Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 54 (1963)

Heft: 26

Artikel: Einpolige, einseitige Unterbrechung bei Erdkurzschluss im Maschennetz

Autor: Wagner, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916548

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

R_g des Nullstrom-Anzeigers der Wert $10^3\ \Omega$ und eine Brückenspeisespannung von 2000 V, 50 Hz, angenommen):

Empfindlichkeiten

Tabelle II

C_1 pF	C_2 pF	R_3 Ω	R_4 Ω	q	I_i A	U_3 V
20	20	10^4	10^4	$8{,}35 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-1}$
200	200	10^4	10^4	$8{,}35 \cdot 10^{-6}$	$1{,}26 \cdot 10^{-4}$	1,26
200	20	10^3	10^4	$4{,}77 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-4}$	$1{,}26 \cdot 10^{-1}$
2000	200	10^3	10^4	$4{,}77 \cdot 10^{-6}$	$1{,}26 \cdot 10^{-3}$	1,26
20	20	10^3	10^3	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	$1{,}26 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$
200	200	10^3	10^3	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$	$1{,}26 \cdot 10^{-4}$	$1{,}26 \cdot 10^{-1}$

Aus Tabelle II geht hervor, dass mit $C_1 = 200$ pF eine in die Grössenordnung von 10^{-6} fallende Abgleichempfindlichkeit erreicht wird. Eine Vergrösserung der Empfindlichkeit kann erreicht werden durch Verkleinerung von Z_2, d. h. durch Verwendung eines verlustfreien Normalkondensators C_2 mit erhöhter Kapazität oder durch Erhöhung der Spannung. Das bedeutet einen merklichen finanziellen Mehraufwand, indem ein verlustfreier einstellbarer Normalkondensator hoher Spannungsfestigkeit relativ schwierig herzustellen und damit teuer ist. Es sind Vakuumkondensatoren bis 10 kV erhältlich, die mit einigen zusätzlichen Änderungen verwendet werden können. Werden alle Brückenelemente inklusiv dem Normalkondensator in einen gemeinsamen Kasten eingebaut, so ist man aus konstruktiven und isolationstechnischen Gründen auf eine möglichst niedrige Spannung angewiesen. Rechnet man mit einer Speisespannung von 3000 V, 50 Hz, $R_3 = R_4 = 10^4\ \Omega$, so ergibt sich mit $C_1 = C_2 = 100$ pF ein q-Wert von $1{,}10^{-5}$. Es ist daraus ersichtlich, dass man sich mit der Schaltung nach Fig. 11 an der Grenze des Möglichen bewegt und die gestellten Anforderungen nur bedingt erfüllen kann, d. h. bei relativ grossen Werten von C_1. Eine Lösung ist möglich, wenn es gelingt, den Nullstrom-Anzeiger um eine Potenz empfindlicher zu machen, was jedoch technisch nicht einfach ist, da hier bereits Faktoren, wie Elektronenrauschen bei elektronischem Aufbau sowie Anpassung an die Brücke u. a. m. eine Rolle spielen.

Adresse des Autors:
K. von Angern, Dipl. Ing. ETH, Watt (ZH).

Einpolige, einseitige Unterbrechung bei Erdkurzschluss im Maschennetz

Von *A. Wagner,* Innsbruck

621.316.1.052.4 : 621.3.014.7

Es werden Formeln für die Phasenströme und die Leitererd- und Sternpunktspotentiale einer Einfach- und einer Doppelleitung eines Maschennetzes mit direkt oder niederohmig geerdeten Sternpunkten für einpolige, einseitige Unterbrechung der fehlerbehafteten Phase bei einpoligem Erdkurzschluss abgeleitet. Die berechneten Grössen dienen zur Projektierung und Einstellung des Leitungsschutzes.

On établit des formules pour les courants de phase et les potentiels vers la terre des phases et des neutres aux extrémités d'une ligne d'énergie à un ou deux ternes connectée à un réseau maillé, dont les neutres sont mis à la terre directement ou par des résistances inférieures, après l'interruption unipolaire et unilatérale de la phase perturbée lors d'un défaut unipolaire à la terre. Les valeurs calculées servent au projet et à la mise au point de la protection de la ligne.

1. Einleitung

Für die Projektierung und Einstellung des Leitungsschutzes in einem Netz mit direkt oder niederohmig geerdeten Sternpunkten kann es zweckmässig sein, ausser den verschiedenen Betriebsbedingungen und Fehlerarten auch die Auswirkungen einer einpoligen, einseitigen Unterbrechung bei Erdschluss dieser Phase zu untersuchen. Diese Unterbrechung kann durch einen Leiterriss oder dadurch verursacht sein, dass bei einpoliger Kurzunterbrechung ohne Mitnahmeschaltung bei Schwachlast oder mangelnder Anregung an einem Leitungsende, wie zu kleinem Summenstrom, zunächst nur einseitig geöffnet wird, so dass erst die veränderte Stromverteilung zum vollständigen Öffnen dieser Phase führt. Eine Modellmessung erfordert die gleichzeitige Netzdarstellung von mindestens 2 Komponenten und fehlwinkelfreie Übertrager zur Verbindung der Komponentennetzwerke [1][1]). Zur Berechnung des Falles einseitiger Unterbrechung wurden bisher nur Formeln und Diagramme für dreipolige Fehler [2; 3] und für einpoligen Erdschluss nur die grundlegenden Beziehungen zur Aufstellung von Gleichungssystemen [1] und Berechnungsformeln für den Erdschlußstrom an Verbundleitungen zwischen zwei sonst durch keine weitere Leitung miteinander verbundenen Netzen [4] angegeben. Demgegenüber werden im folgenden Berechnungsformeln abgeleitet, aus denen sich nach Einsetzen der jeweiligen Impedanzen und EMK alle Anrege- bezw. Messgrössen aller Phasen an beiden Leitungsenden für den Fall ergeben, dass eine einseitigeinpolig unterbrochene und mit einpoligem Erdschluss behaftete Einfach- oder Doppelleitung an ein Maschennetz angeschlossen ist, wobei auch der Lasteinfluss berücksichtigt werden kann. Weiter wird die wegen der Gleichphasigkeit der Nullströme in den Phasen durch Auskreuzen nicht beseitigbare gegenseitige Beeinflussung der Stränge einer Doppelleitung berücksichtigt.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Ableitung von Berechnungsformeln

Die zu Grunde gelegte allgemeine Konfiguration der beidseitigen Anspeisung der Leitung durch ein Maschennetz kann zur Berechnung der Spannungen und Ströme an der Leitung

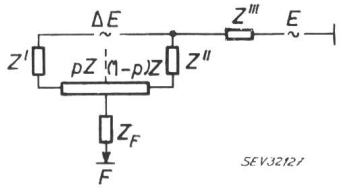

Fig. 1

nach dem Satz von der Ersatzspannungsquelle (Theorem von *Thévenin*) auf ein äquivalentes, vereinfachtes Netzersatzschaltbild nach Fig. 1 zurückgeführt werden, wie dies in Fig. 2 an

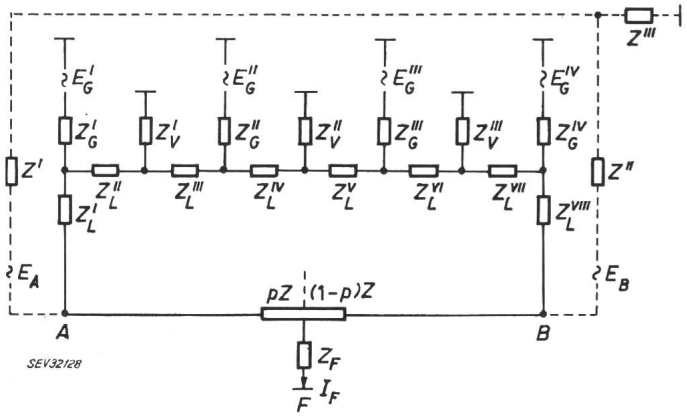

Fig. 2

einem Ringnetz mit Erzeugern Z_G, E_G, Lasten Z_V und Leitungen Z_L angedeutet ist. Dieses Ersatzschaltbild besteht aus 3 Netzersatzimpedanzen Z^{I}, Z^{II}, Z^{III}, einer Generator-EMK E_G und der Leitungsimpedanz Z. Werden Lasten in die Untersuchung einbezogen, ergeben sich nach Fig. 2 nach Abtrennung der Leitung an den Trennstellen im allgemeinen ungleiche EMK E_A, E_B, die kleiner als die Generator-EMK E_G sind. Dafür können im gemeinsamen Zweig des Ersatzschaltbildes eine EMK $E = E_B$ und in einem Seitenzweig eine Zusatz-EMK $\Delta E = E_A - E_B$ gesetzt werden. Die Netzersatzimpedanzen ergeben sich nach Kurzschliessen aller EMK, aber ohne Kurzschliessen derer Innenimpedanzen, aus den nach Anlegen einer Spannungsquelle V in jedem Komponentensystem für sich an den Trennstellen A, B messbaren Potentialen U und Strömen I nach folgenden Beziehungen:

$$Z^{\mathrm{I}} = (V_A - U_B)/I$$
$$Z^{\mathrm{II}} = (V_B{}^{\mathrm{I}} - U_A{}^{\mathrm{I}})/I^{\mathrm{I}}$$
$$Z^{\mathrm{III}} = U_A{}^{\mathrm{I}}/I^{\mathrm{I}}$$

Wird der Lasteinfluss auf die Netzimpedanzen nicht berücksichtigt, können die Netzersatzimpedanzen auch aus Ergebnissen früherer Netzmodelluntersuchungen, also aus den den Leitungsenden A, B zuströmenden Kurzschlussleistungen S bezw. den Einströmungen I für einpoligen Erdkurzschluss berechnet werden, wobei im folgenden mit U_n die Nennspannung und nach Fig. 3 mit I^{I}, I^{II} bezw. S^{I}, S^{II} die Einströmungen über die Netzersatzimpedanzen Z^{I}, Z^{II} bezeichnet werden.

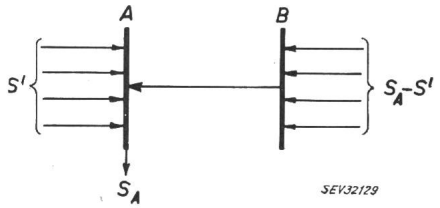

Fig. 3

Für das Mitsystem ergeben sich folgende Beziehungen.

$$1{,}1\, U_n{}^2 = S_A Z_1{}^{\mathrm{III}} + S^{\mathrm{I}} Z_1{}^{\mathrm{I}} = S_B Z_1{}^{\mathrm{III}} + S^{\mathrm{II}} Z_1{}^{\mathrm{II}}$$
$$S^{\mathrm{I}} Z_1{}^{\mathrm{I}} = (S_A - S^{\mathrm{I}})(Z_1 + Z_1{}^{\mathrm{II}})$$
$$Z_1{}^{\mathrm{II}} = (1 - S^{\mathrm{I}}/S_A)\, Z_1 + \frac{1{,}1\, U_n{}^2 (1/S_B - 1/S_A)}{S^{\mathrm{I}}/S_A + S^{\mathrm{II}}/S_B - 1}$$
$$Z_1{}^{\mathrm{III}} = (1{,}1\, U_n{}^2 - S^{\mathrm{II}} Z_1{}^{\mathrm{II}})/S_B$$
$$Z_1{}^{\mathrm{I}} = (S_A/S^{\mathrm{I}} - 1)(Z_1 + Z_1{}^{\mathrm{II}})$$

Analog gilt für das Nullsystem:

$$Z_0{}^{\mathrm{II}} = \frac{(1 - 3\, I_0{}^{\mathrm{I}}/I_{FA})\, Z_0 + 3U_{B0}/I_{FB} - 3U_{A0}/I_{FA}}{3I_0{}^{\mathrm{I}}/I_{FA} + 3I_0{}^{\mathrm{II}}/I_{FB} - 1}$$
$$Z_0{}^{\mathrm{III}} = (3U_{B0} - 3I_0{}^{\mathrm{II}} Z_0{}^{\mathrm{II}})/I_{FB}$$
$$Z_0{}^{\mathrm{I}} = (I_{FA} - 3I_0{}^{\mathrm{I}})(Z_0 + Z_0{}^{\mathrm{II}})/3I_0{}^{\mathrm{I}}$$

Es wird im folgenden Symmetrie der Netz-EMK, Netz- und Leitungsimpedanzen als auch Gleichheit der Mit- und Gegenimpedanzen vorausgesetzt. Dies zieht praktisch in den meisten Fällen keine Einschränkung der Anwendungsmöglichkeit der Berechnungsformeln nach sich, führt aber bei Verwendung von α, β, 0-Komponenten an Stelle von symmetrischen zu einer bedeutenden Erleichterung der Ableitung und zu einfacheren Formeln. Unter diesen Voraussetzungen sind die Mitimpedanzen gleich den α- und β-Impedanzen und diese unabhängig voneinander. Weiter sind die Nullimpedanzen beider Komponentensysteme einander gleich. Die für die Rechnung erforderlichen Ausgangswerte können daher für jede Komponente getrennt auch an einer Netzersatzschaltung für symmetrische Komponenten bestimmt werden, wobei für die Komponenten einer symmetrischen Phasen-EMK E gilt:

$$E_0 = 0$$
$$E_\alpha = E$$
$$E_\beta = -\mathrm{j}\, E$$

Am Beispiel einer Doppelleitung entsprechend Fig. 4 mit den Impedanzen Z_0, Z_1 der Stränge und deren gegenseitigen Nullimpedanz M_0 wird eine Übersicht über die Ableitung allgemeiner Berechnungsformeln für einpoligen Erdkurzschluss und einseitige, einpolige Unterbrechung an Phase R des Stranges I gegeben, wobei folgende Bezeichnungen verwendet werden:

I Phasenstrom, U Leiterpotential, U^+ Sternpunkt-Verlagerungsspannung, E Phasen-EMK, I_F Erdkurzschlußstrom, p relative Fehlerentfernung vom Leitungsende A, Indizes A, B Leitungsenden, Indizes R, S, T Phasen, Index F Fehlerstelle, Index ν zur Kennzeichnung von Grössen, die sowohl für das Null- als bzw. auch für das Mitsystem gelten, tiefgestellte Indizes I, II Stränge einer Doppelleitung, Z_F Lichtbogen- bezw. Fehlerimpedanz, V beliebiger Vektor.

Folgende Definitionsformeln werden benötigt:

$$V_R = V_0 + V_\alpha$$
$$V_S = V_0 - V_\alpha/2 + \sqrt{3}\; V_\beta/2$$
$$V_0 = (V_R + V_S + V_T)/3$$
$$V_\alpha = (2V_R - V_S - V_T)/3$$
$$V_\beta = (V_S - V_T)/3$$

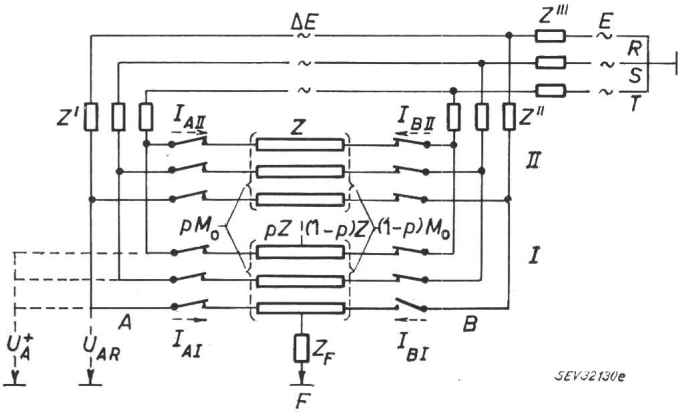

Fig. 4

Bedingungen für einpoligen Erdkurzschluss an Phase R:

$$U_{FR} = U_{F0} + U_{F\alpha} = I_F Z_F$$
$$I_{FS} = I_{FT} = 0$$
$$I_{F0} = 0{,}5\, I_{F\alpha}$$
$$I_F = I_R = I_{F0} + I_{F\alpha}$$
$$I_{F\beta} = 0$$

Spannungsabfall der Komponentenströme an der Unterbrechungsstelle:

$$u_S = u_T = 0$$
$$u_0 = 0{,}5\, u_\alpha$$
$$u_R = 1{,}5\, u_\alpha$$

Zur Abkürzung der Ausdrücke werden im Zuge der Ableitung Konstante, neue Impedanzen und EMK eingeführt, die im folgenden Abschnitt definiert werden. Die unterstrichenen Terme gelten jeweils nur für das angegebene Komponentensystem.

Netzgleichungen nach Fig. 4:

$$\Delta E - [I_\nu - (I_\nu^{\mathrm{I}} + I_\nu^{\mathrm{II}})]\, Z_\nu^{\mathrm{I}} + (I_\nu^{\mathrm{II}} Z_\nu + \underline{I_0^{\mathrm{I}} M_0 - I_0\, p\, M_0}) + (I_\nu^{\mathrm{I}} + I_\nu^{\mathrm{II}})\, Z_\nu^{\mathrm{II}} = 0$$

$$I_\nu^{\mathrm{II}} Z_\nu + \underline{I_0^{\mathrm{I}} M_0 - I_0\, p\, M_0} - (I_\nu^{\mathrm{I}} Z_\nu - I_\nu\, p\, Z_\nu + \underline{I_0^{\mathrm{II}} M_0} + u_\nu) = 0$$

Daraus ergibt sich:

$$I_0^{\mathrm{II}} = (k_0 + p\, k_0^{\mathrm{I}})\, I_\alpha + k_0^{\mathrm{II}} I_\alpha^{\mathrm{I}}$$
$$I_\alpha^{\mathrm{II}} = k_1 I_\alpha - k_1^{\mathrm{II}} I_\alpha^{\mathrm{I}} - \Delta E / Z_1^{\mathrm{IV}}$$
$$I_0^{\mathrm{I}} = - I_\alpha^{\mathrm{I}} = (k^{\mathrm{III}} + p\, k^{\mathrm{IV}})\, I_\alpha + \Delta E / Z^{\mathrm{VI}}$$

Bedingungen an der Erdschlußstelle F:

$$\underline{E + \Delta E} - U_{F\nu} = I_\nu Z_\nu^{\mathrm{I}} + [I_\nu - (I_\nu^{\mathrm{I}} + I_\nu^{\mathrm{II}})]\, Z_\nu^{\mathrm{I}} + (I_\nu - I_\nu^{\mathrm{I}})\, p\, Z_\nu - \underline{I_0^{\mathrm{II}}\, p\, M_0}$$

$$U_{F0} + U_{F\alpha} = I_F Z_F$$

Daraus folgt:

$$I_F = I_{AIR} = 1{,}5\,(E^{\mathrm{I}} + p\, \Delta E^{\mathrm{I}}) / (Z_{res} + 1{,}5\, Z_F)$$

Das Leitererdpotential der Phase R entspricht dem Spannungsabfall bis zur Erdschlußstelle unter Berücksichtigung der gegenseitigen Nullimpedanz der Stränge und ist am Leitungsende A:

$$U_{AR} = p\,[(I_{F0} - I_0^{\mathrm{I}})\, Z_0 + (I_F - I_\alpha^{\mathrm{I}})\, Z_1 - I_0^{\mathrm{II}} M_0] + I_F Z_F$$

Die Sternpunkt-Verlagerungsspannung ist gleich dem Spannungsabfall im Nullsystem von dessen Nullpunkt aus:

$$- U_A^+ = I_{F0} Z_0^{\mathrm{III}} + [I_{F0} - (I_0^{\mathrm{I}} + I_0^{\mathrm{II}})]\, Z_0^{\mathrm{I}}$$

Zur Berechnung des Leitererdpotentials der Phase S bezw. T ist auch das β-System erforderlich, in dem allerdings kein Strom zur Erdschlußstelle abfliesst. Bei Berücksichtigung von Lasten fliesst aber ein Ausgleichstrom infolge ΔE und zwar auch im fehlerbehafteten, einpolig geöffneten Strang wegen $u_\beta = 0$.

$$U_{A\beta} = E + \Delta E - I_\beta Z_1^{\mathrm{I}}$$
$$I_\beta = - \mathrm{j}\, \Delta E / (0{,}5\, Z_1 + Z_1^{\mathrm{I}} + Z_1^{\mathrm{II}})$$

Mit der Beziehung $U_{A\alpha} = U_{AR} - U_A^+$ ergibt sich für Phase S die Leitererdspannung und mit $V_S = V_0 - V_\alpha/2 + \sqrt{3}\, I_\beta/2$ der Strom in Strang I.

$$U_{AS} = (3\, U_A^+ - U_{AR} + \sqrt{3}\, U_{A\beta})/2$$
$$I_{AIS} = (I_{F0} - I_0^{\mathrm{I}}) - 0{,}5\,(I_{F\alpha} - I_\alpha^{\mathrm{I}}) + \sqrt{3}\, I_\beta/2$$

In analoger Weise können auch der Strom im gesunden Strang II und das Leitererdpotential am Leitungsende B berechnet werden. Nach Ordnung nach Potenzen von p ergeben sich Ausdrücke der Form $(a + bp + cp^2) / (d + ep - fp^2) + g$ und daher nach Differentiation nach p und Nullsetzen die relative Fehlerentfernung p_m für einen Extremwert dieser Funktion, der aber nur im Intervall 0 bis 1 interessiert. Für $b = c = 0$ ergibt sich:

$$p_m = e/2f$$

für $b \neq 0,\ c = 0$:

$$p_m = a\,[-1 + \sqrt{1 + (ae - bd)\, b/a^2 f}\,]/b$$

für $b \neq 0,\ c \neq 0$:

$$p_m = (af + cd)\, \frac{-1 + \sqrt{1 + (ae - bd)(ce + bf)/af + cd)^2}}{ce + bf}$$

Aus getrennter Betrachtung des Zählers und Nenners lässt sich unschwer der grundsätzliche Verlauf im Intervall $p = 0$ bis 1 erkennen und bei aussenliegendem oder fehlendem Extremwert voraussagen, an welchem Leitungsende der Grösst- bzw. Kleinstwert auftritt.

3. Berechnungsformeln für Doppelleitungen

$$I_F = I_{AIR} = \frac{1{,}5\,(E^{\mathrm{I}} + p \Delta E^{\mathrm{I}})}{1{,}5\, Z_F + Z^{\mathrm{VII}} + p Z^{\mathrm{VIII}} - p^2 Z^{\mathrm{IX}}}$$

3.1 Strang I am Ende B einpolig unterbrochen

$$Z_\nu^{\mathrm{IV}} = Z_\nu + Z_\nu^{\mathrm{I}} + Z_\nu^{\mathrm{II}}$$
$$Z^{\mathrm{X}} = 0{,}5\, Z_1 + Z_1^{\mathrm{I}} + Z_1^{\mathrm{II}}$$
$$k_0 = 0{,}5\, Z_0^{\mathrm{I}} / Z_0^{\mathrm{IV}}$$
$$k_0^{\mathrm{I}} = 0{,}5\, M_0 / Z_0^{\mathrm{IV}}$$
$$k_1 = Z_1^{\mathrm{I}} / Z_1^{\mathrm{IV}}$$
$$k_\nu^{\mathrm{II}} = (Z_\nu^{\mathrm{I}} + Z_\nu^{\mathrm{II}} + \underline{M_0}) / Z_\nu^{\mathrm{IV}}$$
$$Z^{\mathrm{V}} = 2\,(1 + k_0^{\mathrm{II}})\,(Z_0 - M_0) + (1 + k_1^{\mathrm{II}})\, Z_1$$
$$k^{\mathrm{III}} = [2 k_0\,(Z_0 - M_0) - k_1 Z_1] / Z^{\mathrm{V}}$$
$$k^{\mathrm{IV}} = [(1 + 2\, k_0^{\mathrm{I}})\,(Z_0 - M_0) - Z_1] / Z^{\mathrm{V}}$$
$$Z^{\mathrm{VI}} = Z_1^{\mathrm{IV}} Z^{\mathrm{V}} / Z_1$$
$$k_0^{\mathrm{V}} = k_0 - k_0^{\mathrm{II}} k^{\mathrm{III}}$$
$$k_0^{\mathrm{VI}} = k_0^{\mathrm{I}} - k_0^{\mathrm{II}} k^{\mathrm{IV}}$$
$$k_1^{\mathrm{V}} = k_1 + k_1^{\mathrm{II}} k^{\mathrm{III}}$$
$$k_1^{\mathrm{VI}} = k_1^{\mathrm{II}} k^{\mathrm{IV}}$$
$$Z^{\mathrm{VII}} = (0{,}5 - k^{\mathrm{III}} - k_0^{\mathrm{V}})\, Z_0^{\mathrm{I}} + 0{,}5\, Z_0^{\mathrm{III}} + (1 + k^{\mathrm{III}} - k_1^{\mathrm{V}})\, Z_1^{\mathrm{I}} + Z_1^{\mathrm{III}}$$
$$Z^{\mathrm{IX}} = k^{\mathrm{IV}}\,(Z_0 - Z_1) + k_0^{\mathrm{VI}} M_0$$
$$Z^{\mathrm{VIII}} = (0{,}5 - k^{\mathrm{III}})\, Z_0 - k_0^{\mathrm{V}} M_0 - (k^{\mathrm{IV}} + k_0^{\mathrm{VI}})\, Z_0^{\mathrm{I}} + (1 + k^{\mathrm{III}})\, Z_1 + (k^{\mathrm{IV}} - k_1^{\mathrm{VI}})\, Z_1^{\mathrm{I}}$$
$$E^{\mathrm{I}} = E + \left[1 + \frac{(1 - k_0^{\mathrm{II}})\, Z_0^{\mathrm{I}} - (1 - k_1^{\mathrm{II}})\, Z_1^{\mathrm{I}}}{Z^{\mathrm{VI}}} - \frac{Z_1^{\mathrm{I}}}{Z_1^{\mathrm{VI}}}\right] \Delta E$$
$$\Delta E^{\mathrm{I}} = [(Z_0 - Z_1 - k_0^{\mathrm{II}} M_0) / Z^{\mathrm{VI}}]\, \Delta E$$
$$3 I_{AI0} = 2\,(0{,}5 - k^{\mathrm{III}} - p k^{\mathrm{IV}})\, I_F - 3 \Delta E / Z^{\mathrm{VI}}$$
$$3 I_{BI0} = 2\,(k^{\mathrm{III}} + p k^{\mathrm{IV}})\, I_F + 3 \Delta E / Z^{\mathrm{VI}}$$
$$- I_{AIS} = I_{BIS} = (k^{\mathrm{III}} + p k^{\mathrm{IV}})\, I_F + (1{,}5 / Z^{\mathrm{VI}} + \mathrm{j}\, 0{,}433 / Z^{\mathrm{X}})\, \Delta E$$
$$- I_{AIIR} = I_{BIIR} = 0{,}667\,[k_0^{\mathrm{V}} + k_1^{\mathrm{V}} + p\,(k_0^{\mathrm{VI}} + k_1^{\mathrm{VI}})]\, I_F - [(k_0^{\mathrm{II}} - k_1^{\mathrm{II}}) / Z^{\mathrm{VI}} + 1 / Z_1^{\mathrm{IV}}]\, \Delta E$$
$$- I_{AIIS} = I_{BIIS} = 0{,}667\,[k_0^{\mathrm{V}} - 0{,}5\, k_1^{\mathrm{V}} + p\,(k_0^{\mathrm{VI}} - 0{,}5\, k_1^{\mathrm{VI}})]\, I_F - [(k_0^{\mathrm{II}} + 0{,}5\, k_1^{\mathrm{II}}) / Z^{\mathrm{VI}} - 1/2\, Z_1^{\mathrm{IV}} - \mathrm{j}\, 0{,}433 / Z^{\mathrm{X}}]\, \Delta E$$

$$-3I_{AII0} = 3I_{BII0} = 2(k_0^{V} + pk_0^{VI})\,I_F - 3\Delta E k_0^{II}/Z^{VI}$$

$$-U_A^{+} = 0{,}667\,[(0{,}5 - k^{III} - k_0^{V})\,Z_0^{I} + 0{,}5\,Z_0^{III} - p\,(k^{IV} + k_0^{VI})\,Z_0^{I}]\,I_F - [(1 - k_0^{II})\,Z_0^{I}/Z^{VI}]\,\Delta E$$

$$U_{AR} = \{\,Z_F + 0{,}667\,p\,[(0{,}5 - k^{III})\,Z_0 + (1 + k^{III})\,Z_1 - k_0^{V}\,M_0] - 0{,}667\,p^2\,[k^{IV}\,(Z_0 - Z_1) + k_0^{VI}\,M_0]\,\}\,I_F - p\,[(Z_0 - Z_1 - k_0^{II}\,M_0)/Z^{VI}]\,\Delta E$$

$$U_{AS} = 1{,}5\,U_A^{+} - 0{,}5\,U_{AR} - \mathrm{j}\,0{,}866\,[E + \Delta E\,(0{,}5\,Z_1 + Z_1^{II})/Z^{X}]$$

$$U_B^{+} = U_A^{+} + 0{,}667\,\{\,k_0^{V}\,Z_0 + k^{III}\,M_0 + p\,[k_0^{VI}\,Z_0 - (0{,}5 - k^{IV})\,M_0]\,\}\,I_F - [(k_0^{II}\,Z_0 - M_0)/Z^{VI}]\,\Delta E$$

$$U_{BR} = U_{AR} + 0{,}667\,\{\,k_0^{V}\,Z_0 + k^{III}\,M_0 + k_1^{V}\,Z_1 + p\,[k_0^{VI}\,Z_0 - (0{,}5 - k^{IV})\,M_0 + k_1^{VI}\,Z_1]\,\}\,I_F - [(k_0^{II}\,Z_0 - k_1^{II}\,Z_1 - M_0)/Z^{VI} + Z_1/Z_1^{IV}]\,\Delta E$$

$$U_{BS} = 1{,}5\,U_B^{+} - 0{,}5\,U_{BR} - \mathrm{j}\,0{,}866\,(E + \Delta E Z_1^{II}/Z^{X})$$

3.2 Beide Stränge am Ende B einpolig unterbrochen

$$Z^{IV} = 2\,(Z_0 + Z_0^{I} + Z_0^{II}) + Z_1 + Z_1^{I} + Z_1^{II}$$

$$Z^{X} = 0{,}5\,Z_1 + Z_1^{I} + Z_1^{II}$$

$$Z^{XI} = Z_0^{I} + Z_0^{II} - (Z_1^{I} + Z_1^{II})$$

$$k = (Z_0^{I} - Z_1^{I})/Z^{IV}\,;\; k^{I} = M_0/Z^{IV}$$

$$k^{II} = [2\,(Z_0^{I} + Z_0^{II} + M_0) + Z_1^{I} + Z_1^{II}]/Z^{IV}$$

$$Z^{V} = (1 + k^{II})\,[2\,(Z_0 - M_0) + Z_1]$$

$$Z^{VI} = Z^{IV}\,Z^{V}/[2\,(Z_0 - M_0) + Z_1]$$

$$k^{III} = k\,[2\,(Z_0 - M_0) + Z_1]/Z^{V}$$

$$k^{IV} = [(1 + 2\,k^{I})\,(Z_0 - M_0) - (1 - k^{I})\,Z_1]/Z^{V}$$

$$k^{V} = k - k^{II}\,k^{III}\,;\; k^{VI} = k^{I} - k^{II}\,k^{IV}$$

$$Z^{VII} = (0{,}5 - k^{III} - k^{V})\,Z_0^{I} + 0{,}5\,Z_0^{III} + (1 + k^{III} + k^{V})\,Z_1^{I} + Z_1^{III}$$

$$Z^{IX} = k^{IV}\,(Z_0 - Z_1) + k^{VI}\,M_0$$

$$Z^{VIII} = (0{,}5 - k^{III})\,Z_0 + (1 + k^{III})\,Z_1 - (k^{IV} + k^{VI})\,(Z_0^{I} - Z_1^{I}) - k^{V}\,M_0$$

$$E^{I} = E + \{\,1 + [1/Z^{IV} + (1 - k^{II})/Z^{VI}]\,(Z_0^{I} - Z_1^{I})\,\}\,\Delta E$$

$$\Delta E^{I} = [(Z_0 - Z_1)/Z^{VI} + (1/Z^{IV} - k^{II}/Z^{VI})\,M_0]\,\Delta E$$

$$-I_{AIS} = I_{BIS} = (k^{III} + pk^{IV})\,I_F + (1{,}5/Z^{VI} + \mathrm{j}\,0{,}433/Z^{X})\,\Delta E$$

$$3\,I_{AI0} = 2\,(0{,}5 - k^{III} - pk^{IV})\,I_F - 3\,\Delta E/Z^{VI}$$

$$3\,I_{BI0} = 2\,(k^{III} + pk^{IV})\,I_F + 3\,\Delta E/Z^{VI}$$

$$-I_{AIIS} = I_{BIIS} = (k^{V} + pk^{VI})\,I_F + [1{,}5\,(1/Z^{IV} - k^{II}\,Z^{VI}) + \mathrm{j}\,0{,}433/Z^{X}]\,\Delta E$$

$$-3\,I_{AII0} = 3\,I_{BII0} = 2\,(k^{V} + pk^{VI})\,I_F + 3\,\Delta E\,(1/Z^{IV} - k^{II}/Z^{VI})$$

$$-I_{AIIR} = I_{BIIR} = 0$$

$$-U_A^{+} = 0{,}667\,[(0{,}5 - k^{III} - k^{V})\,Z_0^{I} + 0{,}5\,Z_0^{III} - p\,(k^{IV} + k^{VI})\,Z_0^{I}]\,I_F - Z_0^{I}\,[1/Z^{IV} + (1 - k^{II})/Z^{VI}]\,\Delta E$$

$$U_{AR} = \{\,Z_F + 0{,}667\,p\,[(0{,}5 - k^{III})\,Z_0 - k^{V}\,M_0 + (1 + k^{III})\,Z_1] - 0{,}667\,p^2\,[k^{IV}\,(Z_0 - Z_1) + k^{VI}\,M_0]\,\}\,I_F - p\,[(Z_0 - k^{II}\,M_0 - Z_1)/Z^{VI} + M_0/Z^{IV}]\,\Delta E$$

$$U_{AS} = 1{,}5\,U_A^{+} - 0{,}5\,U_{AR} - \mathrm{j}\,0{,}866\,[E + \Delta E\,(0{,}5\,Z_1 + Z_1^{II})/Z^{X}]$$

$$-U_B^{+} = 0{,}667\,[(k^{III} + k^{V})\,Z_0^{II} + 0{,}5\,Z_0^{III} + p\,(k^{IV} + k^{VI})\,Z_0^{II}]\,I_F + Z_0^{II}\,[1/Z^{IV} + (1 - k^{II})/Z^{VI}]\,\Delta E$$

$$U_{BR} = U_{AR} + 0{,}667\,[0{,}5\,Z_0^{I} + Z_1^{I} - (k^{III} + k^{V})\,Z^{XI} - p\,(k^{IV} + k^{VI})\,Z^{XI} - \{\,1 + Z^{XI}\,[1/Z^{IV} + (1 - k^{II})/Z^{VI}]\,\}\,\Delta E$$

$$U_{BS} = 1{,}5\,U_B^{+} - 0{,}5\,U_{BR} - \mathrm{j}\,0{,}866\,(E + \Delta E Z_1^{II}/Z^{X})$$

4. Berechnungsformeln für Einfachleitungen

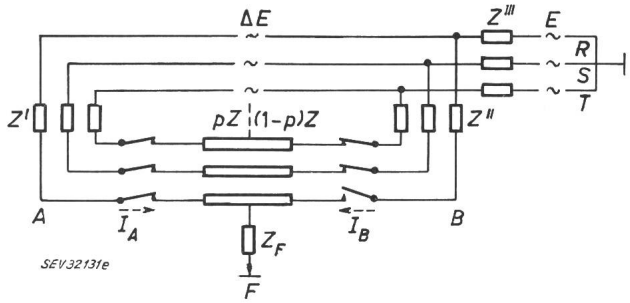

Fig. 5

$I_F = I_{AR}$ wie unter Ziff. 3.

$$Z_\nu^{IV} = Z_\nu + Z_\nu^{I} + Z_\nu^{II}$$

$$Z^{V} = 2\,Z_0^{IV} + Z_1^{IV}$$

$$Z^{VI} = Z_0^{I} + Z_0^{II} - (Z_1^{I} + Z_1^{II})$$

$$k = (Z_0^{I} - Z_1^{I})/Z^{V}$$

$$k^{I} = (Z_0 - Z_1)/Z^{V}$$

$$Z^{IX} = k^{I}\,(Z_0 - Z_1)$$

$$Z^{VII} = (0{,}5 - k)\,Z_0^{I} + 0{,}5\,Z_0^{III} + (1 + k)\,Z_1^{I} + Z_1^{III}$$

$$Z^{VIII} = (0{,}5 - k)\,Z_0 + (1 + k)\,Z_1 - k^{I}\,(Z_0^{I} - Z_1^{I})$$

$$E^{I} = E + [1 + (Z_0^{I} - Z_1^{I})/Z^{V}]\,\Delta E$$

$$\Delta E^{I} = [(Z_0 - Z_1)/Z^{V}]\,\Delta E$$

$$-I_{AS} = I_{BS} = (k + pk^{I})\,I_F + (1{,}5/Z^{V} + 0{,}866/Z_1^{IV})\,\Delta E$$

$$3\,I_{A0} = 2\,(0{,}5 - k - pk^{I})\,I_F - 3\,\Delta E/Z^{V}$$

$$3\,I_{B0} = 2\,(k + pk^{I})\,I_F + 3\,\Delta E/Z^{V}$$

$$-U_A^{+} = 0{,}667\,[(0{,}5 - k)\,Z_0^{I} + 0{,}5\,Z_0^{III} - pk^{I}\,Z_0^{I}]\,I_F - \Delta E Z_0^{I}/Z^{V}$$

$$U_{AR} = \{\,Z_F + 0{,}667\,p\,[(0{,}5 - k)\,Z_0 + (1 + k)\,Z_1] - 0{,}667\,p^2\,k^{I}\,(Z_0 - Z_1)\,\}\,I_F - p\,[(Z_0 - Z_1)/Z^{V}]\,\Delta E$$

$$U_{AS} = 1{,}5\,U_A^{+} - 0{,}5\,U_{AR} - \mathrm{j}\,0{,}866\,[E + \Delta E\,(Z_1 + Z_1^{II})\,/Z_1^{IV}]$$

$$-U_B^{+} = 0{,}667\,(kZ_0^{II} + 0{,}5\,Z_0^{III} + pk^{I}\,Z_0^{II})\,I_F + \Delta E Z_0^{II}/Z^{V}$$

$$U_{BR} = U_{AR} + 0{,}667\,(0{,}5\,Z_0^{I} + Z_1^{I} - kZ^{VI} - pk^{I}\,Z^{VI})\,I_F - \Delta E\,(1 - Z^{VI}/Z^{V})$$

$$U_{BS} = 1{,}5\,U_B^{+} - 0{,}5\,U_{BR} - \mathrm{j}\,0{,}866\,(E + \Delta E Z_1^{II}/Z_1^{IV})$$

5. Zahlenbeispiel

Für eine 51,5 km lange 110-kV-Doppelleitung mit den Reaktanzen $X_0 = 60{,}8\,\Omega$, $M_0 = 34{,}6\,\Omega$, $X_1 = 21{,}1\,\Omega$ sollen aus tieferstehenden Messwerten einer früher durchgeführten Netzmodellmessung die Grösst- und Kleinstwerte der Anrege- bezw. Messgrössen berechnet werden, die an den Leitungsenden nach einpoliger Unterbrechung am Strang I bei Erdkurzschluss zwischen den beiden Leitungsenden auftreten.

Dreipolige Kurzschlussleistung [MVar]	$Q_A = 1300$; $Q_B = 1510$
Aus dem Netz einströmender Anteil [MVar]	$Q^{I} = 1080$; $Q^{II} = 1450$
Einpoliger Erdkurzschlußstrom [kA]	$I_{FA} = 3{,}71$: $I_{FB} = 4{,}3$
Aus dem Netz einströmender Anteil des Nullstromes [kA]	$3\,I_0^{I} = 3{,}19$; $3\,I_0^{II} = 4{,}14$
Sternpunkteverlagerung (% von 110/3 kV)	$U_{A0} = 69{,}9$; $U_{B0} = 70{,}2$

Daraus ergeben sich folgende Netzersatzreaktanzen in Ω:

$$X_0^{I} = 7{,}95\,;\; X_0^{II} = 2{,}17\,;\; X_0^{III} = 29{,}05$$

$$X_1^{I} = 2{,}243\,;\; X_1^{II} = 0{,}457\,;\; X_1^{III} = 8{,}37$$

Daraus können folgende Hilfsgrössen berechnet werden:

$$Z_0^{IV} = 70{,}92\,\Omega;\; Z_1^{IV} = 23{,}8\,\Omega;$$

$$k_0 = 0{,}056;\; k_0^{I} = 0{,}244;\; k_1 = 0{,}0943$$

$k_0^{II} = 0{,}631; k_1^{II} = 0{,}1134; k^{III} = 0{,}00868;$
$k^{IV} = 0{,}1642; k_0^{V} = 0{,}0505$
$k_1 = 0{,}0953; k_0^{VI} = 0{,}1403; k_1^{VI} = 0{,}01865$
$Z^{VII} = 28{,}45\,\Omega; Z^{VIII} = 47{,}28\,\Omega; Z^{IX} = 11{,}37\,\Omega$

Daraus ergeben sich die Anrege- und Messgrössen als Funktionen der Fehlerentfernung p und deren Kleinst- und Grösstwerte, die mit Ausnahme von I_{AIIR} bei $p = 0$ und 1 auftreten und in dieser Reihenfolge angegeben sind:

$I_F = I_{AIR} = 104{,}8/(28{,}45 + 47{,}28\,p - 11{,}37\,p^2)$...3,68 bis 1,63 kA

Vor Unterbrechung in B war $I_{AIR} = 3190$ bis 128 A. Die Nullstellen des Nenners liegen bei $p = 0{,}535; 4{,}7 \cdot p_m = 2{,}11$.

$3\,I_{AI0} = 2\,(0{,}491 - 0{,}1642)\,I_F$...3,62 bis 1,065 kA

Vor Unterbrechung in B war $3\,I_{AI0}$ 3190 bis 80 A.

$-\,I_{AIS} = I_{BIS} = (0{,}00868 + 0{,}1642\,p)\,I_F$...32 bis 282 A

$-\,I_{AIIR} = I_{BIIR} =$
$0{,}667\,(0{,}1458 + 0{,}159\,p)\,I_F$...320 A ($p = 0{,}553$) bis 359 A

$-\,I_{AIIS} = I_{BIIS} = 0{,}667\,(0{,}00287 + 0{,}1309\,p)\,I_F$...7 bis 145 A

$-\,3\,I_{AII0} = 3\,I_{BII0} = 2\,(0{,}0505 + 0{,}1403\,p)\,I_F$...372 bis 621 A

$-\,U_A^+ = 0{,}667\,(18{,}03 - 2{,}42\,p)\,I_F$...44,4 bis 17 kV

$U_{AR} = 0{,}667\,(49{,}38 - 11{,}38\,p)\,p\,I_F$...0 bis 41,4 kV

$U_{AS} =$
$\sqrt{[0{,}667\,(27{,}05 + 21{,}06\,p - 5{,}69\,p^2)\,I_F]^2 + 3660}$...89,8 bis 75,9 kV

$-\,U_B^+ = 0{,}667\,(14{,}66 + 0{,}66\,p)\,I_F$...36 bis 16,7 kV

$U_{BR} = 0{,}667\,(5{,}38 + 46{,}7\,p -$
$- 11{,}38\,p^2)\,I_F$...13,2 bis 44,4 kV

$U_{BS} =$
$\sqrt{[0{,}667\,(24{,}67 + 24{,}34\,p - 5{,}69\,p^2)\,I_F]^2 + 3660}$...85,6 bis 74,5 kV

Literatur

[1] *Clarke, E.:* Circuit Analysis of A-C Power Systems. Bd. 1. New York: Wiley 1958.

[2] *Selseth, N.:* Über die Berechnung der Reihenfehler in Drehstromsystemen unter Anwendung symmetrischer Komponenten. ETZ-A 82(1961)1, S. 18...21.

[3] *Selseth, N.:* Unbalanced Open Conductors in Power Systems. Trans. AIEE - III (Power App. & Syst.) 80(1961)57, S. 764...768.

[4] *Wagner, A.:* Ableitung von Formeln für den Erdschlußstrom nach einpoliger Unterbrechung an einem Leitungsende. E und M 79(1962)5, S. 106...108.

Adresse des Autors:

A. Wagner, dipl. Ingenieur, Ampfererstrasse 1, Innsbruck (Österreich).

Der Sammelschienenschutz

Von *Ch. Jean-Richard,* Bern

621.316.35 : 621.316.9

Die Fragen im Zusammenhang mit dem Schutz von elektrischen Netzen gegen Störungen aller Art haben einen eigentümlichen Charakter. In der Tat handelt es sich dabei um Aufgaben, welche zu ihrer Lösung Materialien benötigen, welche die verschiedensten Eigenheiten aufweisen. Diese Materialien müssen den Bedingungen ihrer Anwendung angepasst werden, wobei die schwierige Aufgabe zu lösen ist, Ausschaltungen wenn nötig, selektiv vorzunehmen.

Ausgehend von dieser Sachlage ist es selbstverständlich, dass der Schutz sich zuerst mit denjenigen Elementen der Netze befasst hat, welche Anlass geben zu der grössten Anzahl von Fehlern. Das sind die Freileitungen. Ausserdem wurden die Generatoren und Transformatoren mit geeigneten Schutzeinrichtungen ausgerüstet, an welchen mit dem steigenden Stand der Technik Verbesserungen vorgenommen wurden.

Was die Sammelschienen anbetrifft, blieben sie lange Zeit abweisend gegenüber dem Schutz. Es gab sogar eine Zeit, während welcher die Auffassung vorherrschte, dass die Sammelschienen überhaupt nicht zu schützen sind. Dies war der Fall, als die unausgeglichenen Devisen-Wechselkurse Transformatoren von jenseits des Atlantik billiger erscheinen liessen als hierzulande hergestellte Transformatoren. Sie wurden in Betrieb gesetzt, ausgerüstet nur mit Differentialrelais in der Meinung, dass bei Störungen an den benachbarten Sammelschienen die Transformatoren nicht abgeschaltet werden sollten. Anlässlich einer Störung wurde dieser Zweck tatsächlich erreicht, die Transformatoren blieben in Betrieb bis zum Schluss. Aber von den Sammelschienen blieb praktisch nichts übrig. Der Lichtbogen hatte sie zum grössten Teil verzehrt.

Diese Begebenheit zeigt, wie sehr die Existenzbedingungen voneinander abhängen. Der Devisenkurs schlecht ausgeglichen, ein Schutz schlecht angepasst, ein Kurzschluss schlecht beherrscht, das ist die traurige Kette von Ereignissen, welche vor noch nicht einem mittleren, gesunden Menschenalter vorgekommen sind.

Der nächste Abschnitt ist durch den Schnelldistanzschutz mit Stufen charakterisiert, welcher den Schutz der Sammelschienen in der zweiten Stufe bewirkt. Die erste Stufe benötigt ca. 0,12 s, die zweite 0,7 s. Mit der Zeit und dank weiterer technischer Fortschritte in den verschiedensten Gebieten konnte die zweite Stufe reduziert werden auf 0,6 und 0,5 s für die schnellsten Distanzrelais.

Aber es handelt sich dabei um eine bequeme Lösung. Die Sammelschienen sind nicht der Zweck des Distanzschutzes. Dieser muss notwendigerweise verzögert werden für einen Fehler, welcher sich in der Nähe der gegenüberliegenden Sammelschiene befindet, wenn er selektiv arbeiten soll, ohne Fernverbindung zwischen den Stationen.

Man hat sich mit dieser Lösung begnügen können, solange die Kurzschlussleistungen nicht besonders gross waren. Dies ist aber heute nicht mehr der Fall, so dass es notwendig war, ein Mittel zu finden, um die Sammelschienen auf direkte, ultrarasche Art zu schützen.

Die erste Idee, welche sich zur Lösung eines solchen Problemes anbietet, ist der Differentialschutz.

Tatsächlich, solange die Sammelschienen gesund sind, ist die Summe der über sie fliessenden Ströme gleich Null. Dagegen ist bei einem Fehler an den Sammelschienen diese Summe nicht mehr gleich Null. Von dieser Tatsache ausgehend bedeutet die Anwendung eines Differentialrelais nur