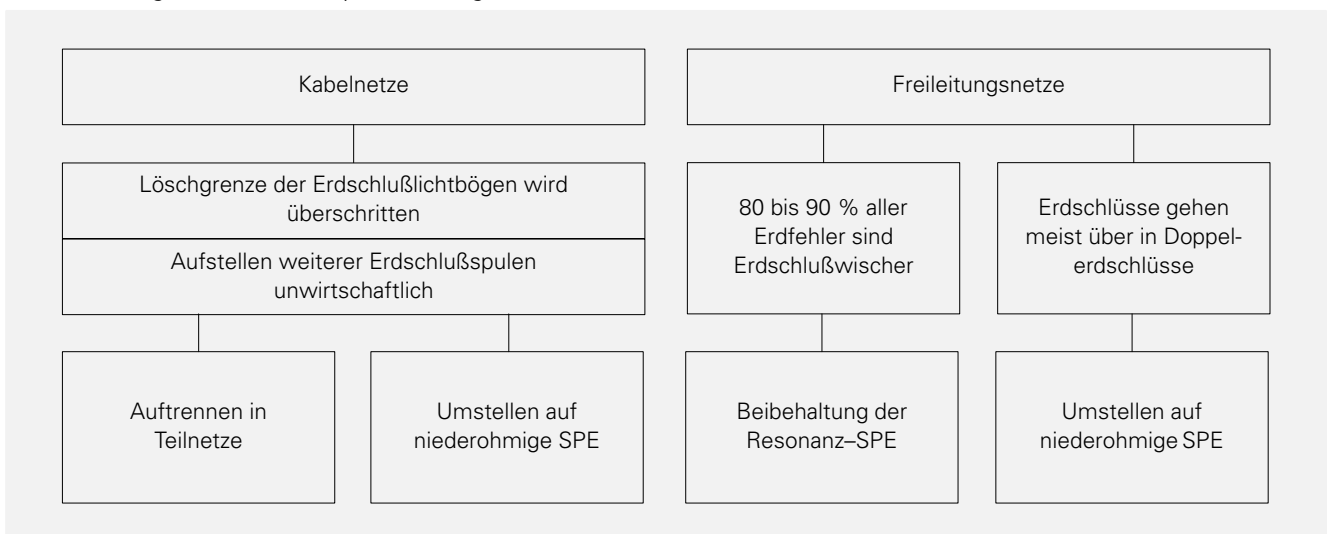
Wiederzündungsgefahr:

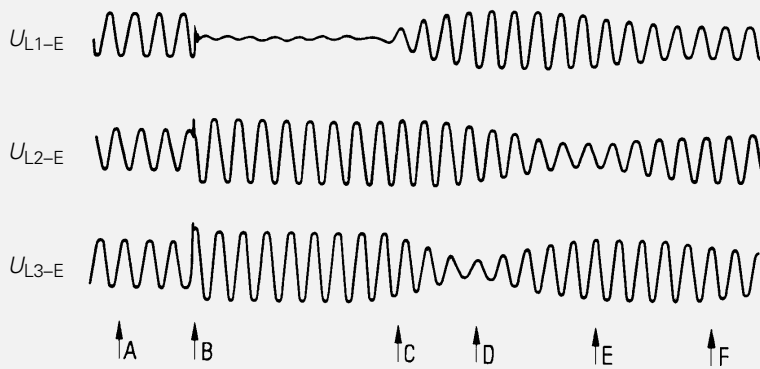
- nicht möglich bzw. unwahrscheinlich, da die Spannung im fehlerbehafteten Leiter langsam wiederkehrt

Verhalten nach Selbstlöschung oder Fehlerabschaltung:

- Die Spannung kehrt im fehlerbehafteten Leiter mit der Eigenfrequenz des Netzes wieder (Bild 7).
- Die wirksamen Zeitkonstanten sind verstimmungsabhängig. $\tau > 300 \text{ ms}$ bei exakter Kompensation.

Grenzen der gelöschten Sternpunktterdung

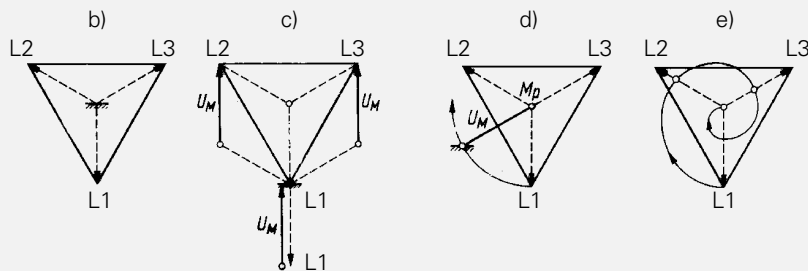
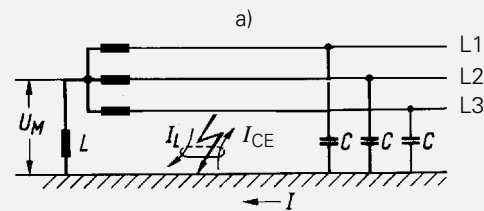




Oszillogramm eines Erdschlusses mit nachfolgendem Einschwingvorgang

U_{L1-E} , U_{L2-e} , U_{L3-E}
Spannungen gegen Erde

- A Gesundes Netz
- B Beginn des Erdschlusses
- C Löschen des Erdschlusses
- D Durch Ausschwingen der Petersenspule hervorgerufene Verminderung der Erdspannung des gesunden Leiters L3
- E desgl. im Leiter L2
- F desgl. im Leiter L1



Ersatzschaltbild und Spannungsdiagramme

- a) Schwingfähiges System
Netzkapazität Löscheinrichtung
- b) Gesundes Netz
- c) Erdschluß der Phase L1
- d) Erdschluß beendet, Netz kehrt in normalen Zustand zurück
- e) Weg des Erdpunktes (bei Unterkompensation)

Bild 7
Erdschluß und wiederkehrende Spannung im gelöschten Netz

Resistanz – Reaktanz – Sternpunktterdung (siehe Bild 8)

Kabelnetze

- Umstellung von Resonanz-Sternpunktterdung (auf Halbstarre) aufgrund zunehmender Erdfehlerhäufigkeit
- bei zunehmendem Vermaschungsgrad und Neuaufgaben im städtischen Bereich

Freileitungsnetze

- Überwiegend in gemischten Netzen mit großem Anteil an Kabeln

Betriebsverhalten:

Fehler muß abgeschaltet werden, Ausfall des Kabels

Isolationsniveau:

reduzierte, eventuell abgestufte Isolation möglich.

Netzausdehnung:

Begrenzung durch Anregeprobleme des Selektivschutzes, möglichst offene Ringe oder Strahlennetze.

Lange Stiche oder Parallelkabel vermeiden.

Aufwand bezüglich Sternpunktbehandlung:

- Reaktanz oder Resistanz mit Steuerung und Schutzeinrichtung für das Betriebsmittel
- Reaktanz bei höheren Leistungen wegen geringerer Kosten.

Erdfehlerfaktor:

$c_f \leq 1,4$ abhängig von Größe und Art der Impedanz für die Sternpunktterdung.

transiente Spannungserhöhung:

kleiner als im gelöschtem Netz
 $k_t = 1,8$ bis $2,5$

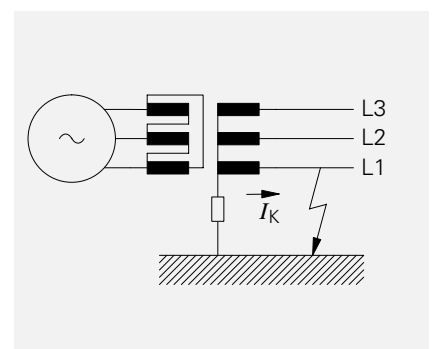


Bild 8
Resistanz – Reaktanz – Sternpunktterdung

Fehlerstrom

Kann je nach Größe des Sternpunktterdungswiderstandes kurzschlußartige Werte annehmen.

Begrenzung üblicherweise auf 0,3 bis 2 kA, um Betriebsmittel nicht zu hoch zu belasten.

Für die Schutzanregung ergeben sich bei Resistanz- und Reaktanz- erdung unterschiedliche Verhältnisse (Bild 9 bzw. Bild 10).

Resistanzterdung:

- Der kapazitive Erdschlußstrom wirkt anregeunterstützend.
- Das System ist vom Netzschaltzustand wenig beeinflusst.
- Der Stromverlauf ist beim Fehler eintritt praktisch nicht verlagert.

Reaktanzsternpunktterdung:

- Kapazitiver Erdschlußstrom wirkt nicht anregeunterstützend sondern mindernd.
- Der Stromverlauf ist je nach Fehler eintrittszeitpunkt einseitig verlagert und während des Fehlerverlaufs nicht konstant.

Schritt- und Berührungsspannung kann unzulässige Werte je nach Stromgröße annehmen.

Induktive Beeinflussung von Informationsanlagen

sind unwahrscheinlich, da vorwiegend in Kabelnetzen eingesetzt.

Fehlererfassung

durch Netzschutz bzw. eigenständigen Nullstromrichtungsschutz bzw. Unterimpedanzanregung.

Lichtbogen:

Zerstörungsgefahr des Betriebsmittels bei zu langer Fehlerdauer, keine selbsttätige Löschung.

Wiederzündungsgefahr:

nicht vorhanden

Verhalten nach Fehlerabschaltung:

Transiente Überspannungen bei Resistanzterdung, kleiner als im gelöschten Netz.

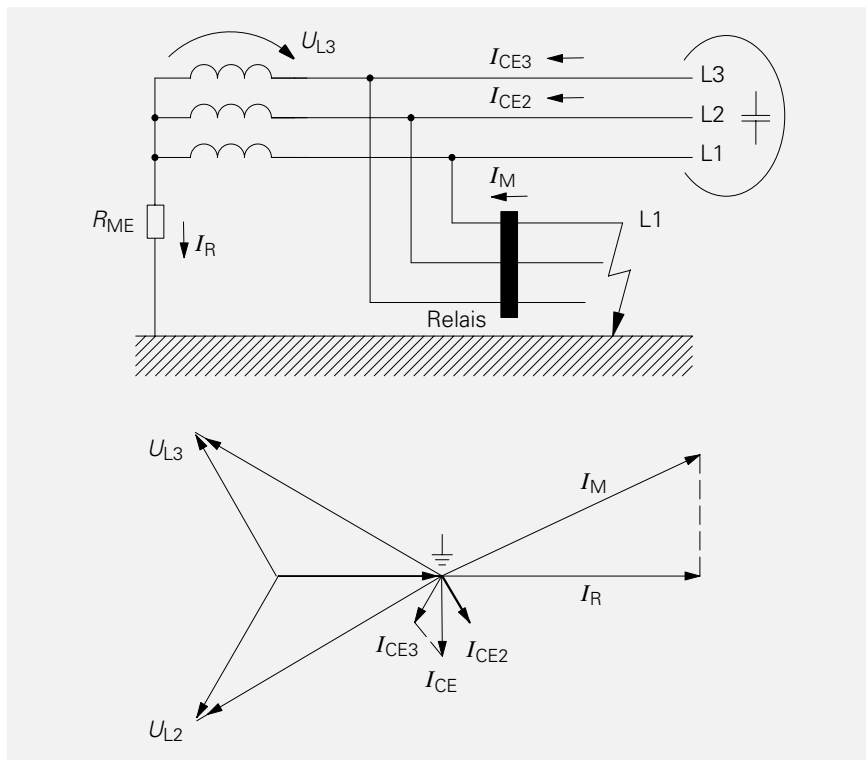


Bild 9
Resistanzterdung

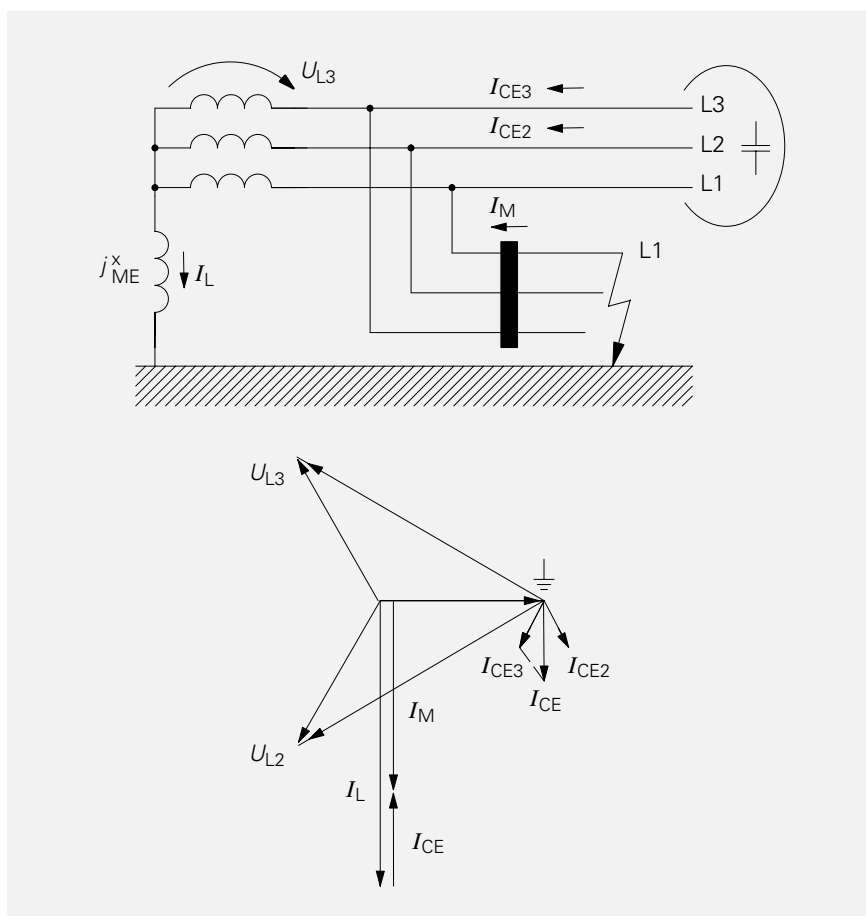


Bild 10
Reaktanzsternpunktterdung

Starre Sternpunktterdung:

(siehe Bild 11)

Starre Sternpunktterdung:

- alle 380/220-kV-Netze in Deutschland
- Netzausdehnung und Koronaverluste zu groß, um selbsttätiges Lichtbogenverlöschen zu erreichen.

Teilstarre Erdung

- Erdung nur an ausgewählten Sternpunkten, um den einpoligen KS-Strom zu begrenzen.

Betriebsverhalten:

Fehlerabschaltung, d. h. Ausfall der Leitung

Isolationsniveau:

reduzierte, eventuell abgestufte Isolation möglich

Netzausdehnung:

keine Begrenzung

Aufwand bezüglich Sternpunktbehandlung:

gering

Erdfehlerfaktor:

$c_f = 1,4$ an der Fehlerstelle

transiente Spannungserhöhung:

$k_t < 1,8$

Fehlerstrom:

Erdkurzschlußstrom abhängig von der Größe des Verhältnisses $\frac{Z_0}{Z_1}$

Schritt- und Berührungsspannungen:

unzulässige Werte sind möglich

Induktive Beeinflussung von Informationsanlagen:

unzulässige Beeinflussung, besondere Schirmmaßnahmen erforderlich

Fehlererfassung:

durch Netzschutz, bei Anregeproblemen mit empfindlichen Erdfehler-schutz

Lichtbogen

einpolige WE zur Fehlerbeseitigung

Wiederzündungsgefahr:

nicht vorhanden

Verhalten nach Fehlerabschaltung:

keine besonderen Erscheinungen

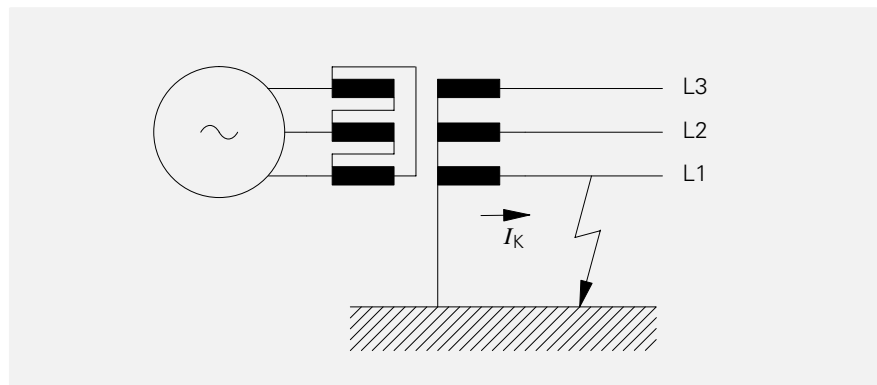


Bild 11
Starre Sternpunktterdung

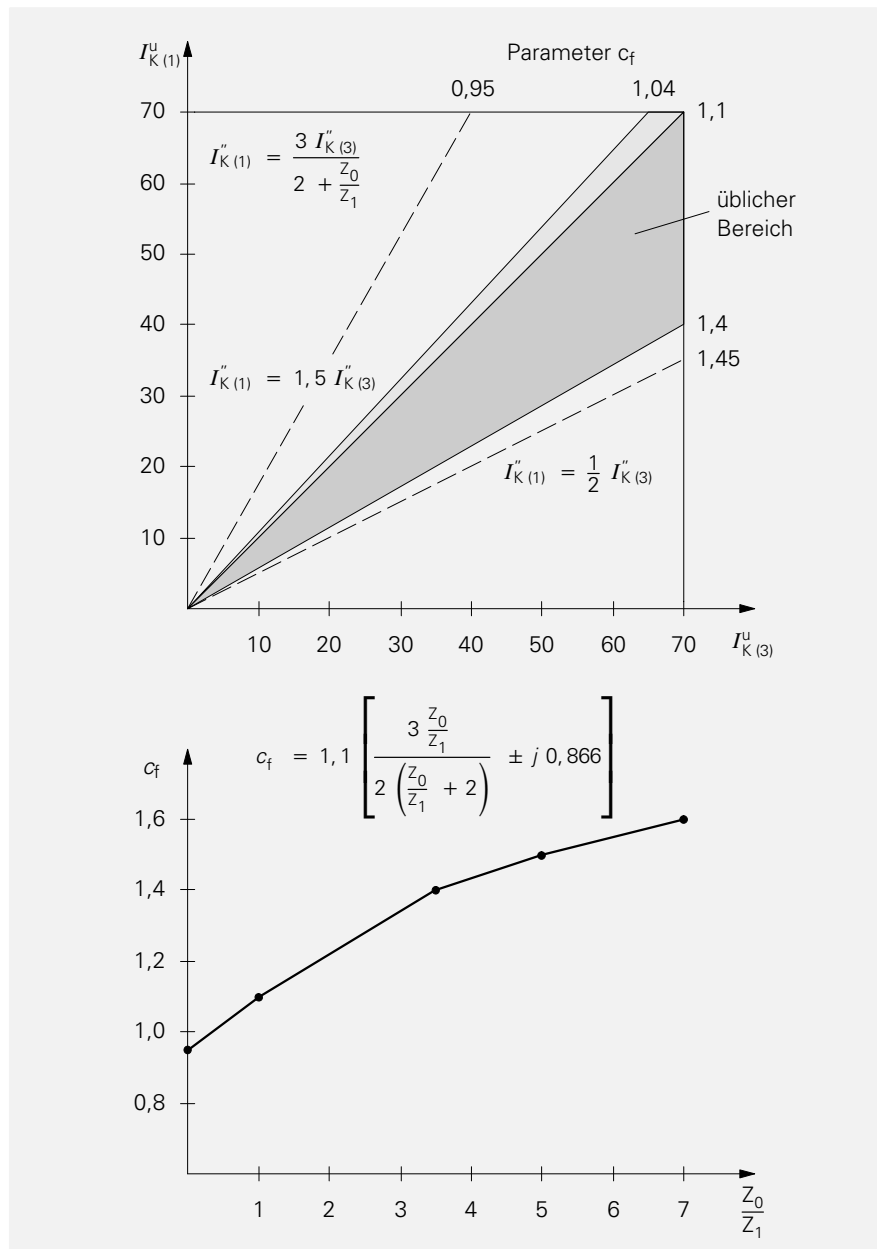


Bild 12
Zusammenhang zwischen ein- und dreipoligem Kurzschlußstrom unter der Annahme gleicher Impedanzwinkel der Null- und Mitimpedanz

Zusammenfassung:

Aus der Vielfalt der Möglichkeiten der Sternpunktbehandlung wird deutlich, daß es nicht nur eine einzige Lösung bezüglich der Verfügbarkeit, dem Aufwand der Erdungsanlage und der selektiven Fehlererfassung gibt.

- Kleine Netze ($I_{CE} < 50 \text{ A}$) z. B. Kraftwerk–Eigenbedarfsanlagen oder Industriebetriebe können mit isoliertem Sternpunkt betrieben werden.
- Mittel– und Hochspannungsnetze mit dem Hauptanteil an Freileitungen werden in Deutschland mit verteilten Petersenspulen ausgerüstet.

Diese Sternpunktbehandlung ermöglicht eine Betriebsführung, da die meisten Erdschlüsse schnell erlöschen und stehende Erdschlüsse über mehrere Stunden bis zu einer Netzausschaltung weiterbetrieben werden können.

In Kabelnetzen erfolgt eine Beruhigung des Fehlergeschehens und Minimierung der Rückzündungswahrscheinlichkeit.

Die Netzgröße ist durch den zulässigen ungelöschten Erdstrom begrenzt:
bei 6 bis 30 kV auf $I_{CE} < 600 \text{ A}$, bei 110 kV auf $I_{CE} \leq 1500 \text{ A}$

- In größeren Mittelspannungskabelnetzen kann eine Umstellung auf Resistanz– oder Reaktanzerdung ratsam sein, wenn die Wirksamkeit der Resonanzsternpunktterdung nicht mehr gegeben ist.

Da die Doppelerdschlußwahrscheinlichkeit mit der Netzgröße steigt, kann die Anzahl der Doppelerdschlüsse durch das Auftrennen in zwei bis drei Teilnetzen auf den vierten bis zehnten Teil reduziert werden

- Höchstspannungsnetze werden aufgrund der großen Ausdehnung starr geerdet. Darüberhinaus werden im Ausland, besonders in Übersee, aus historischen Gründen auch die Hochspannungsnetze wirksam geerdet.

Spannungen und Ströme bei Erdschluß

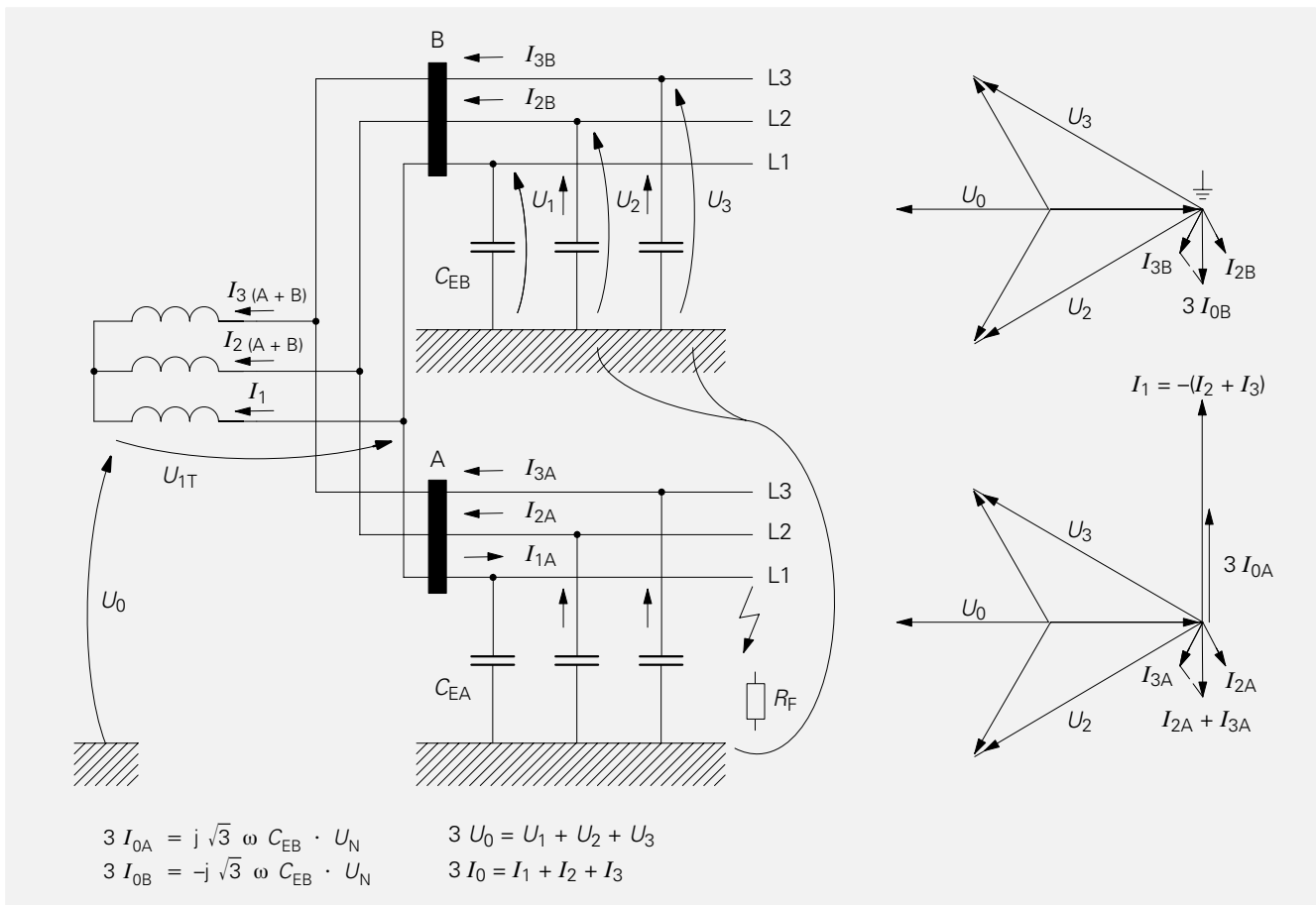


Bild 13
Stationäre Spannungs- und Stromvektoren im isolierten Netz

Isoliertes Netz (siehe Bild 13)

Bei Erdschlüssen ohne Übergangswiderstand erhöht sich die Spannung der gesunden Leiter um den Faktor $c_f = \sqrt{3}$.

Das Dreieck der Leiter-Leder-Spannungen bleibt auch bei hochohmigen Erdfehlern erhalten (siehe Bild 14).

- Die Spannungsvektoren sind im gesamten galvanisch zusammenhängenden Netz aufgrund des geringen Fehlerstromes nahezu gleich.
- Der Nullstrom in den fehlerfreien Abzweigen ist die vektorielle Addition der Erdschlußladeströme der fehlerfreien Leiter des Abzweigs.
 $3 I_0 = -j \sqrt{3} \omega C_E \text{ Abzweig } U_N$

- Im fehlerbehafteten Abzweig wird die Summe sämtlicher Abzweigströme abzüglich des Erdschlußladestromes des eigenen Abzweiges gemessen.

Daraus folgt, daß das fehlerfreie Netzteil den Meßstrom liefert und die Meßbedingungen für die Abzweige mit großem Verhältnis am besten sind.

$I_{CE \text{ Netz}} / I_{CE \text{ Abzweig}}$

- Nach Beseitigung des Erdfehlers schwingen die Spannungen sehr schnell auf ihre betrieblichen Größen ein.

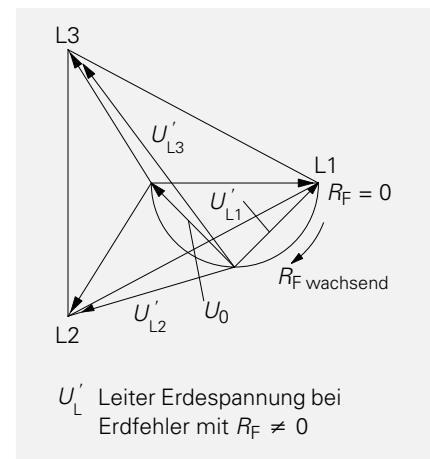


Bild 14
Dreieck der Leiter-Leder-Spannungen

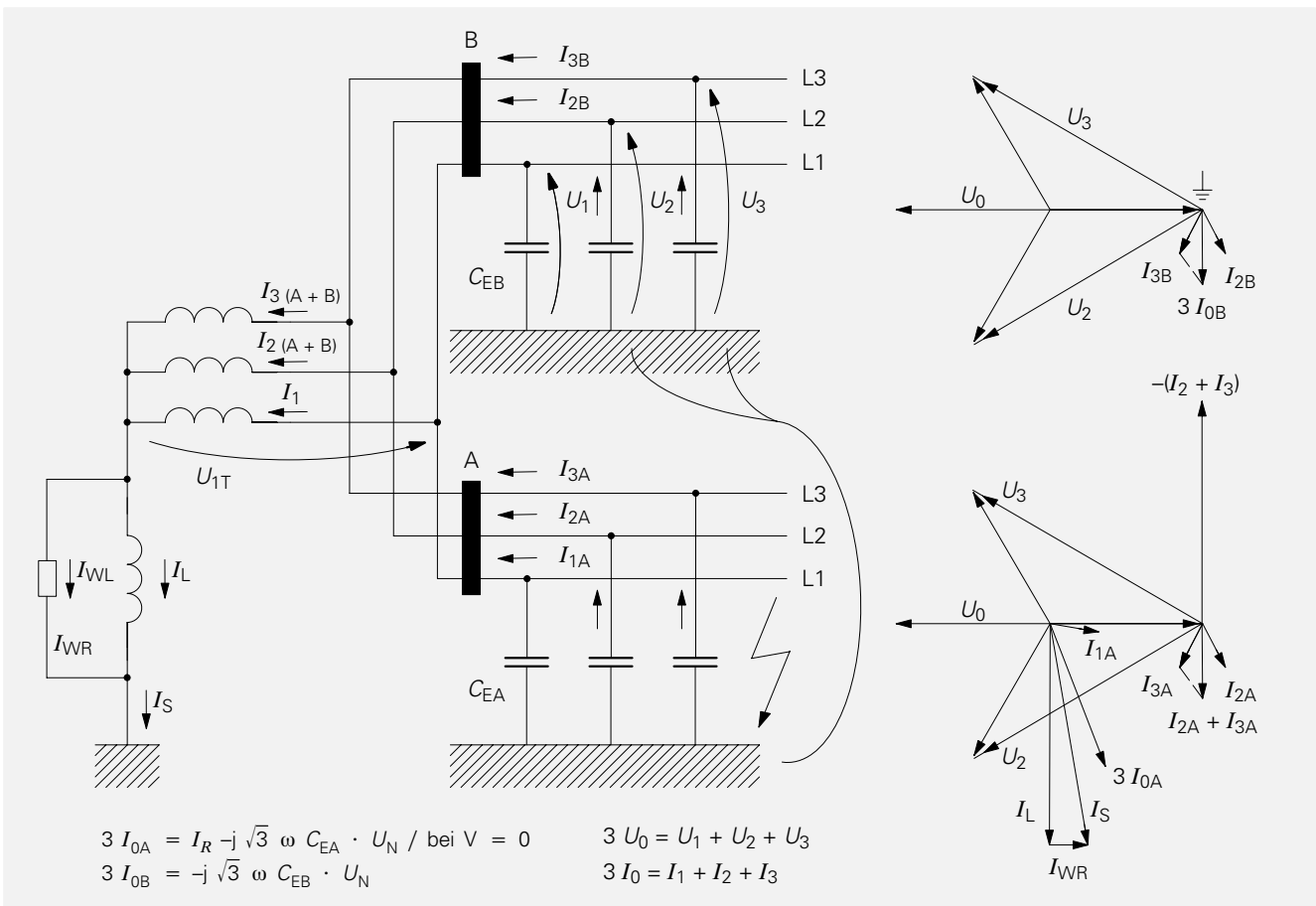


Bild 15
Stationäre Spannungs- und Stromvektoren im gelöschten Netz

Gelöschtes Netz (siehe Bild 15)

Ein Maß für den Kompensationsgrad ist die Verstimmung V .

$$V = \frac{I_{CE} - I_L}{I_{CE}}$$

$V < 0$ = Überkompensation

$V > 0$ = Unterkompensation

Ziel der Kompensation ist es, den kapazitiven Erdschlußstrom I_{CE} an der Fehlerstelle durch den induktiven Spulenstrom I_C aufzuheben. Aufgrund der ohmschen Verluste der Petersenspule (in Bild 15 durch I_{WR} dargestellt) sowie der Corona- und dielektrischen Verluste der Freileitungen und Kabel wird der Fehlerstrom auch bei exakter Kompensation ($V = 0$) eine Wirkkomponente enthalten. Die Verluste der Freileitungen und Kabel schwanken infolge Witterungsabhängigkeit, so daß eine exakte Berechnung schwierig ist.

Das Verhältnis Wattreststrom/kapazitiver Erdschlußstrom wird als Dämpfung bezeichnet.

$$d = \frac{I_{WR}}{I_{CE}}$$

Der Reststrom an der Fehlerstelle ist die Addition der ohmschen Verlustkomponenten der Petersenspule und des Netzes.

In Kabelnetzen betragen die dielektrischen Verluste nur ca. 0,2 % des Erdschlußstromes, so daß die Dämpfung im wesentlichen durch die Spulenverluste allein bestimmt ist.

Typische Dämpfungen:

| U_N | d |
|---------------|---------------|
| ≤ 30 kV | 0,02 bis 0,03 |
| ≤ 110 kV | 0,03 bis 0,06 |

Im praktischen Betrieb wird das Netz leicht überkompensiert betrieben ($V = 0,05$). Damit wird besonders bei Freileitungsnetzen die aufgrund der kapazitiven Unsymmetrie auftretende Verlagerungsspannung klein gehalten.

Im Gegensatz zum isolierten Netz zeigen die Spannungen nach Verlöschten des Erdschlusses noch eine Schwebung. Diese Schwebung ist durch das Ausschwingen des Schwingkreises Petersenspule-Netzterdkapazität begründet.

Bei exakter Kompensation bilden Spule und Erdkapazität des Netzes einen auf 50 Hz abgestimmten Schwingkreis. Mit Abschaltung einer Leitung und durch Überkompensation bedingt liegt die Resonanz nicht bei 50 Hz, sondern etwas darüber.

$$f_e = \sqrt{f_{\text{Netz}}^2 (1 - V)}$$

f_e = Eigenfrequenz des Schwingkreises

Diese Schwingung klingt entsprechend der Verluste langsam ab. Während die Verlagerungsspannung U_0 langsam verschwindet, kehrt die Spannung des fehlerbehafteten Leiters wieder.

Es vergehen mehrere Halbwellen bis die volle Spannungsrückbildung an der ionisierten Strecke erfolgt; darin ist das erfolgreiche Unterdrücken von Rückzündungen begründet.

Der Reststrom an der Fehlerstelle setzt sich somit aus dem durch die Dämpfung bestimmten Wattreststrom und dem durch die Verstimmung bedingten Blindstrom zusammen.

$$I_R = I_{CE} \sqrt{d^2 + V^2}$$

Der vom Relais erfaßte Strom $3 I_0$ ($3 I_{0A}$ im Bild 15) besitzt eine größere Blindkomponente als der Strom im fehlerbehafteten Leiter (I_{1A} in Bild 15). Diese Tatsache ist bei der Relaiseinstellung zu beachten und wird im Punkt "Planen und Inbetriebsetzen des Erdschlußschutzes" behandelt.

Ein einfaches Verfahren, die Abstimmung während des Betriebes festzulegen, ist das Beobachten der Sternpunkt-Erdspannung im fehlerfreien Netz.

Man schließt dabei an das offene Dreieck der Spannungswandler ein Voltmeter an, dessen Meßbereich man bei Freileitungen 3 bis 30 V und bei Kabelnetzen etwa 0,3 bis 3 V wählt. Stellt man jetzt die Petersenspule der Reihe nach auf ihre verschiedenen Anzapfungen ein, so muß eine ausgeprägte Resonanzkurve entstehen (siehe Bild 16).

Ströme und Spannungen bei Fehlereintritt

Anhand der Parameter eines Stichnetzes sollen die wichtigsten Eigenschaften des Erdschlußeintritts diskutiert und erläutert werden. Bild 17 zeigt das Übersichtsschaltbild eines Mittelspannungsnetzes mit einer Einspeisung. Bild 18 zeigt die Ersatzschaltung in symmetrischen Komponenten.

Zusätzliche Erklärung zu Bild 18:

- R_N, X_N Parameter der Einspeisung
- R_T, X_T Parameter des Transformators
- R_L, X_L Parameter des fehlerbehafteten Abzweiges
- C_{bN} Betriebskapazität des verbleibenden Netzteils
- C_{bA} Betriebskapazität des fehlerbehafteten Abzweiges
- C_P Erdkapazitäten (Nullkapazität)
- Z_M Magnetisierungsimpedanz des Transformators
- R_{0Tu}, X_{0Tu} Trafonullresistenz und Reaktanz der Unterspannungsgeräte
- 0, 1, 2 Parameter des Null-, Mit- und Gegensystems
- R_P, X_P Resistanz und Reaktanz der Petersenspule
- R_F Übergangswiderstand
- Z_L Last an der Sammelschiene

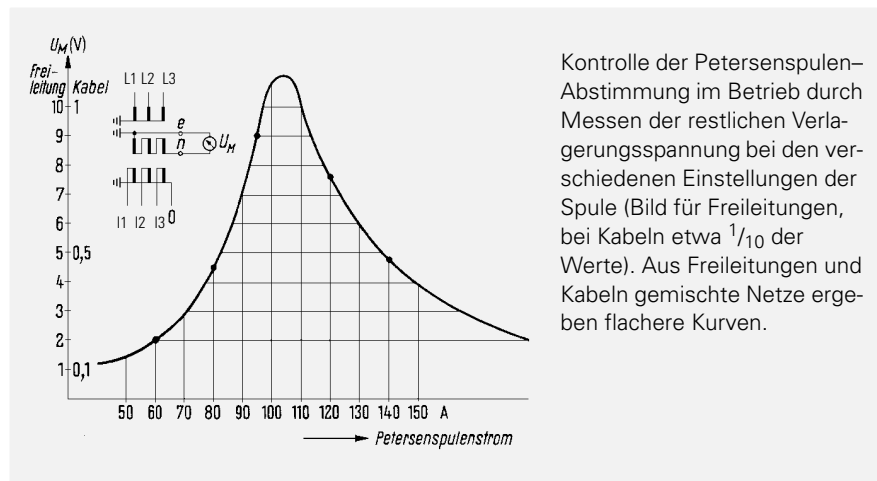


Bild 16 Resonanzkurve der Petersenspule

Kontrolle der Petersenspulen-Abstimmung im Betrieb durch Messen der restlichen Verlagerungsspannung bei den verschiedenen Einstellungen der Spule (Bild für Freileitungen, bei Kabeln etwa $1/10$ der Werte). Aus Freileitungen und Kabeln gemischte Netze ergeben flachere Kurven.

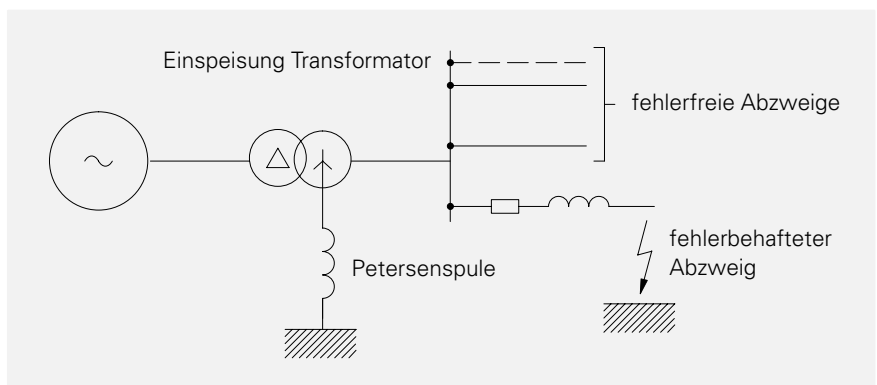


Bild 17 Stichnetz mit Erdschluß, Ersatzschaltbilder

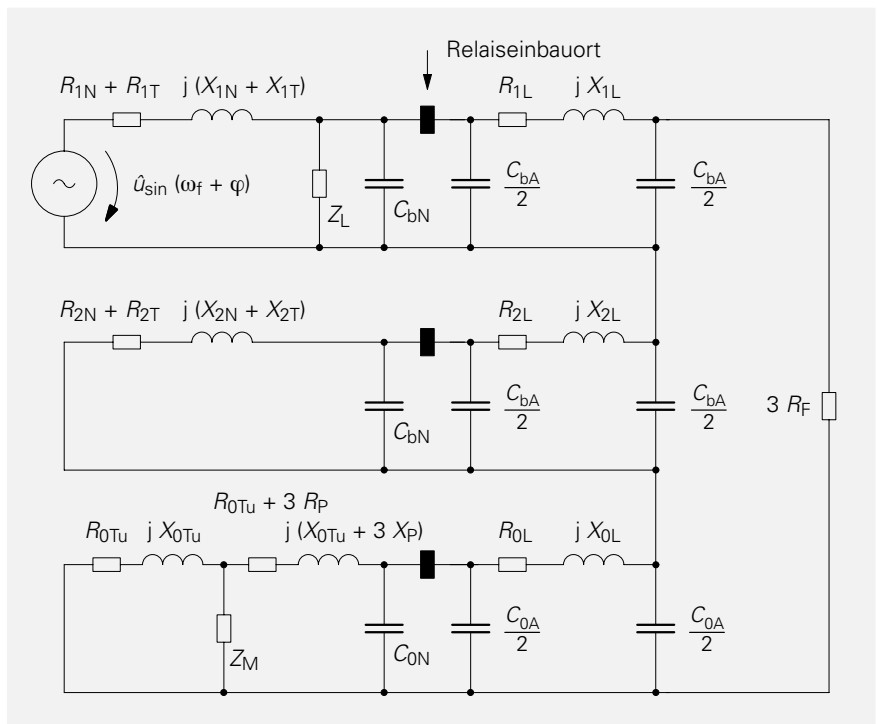


Bild 18 Ersatzschaltung in symmetrischen Komponenten

Die im Relais meßbaren Übergangsvorgänge können im Wesentlichen in drei deutlich unterscheidbare Phasen unterteilt werden. Zunächst wird beim Erdschlußeintritt die fehlerhafte Phase durch Wanderwellen entladen. Die Entladungsschwingung liegt im Frequenzbereich von etwa 10 bis 100 kHz. Da solche Vorgänge von den herkömmlichen Relais aufgrund der begrenzenden Eingangsfiler nicht erfaßt werden, wird hier nicht näher darauf eingegangen. Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen ist das symmetrische Dreileitersystem. Die Ladung der Betriebskapazitäten C_b ist proportional dem Momentanwert der Leiter-Erdespannung des fehlerbehafteten Leiters zum Zeitpunkt des Fehlereintritts. Nach dem Erdschlußeintritt treten folgende Vorgänge auf:

1. Entladung der Kapazität des fehlerbehafteten Leiters

Der hierfür wirksame Ersatzschwingkreis kann unter Vernachlässigung der Kapazitäten $C_{L\Lambda}$

des fehlerbehafteten Abzweiges

ermittelt werden (siehe Bild 19).

Es ist ersichtlich, daß bei diesem hochfrequenten Vorgang (Frequenzen bis ca. 5 bis 6 kHz) neben diesen Kapazitäten nur die Resistenzen und Reaktanzen des fehlerbehafteten Abzweiges eine Rolle spielen. Die Entladefrequenz f_e berechnet sich etwa zu

$$f_e \approx \frac{1}{\sqrt{L_{ers} \cdot C_{ers}}}$$

Da $L_{ers} = L_{0L} + 2 L_{1L}$ wesentlich geringer als die Induktivität des Transformators und der Petersenspule ist, wird deutlich, daß es sich hier um die Schwingung mit der größten Frequenz handelt. Die maximale Amplitude im Nullstrom $3 I_0$ ist bei Fehlereintritt im Spannungsmaximum zu erwarten.

2. Aufladung der Erdkapazitäten (C_0 im Ersatzschaltbild)

(Vor Fehlereintritt sind die Leiter-Erd-Kapazitäten aufgeladen. Dies entspricht einer geladenen Betriebskapazität $C_b = C_E + 3 C_{12}$ im Mitsystem).

Die Aufladung erfolgt über eine Nullspannung. Die Energiequelle ist der einspeisende Transformator.

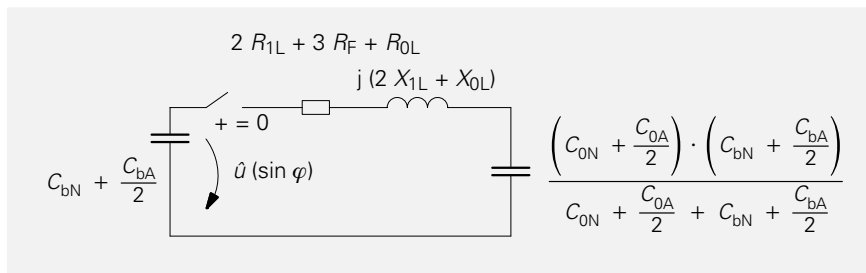


Bild 19 Ersatzschaltung zur Bestimmung der Entladeschwingung der fehlerhaften Phase

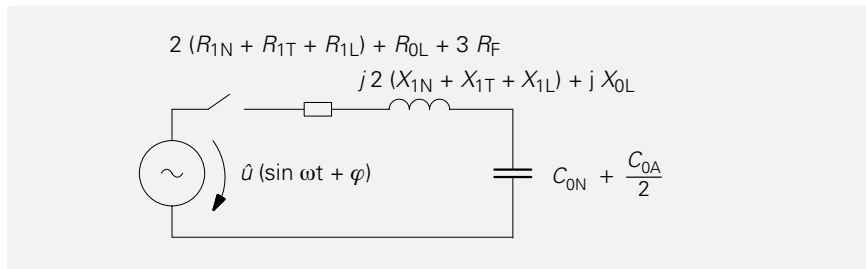


Bild 20 Ersatzschaltung zur Bestimmung der Entladeschwingung der gesunden Phase

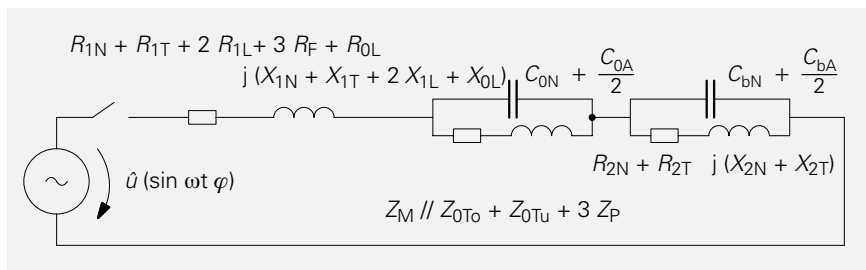


Bild 21 Ersatzschaltung in symmetrischen Komponenten

Damit ergibt sich ein Ersatzschwingkreis gemäß Bild 20. Die Frequenz dieser Schwingung

$$f_a \approx \frac{1}{\sqrt{L_{ers} \cdot C_{ers}}}$$

liegt je nach Netzgröße bei etwa 70 bis 3000 Hz und ist damit die der Entladeschwingung, da der Transformator mit seiner großen Induktivität eingeht. Aus dem Ersatzschaltbild folgt weiterhin, daß diese Komponente im Nullstrom $3 I_0$ der Einspeisung nicht meßbar ist, da bis zu diesem Zeitpunkt kein Strom über die Erdschlußspule fließt. Die beschriebene Schwingung entspricht im Drehstromsystem dem Aufladen der Leiter-Erde-Kapazitäten der gesunden Leiter auf verkettete Spannung bei satterm Erdschluß. Es erfolgt ein Größensprung um den Faktor $\sqrt{3}$ und einen Winkelsprung von 30° . Der Übergang kann gemäß der Elemente R, L, C nur in Form einer oszillierenden Schwingung erfolgen.

3. Einstellen der stationären Erdschlußströme und Spannungen

In diesem Fall ergibt sich die Ersatzschaltung gemäß Bild 21.

An diesem Vorgang ist jetzt auch die Petersenspule beteiligt. Der Strom kann anfangs einseitig verlagert sein, gemäß der Reihenschaltung R, L_p . Die maximale Verlagerung tritt beim Einschalten im Spannungsnulldurchgang auf. An der Fehlerstelle (über $3 R_F$) fließt bei exakter Kompensation nur noch der Wattreststrom.

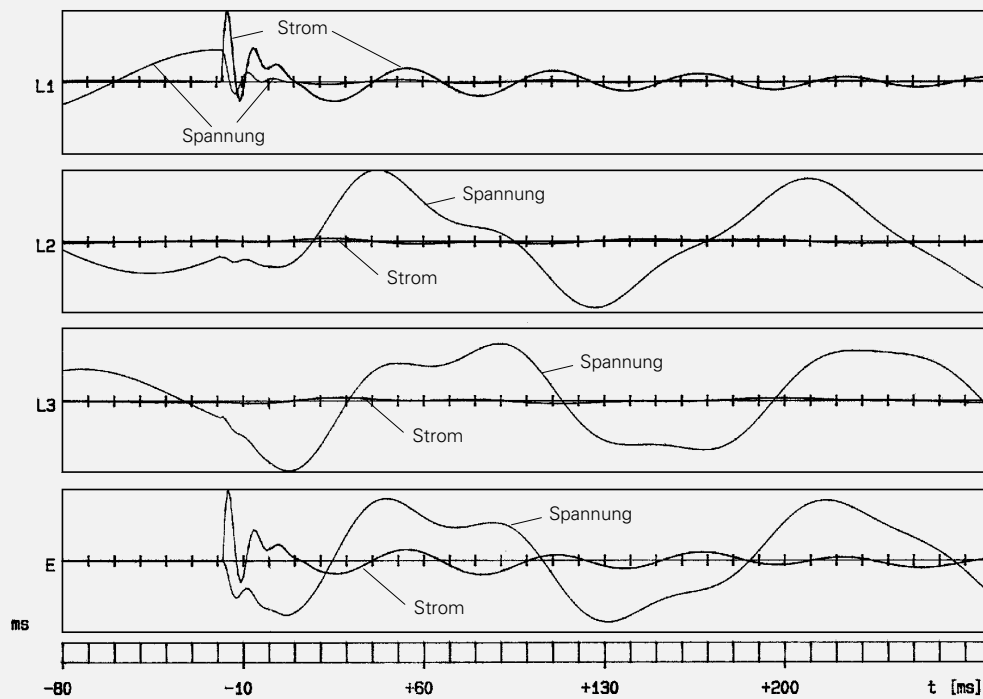


Bild 22
Ströme und Spannungen bei einem Erdschluß in einem gelöschten 110-kV-Netz für den Fall des Fehlereintritts im Spannungsmaximum (90 Grad).

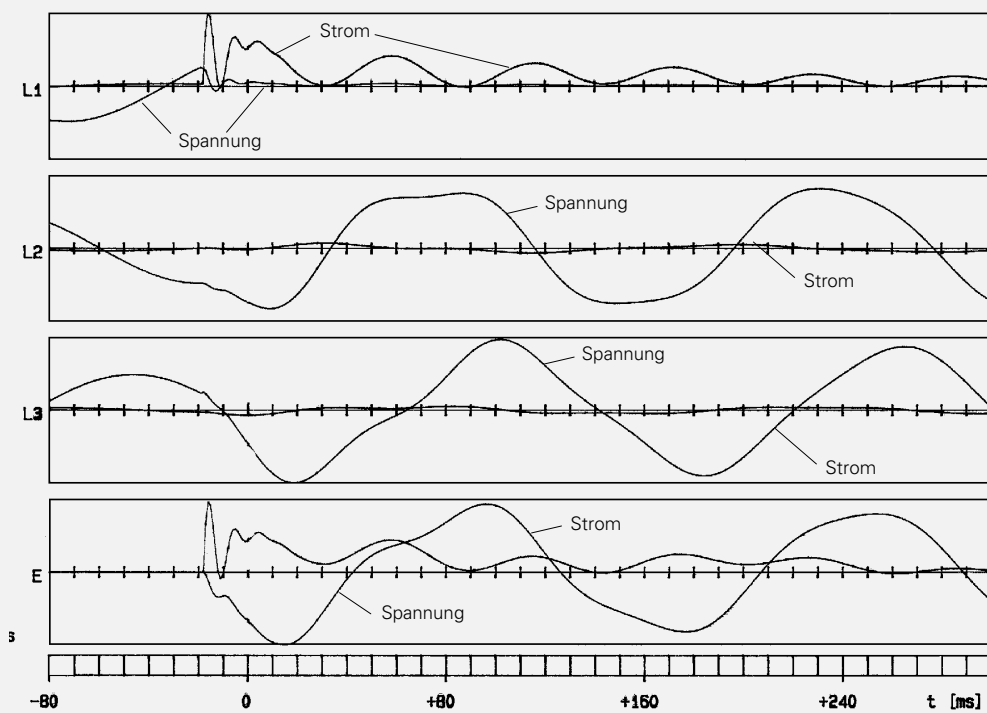


Bild 23
Größen bei gleichen Netzverhältnissen und einem Fehlereintrittszeitpunkt bei einem Winkel von 30 Grad nach dem Spannungsnulldurchgang.

Aus den Oszillogrammen (Bild 22 und Bild 23) lassen sich folgende Informationen ableiten:

1. Für einen Erdschluß Richtung Leitung/Kabel haben Nullstrom und Nullspannung zum Eintrittszeitpunkt entgegengesetztes Vorzeichen.
2. Die Spannungsbeanspruchung der fehlerfreien Leiter sowie die auftretenden 1. Amplituden im Nullstrom $3 I_0$ sind bei Erdschluß eintritt im Spannungsmaximum am größten.
3. Der Nullstrom ist als eine Überlagerung der erläuterten Vorgänge meßbar; seine ersten Amplituden betragen in der Regel das Vielfache des Wandlernennstromes.

Bild 25 zeigt die Größen Entladefrequenz f_e , Aufladefrequenz f_a und die maximale Amplitude des Nullstromes bezogen auf die Amplitude des Wandlernennstromes in Abhängigkeit vom Fehlerort für ein typisches 20-kV-Stichnetz mit einem kapazitiven Erdschlußstrom von 400 A.

Diese Aussagen gelten im Grundsatz auch für vermaschte Netze.

Oberschwingungsgehalt des stationären Nullstromes

Im fehlerfreien Betrieb liegt die Aussteuerung gemäß der Resonanzkurve im Arbeitspunkt.

Bild 24 zeigt die Magnetisierungskennlinie der Einspeisetransfos.

Aufgrund der nichtlinearen Übertragungsfunktion wird der stationäre Erdschlußstrom je nach Größe der Verlagerungsspannung bei Erdschluß (Arbeitspunkt B) ungeradzahlig Harmonische enthalten.

Die dominierende Frequenz ist dabei 250 Hz (Bild 26).

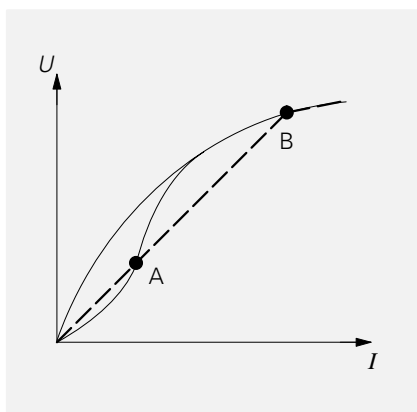


Bild 24
Trafomagnetisierung im Normalbetrieb (A) und bei Erdschluß (B)

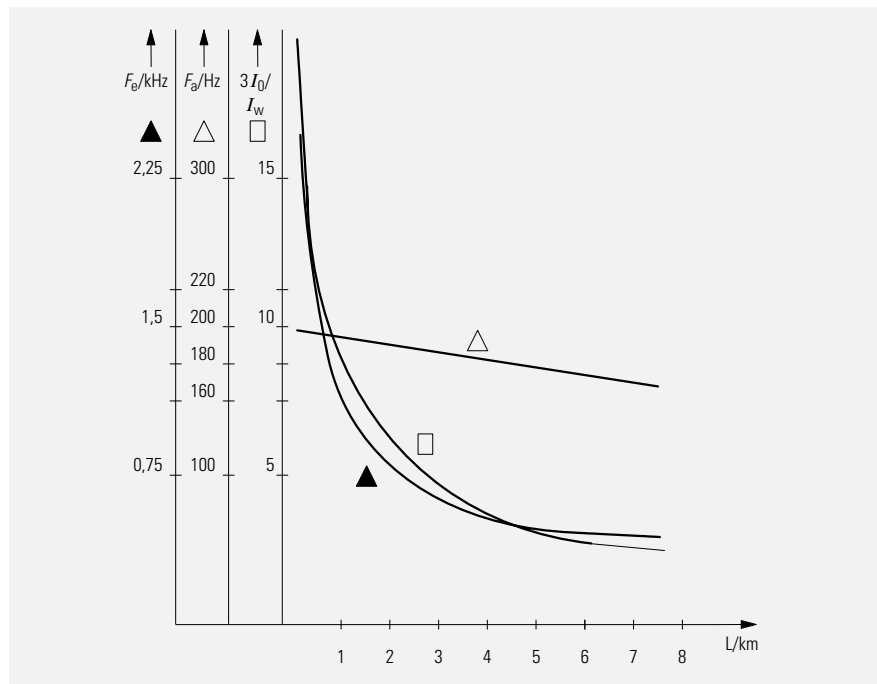


Bild 25
Netzgröße im Erdschlußfall

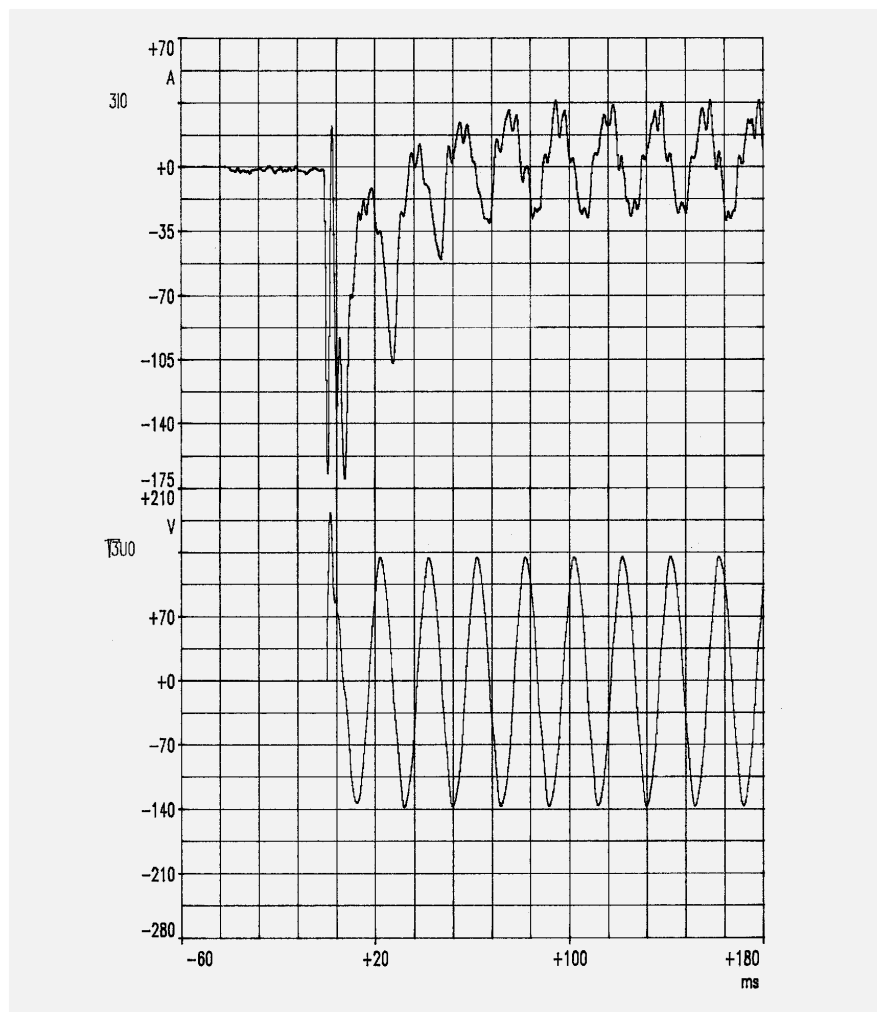


Bild 26
Nullstrom oberwellenbehaftet

Übertragung der Primärgrößen durch die Wandler

Zur Erdschlußrichtungsbestimmung werden Verlagerungsspannung und Erdschlußstrom ausgewertet. Für die entsprechenden Sekundärgrößen ist die Übersetzung der Wandler maßgebend.

Verlagerungsspannung

Das Übersetzungsverhältnis der Spannungswandler wird so gewählt, daß die Leiter-Leiter-Spannung der Sekundärseite bei hochspannungsseitiger Nennspannung 100 V beträgt. Die im Dreieck geschaltete dritte Wicklung der Spannungswandler wird im Gegensatz hierzu jedoch so bemessen, daß an ihm bei sattem Erdschluß 100 V auftreten, um an dem Relais eine genormte Spannung zu haben (siehe Bild 27).

Diese Spannung entspricht definitionsgemäß $\sqrt{3} U_0$. Sie wird gebildet, indem man die Spannungswandler z. B. für ein 110-kV-Netz mit einem Übersetzungsverhältnis

$$\frac{110000}{\sqrt{3}} \Big/ \frac{100}{\sqrt{3}} \Big/ \frac{100}{3}$$

ausführt.

Besitzen die verfügbaren Spannungswandler keine zweite Sekundärwicklung, so kann die Verlagerungsspannung $\sqrt{3} U_0$ durch einen Satz zwischen Wandler mit dem Übersetzungsverhältnis 100/(100/ $\sqrt{3}$ V) in der Schaltung nach Bild 27 gewonnen werden.

Zur Bildung der Verlagerungsspannung sind stets drei gegen Erde geschaltete Spannungswandler erforderlich. Die sogenannte V-Schaltung genügt nicht, da dort keine Spannung gegen Erde gemessen wird.

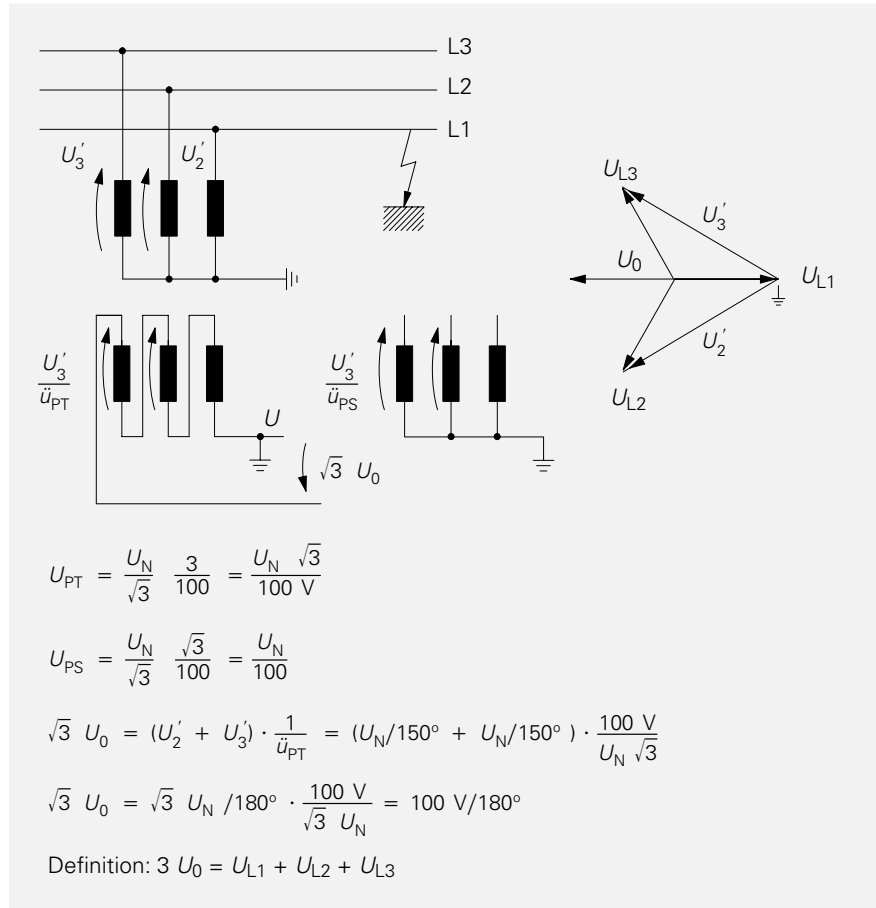


Bild 27
Bildung der Verlagerungsspannung

Erdschlußstrom

Für die meßtechnische Bestimmung der vom Erdschluß betroffenen Leitung ist neben der Verlagerungsspannung auch der Erdstrom $3 I_0 = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}$ heranzuziehen.

Die Hauptstromwandler in den drei Leitern bilden in ihrer Parallelschaltung gemäß der Definitionsgleichung diesen Strom ab. Die Anordnung nach Bild 28 wird als Holmgreenschaltung bezeichnet.

Der Erdstrom ist die vektorielle Summe der drei Leiterströme.

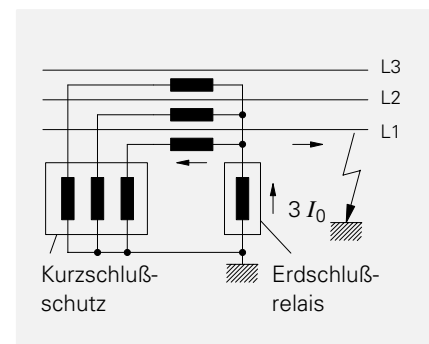


Bild 28
Holmgreenschaltung

Erdschlußstrom (Fortsetzung)

Die symmetrischen Betriebsströme addieren sich dabei zu Null. Im praktischen Betrieb werden infolge der Wandlerübertragungsfehler und der kapazitiven Unsymmetrie betriebsmäßig geringe Nullströme meßbar sein. In vermaschten Netzen kommt ebenfalls der Einfluß unterschiedlicher Leiterimpedanzen parallel geführter Leitungen zum Tragen. Um einen Erdstrom in jedem Fall messen zu können, sind stets 3 Wandler erforderlich.

Eine weitere Möglichkeit der Erdstromerfassung bietet ein alle drei Leiter umfassender Wandler, der gemäß seines Anwendungsgebietes als Kabelumbauwandler bezeichnet wird (siehe Bild 29 und Bild 30).

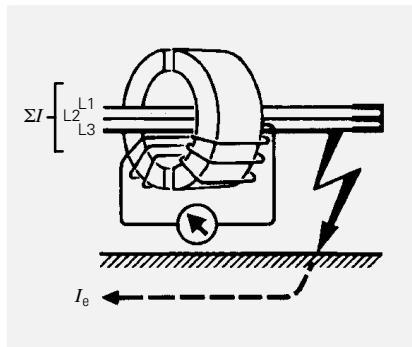


Bild 29
Kabelumbauwandler zum Erfassen des Erdstromes

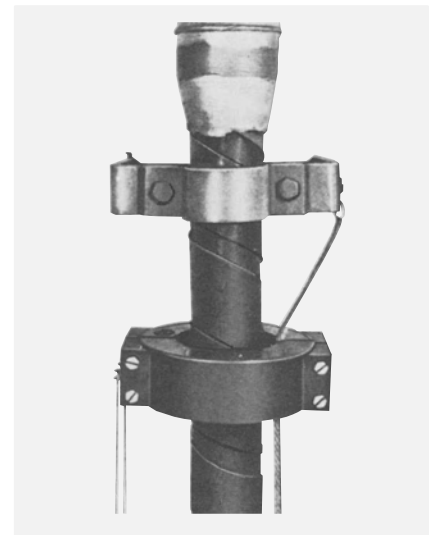


Bild 30
Kabelumbauwandler

Kenngößen und Merkmale der Anschaltungen

- Holmgreenschaltung
- Hauptstromwandler mit großem Übersetzungsverhältnis z. B. $400/1$
- Große Nennüberstromziffer zur richtigen Abbildung der kurzschlußartigen Ströme z. B. 5P10 = Gesamtfehler <5 % bei 10fachem Nennstrom.
- In gelöschten Netzen wird der Wattreststrom, der in der Größenordnung (2 bis 6 %) $I_{CE \text{ Netz}}$ liegt, zur Richtungsbestimmung ausgewertet.

Der Einfluß des Fehlwinkels kann, gerade in Netzen mit niedrigeren Wattreststromansprechwerten ($0,01$ bis $0,02 \times I_N$), zu falschen Aussagen bei der Anschaltung über Holmgreenschaltung führen.

Anhand der Tabelle sollte die Abschätzung zum Einsatz der Holmgreenschaltung erfolgen.

Für einen Wandler 5P gilt:

| | $0,1 I_N$ | $0,2 I_N$ | $1,0 I_N$ |
|---|-------------|------------|-------------|
| Stromfehler F_i in % | 2,0 | 1,5 | 1 |
| Fehlwinkel $\delta_i \pm$ °el. | 2,0 | 1,5 | 1 |
| Winkelanteil des max. Fehlerstromes $3 I_C$ infolge Wandlerfehlwinkel bei einem Lastwinkel von 30° | $0,007 I_N$ | $0,01 I_N$ | $0,035 I_N$ |

Als Empfehlung gilt: Holmgreenschaltung nur, wenn der eingestellte Relaisansprechwert der Richtungsmessung größer $>0,05 I_N$ eingestellt werden kann.

Für isolierte Netze können im allgemeinen Wandler in Holmgreenschaltung verwendet werden. Die Gründe hierfür sind:

- Wandlerfehler infolge Wandlertoleranzen wirken sich vorwiegend auf die ohmsche Komponente wegen des nahezu ohmschen Lastwinkels aus, während das Verfahren hier jedoch den Blindstrom (U -, I -, $\cos \varphi$ -Messung) mißt.
- Die Richtungsgerade liegt hier (siehe stationäre Zeiger) nahezu um 90° zum Scheinstrom verschoben, so daß größere Winkelfehler zulässig sind.

Eine Richtungsfehlerscheidung wird somit bei einer gewählten Ansprechsicherheit von 2 abgeschlossen.

- Bei der Verwendung von Erdschlußwischerrelais zur selektiven Erdschlußerfassung ist der Anschluß der Holmgreenschaltung generell unproblematisch, da die ersten Amplituden des transienten Einschwingvorgangs ein Vielfaches des Wandlernennstromes betragen.

Kabelumbauwandler

Kabelumbauwandler sind besonders für die Erfassung kleiner Ströme geeignet. Der bei Holmgreenschaltung auftretende Fehlerstrom infolge unterschiedlicher Wandlerfehler tritt durch die magnetische Addition nicht auf.

Die Kabelumbauwandler (Bild 31, Bild 32) haben eine lichte Weite von 84 oder 20 mm. Das Übersetzungsverhältnis beträgt 60/1 A. Sie müssen so montiert werden, wie im Bild 33 dargestellt ist.

Das Trageisen für den Kabelkopf muß gegen das Gerüst isoliert sein, damit der Erdstrom gezwungen wird, über die durch den Kabelumbauwandler zurückgeführte Erdleitung zu fließen. Es genügt, wenn die Trageisen im Mauerwerk ohne Verbindung mit dem Gerüst oder untereinander eingebaut werden. Falls durch Unterlegen von Material isoliert werden soll, genügt eine verhältnismäßig geringe Dicke der Isolierschicht, da nur mäßige Differenzspannungen auftreten.

Die Notwendigkeit dieser Maßnahme ersieht man aus dem Stromlaufschema bei Erdschluß (Bild 34). Wenn der gezeichnete Leiter Erdschluß gegen den Bleimantel bekommt, braucht an der Fehlerstelle noch keine Verbindung zum Erdreich zu bestehen, da der Kabelmantel durch die Juteumwicklung gegen Erdberührung geschützt sein kann. Durch die transformatorische Wirkung des Feldes wird der Erdstrom auf dem Bleimantel zurückgesaugt. Durch die Hin- und Rückführung durch den Umbauwandler entstehen, wie das Bild zeigt, für den Kabelumbauwandler wirksame Amperewindungen erst, wenn der Strom mit der Erdungsleitung durch den Wandler wieder zurückgeführt wird.

Weiterhin könnte durch die transformatorische Wirkung des Wandlerfeldes ein störender Kreisstrom über den Erdleitungen entstehen (Bild 35).

Die Eisenbandarmierung unter dem Kabelumbauwandler braucht nicht entfernt zu werden, da sie die Messung nicht stört. Man kann sie jedoch wegnehmen, wenn man mit der Lochweite nicht auskommt.

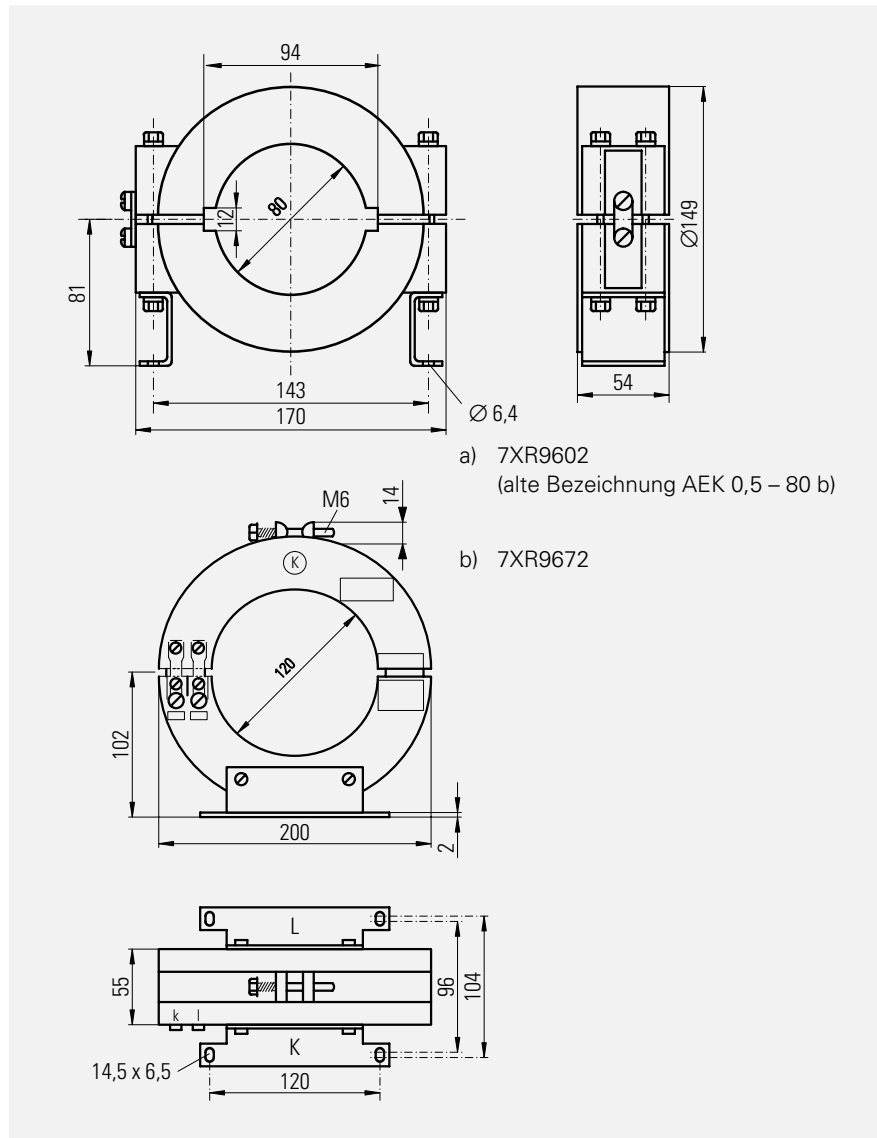


Bild 31
Kabelumbauwandler 7XR96

Bei der Montage ist die dem Wandler bei der Lieferung mitgegebene Vorschrift für den Einbau zu beachten.

Die Wandler sind als Schnittbandkerne ausgeführt. Bei Schnittbandkernen ist magnetisch hochwertiges Eisen zu einem Bandkern gerollt und durch einen Kunststoff fest verbakken. Der Kern wird dann nachträglich in zwei halbringförmige Teile geschnitten und die Schnittflächen werden geschliffen. Nach dem Überschieben über das Kabel werden die Kernhälften mit der Wicklung durch Spanschrauben zusammengehalten (Bild 32).

Es hat sich gezeigt, daß bei Suchschaltungen, bei denen ein Relais durch Umschalten für mehrere Kabel verwendet wird, die Gefahr besteht, daß über die Erdverbindungen der Wandlersekundärseiten Fremdströme fließen können und das Arbeiten der Relais stören. Da der Umbauwandler bei normaler Montage genügend weit von der offenen Hochspannung entfernt ist und über dem fest geerdeten Kabelmantel liegt, ist er gegen Hochspannung geschützt. Man kann daher die eine Klemmenseite aller Umbauwandler auf dem kürzesten Weg miteinander verbinden und nur an einer Stelle erden.

Die andere Klemmenseite führt dann zu den Umschaltern (normale Stromwandler müssen immer je Kern ein Schutzerdung erhalten).

Bei Suchschaltungen hoher Empfindlichkeit sind für den Strompfad geschirmte Leitungen zu verwenden oder freie Adern im Hilfskabel zur Schirmung der stromführenden Adern an beiden Enden des Hilfskabels zu erden.

Beim Gebrauch der Kabelumbauwandler sind die bei den Erdschlußrelais gemachten Ausführungen zu beachten, die besagen, daß die Wandler und das Relais aufeinander abgeglichen sind.

Bei der Montage der Umbauwandler muß beachtet werden, daß der Widerstand zwischen Umbauwandler und Relais (7SN93, 7SN73, 7SA5, 7SJ5) nicht mehr als 0,4 Ohm Schleife (0,2 Ohm einfache Länge) betragen darf bei Einstellungen ab 2 mA. Bei Einstellungen ab 20 mA sind 1,2 Ohm zulässig. Bei Wischerrelais (7SN70, 7SN71) soll der Schleifenwiderstand nicht mehr als 6 Ohm betragen. Abstand und Querschnitte müssen entsprechend gewählt, d. h. die Relais in der Nähe der Wandler montiert werden. Bei Wischerrelais besteht diese Beschränkung nicht.

Meßgenauigkeit von Wandlern für Meßzwecke

- Nennübersetzungsverhältnis

$$K_{ul} = \frac{I_{Pu}}{I_{Su}} = \frac{\text{Nennstrom primär}}{\text{Nennstrom sekundär}}$$

- Betragsfehler (Stromfehler)

$$F_i [\%] = \frac{K_{ul} I_S - I_P}{I_P} \cdot 100$$

- Gesamtfehler

$$F_g [\%] = \frac{100}{I_P} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_{mj} - 1_s - 1_p)^2 dt}$$

(T = Periodendauer in [s])

- Fehlwinkel

$$\delta_i = \varphi_{is} - \varphi_{ip}$$

Beispiel: Kabelumbauwandler 3M5

Aus den Wandlerdaten folgt:

3 max. 3 % Betragsfehler im Bereich (0,5 bis 1,2) I_N

M Wandler für Meßzwecke

5 bei 5fachem Nennstrom kann der Gesamtfehler >15 % werden



Bild 32
Die beiden Hälften eines Kabelumbauwandlers

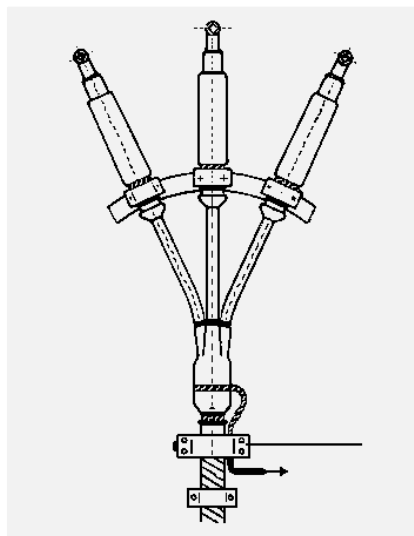


Bild 33
Montage eines Kabelumbauwandlers

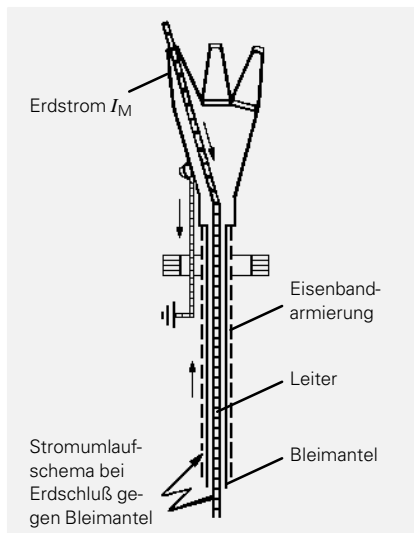
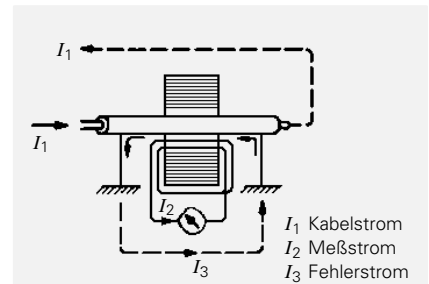
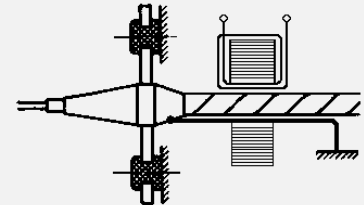


Bild 34
Stromlaufschema eines Kabelumbauwandlers bei Erdschluß



a) Falsch, Fehlerstrom I_3 bildet sich aus



b) Richtig, metallenes Äußeres des Erdschlusses schwach gegen Erde isoliert, Erdleitung durch den Wandler zurückgezogen

Bild 35
Verlegung der Kabelerdleitung

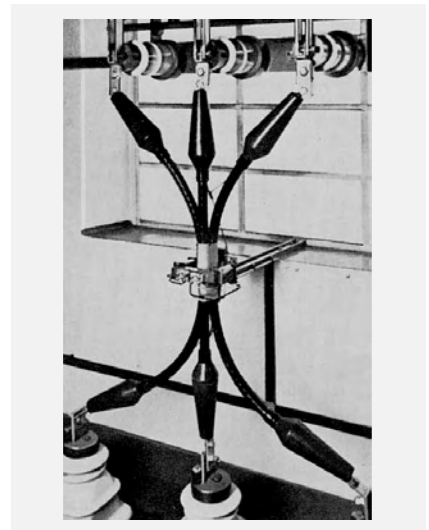


Bild 36
Kabelumbauwandler in Freileitungsabzweigen

Zu Bild 35:

Das Bild zeigt, daß ganz allgemein Kabelumbauwandler, auch wenn sie der Messung von Leiterströmen dienen, eine Isolierung des Kabelkopfes und die Rückführung der Erdleitung durch den Wandler verlangen, da sonst bei dem Wandler durch die Erdberührung des Metallmantels bzw. Kabelkopfes vor und hinter dem Wandler die Sekundärwicklung des Wandlers kurzgeschlossen ist und nicht mehr richtig arbeitet. Ein mit Bitumen geschützter Kabelmantel muß als geerdet angesehen werden.

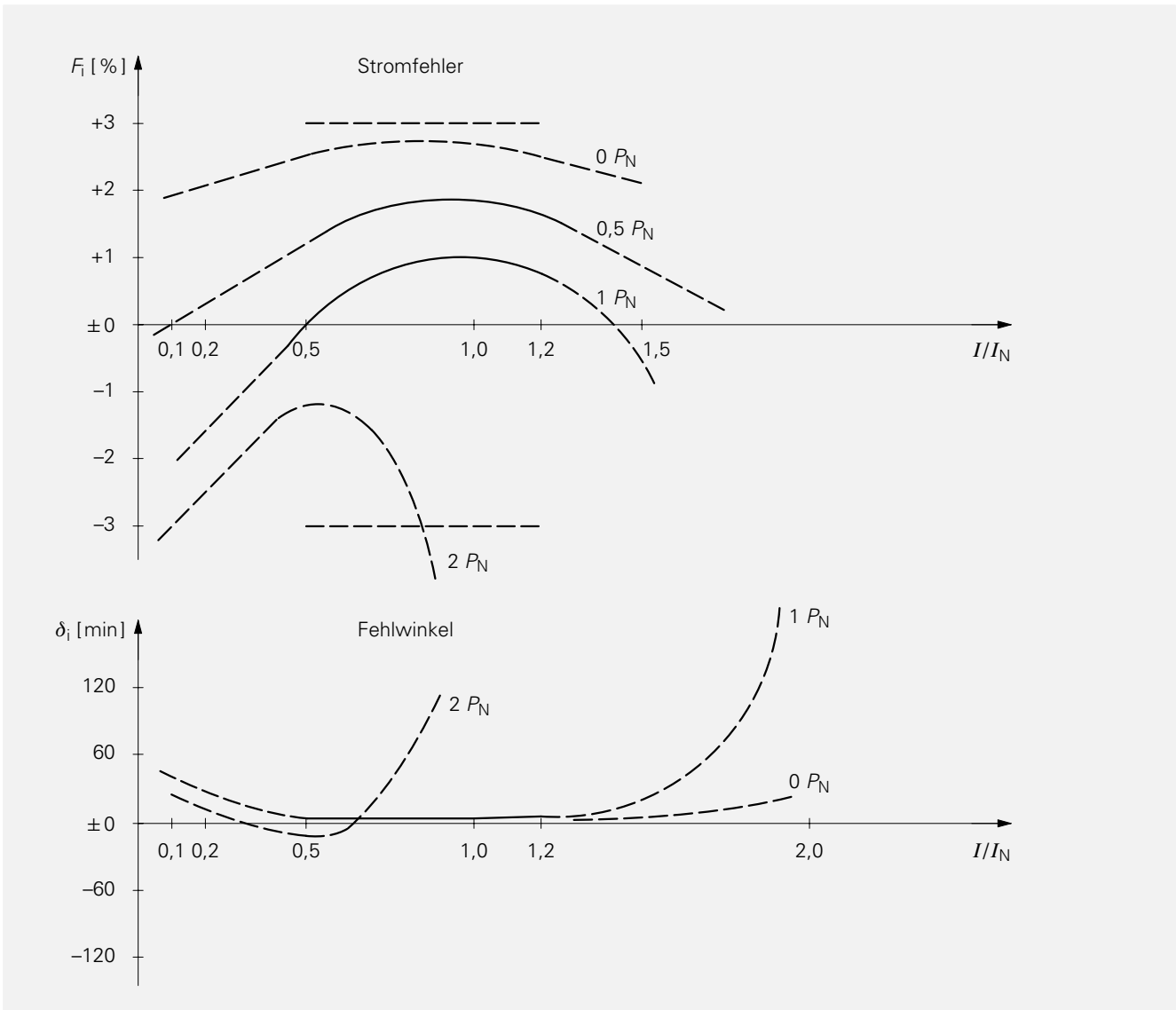


Bild 37 Fehlergrenzen des Kabelumbauwandlers 7XR9602 (1,2 VA, Klasse 3M5)

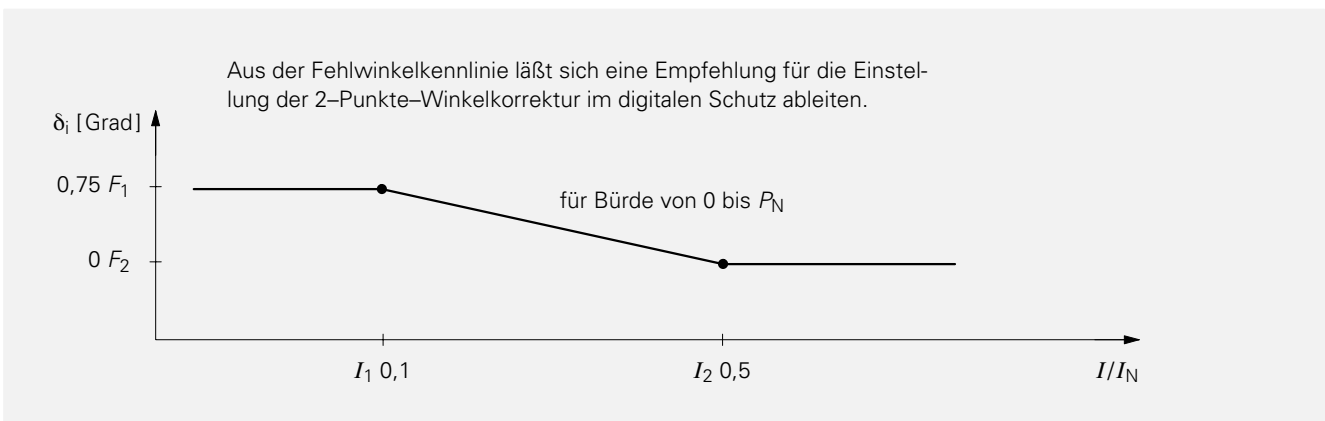


Bild 38 Winkelkorrektur der Erdstromrichtungsmessung beim Digitalschutz 7SA511/7SJ512

Einrichtungen zur allgemeinen Erdschluß- meldung

Bei den Erdschlußrelais muß man grundsätzlich unterscheiden zwischen Melderelais, die nur das Vorhandensein eines Erdschlusses im Netz anzeigen, und solchen, die die schadhafte Leitung angeben.

Wie gezeigt, erhält der Netzsternpunkt im isolierten, gelöschten oder hochohmig geerdeten Netz bei Erdschluß die volle Sternspannung gegen Erde. Diese Spannungsverlagerung tritt unabhängig von der örtlichen Lage des Erdschlusses im ganzen Netz gleichartig auf.¹⁾

Man bemerkt also den Erdschluß in allen Stationen eines metallisch zusammenhängenden Netzes zur selben Zeit. Wegen der Möglichkeit eines Überganges in Doppelerdschluß (d. h. Kurzschluß) stellt das Fahren mit Erdschluß eine Fortsetzung des Betriebes in einem weniger sicheren Zustand dar. Die Erdschlußmeldung ist eine Warnung.

Wie im Bild 13 gezeigt, erhält der isolierte Netzsternpunkt bei sattem Erdschluß die volle Verlagerungsspannung $U/\sqrt{3}$. Erfolgt der Erdschluß über einen Erdübergangswiderstand R_F , so bewirkt dieser eine Verminderung der Verlagerungsspannung.

Eine einfache Erdschlußmeldung erhält man durch Erfassen der Verlagerungsspannung $U_0 = \frac{1}{3}(U_{L1} + U_{L2} + U_{L3})$ an der offenen Dreieckwicklung eines Spannungswandlers oder eines Erdungstransformators.

Um einerseits unabhängig von Störspannungen zu sein, andererseits aber schon bei kleineren Verlagerungsspannungen eine Meldung zu bekommen, wird in der Praxis ein Spannungsrelais mit etwa 30 bis 60 V Ansprechwert an die offene Dreieckwicklung eines Spannungswandlers gelegt, die bei sattem Erdschluß eine Spannung von 100 V abgibt (Bild 39 und Bild 41).

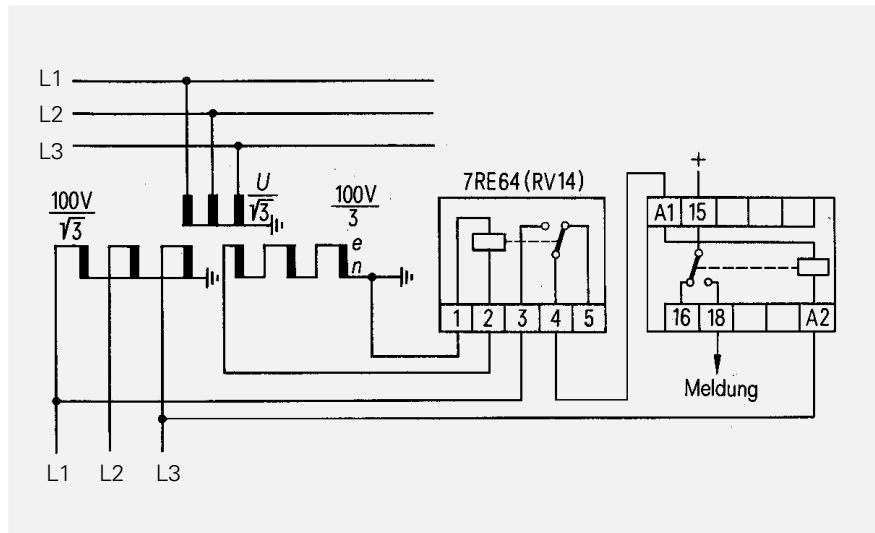


Bild 39
Erdschlußmeldung, Spannungswandler mit zweiter Sekundärwicklung für Erdschlußerfassung

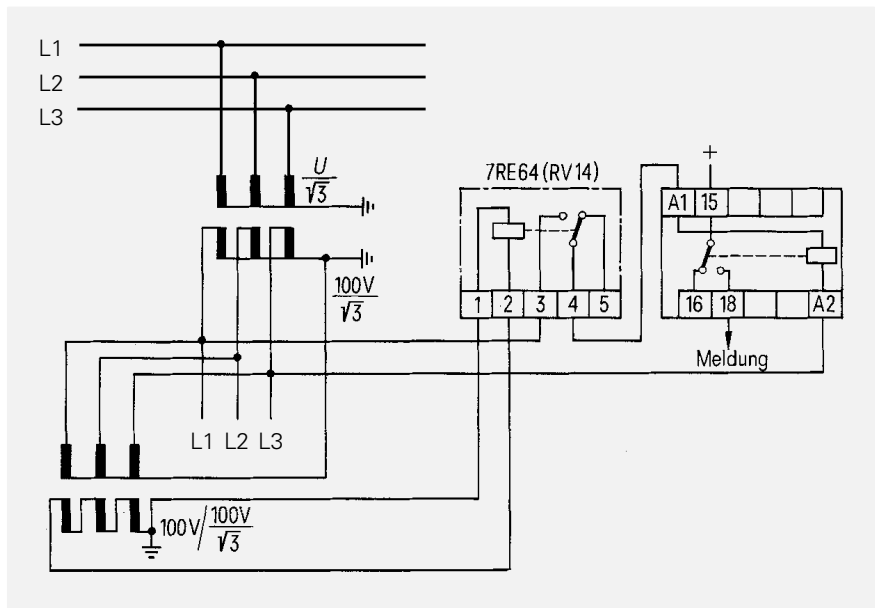


Bild 40
Erdschlußmeldung, Spannungswandler ohne zweite Sekundärwicklung für Erdschlußerfassung, mit zusätzlichen drei Einphasen-Zwischenwandlern

1) Vorschrift in VDE 0101 ("Errichten von Starkstromanlagen über 1 kV") § 6.1.2

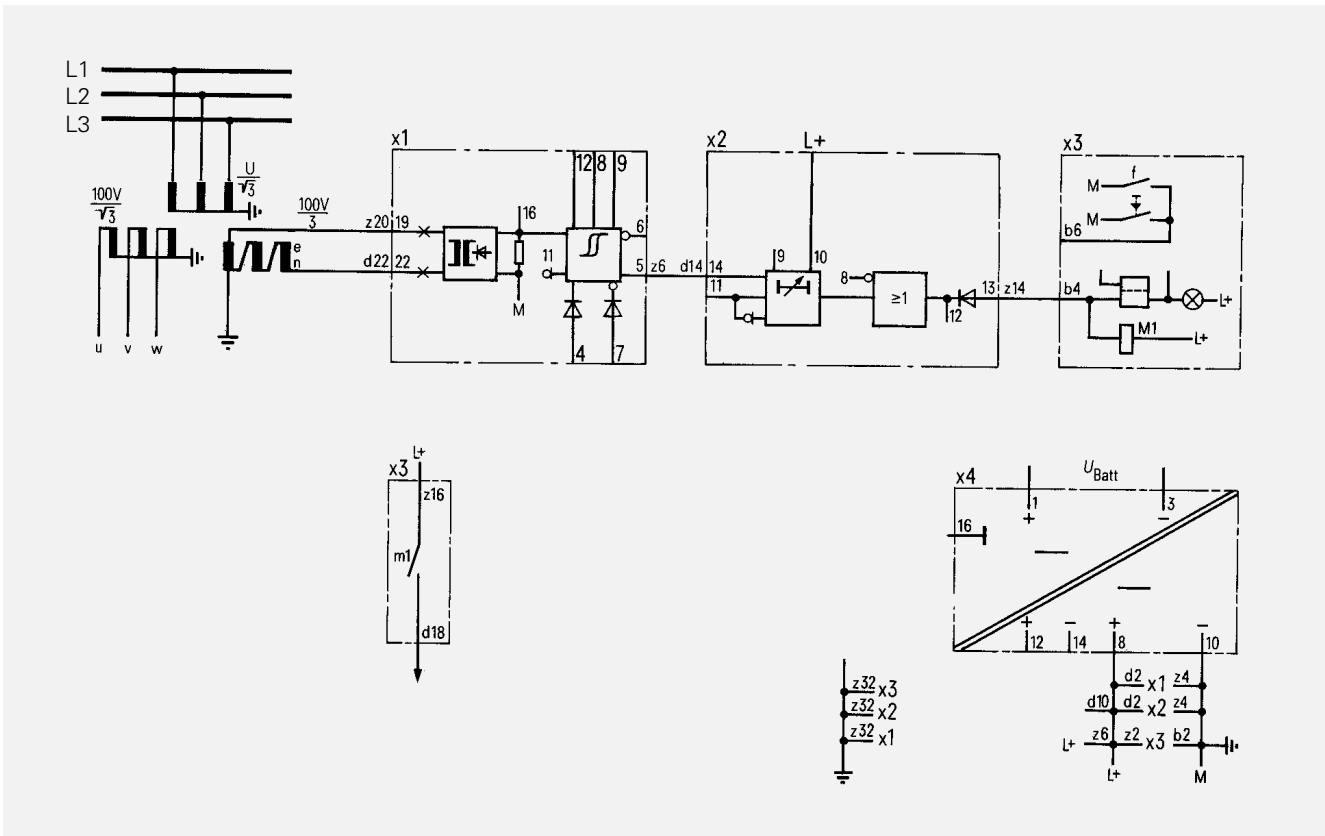


Bild 41
Erdschlußmeldung mit elektronischen Baugruppen

| Gerätezeichen | Baugruppe | |
|---------------|-----------------------------------|-------------|
| x1 | Spannungsgeber-Baugruppe | 7TU10 10-2A |
| x2 | Zeitgeber-Baugruppe | 7TT10 20-1 |
| x3 | Meldebaugruppe | 7TS17 |
| x4 | Stromversorgungs-Baugruppe, z. B. | 7TN40 |

Weil man, wenigstens in Mittelspannungsnetzen, im allgemeinen nur bei bleibenden Erdschlüssen eine Meldung wünscht, schaltet man gewöhnlich dem Spannungsrelais bzw. dem Spannungsgeber ein einfaches Zeitwerk nach. Bei einem Erdschlußwischer verschwindet die Verlagerungsspannung vor der Abgabe einer Meldung und die Anordnung kehrt in ihre Ruhelage zurück.

In der Ausführung der Meldeeinrichtung mit konventionellen Geräten kann man dazu ein Zeitrelais für Wechselstrom verwenden, das durch die auch bei Erdschluß gleichbleibende Leiter-Leiter-Spannung angetrieben wird.

In den digitalen Relais 7SJ512, 7SJ531 und 7SA511 ist diese Funktion verfügbar.

Ermittlung der erdschlußbehafteten Leitung durch Erdschlußrichtungsrelais

Um die schadhaftete Leitung im Netz zu finden, werden Erdschlußrelais verwendet, die aus Nullstrom $3 I_e$ und Nullspannung $\sqrt{3} U_e$ die Erdschlußrichtung bestimmen.

Wenn es sich um ein isoliertes Netz handelt, genügen in Stationen mit ausschließlich Stickleitungen unter besonders günstigen Verhältnissen empfindliche Stromrelais zur Ermittlung der Leitung, auf der sich der Erdschluß befindet. Jedoch können schon stark unterschiedliche Leitungslängen dieses Verfahren unbrauchbar machen. Deshalb sind fast immer Richtungsrelais erforderlich.

Aus den Angaben der Richtungsrelais kann man auch in vermaschten Netzen die fehlerbehaftete Leitung schnell herausfinden (Bild 42).

Die Erdschlußrichtungsrelais liegen mit ihrem Strompfad in der Verbindungsleitung der Stromwandler-Sternpunkte oder am Kabelumbauwandler. Als Steuerspannung für den Spannungspfad dient die Nullspannung $\sqrt{3} U_e$. Man mißt die vektorielle Lage des Nullstromes gegen die Nullspannung, die in allen Stationen des Netzes bei Erdschluß gleichartig auftritt und im Zeigerdiagramm die gleiche Lage hat.

Jede Leitung erhält ein Erdschlußrelais; bei den langsamen Relais wird manchmal auch nur zeitweilig ein Relais in die zu untersuchende Leitung eingeschaltet. Vom Relais wird verlangt, daß es eine Meldung abgibt, wenn der Fehler in Richtung der betreffenden Leitung liegt. Das Gesamtbild (Bild 42) ergibt dann die Lage der Erdschlußstelle. Wenn von einer Station nur Stickleitungen abgehen, zeigt das Relais unmittelbar die schadhaftete Leitung an. Unter Benutzung der beschriebenen Ströme und Spannungen beim Auftreten eines Erdschlusses sind die folgenden Verfahren der Richtungsmessung möglich:

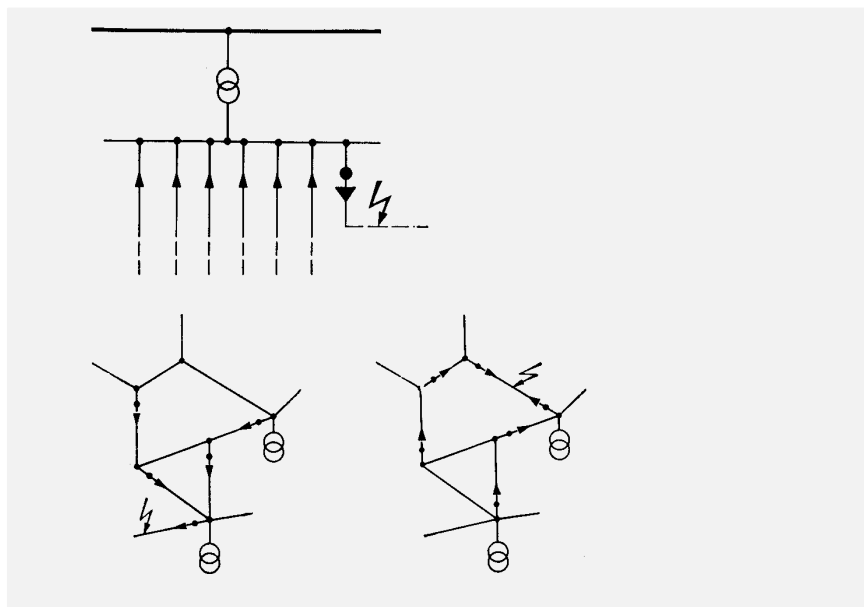


Bild 42
Richtungsangabe der Erdschlußrelais im strahlenförmigen und vermaschten Netz

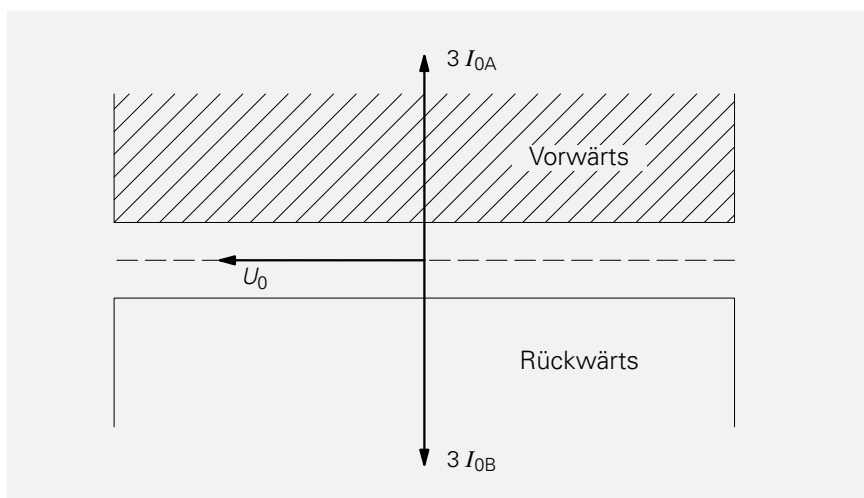


Bild 43
Vektorielle Lage der Nullspannung und -ströme

Richtungsmessung mit langsamen Relais

Die Art der Messung unterscheidet sich nach der Art der Erdung. Bei isolierten Netzen erfolgt die Richtungsbestimmung mit dem kapazitiven Erdstrom (U -, I -, $\sin \varphi$ -Messung) bei kompensierten Netzen mit dem Wattreststrom (U -, I -, $\cos \varphi$ -Messung).

Isolierte Netze

Wenn der Netzsternpunkt völlig frei ist, also keinerlei Verbindung mit Erde hat, mißt man nach Abklingen der Zündschwingung an den Meßpunkten der Abgänge nahezu reine Blindströme.

Bild 43 zeigt die vektorielle Lage der Nullspannung und der Nullströme für den fehlerbehafteten Abzweig A und den fehlerfreien Abzweig B, übernommen aus Bild 13 (siehe Seite 10).

Daraus läßt sich die Festlegung der Richtungsgeraden im isolierten Netz ableiten. Sie liegt parallel zur Nullspannung U_0 .

Für die Erdschlußrelais liegen sehr gute Meßbedingungen vor, da sich die Größen A und B stark unterscheiden (180° Winkeldrehung). Beträgsmäßig werden im fehlerbehafteten Abzweig die Erdschlußladeströme des gesamten galvanisch verbundenen Netzes abzüglich des Ladestromes des eigenen Abzweiges gemessen. Als praktische Größe können hier je nach Netzgröße 20 bis 50 A angesetzt werden. An das Übertragungsverhalten der Wandler werden keine so großen Anforderungen wie im gelöschten Netz gestellt. Eine Anschaltung der Relais an Holmgreenschaltung kann möglich sein.

Bei der Verwendung von Kabelumbauwandlern können eventuell auch normale Überstrom-Zeitrelais die fehlerbehaftete Leitung ermitteln. Kritisch sind Netze mit stark unterschiedlich langen und wenigen Leitungen, dort versagt die Fehlererfassung mit reiner Erdstrommessung (siehe Tabelle). Bei der Einstellung der Ansprechwerte der wattmetrischen Richtungsrelais muß diese Erscheinung ebenfalls berücksichtigt werden.

Beispiel:

Ein Netz besteht aus 3 Abzweigen (Stichleitung):

- $3 I_0$ Abzweig A = 5 A
- Abzweig B = 10 A
- Abzweig C = 15 A

| Fehler | | A | B | C |
|----------|---|------|------|------|
| Meßstrom | A | [25] | 5 | 5 |
| | B | 10 | [20] | 10 |
| | C | 15 | 15 | [15] |

Wattmetrische Relais, welche in isolierten Netzen die Blindkomponente des Nullstromes zur Richtungsbestimmung verwenden, werden gelegentlich auch als Erdschlußrelais mit $\sin \varphi$ -Messung bezeichnet.

Gelöschtes Netz

Die Strom- und Spannungsvektoren für den fehlerbehafteten Abzweig A und den fehlerfreien Abzweig B werden aus Bild 15 (siehe Seite 11) übernommen. Für die Relais in den fehlerfreien Abgängen B sind die Meßgrößen die gleichen wie im isolierten Netz. Der Stromvektor $3 I_0$ des fehlerbehafteten Abzweiges ist dagegen in Betrag und Phase völlig verschieden zum isolierten Netz. Die Konstruktion wurde bereits im Kapitel "Spannungen und Ströme bei Erdschluß" (siehe Seite 10) behandelt.

Da der Wirkreststrom die für den fehlerbehafteten Abzweig charakteristische Größe ist, wird die Richtungsgerade hier durch diesen Vektor bestimmt.

Wenn die Wirkkomponente des Nullstromes $3 I_0$ entgegengesetzt der Verlagerungsspannung U_0 zu liegen kommt, wird auf Erdschlußrichtung vorwärts erkannt (Bild 44).

Der Betrag und die Phase des Stromvektors $3 I_{0A}$ sind von der Verstimmung V, dem kapazitiven Erdschlußstrom des fehlerbehafteten Abzweiges I_{CE1} und der Dämpfung d abhängig.

Für das Stichnetz gilt:

Somit kann sich dieser Vektor im 1. oder 4. Quadranten befinden. Daraus resultiert auch die Unbrauchbarkeit der $\sin \varphi$ -Messung. Die Relais in fehlerfreien Abgängen werden durch diese Kennlinie, auch als $\cos \varphi$ -Messung bezeichnet, bedingt keine Richtungsbestimmung durchführen, da der (Freigabewert) Ansprechwert nicht erreicht wird. Kritisch sind hier jedoch kleine Netze $I_{CE} < 50$ A, wo Ansprechwerte von weniger 10 mA gewählt werden müssen. Durch den Phasenfehler des Kabelumbauwandlers kann der Nullstrom langer fehlerfreier Abzweige in den nahegelegenen Ansprechbereich gedreht werden.

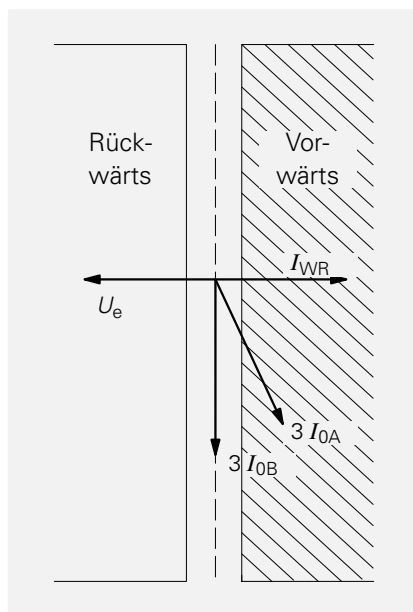


Bild 44 Wirkkomponente des Erdstromes

In solchen Fällen ist die in den digitalen Geräten 7SJ52, 7SJ512, 7SJ531, 7SA511 einstellbare Winkelkorrektur sorgfältig zu verwenden. Besonders in Kabelnetzen liegen die Nullströme der fehlerfreien Abzweige bei nahezu -90° .

Beim Einsatz von empfindlichen langsamen Erdschlußrelais in gelöschten Netzen mit Parallelkabeln und -leitungen ist einige Vorsicht geboten. Hier können über die Relais Fehlströme durch ungleiche Verteilung des Laststromes auf die einzelnen Stränge von Parallel- oder Mehrfachkabeln auftreten.

Die Widerstände der Leiter bei den parallelgeschalteten Kabeln (Bild 45a) oder Leitungen sind häufig nicht ganz gleich. Das eine Kabel nimmt z. B. im Leiter L1 mehr Betriebsstrom auf als das Nachbarkabel. In den anderen Leitern kann die Aufteilung gleich oder auch umgekehrt sein. Die Gesamtstromsumme des Betriebsstromes für die gesamten Parallelkabel ist dann zwar noch gleich Null, nicht aber mehr für das Einzelkabel. In der Sternpunktverbindung der Wandler oder im Umbauwandler des einen Kabels tritt der Unterschied der Betriebsströme als Falschstrom in einer Richtung auf, bei dem Parallelkabel der gleiche Strom jedoch in der umgekehrten Richtung. Addiert man die Ströme der Kabelumbauwandler der parallelen Kabel, so sind die Ausgleichsströme wieder verschwunden, da sie gleich groß sind, aber entgegengesetzt verlaufen.

Man darf also zwei oder mehrere Parallelleitungen nicht einzeln mit empfindlichen Erdschlußrelais ausrüsten, da dies zu Fehlangaben führen könnte. In Maschen- und Ringnetzen können diese Schwierigkeiten ebenfalls auftreten, da auch hier eine unsymmetrische Aufteilung des Laststromes möglich ist.

Man muß die Kabelumbauwandler der parallelen Leitungen summieren (Bild 45 b). Bei geringen Erdschlußströmen sollte man wegen der Magnetisierungsströme nicht mehr als zwei bis drei Kabelumbauwandler parallelschalten. Dann kann man feststellen, ob der Fehler in dem Strang liegt oder nicht. Liegt der Fehler in dem Strang, so müssen die Parallelkabel nacheinander am Ende aufgetrennt werden und anschließend muß der Erdschlußstrom der Einzelkabel gemessen werden. Ein weiterer Fehlstrom über die Erdschlußrelais kann durch ungleiche Kapazitäten der einzelnen Hochspannungsleiter gegen Erde vor und hinter der Meßseite entstehen.

Für das Erdschlußsuchen mit langsamen Erdschlußrelais verwendet man oft die sogenannte Suchschaltung (Bild 46).

Mehrere Leitungen erhalten aus Ersparnisgründen nur ein gemeinsames Erdschlußrelais, das mit Hilfe von Umschaltern nacheinander jeweils an die Wandler oder den Kabelumbauwandler der einzelnen Kabel angeschlossen wird.

Wattmetrische Relais finden vorwiegend ihren Einsatz in Stichnetzen. Im vermaschten Netz müssen die Einstellung und das Auswerten von Anzeigen sehr sorgfältig durchgeführt werden.

Durch die in Freileitungsnetzen wirkenden Korona und Ableitverluste liegt der Vektor $3 I_{0A}$ in diesen Netzen im 3. Quadranten.

Für die wattmetrische Messung in gelöschten Netzen wird daher die Verwendung von Kabelumbauwandlern empfohlen. Wenn man Kabelumbauwandler in Stationen einbauen will, die Freileitungseinführungen haben, kann man auch fabrikmäßig angefertigte kurze Kabelstücke (Kunststoffkabel) mit Erdverschlüssen erhalten. Diese Kabelstücke lassen sich dann leicht einbauen (siehe Seite 19, Bild 36).

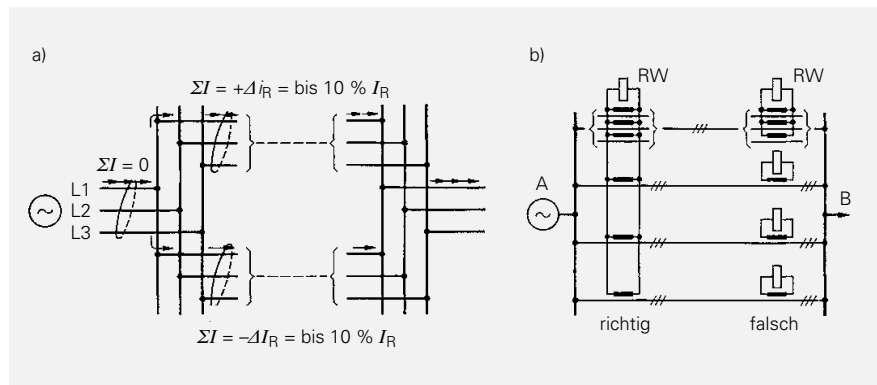


Bild 45 Stromaufteilung bei Erdschlußrelais in Parallelleitungen. Wandler in Holmgreenschalung oder Kabelumbauwandler

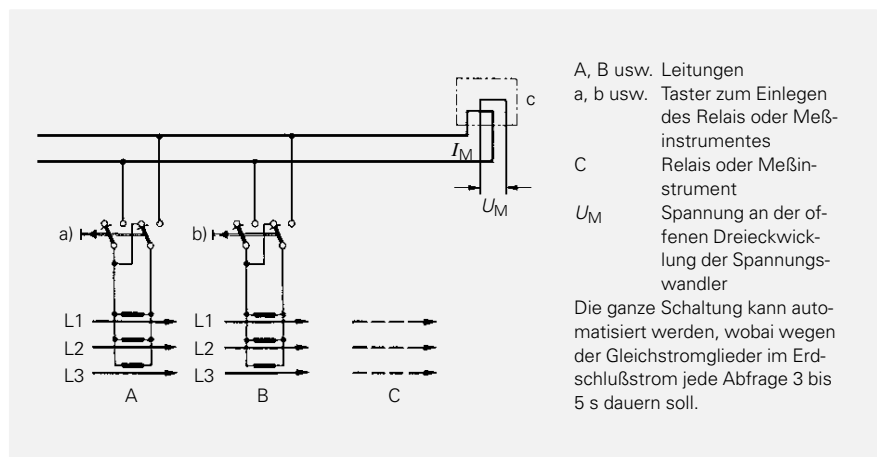


Bild 46 Erdschlußsuchschaltung zum Ausmessen eines Dauererdschlusses

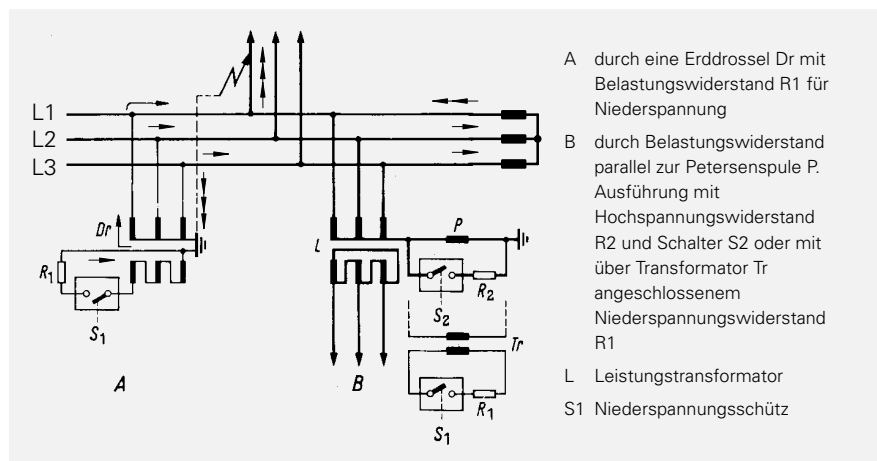


Bild 47 Verstärken des Erdstromes

Ein anderes erfolgreiches Verfahren, die Meßmöglichkeiten bei kleinen Erdströmen zu verbessern, besteht darin, hochspannungsseitig den Erdstrom durch Belastungswiderstände im Erdstromkreis dauernd oder auch nur kurzzeitig zu vergrößern.

Man kann, wie im Bild 47 angegeben (Teilbild B), zur Petersenspule P im Sternpunkt des Leistungstransformators L einen Hochspannungswiderstand R_2 parallelschalten, der den Wattreststrom z.B. auf 5 bis 12 A vergrößert.

Anstelle des Hochspannungswiderstandes ist es auch möglich, über einen Transformator einen Niederspannungswiderstand und ein Schütz anzuschließen. Die gleiche Wirkung kann auch erzielt werden, wenn man eine Hilfswicklung (als Leistungswicklung belastbar) der Petersenspule auf einen Belastungswiderstand arbeiten läßt. Will man vom Sternpunkt des Leistungstransformators unabhängig sein, kann man an einer passenden Stelle des Netzes eine dreipolige Erdungsdrosselpule (Bild 47, Teilbild A) einbauen (Eisenkern mit 5 Schenkeln), dessen besondere Niederspannungs-Dreieckwicklung einen Widerstand speist. Diese Erdungsdrossel stellt einen vergrößerten Spannungswandler dar. Er enthält neben der in Dreieck geschalteten Erdstromwicklung zur Vergrößerung des Wattreststromes drei Meßwicklungen für $100/\sqrt{3}$ Sekundärspannung bei 1 % Genauigkeit. Man kann diese Erdungsdrossel also anstelle der Sammelschienenspannungswandler einbauen und für die Betriebsmessung und Zählung mitverwenden.

Wenn alle Leitungsenden mit Relais ausgerüstet sind, genügt es, den Widerstand für den Erdstrom nur wenige Sekunden lang einzuschalten. Die Schalter S 2 oder die Schütze S 1 werden dabei von der Sternpunkterdspannung aus über Zeitwerke gesteuert.

Bei sogenannten Suchschaltungen, wobei ein Erdschlußrelais nacheinander für mehrere Leitungen benutzt wird, muß der Widerstand während der ganzen Suchzeit eingeschaltet werden, ist also thermisch größer auszulegen. Wie schon erwähnt, beginnt der Erdschluß mit einer kräftigen "Zündschwingung", deren Verlauf sehr unregelmäßig sein kann. Besonders die einseitige Verlagerung, d. h. das auftretende Gleichstromglied, stört das Arbeiten der langsamen wattmetrischen Erdschlußrelais. Aus diesem Grunde ist mit den beschriebenen langsamen Relais eine Einmessung des Erdschlusses erst möglich, wenn der Fehler fest eingebrannt ist und sich beruhigt hat. Die Meßwerke sind deshalb absichtlich träg gemacht worden (Ansprechverzögerung im Mittel 0,5 bis 3 s).

Schnelle Richtungsmessung mit Hilfe der Zündschwingung

Wie auf den Seiten 14 und 15 in den Bildern 22, 23 und 26 angezeigt wurde, beginnt jeder Erdschluß mit einem verhältnismäßig starken Stromstoß, der sogenannten Zündschwingung. Dieser Stromstoß fließt von allen Leitungen aus über die Erdschlußstelle. Er gibt also, von allen Meßstellen aus gesehen, zusammen mit der entstehenden Leiter-Erdspannung die Richtung zur Fehlerstelle an. Diese Erscheinung ist unabhängig vom Vorhandensein einer Petersenspule. Sie wird im Erdschlußwischerrelais ausgewertet.

Da durch die Größe dieses Stromstoßes die bei gelöschten Netzen sonst infolge der Kleinheit des Stromes auftretenden meßtechnischen Schwierigkeiten nicht vorhanden sind, ist dieses Relais heute das bevorzugte Gerät zum Erfassen aller Erdschlüsse in wichtigen Netzen geworden. Da alle Erdschlüsse mit dem Stromstoß beginnen, erfaßt man sowohl die vorübergehenden (Wischer) als auch die Dauererdschlüsse in gelöschten und isolierten Netzen.

Im vermaschten Netz ist im Gegensatz zu den wattmetrischen Relais eine eindeutige Aussage über das fehlerbehaftete Kabel/Freileitung möglich. Dazu müssen alle im Netz installierten Relais ausgewertet werden. Die fehlerbehaftete Leitung ist durch die beiderseitige Vorwärtsanzeige der Relais erkennbar.

Die Bauformen der Erdschlußrichtungsrelais

Die langsamen Relais

Die langsamen Erdschlußrelais wurden früher in zwei konventionellen Bauformen gefertigt. Außerdem gibt es eine elektronische Ausführung in Einschubtechnik, die wahlweise entweder zusammen mit anderen Geräten in einem Flachbaukasten eines Schutzschrankes oder aber als Einzelgerät in einem Gehäuse untergebracht werden kann. Für verhältnismäßig große Erdströme wurde eine zählerartige Bauform, Typ 7RM18, hergestellt. Sie enthält die drei Meßwerke eines Drehstromzählers, jedoch in Sonderausführung als Erdschlußrelais. Wenn verhältnismäßig große Empfindlichkeit notwendig ist, z. B. für gelöschte Netze, werden alle drei Meßwerke im Strompfad in Serie in den Erdstromkreis geschaltet, im Spannungspfad parallel an die Sternpunktterdspannung, so daß sich die drei Drehmomente addieren (einstellbar 30 bis 60 mA). Bei großen Strömen genügt stromseitig der Anschluß eines Meßwerkes. Das Relais wird auf $\cos \varphi = 1$ genau abgeglichen. Das gleiche Relais läßt sich ohne Änderung einfach durch Vorschalten eines ohmschen Widerstandes im Spannungspfad auch für ungelöschte Netze verwenden. Der Widerstand dreht die Phasenlage des Erregerstromes für die Spannungsspulen. Ein Winkelabgleich ist in diesem Fall nicht erforderlich (Ansprechwert = Skalenwert $\times 2,5$).

Für kleine Erdschlußströme (Empfindlichkeit 2 bis 50 mA, umschaltbar 20 bis 500 mA) wurde das empfindliche Erdschlußrelais 7SN93, gebaut, das eine Gleichrichterbrückenschaltung enthielt. Über kleine Meßübertrager werden die Summen $I_M + U_M$ und $I_M - U_M$ gebildet und nach der Gleichrichtung einem Drehspulrelais zugeführt (Schaltung Bild 48). Man erhält so die Richtung des Erdstromes I_M gegenüber der Sternpunktterdspannung U_M mit großer Empfindlichkeit.

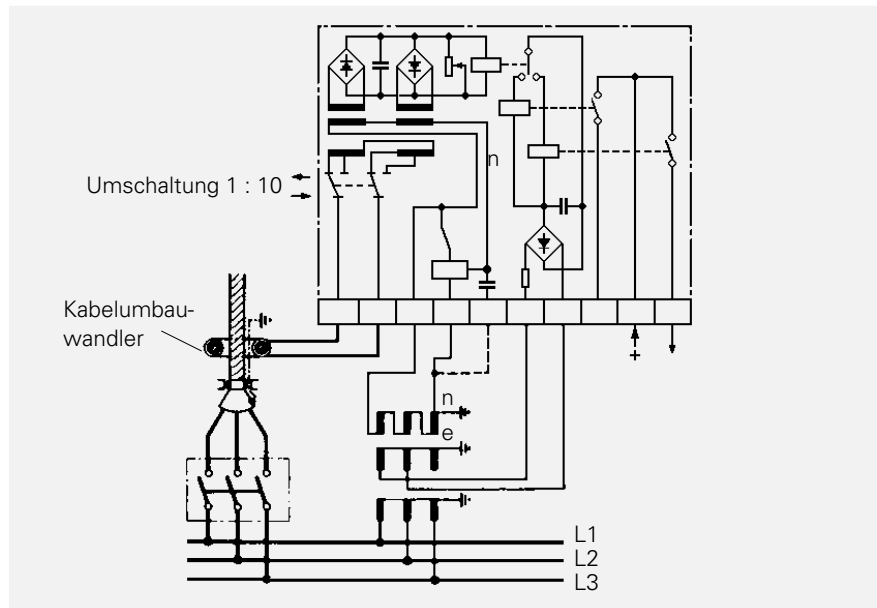


Bild 48
Erdschlußrelais 7SN93 Schaltung, Anschluß der Umbauwandler



Bild 49
Baugruppe 7TG20 für Erdschlußrichtungsrichtungsmessung

Wenn die hohe Empfindlichkeit gebraucht wird, hat es meistens keinen Sinn, das Relais in Holmgreen-schaltung in die Sternpunktverbindung der Stromwandler zu schalten, da hier die Fehlerströme oft größer sind als der Wirkstromanteil des Erdschlußstromes. Dieses Relais sollte daher für die Einstellwerte 2 bis 50 mA nur an Kabelumbauwandler angeschlossen werden, die bei Einfachleitungen kaum Fehlerströme führen.

Auch dieses Relais läßt sich durch Umlegen der Klemme am Relais für nicht gelöschte Netze verwenden. Vor dem Spannungspfad liegt dann ein Kondensator (Ansprechwert = Skalenwert).

Da diese wattmetrischen Erdschlußrelais in ihrer Arbeitsweise absichtlich langsam gemacht sind, können sie in ihren Angaben nicht durch einseitig verlagerte Erdschlußströme (wie in Bild 26) gestört werden. Man wartet das Abklingen dieser stoßartigen Vorgänge durch eine Arbeitszeit von etwa 0,5 s ab.

Zählerartige Meßsysteme sind von Natur aus träge gegen gleichstromartige Stöße, den Brückenrelais mit Gleichrichtern gibt man eine künstliche Dämpfung, z. B. durch Kurzschlußrähmchen.

Bei der Baugruppe 7TG20, die zur Generation elektronischer Netzschutzgeräte in Einschubtechnik gehört, wird der Meßwert ebenso wie beim 7SN93 durch den Vergleich der Beträge von $I_M + U_M$ und $I_M - U_M$ gewonnen. Die Auswertung erfolgt jedoch hier durch eine statische Meßschaltung.

Auch das 7TG20 mißt je nach Anschluß entweder die Wirkkomponente des Erdschlußstromes, die in gelöscht betriebenen oder über einen Wirkwiderstand geerdeten Netzen die Richtung der Erdschlußstelle angibt, oder die Blindkomponente beim Einsatz in isoliert betriebenen Netzen.

Für kleine Erdschlußströme besitzt das 7TG20 Einstellmöglichkeiten von 2 bis 30 mA; der höhere Bereich von 20 bis 300 mA gilt für die zweite Anschlußmöglichkeit des Strompfades.

Wenn der für die Messung verwendete Anteil des Erdschlußstromes den Einstellwert überschreitet, gibt die Baugruppe statisch und mit einem Relaiskontakt Signal.

Die nötige Dämpfung ist durch kapazitive Beschaltung der Meßstufe erreicht.

Das Erdschlußrichtungsrelais 7SN73 enthält in einem Gehäuse 7XP7720 eine Baugruppe 7TG20 und eine Umrichterbaugruppe, die aus der Batteriespannung der Station die Versorgungsspannung für die elektronische Schaltung des 7TG20 erzeugt. Die elektronische Schaltung besitzt keine galvanische Verbindung mit den Klemmen des Gehäuses.

Die Funktion wattmetrische Erdschlußrichtungsbestimmung im isolierten oder gelöschten Netz ist in den digitalen Abzweigschutzgeräten enthalten:

- Digitaler Abzweigschutz (Distanzschutz) 7SA500, 7SA511
- Digitaler Abzweigschutz (Überstromzeitschutz) 7SJ52, 7SK52, 7SJ512, 7SJ531

(Siehe Anschlußbilder der Geräte 7SA511/7SJ512, Bilder 54 und 55)

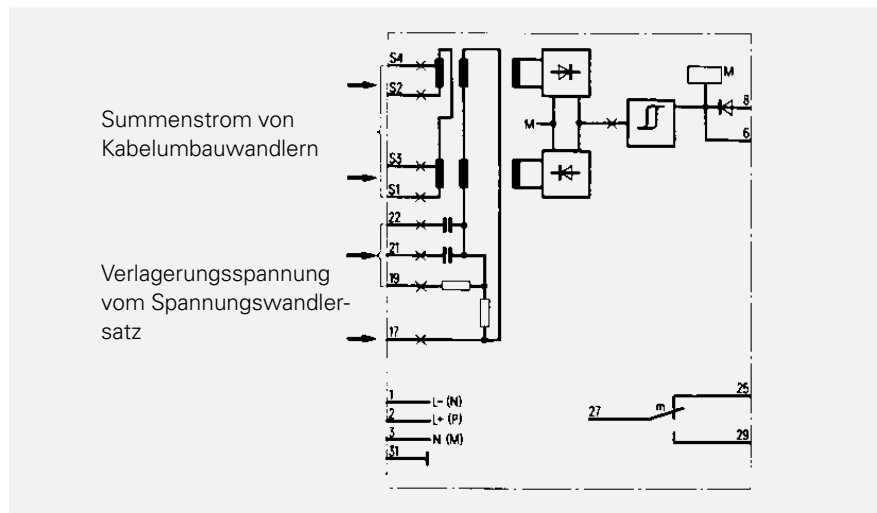


Bild 50
Schaltplan des 7TG20



Bild 51
Digitaler Abzweigschutz 7SA511

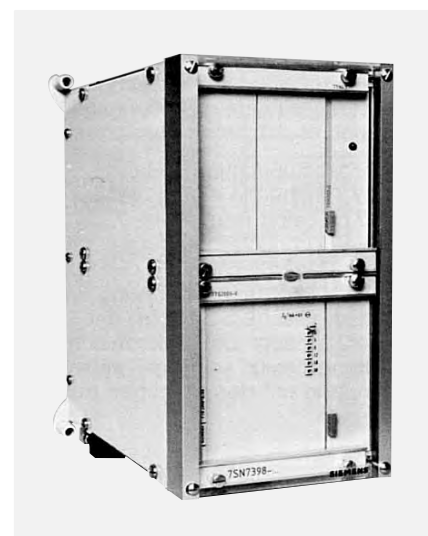


Bild 53
Erdschlußrichtungsrelais 7SN73

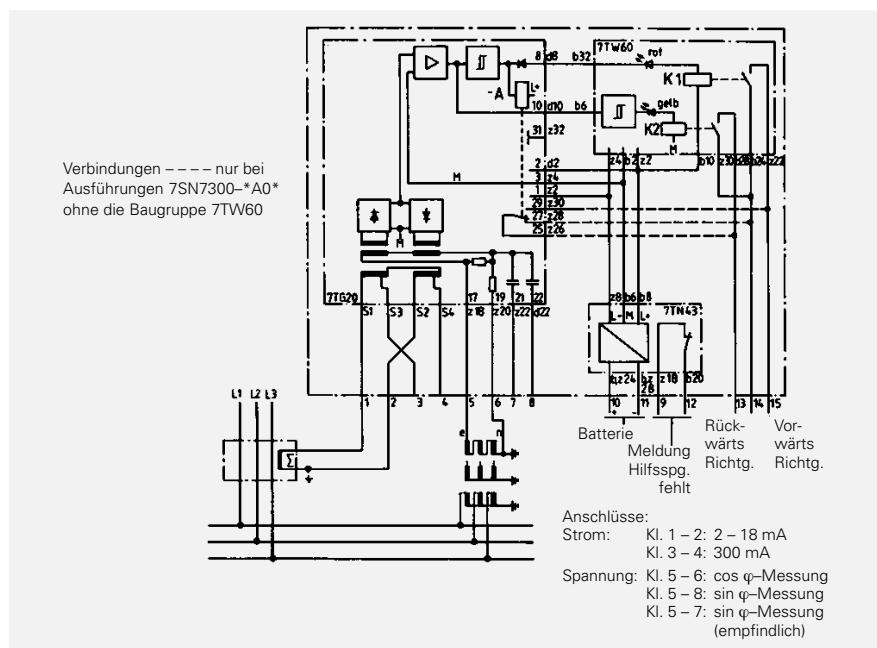


Bild 52
Schaltplan des Erdschlußrichtungsrelais 7SN73

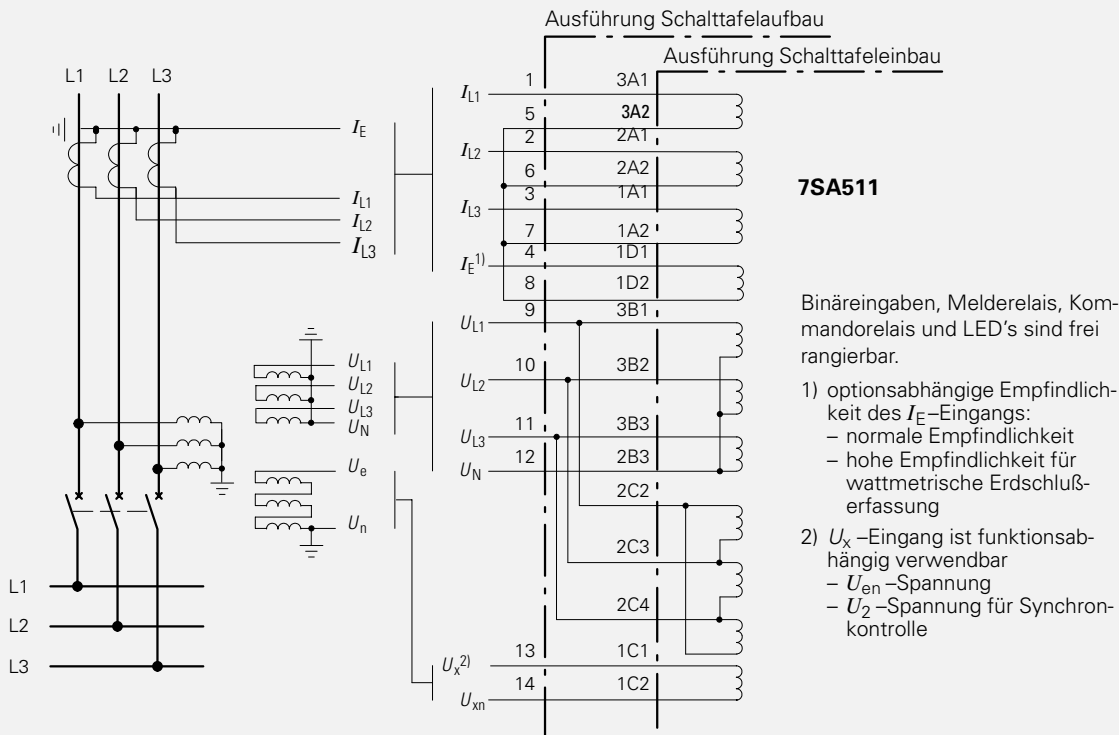


Bild 54
Schaltplan für Abzweigschutz 7SA511

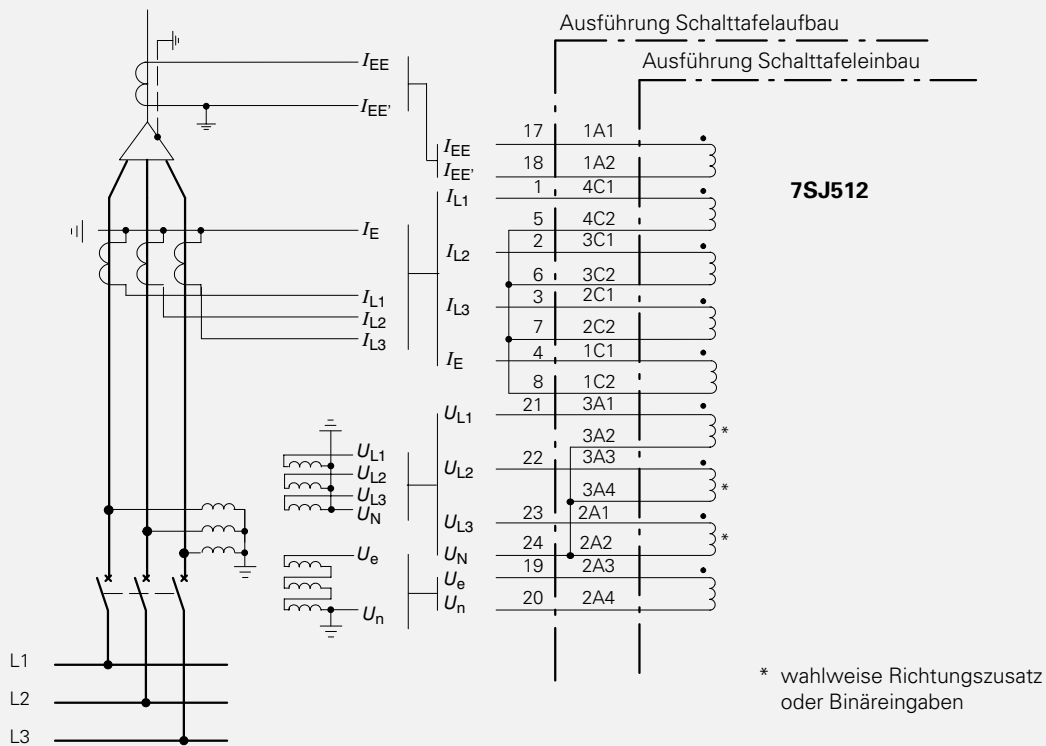


Bild 55
Schaltplan, Digitaler Überstromschutz 7SJ512

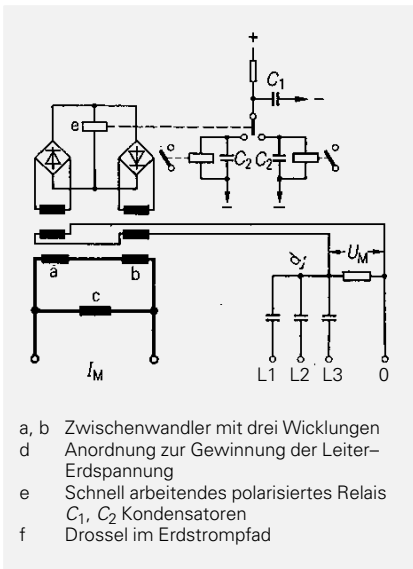


Bild 56
 Schnell arbeitende Meßschaltung des konventionellen Erdschlußwischerrelais

Die schnellen Erdschlußwischerrelais (siehe Bild 56)

Erdschlußwischerrelais gibt es in der konventionellen Ausführung 7SN90 und als elektronische Baugruppe 7TG23 in Einschubtechnik, die wahlweise entweder zusammen mit anderen Geräten in einem Flachbau-rahmen eines Schutzschrankes oder aber als Einzelgerät in einem Gehäuse untergebracht werden kann.

Die stets vorhandene Zündschwingung (Bild 56/Bild 57) ist durch den vom Erdschluß eingeleiteten Übergang der Stromverhältnisse vom Normalzustand in den Zustand des Dauererdschlusses bedingt. Die Richtung dieses Schwingstromes gibt die Lage der Fehlerstelle im Netz an, da der Strom durch die Erdschlußstelle fließt, also an allen Meßstellen zur Fehlerstelle weist.

Die Erdschlußwischerrelais sind Brücken-Richtungsrelais, die zum schnellsten Erfassen des Stoßstromes über Stoßkreise angeschlossen sind und eine sehr kurze Ansprechzeit haben.

Dadurch bestimmen die ersten steilen Anstiege im Strom- und Spannungspfad die Richtungsangabe. Bei Spannungen über 50 kV kann das Abschirmen der Wandlersekundärleitungen gegen Überspannungen aus dem Hochspannungsnetz erforderlich werden.

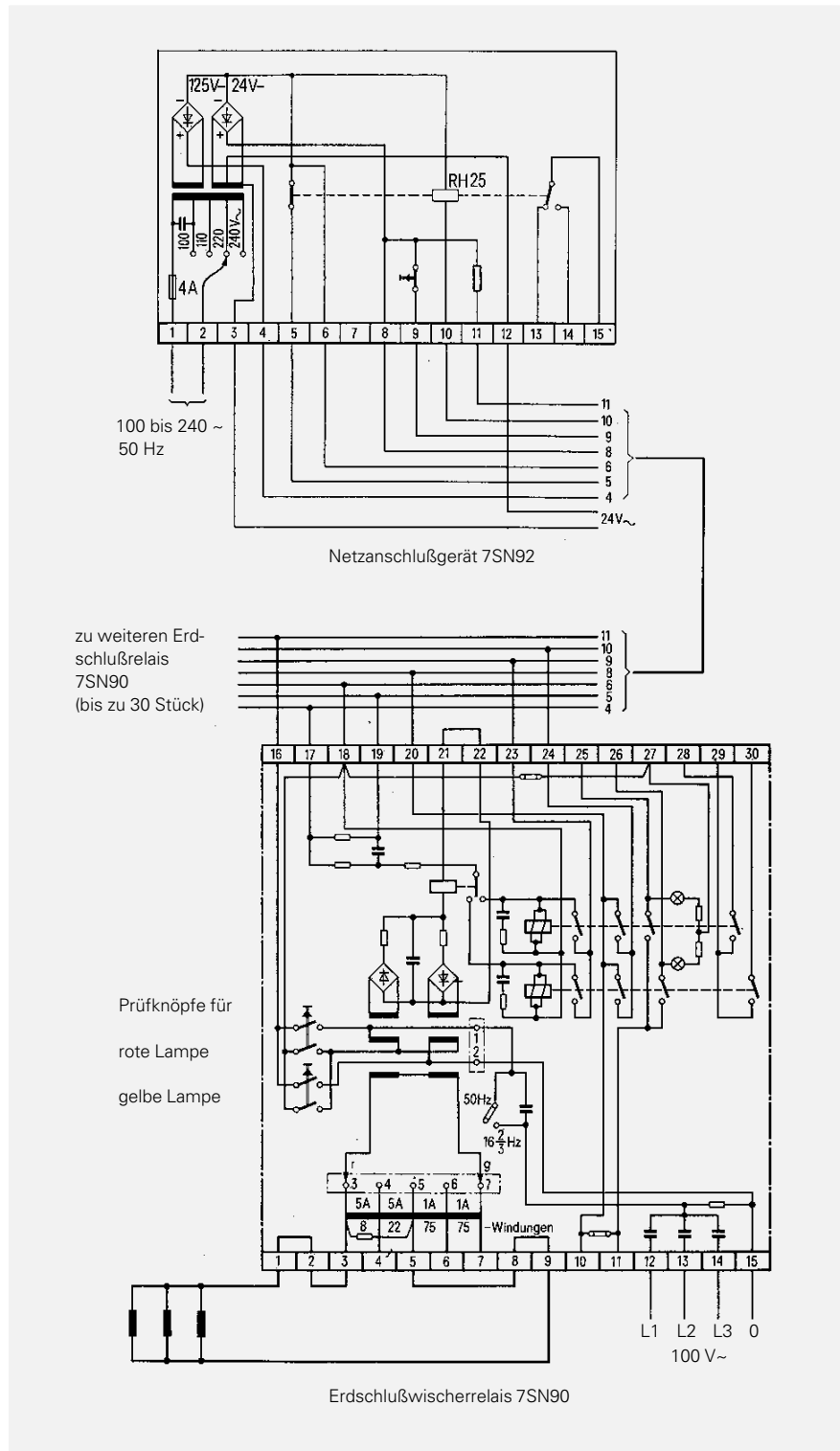


Bild 57
 Innen- und Außenschaltung des Erdschlußwischerrelais 7SN90 mit Netzanschlußgerät

Im Gegensatz zu den langsamen Relais müssen die Erdschlußwischerrelais ihren Richtungsentscheid sehr schnell treffen und das Ergebnis sogleich festhalten. Der erste von der Meßbrücke abgegebene Stromstoß mit weniger als einer Millisekunde Dauer muß dazu genügen.

In konventionellen Erdschlußwischerrelais wird das durch den Einsatz eines sehr schnell arbeitenden Relais erreicht, das dabei durch eine besondere Schaltung unterstützt wird, die mit dem Umladen von Kondensatoren arbeitet.

Dabei wird die Möglichkeit verwendet, durch entsprechende Wahl der Kapazitäten und Widerstände die Zeitkonstanten der einzelnen Lade- und Entladekreise auf geeignete Werte zu bringen. Eine Halteschaltung speichert die von der roten (vorwärts) oder von der gelben (rückwärts) Signallampe gegebene Anzeige der Meßrichtung bis zur Rückstellung. Hilfskontakte ermöglichen die Ferndurchgabe (Bild 56/Bild 57).

Die schnelle Auswertung des ersten Stromstoßes im konventionellen Wischerrelais wird anhand von Bild 56, das die Meßschaltung zeigt, erläutert.

Der erste steile Stromanstieg im Strompfad erzeugt an der Drossel C (Induktivität) einen kräftigen Spannungsabfall, der einen entsprechenden Strom über die Zwischenwandler a und b zur Folge hat.

Der sprunghafte Anstieg der Sternpunkt-Erdspannung erzeugt im Spannungspfad des Relais über die Kondensatoren und die Spannungswicklung der beiden Brückenwandler einen entsprechenden Impuls.

Die Stromstöße von Strom- und Spannungspfad werden im Zwischenwandler a addiert, im Zwischenwandler b subtrahiert. Die beiden Brückengleichrichter erhalten verschieden hohe Ströme, die Differenz gleicht sich über das polarisierte Relais e aus. Das Relais mißt daher die Richtung der Stromwelle bei der Erdschlußzündung gegenüber der auftretenden Sternpunkt-Erdspannung.

Der Kondensator C_1 ist über einen großen Vorwiderstand auf die vom Speisegerät her anstehende Gleichspannung aufgeladen. Bei der ersten Kontaktgabe des schnellen Relais e übernimmt der Kondensator C_2 der entsprechenden Seite mit sehr kurzer Zeitkonstante die Ladung von C_1 . Diese Ladung bringt das parallel dazu angeschlossene Relais zum Ansprechen; dieses geht in Selbsthaltung und verhindert ein erneutes Ansprechen des Gerätes auf einen weiteren Vorgang, solange die Anzeige nicht quittiert ist. Ein nachträgliches Ansprechen des gegenüberliegenden Relais beim ersten Vorgang infolge anschließend entgegengesetzter Kontaktgabe durch e ist nicht möglich, weil C_1 mit der ersten Kontaktgabe weitgehend entladen wurde.



Bild 58
Erdschlußwischerrelais 7SN70

Für die elektronische Ausführung des Erdschlußwischerrelais 7SN70 verlangt die schnelle Auswertung und Speicherung des vor Ablauf der ersten Millisekunde nach Eintritt des Erdschlusses gebildeten Impulses keine besonderen Maßnahmen. Die Baugruppe 7TG21 aus der Generation elektronischer Netzschutzgeräte in Einschubtechnik enthält für die Bildung des Meßwertes unverändert die bewährte Eingangsschaltung des konventionellen Erdschlußwischerrelais 7SN90; der Unterschied liegt in der statischen Auswertung.

Der von der Eingangsschaltung abgegebene Stromstoß gibt sofort nach Eintritt eines Erdschlusses mit seinem Vorzeichen die Richtung zur Fehlerstelle an. Dieser Strom gelangt nach Durchlaufen eines Filters (je nach seinem Vorzeichen) an einen der beiden entkoppelten Stromgebereingänge, der bei Überschreiten eines Grenzwertes anspricht. Gleichzeitig wird der andere Stromgeber gesperrt. Dieser Zustand besteht so lange, bis die Löschung über die Rückstelltaste oder das Fernrückstellsignal erfolgt.

Mit je einer Prüftaste kann die Funktion der Stromgeber beider Richtungen überprüft werden.

Das Erdschlußwischerrelais 7SN70 (Bild 58) im Gehäuse 7XP7720 wurde durch das Erdschlußwischerrelais 7SN71 im Gehäuse 7XP20 abgelöst.



Bild 59
Erdschlußwischerrelais 7SN71

Kernstück des Relais ist die Baugruppe 7TG23, welche bereits in den Geräten 7SN70 neuerer Bauart Anwendung fand. Bild 60 zeigt das Innenschaltbild des 7SN71 mit der Baugruppe 7TG23, die vollelektronisch arbeitet. Die Baugruppe 7TG23 enthält den Funktionsumfang der Baugruppen.

Funktionsumfang 7TG23: 7TG21, 7TM49, 7TF12, 7TR35 siehe Bild 61 7SN70 alte Ausführung.

- Richtungsbestimmung aus $3 I_0$ und $3 U_0$ durch vollelektronische Richtungsleistung
- Speicherung der ermittelten Richtung
- Schalthandlungsmeldungsunterdrückung.

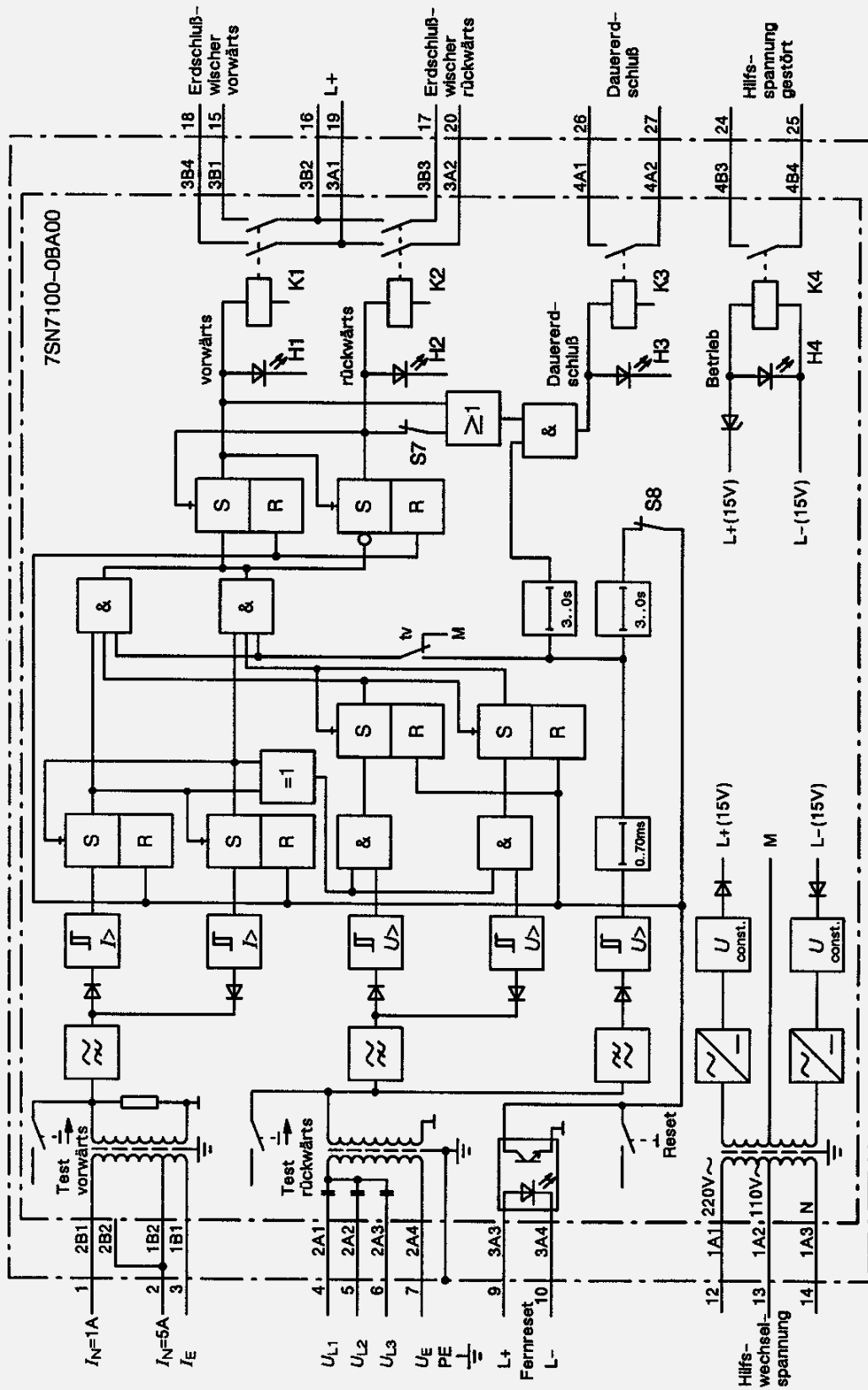


Bild 60
Schaltplan des 7SN7100-0BA00 (Schalttafelbau mit Wechselspannungsversorgung)

Zu weiteren Erdschlußrelais 7SN11 bzw. RN1b (bis zu 30 Stück)

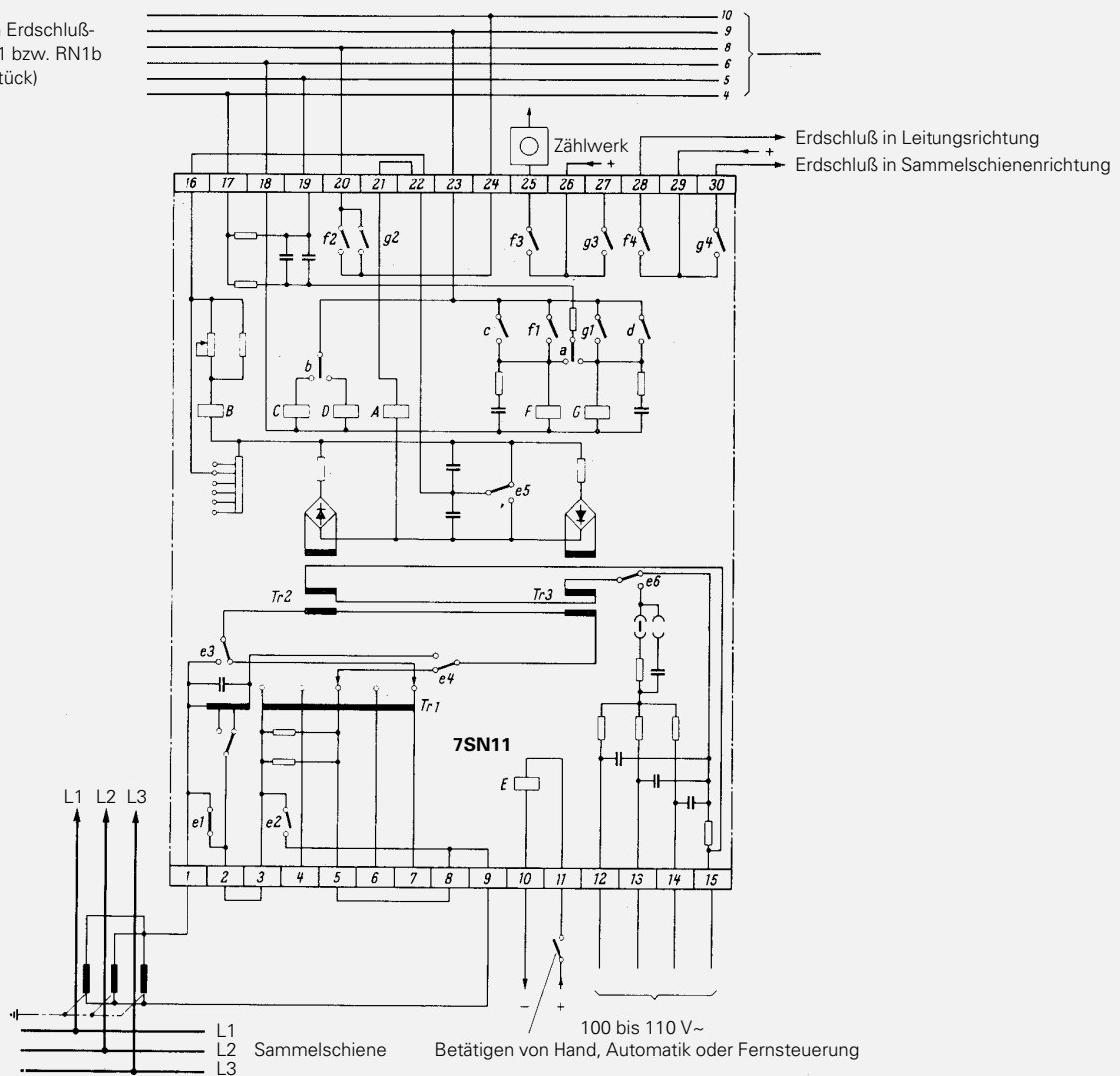


Bild 62
Innenschaltung und Anschlußschaltung des kombinierten Erdschlußrelais 7SN11

Das kombinierte Erdschlußrelais (siehe Bild 62)

Das kombinierte Erdschlußrelais 7SN11 vereint in sich die Eigenschaften des Erdschlußwischerrelais 7SN90 mit denen des Dauererdschlußrelais 7SN93. Es ermöglicht also neben der Erfassung von Erdschlußwischern auch eine Erfassung von Dauererdschlüssen nach dem wattmetrischen Prinzip X-fach unterteilten Ringleitungen sehr günstig. Nach der schnellen Erfassung des Erdschlusses kann durch Umschalten auf wattmetrische Messung der fehlerhafte Leitungsteil fast immer ohne Lastabschaltung ermittelt werden.

Das 7SN11 arbeitet normal als Wischerrelais (wie 7SN90) und wird nach Anzeige eines Erdschlusses auf wattmetrische Messung (wie 7SN93) umgeschaltet.

Vom 7SN90 unterscheidet sich das 7SN11 durch das Fehlen von Meldeleuchten; dafür sind entsprechende Meldekontakte an Klemmen geführt (Bild 62).

Die Wirkungsweise und Einstellung für den Betrieb als Wischerrelais ist die gleiche wie beim 7SN90.

Auf wattmetrische Messung wird durch ein von außen betätigtes Relais umgeschaltet. Dieses macht im Strompfad anstelle der Drossel einen Wandler und in der Brücke ein Drehpulverrelais wirksam.

Die Wirkungsweise der wattmetrischen Messung ist die gleiche wie beim 7SN93. Für die Einstellung entfallen jedoch die im 7SN93 vorhandenen unteren Ansprechwerte von 2 und 3 mA.

Der Einsatz des 7SN11 ist folgendermaßen gedacht:

Normal arbeitet das Gerät als Wischerrelais. Wurde damit die erdschlußbehaftete Leitungsfolge gefunden, so trennt man diese auf und stellt dann mit wattmetrischer Messung den betroffenen Abschnitt fest. So kann eine nähere Lokalisierung des Erdschlusses erfolgen, ohne daß eine Lastabschaltung durchgeführt werden muß.

Seite 36 enthält Hinweise für das Inbetriebsetzen von Erdschlußrelais.

Planen und Inbetriebsetzen des Erdschlußschutzes

Einstellen der wattmetrischen Relais

Wie die Ausführungen gezeigt haben, ist der Aufbau eines Erdschlußschutzes stets eine Angelegenheit des gesamten galvanischen zusammenhängenden Netzes. Man kann also nie für einzelne Stationen ein Schutzkonzept entwerfen ohne das ganze Netz zu kennen.

Grundlage ist in jedem Fall der kapazitive Erdschlußstrom $I_{CE} = \sqrt{3} U_N \omega C_E$ des Netzes. Er kann, wenn nicht vorhanden, überschlagsmäßig aus den in den Bildern 63 bis 66 enthaltenen Diagrammen abgelesen werden.

Bild 63 zeigt ein Diagramm, aus dem nach Umrechnung der Erdschlußstrom für Freileitungen berechnet werden kann.

- Für isolierte Netze, welche nahezu ausschließlich Stichnetzcharakter haben, muß ebenfalls der Abzweig mit dem größten Erdschlußstrom ermittelt werden.

Der Einstellwert wird mit einer Ansprechsicherheit von 2 ermittelt zu:

- In gelöschten Netzen geht man entweder vom eingestellten Spulenstrom I_L oder ebenfalls vom kapazitiven Erdschlußstrom aus.

Für die wirksame Dämpfung kann in Kabelnetzen der Spannungsebenen 10 – 30 kV $d = 0,02$ bis $0,03$ und in den 110-kV-Freileitungsnetzen $d = 0,03$ bis $0,06$ angenommen werden. Da wattmetrische Relais vorwiegend in Mittelspannungsnetzen mit dominierendem Kabelanteil Anwendung finden, sollte nicht der kapazitive Erdschlußstrom $I_{WR} = I_{CE} \cdot d$ sondern der Spulenstrom $I_{WR} = I_C \cdot d$ zur Berechnung verwendet werden.

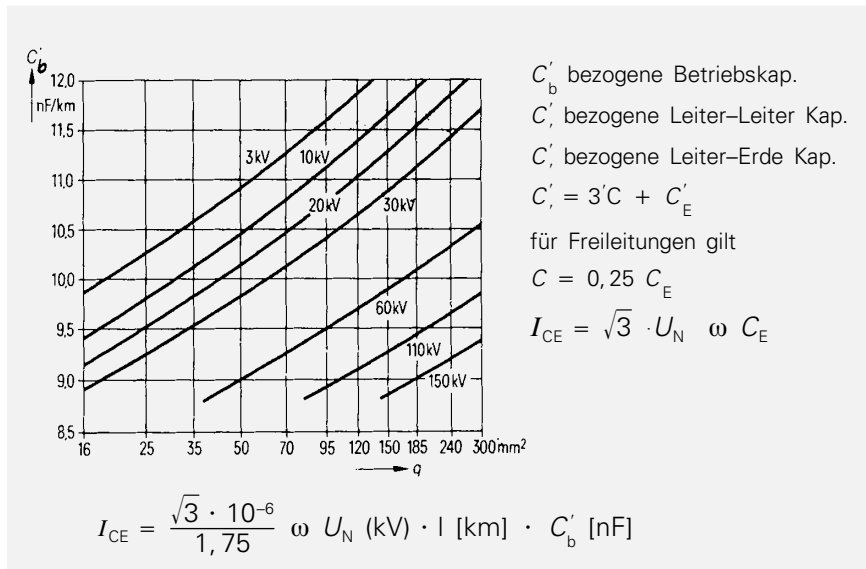


Bild 63 Betriebskapazität C'_b in nF/km je Leiter für Betriebsspannungen bis 150 kV

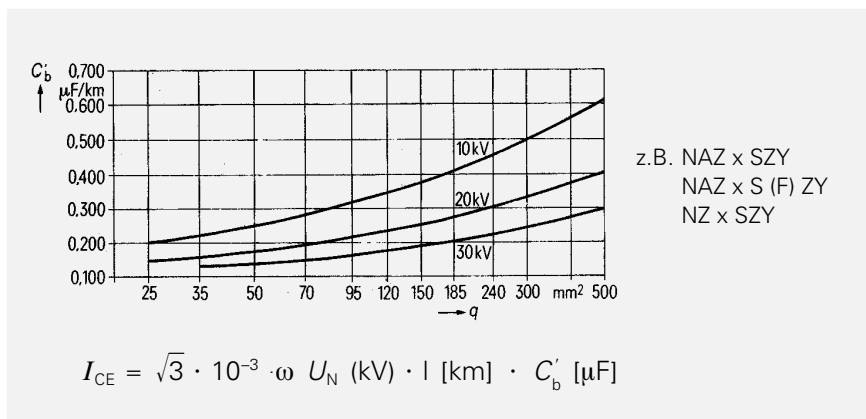


Bild 64 Betriebskapazität C'_b in $\mu\text{F}/\text{km}$ je Leiter von einadrigen Kunststoffkabeln mit PE- oder VPE-Isolierung mit Kupfer- oder Aluminiumleiter für Nennspannungen von 6/10 bis 18/30 kV

Die Bild 64 bis Bild 66 zeigen Diagramme für die Bestimmung der Erdschlußströme von Kabeln.

Wie im Kapitel Spannungen und Ströme bereits erwähnt, sind die dielektrischen Verluste der Kabel vernachlässigbar klein ($d \approx 0,002$).

Bei der Ermittlung des Einstellwertes braucht im gelöschten Netz nicht mit einer Ansprechsicherheit von 2 gerechnet werden, da hochohmige Erdfehler zur Vergrößerung der Wirkkomponente führen. Um Schaltzustandsänderungen ausgleichen zu können, wird empfohlen, ca. 65 % des berechneten Wattreststromes als Ansprechwert zu wählen. Der ermittelte Sekundärwert muß den Anforderungen bezüglich der Wandler-toleranzen bei Holmgreenschaltung bzw. bei $I_{\text{Ansprech}} \leq 10 \text{ mA}$ sehr genauer Winkelkorrektur des Kabelumbauwandlers entsprechen.

Der Anschluß der Relais an die Meßkerne der Kabelumbauwandler wird empfohlen.

Einstellen der Erdschlußwischerrelais

Erdschlußwischerrelais sprechen auf die erste Amplitude im Nullstrom $3 I_0$ an. Die Größe der ersten Amplitude ist jedoch nicht so einfach wie die Werte des stationären Nullstromes zu ermitteln. Abhängigkeiten hierzu sind unter dem Punkt Spannungen und Ströme zu finden.

Da die Größenordnungen neben der Leitererde-Kapazität des gesamten Netzes auch von den Reaktionen der einspeisenden Umspannern und der Fehlerstrombahn abhängen, können die zu erweiternden Amplituden nur mit speziellen Rechenprogrammen ermittelt werden.

Eine andere Möglichkeit ist die Beobachtung der Anzeigen der Relais infolge Erdfehler und eine daraus abgeleitete Korrektur der Einstellungen.

Durch den Anschluß am 5-A-Eingang wird der Ansprechwert um den Faktor 5 erhöht. Es stehen somit acht Einstellmöglichkeiten zur Verfügung.

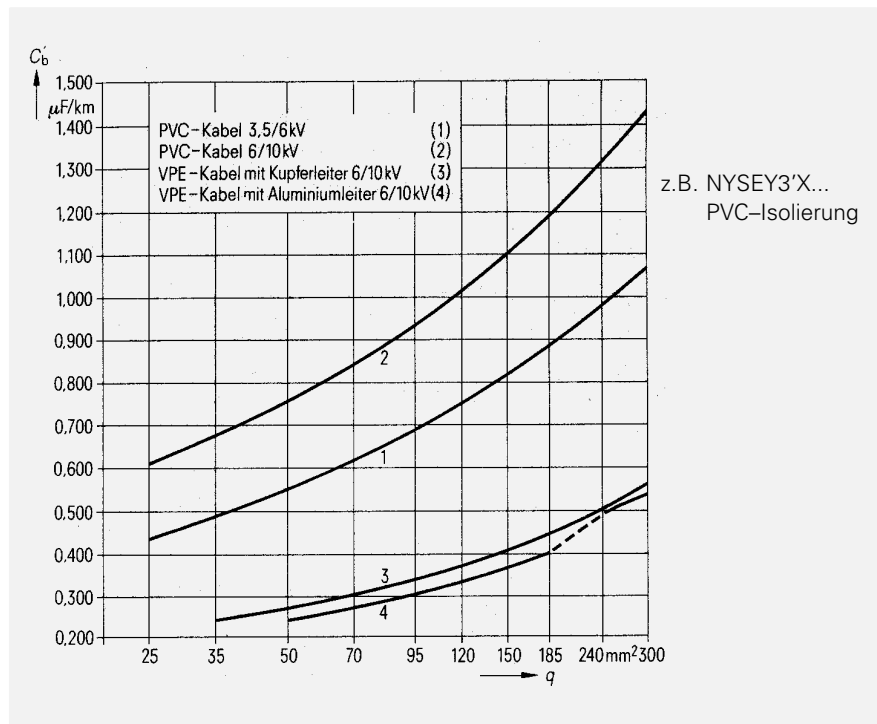


Bild 65 Betriebskapazität C_b in $\mu\text{F}/\text{km}$ je Leiter von dreidrigen Kunststoffkabeln mit Kupfer- oder Aluminium für Nennspannungen von 3,5/6 und 6/10 kV

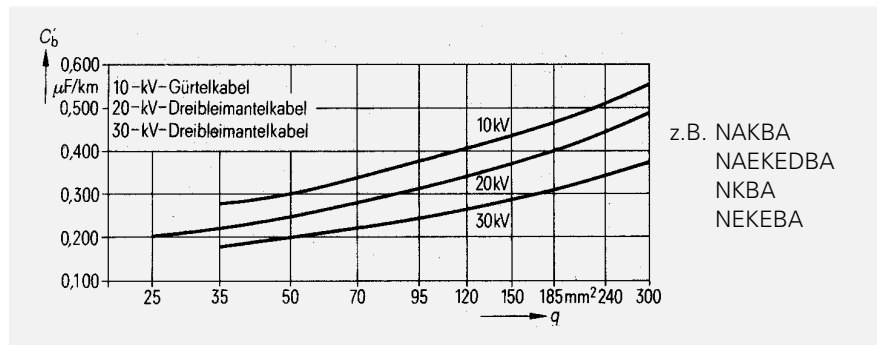


Bild 66 Betriebskapazität C_b in $\mu\text{F}/\text{km}$ je Leiter von einadrigen Kabeln mit Papierisolierung mit Kupfer- oder Aluminiumleiter für Nennspannungen von 6/10 bis 18/30 kV

Tabelle zeigt die Ansprechempfindlichkeiten der verfügbaren Wischerrelais 7TG23, 7SN70, 7SN71

| Stecker gesteckt | Ansprechgrenze |
|------------------|-------------------|
| 1, 2 und 3 | (0,2 bis 0,3) A |
| 1 und 2 | (0,1 bis 0,15) A |
| 1 | (0,03 bis 0,04) A |
| - | 0,02 A |

Durch den Anschluß am 5-A-Eingang wird der Ansprechwert um den Faktor 5 erhöht. Es stehen somit acht Einstellmöglichkeiten zur Verfügung.

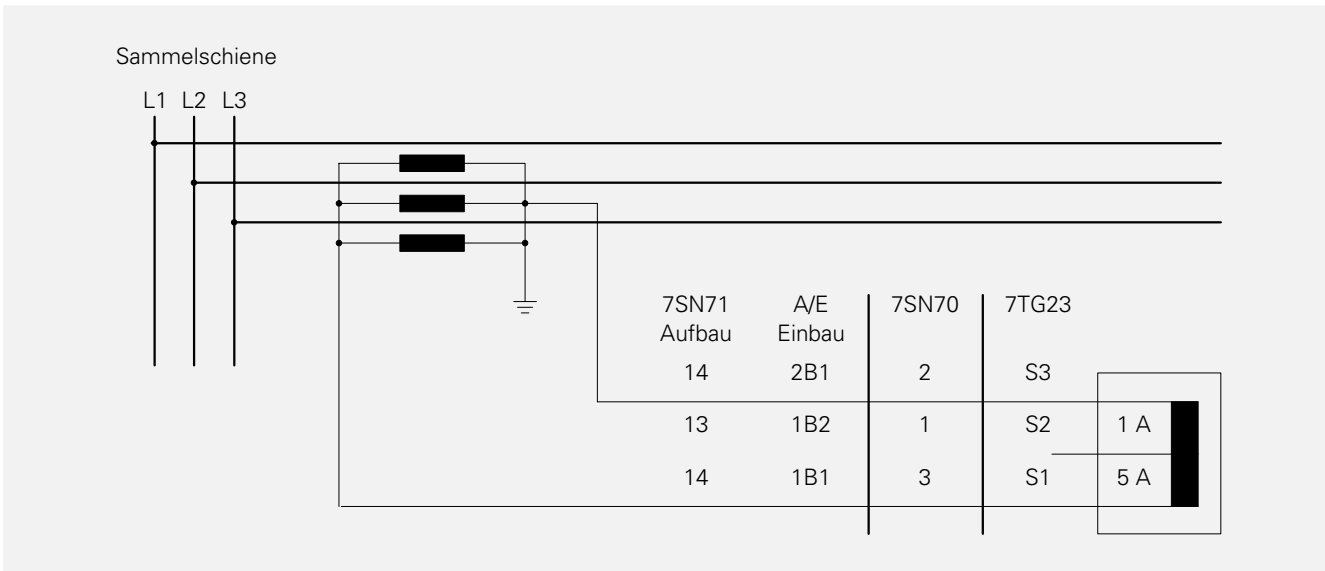


Bild 68
Wandleranschluß wattmetrischer Relais

Anschluß der Erdschlußwischerrelais

Die Anschaltung gilt immer und ist von der Seite der Stromwandlererdung unabhängig.

Beim Anschluß an Kabelumbauwandler muß die leitungsseitige Klemme wie der leitungsseitige Sternpunkt der Holmgreenschaltung angeschlossen werden.

Kontrolle der Wandleranschlüsse

Beim gerichteten Erdschlußschutz ist es besonders wichtig, die richtige Anschaltung der Wandler zu überprüfen. Der Wickelsinn und Anschluß der U_{EN} -Wicklung ist insbesondere bei älteren Spannungswandlern oft unklar. Weiterhin kann es im Strompfad beim Anschluß an Kabelumbauwandler zu Vertauschungen kommen. Mit der digitalen Prüfeinrichtung 7VP15 ist es möglich, den richtigen Anschluß der Kabelumbauwandler zu überprüfen. Hierzu werden die Anschlußleitungen des Prüfstromes von der Sammelschienenenseite aus beginnend durch den Kabelumbauwandler gefädelt (siehe Bild 69). Der Spannungsanschluß Prüfeinrichtung-Schutzgerät kann wahlweise 3phasig oder einphasig erfolgen (z. B. bei Relais, die nur die Nullspannung $\sqrt{3} U_0$ verwenden).

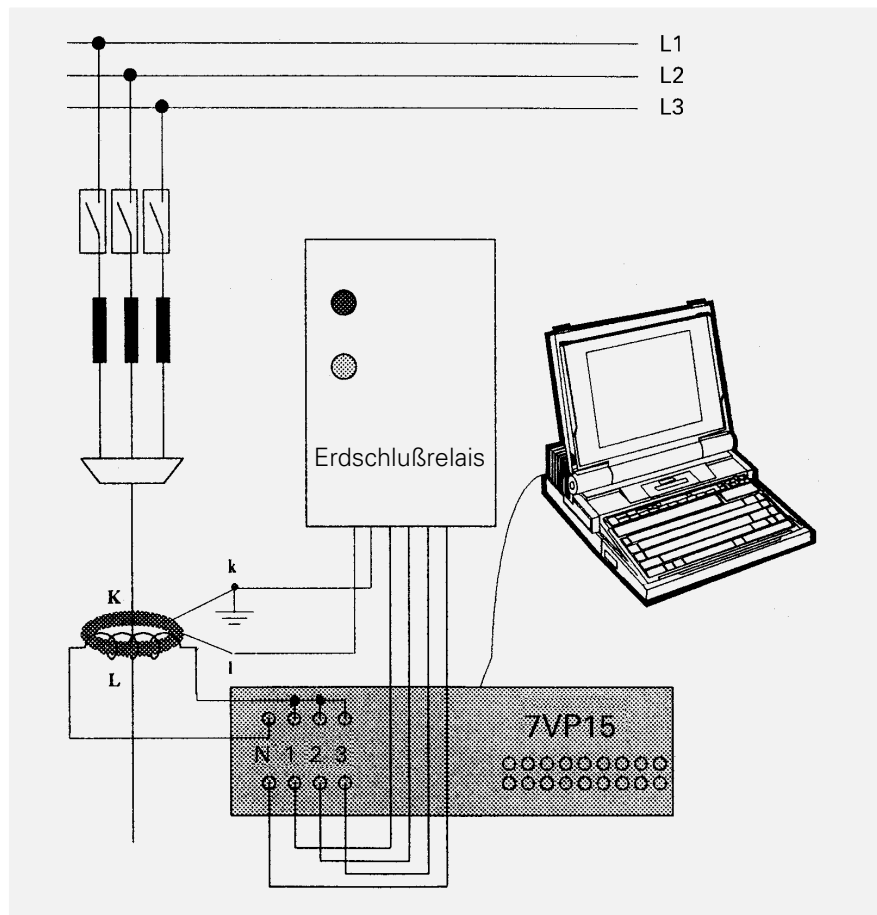


Bild 69
Anschaltung der 7VP15 Prüfeinrichtung

Durch die digitale Prüfeinrichtung ist es insbesondere für die Prüfung von Erdschlußwischerrelais möglich, den Erdschlußeintritt mit netzspezifischen Daten zu simulieren und als praxistaugliche Größe in Bezug auf Frequenz, Amplitude und Phasenlage auszugeben.

Diese Prüfschaltung setzt den richtigen Anschluß der Spannungswandler voraus. Beim Erdschlußwischerrelais (7SN71; 7SN70) wird die Verlagerungsspannung aus den angeschlossenen Leiter-Erdespannungen ermittelt $3U_0 = U_{L1} + U_{L2} + U_{L3}$.

Ein Vertauschen der Leiter-Erde-Spannungen ist somit unkritisch, wenn der richtige Anschluß des Wandlersternpunktes sichergestellt ist. Der richtige Anschluß des Sternpunktes kann mit einem einfachen Vielfachmesser überprüft werden. Eine Überprüfung auf den richtigen Spannungswandleranschluß kennzeichnet Bild 70 für Erdschlußwischerrelais und Bild 71 für Relais welche nach dem wattmetrischen Prinzip arbeiten.

Die auf dem Umbauwandler angegebenen Bezeichnungen K-L, k-l geben wie bei allen Wandlern nur an, wie die Klemmen einander zugeordnet sind. Deshalb ist in der Zeichnung kein "K-L" eingetragen. Man muß nur beachten: Liegt z. B. "K" zur Leitungsseite, so ist "k" der leitungsseitige Sekundäranschluß und muß bei allen Erdschlußrelais zur Klemme 1 führen.

Zeigt "L" zur Leitungsseite, so ist "l" der leitungsseitige Anschluß. Man sollte jedoch Wert darauf legen, in einer Anlage möglichst alle Wandler gleichartig einzubauen. Die empfindlichen Erdschlußrelais 7SN93, 7TG20 und 7SN73 sind auf das Zusammenarbeiten mit den Umbauwandlern durch ein besonderes Filter abgeglichen. Man darf deshalb nicht den Strompfad umdrehen und die Meldekontakte tauschen, sondern muß genau der Zeichnung nach anschließen.

Alle diese Versuche dürfen nur durch sehr fachkundiges Personal ausgeführt werden. Bei den Arbeiten an den Wandlern ist größte Vorsicht geboten.

Beim Inbetriebsetzen der Erdschlußwischerrelais muß nur sorgfältig auf den Anschluß der Stromwandler geachtet werden (siehe insbesondere die Betriebsanleitung für das 7SN90). Der leitungsseitige Sternpunkt der Wandler führt beim 7SN90 und beim 7SN70 zur Klemme 1, beim 7TG21 zum Anschluß S mit der kleineren Nummer.

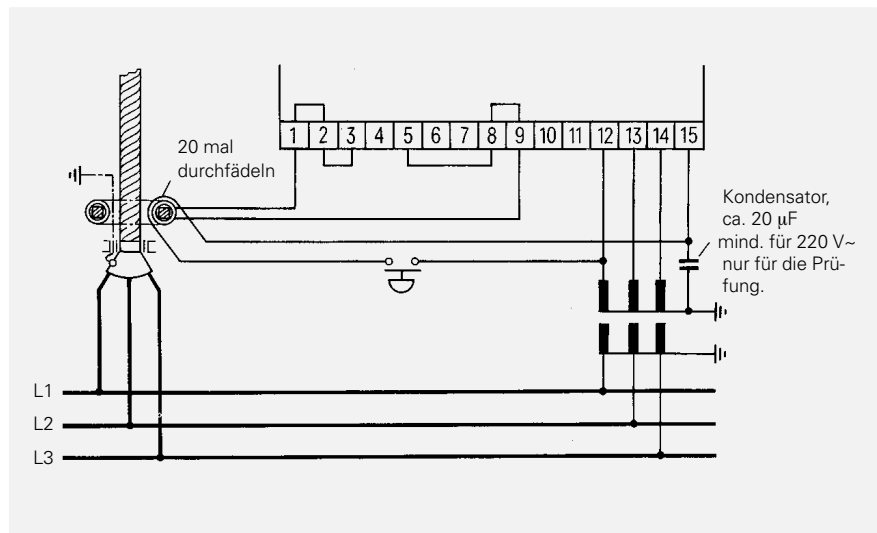


Bild 70 Anschluß- und Prüfschaltung für ein Erdschlußwischerrelais

Bei etwa 80 bis 90 % der Tastenbetätigungen spricht das Wischerrelais an. Wenn das Schließen des Kontaktes zufällig gerade in der Nähe des Nulldurchganges der Spannung erfolgt, kann das Relais nicht ansprechen. Das Wischerrelais muß bei der gezeichneten Schaltung "rot" bei entgegengesetzter Polung der Stromleitung durch den Umbauwandler "gelb" anzeigen.

Der Anschluß kann auch an Kabelumbauwandler erfolgen. Man rechnet dann mit dem Übersetzungsverhältnis 300/5 statt 60/1 und schließt an die 5-A-Wicklung im Relais an.

Um zu vermeiden, in großen Anlagen mit Sammelschienenwandlern die Sternpunkterdschaltung mit über die Trennschalterkontakte schleifen zu müssen, bildet das Wischerrelais in sich die Verlagerungsspannung aus den drei Sternspannungen. Außerdem vermeidet man so alle Zweifel über den Anschlußsinn, da die Meßwicklungen der Wandler immer $\swarrow \searrow$ geschaltet sind. Die Reihenfolge der Spannungsanschlüsse L1, L2, L3 (Drehfeld) ist ohne Einfluß.

Durch die Reihenschaltung der Spannungen U_{L2} und U_{L3} der offenen Dreieckschaltung erhält das Relais folgende Spannung:

$$U_{\text{meß}}$$

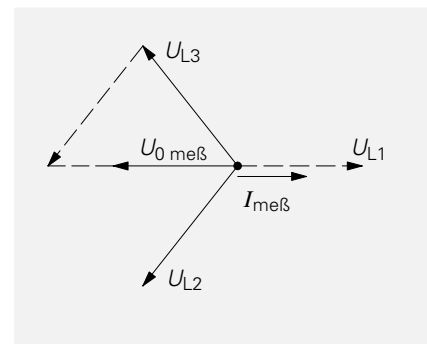


Bild 71 Zeigerdiagramm zur Prüfschaltung von Bild 70

Gleichzeitig wird durch die Spannung U_{L1} der Sekundärwicklung des Spannungswandlers ein Strom $I_{\text{meß}}$ über den Widerstand R getrieben, welcher gleichphasig zu U_{L1} ist. Das Zeigerdiagramm Bild 71 zeigt die Lage der Vektoren.

Trägt man die Vektoren in das Richtungskennlinienfeld Bild 44 ein, so wird die Simulation eines Erdschlusses in Richtung Leitung deutlich.

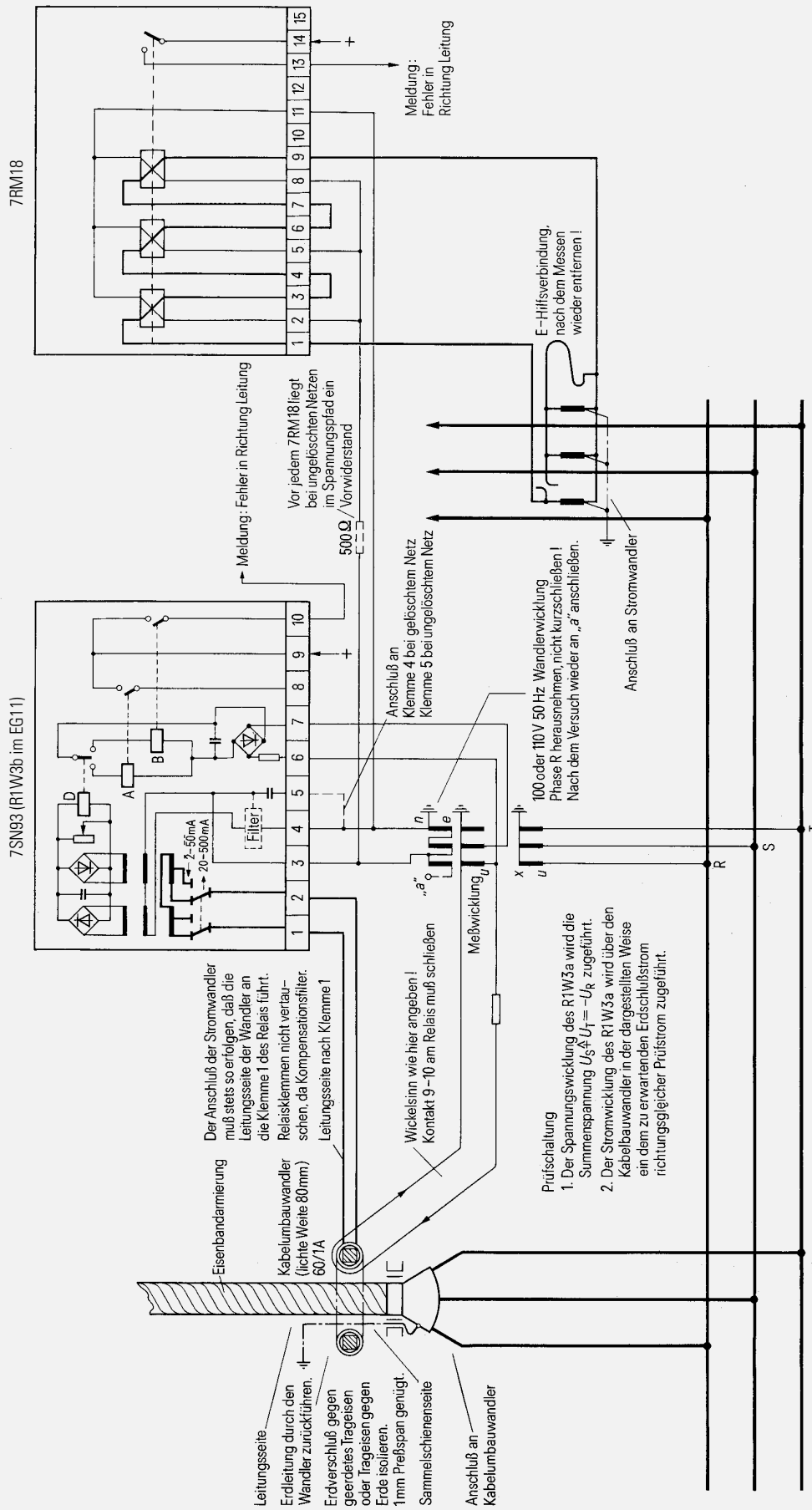


Bild 72
Anschluß und Prüfung der Erdschlußrelais

Verantwortlich für

Technischen Inhalt: Bernhard Böckenfeld,
Siemens AG, EV S V13, Nürnberg

Redaktion: Jana Steffen,
Siemens AG, EV S SUP 22, Nürnberg

Bereich
Energieübertragung und -verteilung
Geschäftsgebiet Sekundärtechnik
Postfach 48 06
D-90026 Nürnberg

Siemens Aktiengesellschaft



Wir bringen
Energie
ans Ziel

Bestell-Nr.: **E50410-D0001-X000-A1-0070**
Printed in Germany
KG 10.10.1996