

PSS[®]SINCAL 10.5

Mehrfachfehler

Ermittlung von Strömen und Spannungen in mehrfach fehlerhaften Netzen

Herausgegeben von
SIEMENS AG
Freyeslebenstraße 1, 91058 Erlangen

IC SG SE PTI SW

Vorbemerkung

Die PSS SINCAL Handbücher bestehen aus drei Teilen:

- Benutzerhandbuch PSS SINCAL Bedienung
- Fachhandbücher für Elektronetze und Strömungsnetze
- Systemhandbuch Datenbankbeschreibung

Allgemeine Grundsätze der Bedienung und der Grafikoberfläche von PSS SINCAL können dem **Benutzerhandbuch PSS SINCAL Bedienung** entnommen werden.

Die **Fachhandbücher für Elektronetze** beinhalten detaillierte Beschreibungen der verschiedenen Berechnungsverfahren für Elektronetze (Lastfluss, Kurzschluss, etc.) sowie deren Eingabedaten.

Die **Fachhandbücher für Strömungsnetze** beinhalten detaillierte Beschreibungen der verschiedenen Berechnungsverfahren für Strömungsnetze (Wasser, Gas und Wärme/Kälte) sowie deren Eingabedaten.

Das **Systemhandbuch Datenbankbeschreibung** beinhaltet eine vollständige Beschreibung der Datenmodelle für Elektronetze und Strömungsnetze.

Urheber- und Verlagsrechte

Das Handbuch und alle in ihm enthaltenen Informationen und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

Die Rechte, insbesondere die Rechte zur Veröffentlichung, Wiedergabe, Übersetzung, zur Vergabe von Nachdrucken, zur elektronischen Speicherung in Datenbanken, zur Herstellung von Sonderdrucken, Fotokopien und Mikrokopien liegen bei SIEMENS.

Für jede Wiedergabe oder Verwendung außerhalb der durch das Urhebergesetz erlaubten Grenzen ist eine vorherige schriftliche Zustimmung von SIEMENS unerlässlich.

Gewährleistung

Trotz sorgfältiger Ausarbeitung könnten in diesem Handbuch Fehler enthalten sein. Es wird keinerlei Haftung für Fehler und deren Folgen übernommen. Änderungen des Textes und der Funktion der Software werden im Rahmen der Pflege ständig durchgeführt.

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | Einleitung Mehrfachfehler | 1 |
| 2. | Verfahren Mehrfachfehler | 3 |
| 2.1 | Netzmodell der Mehrfachfehlerberechnung | 4 |
| 2.1.1 | Transformation Phasenwerte in Komponentenwerte | 5 |
| 2.1.2 | Nachbildung von dreiphasigen Leitungen | 6 |
| 2.1.3 | Nachbildung von ein- und zweiphasigen Leitungen | 8 |
| 2.1.4 | Nachbildung von Querzweigen gegen Erde | 9 |
| 2.1.5 | Nachbildung von Querzweigen zwischen zwei Phasen | 9 |
| 2.1.6 | Fehler auf Knoten | 10 |
| 2.1.7 | Fehler auf Zweigen | 12 |
| 3. | Anwendungsbeispiel für Mehrfachfehler | 15 |
| 3.1 | Voreinstellen der Berechnungsparameter | 16 |
| 3.2 | Erfassen von Fehleruntersuchungen | 16 |
| 3.3 | Definieren von Fehlerpaketen | 17 |
| 3.4 | Starten der Mehrfachfehlerberechnung | 18 |
| 3.5 | Darstellen und Auswerten der Ergebnisse | 19 |
| 3.5.1 | Ergebnisse in der Netzgrafik | 19 |

1. Einleitung Mehrfachfehler

PSS SINICAL Mehrfachfehler berechnet die elektrischen Größen Strom und Spannung bei 1-, 2- und 3-poligen Kurzschlüssen, Erdschlüssen und Unterbrechungen. Die drei Fehlerarten Kurzschluss, Erdschluss und Unterbrechung können dabei in unterschiedlichen Formen kombiniert werden (z.B. 1-poliger Erdschluss mit 1-poliger Unterbrechung).

Die Fehlerangabe ist nicht auf einen Fehlerort im Netz beschränkt. Es können mehrere Fehler, die gleichzeitig aufgetreten sind, nachgebildet werden.

Mit PSS SINICAL Mehrfachfehler können unter anderem folgende in der Praxis häufig vorkommende Störfälle nachgebildet werden:

- 1-polige Kurzunterbrechung in starr geerdeten Netzen
- 3-polige Kurzunterbrechungen in gelöschten Netzen
- Doppelerdschlüsse in Kabelnetzen

Dieses Handbuch enthält folgende Kapitel:

- [Verfahren Mehrfachfehler](#)
- [Anwendungsbeispiel für Mehrfachfehler](#)

Vorgehensweise Mehrfachfehler

Um eine Mehrfachfehlerberechnung durchführen bzw. spezielle Daten für die Mehrfachfehlerberechnung erfassen zu können, muss zuerst die Berechnungsmethode Mehrfachfehler und das **unsymmetrische Netzmodell** aktiviert werden.

Zum Durchführen einer Mehrfachfehlerberechnung müssen folgende Daten eingegeben werden:

- Eingeben von Fehlerpaketen
- Erfassen von Fehleruntersuchungen
- Zuordnung der Fehleruntersuchungen zu den Fehlerpaketen

Berechnung der Netze

Wie rasch die Berechnung eines Netzes abläuft, ist hauptsächlich von vier Faktoren abhängig:

- Netzgröße und Topologie
- Anzahl der geregelten Elemente
- Berechnungsart
- Verfügbarer Hauptspeicher

Lastfluss für Ermittlung des ungestörten Netzzustandes

Die Lastflussberechnung wird im Rahmen von PSS SINICAL Mehrfachfehler zur Ermittlung der Spannungen und Lastströme der Generatoren verwendet.

Berücksichtigung der Kurzschlussmethode

Das bei den Kurzschluss Berechnungsparametern angegebene Kurzschlussverfahren wird in PSS SINICAL Mehrfachfehler bei der Ermittlung der Impedanzen der Betriebsmittel berücksichtigt.

Abbildung der Netze für die Berechnung

Die Darstellung der Netze zur Berechnung wird im Kapitel Netzdarstellung des Eingabedaten Handbuches genau beschrieben.

Bei der Mehrfachfehlerberechnung können sowohl unsymmetrische als auch symmetrische Fehlerfälle angegeben werden.

2. Verfahren Mehrfachfehler

Bei der Mehrfachfehlerabhandlung handelt es sich um ein elektrisches Netzwerk mit gegebenen Längs- und Queradmittanzen und aktuellen Spannungen der Einspeisungen. Die Längs- und Queradmittanzen sind durch die Betriebsmittel gegeben. Die Spannungen der Einspeisungen werden über eine vorangehende Lastflussberechnung ermittelt. Gesucht sind die Ströme und Spannungen bei Auftreten von Kurzschlüssen, Erdschlüssen und Unterbrechungen an folgenden Punkten im Netz.

Netzpunkte für Kurz- und Erdschlüsse

- Knoten
- Anfang oder Ende von allen Zweigelementen (Transformatoren, Drosseln, etc.)
- Fiktiver Punkt auf einer Leitung (über Entfernungsangabe vom Anschlusspunkt der Leitung)

Netzpunkte für Unterbrechungen

- Anfang oder Ende von allen Zweigelementen (Transformatoren, Drosseln, etc.)
- Fiktiver Punkt auf einer Leitung (über Entfernungsangabe vom Anschlusspunkt der Leitung)

In PSS SINCAL werden alle obigen Fehler und Unterbrechungen mit Hilfe der symmetrischen Komponenten nachgebildet.

Prinzipieller Rechnungsablauf Mehrfachfehler

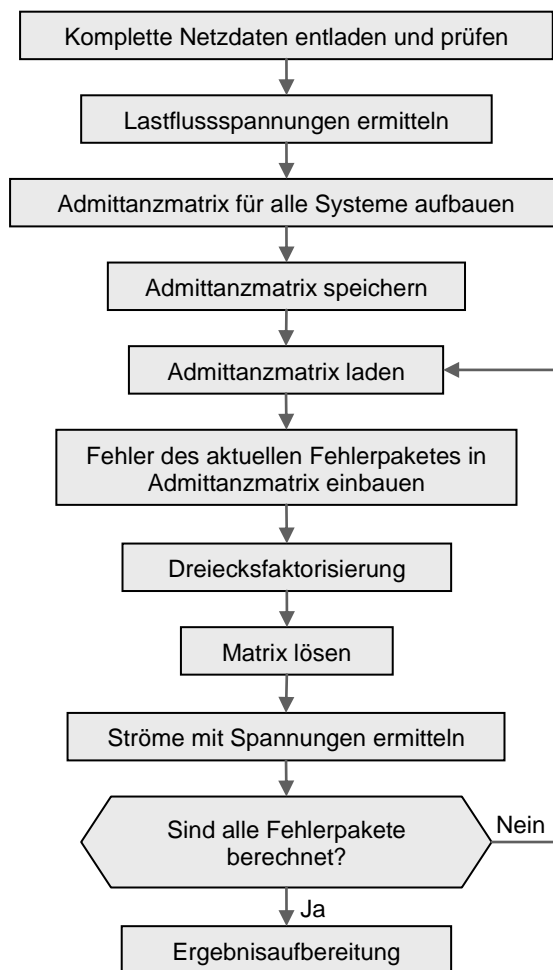


Bild: Ablaufdiagramm

2.1 Netzmodell der Mehrfachfehlerberechnung

Alle Berechnungsmethoden von PSS SINCAL basieren auf symmetrischen Komponenten. Damit die unsymmetrischen Betriebszustände im Zuge einer Mehrfachfehlerberechnung beschrieben werden können, müssen die entsprechenden Phasenwerte in symmetrische Komponentenwerte transferiert werden. Auch das Modellieren von unsymmetrischen Fehlern oder einphasigen Unterbrechungen erfordert diese Transformation.

2.1.1 Transformation Phasenwerte in Komponentenwerte

Phasenwerte können durch Multiplikation mit linearen komplexen Matrizen in Komponentenwerte übergeführt werden.

Transformationsmatrix

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix}$$

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

Transformationsgleichung für Spannungen

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_0 \end{pmatrix}$$

- \underline{U}_0 ... Spannung im Mitsystem
- \underline{U}_1 ... Spannung im Gegensystem
- \underline{U}_2 ... Spannung im Nullsystem
- \underline{U}_{L1} ... Spannung Leiter 1
- \underline{U}_{L2} ... Spannung Leiter 2
- \underline{U}_{L3} ... Spannung Leiter 3

Transformationsgleichung für Ströme

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_0 \end{pmatrix}$$

- \underline{I}_0 ... Ströme im Mitsystem
- \underline{I}_1 ... Ströme im Gegensystem
- \underline{I}_2 ... Ströme im Nullsystem
- \underline{I}_{L1} ... Ströme Leiter 1
- \underline{I}_{L2} ... Ströme Leiter 2
- \underline{I}_{L3} ... Ströme Leiter 3

Transformationsgleichung für Admittanzen

$$\begin{pmatrix} \underline{Y}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{Y}_s & \underline{Y}_m & \underline{Y}_m \\ \underline{Y}_m & \underline{Y}_s & \underline{Y}_m \\ \underline{Y}_m & \underline{Y}_m & \underline{Y}_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{pmatrix}$$

- \underline{Y}_0 ... Admittanz im Mitsystem
- \underline{Y}_1 ... Admittanz im Gegensystem
- \underline{Y}_2 ... Admittanz im Nullsystem
- \underline{Y}_s ... Selbstadmittanz
- \underline{Y}_m ... gegenseitige Admittanz
- \underline{Y}_0 ... Admittanz im Mitsystem

Die Transformation der Admittanzmatrix wird in PSS SINICAL nur von Phasenwerten in Komponentenwerte benötigt.

Während einfache unsymmetrische Fehler in elektrischen Netzen durch Überführung in die drei symmetrischen Komponenten (Mit-, Gegen und Nullsystem) und deren Ersatzschaltungen (am Fehlerort sind Mit-, Gegen- und Nullsystem in Serie zu schalten) leicht abgehandelt werden können, führt die Behandlung von mehrfachen gleichzeitigen Fehlern in elektrischen Netzen zu komplizierten Ersatznetzwerken.

Im Zuge der Fehlerbehandlung wird die Aufgabe gestellt, die komplette Strom- und Spannungsverteilung in L1, L2, L3 Größen an jeder beliebigen Stelle im Netz zur Verfügung zu stellen. Will man die zyklische Symmetrie der Komponenten weiterhin nutzen, müssen die Konditionen von allen gleichzeitig auftretenden Fehlern in die symmetrischen Komponenten eingearbeitet oder durch eine Zusatzadmittanzmatrix ausgedrückt werden.

2.1.2 Nachbildung von dreiphasigen Leitungen

Die Energieübertragung erfolgt über einfache Drehstromleitungen. Der Aufbau der Leitung ist dabei über die Mit- und Nullsystemimpedanz vorgegeben. Zum Beschreiben des betrieblichen Verhaltens einer Leitung betrachtet man die Beziehung zwischen den Strömen und Spannungen am Eingang und am Ausgang der Leitung.

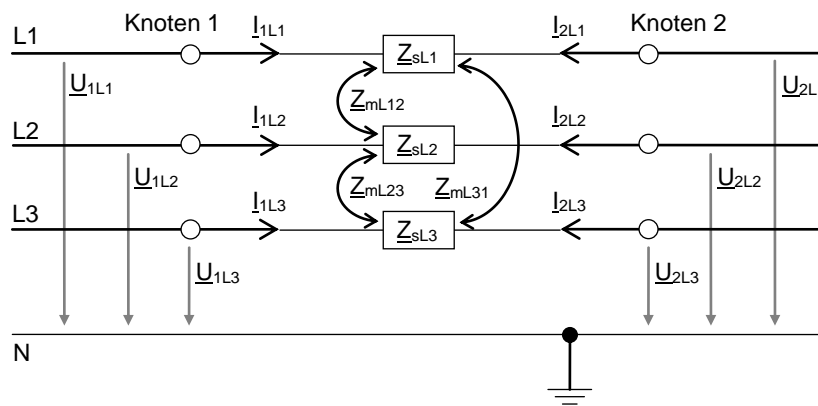


Bild: Drehstromleitung in Leitern L1, L2 und L3

$$\underline{Z}_s = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{sL1} + \underline{Z}_{sL2} + \underline{Z}_{sL3})$$

$$\underline{Z}_m = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{mL12} + \underline{Z}_{mL23} + \underline{Z}_{mL31})$$

Die lineare Beziehung zwischen Strömen und Spannungen am Anfang und Ende einer gekoppelten Drehstromleitung kann man immer über die Widerstandsmatrix mit Phasenwerten beschreiben.

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \underline{U}_{2L1} \\ \underline{U}_{2L2} \\ \underline{U}_{2L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{I}_{1L1} \\ \underline{I}_{1L2} \\ \underline{I}_{1L3} \end{pmatrix}$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m$$

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m$$

$$\underline{Z}_s = \frac{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1}{3}$$

$$\underline{Z}_m = \frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{3}$$

- \underline{Z}_1 ... Impedanz im Mitsystem
- \underline{Z}_2 ... Impedanz im Gegensystem
- \underline{Z}_0 ... Impedanz im Nullsystem
- \underline{Z}_s ... Selbstimpedanz
- \underline{Z}_m ... gegenseitige Impedanz

Die Widerstandsmatrix mit Phasenwerten kann in eine Leitwertmatrix mit Phasenwerten übergeführt werden.

$$\begin{pmatrix} \underline{Z}_s & \underline{Z}_m & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_s & \underline{Z}_m \\ \underline{Z}_m & \underline{Z}_m & \underline{Z}_s \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_s & \underline{Y}_m & \underline{Y}_m \\ \underline{Y}_m & \underline{Y}_s & \underline{Y}_m \\ \underline{Y}_m & \underline{Y}_m & \underline{Y}_s \end{pmatrix}$$

$$\underline{Y}_s = \frac{\underline{Y}_0 + 2\underline{Y}_1}{3}$$

$$\underline{Y}_m = \frac{\underline{Y}_0 - \underline{Y}_1}{3}$$

Durch Miteinbeziehen der Ströme von Seite 2 und Verwenden der Leitwertmatrix mit Phasenwerten ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_{1L1} \\ \underline{I}_{1L2} \\ \underline{I}_{1L3} \\ \underline{I}_{2L1} \\ \underline{I}_{2L2} \\ \underline{I}_{2L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_s & \underline{Y}_m & \underline{Y}_m & -\underline{Y}_s & -\underline{Y}_m & -\underline{Y}_m \\ \underline{Y}_m & \underline{Y}_s & \underline{Y}_m & -\underline{Y}_m & -\underline{Y}_s & -\underline{Y}_m \\ \underline{Y}_m & \underline{Y}_m & \underline{Y}_s & -\underline{Y}_m & -\underline{Y}_m & -\underline{Y}_s \\ -\underline{Y}_s & -\underline{Y}_m & -\underline{Y}_m & \underline{Y}_s & \underline{Y}_m & \underline{Y}_m \\ -\underline{Y}_m & -\underline{Y}_s & -\underline{Y}_m & \underline{Y}_m & \underline{Y}_s & \underline{Y}_m \\ -\underline{Y}_m & -\underline{Y}_m & -\underline{Y}_s & \underline{Y}_m & \underline{Y}_m & \underline{Y}_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \\ \underline{U}_{2L1} \\ \underline{U}_{2L2} \\ \underline{U}_{2L3} \end{pmatrix}$$

2.1.3 Nachbildung von ein- und zweiphasigen Leitungen

Die Nachbildung von ein- und zweiphasigen Leitungen erfolgt basierend auf der Admittanzmatrix der dreiphasigen Leitungen durch Nullsetzen der Admittanzen der nicht vorhandenen Phasen und Korrektur der Admittanzen der verbleibenden Phasen.

Für eine zweiphasige Leitung in L2 und L3 ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_{1L1} \\ \underline{I}_{1L2} \\ \underline{I}_{1L3} \\ \underline{I}_{2L1} \\ \underline{I}_{2L2} \\ \underline{I}_{2L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{s2p} & \underline{Y}_{m2p} & 0 & -\underline{Y}_{s2p} & -\underline{Y}_{m2p} \\ 0 & \underline{Y}_{m2p} & \underline{Y}_{s2p} & 0 & -\underline{Y}_{m2p} & -\underline{Y}_{s2p} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\underline{Y}_{s2p} & -\underline{Y}_{m2p} & 0 & \underline{Y}_{s2p} & \underline{Y}_{m2p} \\ 0 & -\underline{Y}_{m2p} & -\underline{Y}_{s2p} & 0 & \underline{Y}_{m2p} & \underline{Y}_{s2p} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \\ \underline{U}_{2L1} \\ \underline{U}_{2L2} \\ \underline{U}_{2L3} \end{pmatrix}$$

$$\underline{Y}_{s2p} = \underline{Y}_s - \frac{\underline{Y}_m^2}{\underline{Y}_s}$$

$$\underline{Y}_{m2p} = \underline{Y}_m - \frac{\underline{Y}_m^2}{\underline{Y}_s}$$

Für eine einphasige Leitung in L1 ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} I_{1L1} \\ I_{1L2} \\ I_{1L3} \\ I_{2L1} \\ I_{2L2} \\ I_{2L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{s1p} & 0 & 0 & -\underline{Y}_{s1p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{Y}_{s1p} & 0 & 0 & \underline{Y}_{s1p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \\ \underline{U}_{2L1} \\ \underline{U}_{2L2} \\ \underline{U}_{2L3} \end{pmatrix}$$

$$\underline{Y}_{s1p} = \underline{Y}_s - \frac{2 * \underline{Y}_m^2}{\underline{Y}_s + \underline{Y}_m}$$

2.1.4 Nachbildung von Querzweigen gegen Erde

Die Nachbildung von Querzweigen gegen Erde erfolgt analog zur Nachbildung von ein-, zwei- und dreiphasigen Leitungen. Da der zweite Knoten nicht vorhanden ist, reduzieren sich die Gleichungen auf den Teil für den ersten Knoten.

Für dreiphasig gegen Erde gilt:

$$\begin{pmatrix} I_{1L1} \\ I_{1L2} \\ I_{1L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_s & \underline{Y}_m & \underline{Y}_m \\ \underline{Y}_m & \underline{Y}_s & \underline{Y}_m \\ \underline{Y}_m & \underline{Y}_m & \underline{Y}_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \end{pmatrix}$$

Für zweiphasig gegen Erde in L2 und L3 gilt:

$$\begin{pmatrix} I_{1L1} \\ I_{1L2} \\ I_{1L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{s2p} & \underline{Y}_{m2p} \\ 0 & \underline{Y}_{m2p} & \underline{Y}_{s2p} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \end{pmatrix}$$

Für einphasig gegen Erde in L1 gilt:

$$\begin{pmatrix} I_{1L1} \\ I_{1L2} \\ I_{1L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{s1p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \end{pmatrix}$$

2.1.5 Nachbildung von Querzweigen zwischen zwei Phasen

Die Nachbildung von Querzweigen zwischen zwei Phasen kann ebenfalls aus der Admittanzmatrix der dreiphasigen Leitungen hergeleitet werden. Da die Impedanz zwischen den Phasen liegt, ist die gegenseitige Impedanz identisch mit der Selbstimpedanz. Da der zweite Knoten nicht vorhanden ist, reduzieren sich die Gleichungen auf den Teil für den ersten Knoten. Die Admittanzen der nicht vorhandenen Phasen werden auf null gesetzt.

Für einen Quersweig zwischen den Leitern L1 und L2 ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} I_{1L1} \\ I_{1L2} \\ I_{1L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_s & -\underline{Y}_s & 0 \\ -\underline{Y}_s & \underline{Y}_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \end{pmatrix}$$

Für einen Quersweig zwischen den Leitern L2 und L3 ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} I_{1L1} \\ I_{1L2} \\ I_{1L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_s & -\underline{Y}_s \\ 0 & -\underline{Y}_s & \underline{Y}_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \end{pmatrix}$$

Für einen Quersweig zwischen den Leitern L3 und L1 ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} I_{1L1} \\ I_{1L2} \\ I_{1L3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_s & 0 & -\underline{Y}_s \\ 0 & 0 & 0 \\ -\underline{Y}_s & 0 & \underline{Y}_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \underline{U}_{1L1} \\ \underline{U}_{1L2} \\ \underline{U}_{1L3} \end{pmatrix}$$

2.1.6 Fehler auf Knoten

Die Nachbildung von Fehlern auf Knoten erfolgt von Quersweigen mit Impedanz von

$$\underline{Z}_F = 0,0 + j10^{-6} \text{ Ohm}$$

Kurzschlüsse

In den jeweiligen Knoten wird eine Impedanz zwischen den jeweils fehlerbehafteten Leitern geschaltet.

Für einen Kurzschluss zwischen L1 und L2 erfolgt folgende Verschaltung:

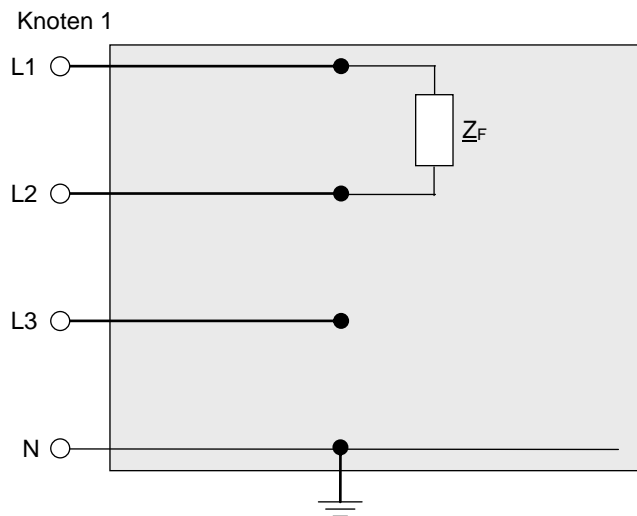


Bild: Fehlerverschaltung im Knoten

Erdschlüsse

In den jeweiligen Knoten wird eine Impedanz gegen Erde der jeweils fehlerbehafteten Leitern geschaltet.

Für einen Erdschluss in Leiter L1 und L2 erfolgt folgende Verschaltung:

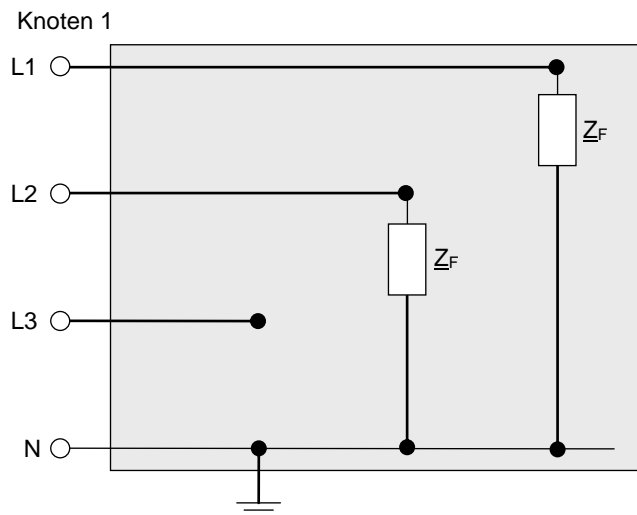


Bild: Fehlerverschaltung im Knoten

2.1.7 Fehler auf Zweigen

Bei Fehlern auf Zweigen können Fehler und Unterbrechungen kombiniert werden. Die Nachbildung erfolgt zusätzlich noch abhängig zur Entfernungsangabe.

Unterbrechungen

Die Unterbrechungen werden immer an dem Anschluss eingebaut, dem die Fehleruntersuchung zugeordnet ist. D.h. die Unterbrechung befindet sich damit vor dem Fehler. Damit kann einfach die Auswirkung einer Kurzunterbrechung im Netz nachgebildet werden, da vor dem eigentlichen Fehler das Netzelement vom Knoten getrennt ist.

Unterbrechungen werden durch Verbindungsleitungen mit einer Impedanz von

$$Z_{VL} = 10^{-5} + j10^{-5}$$

in den nicht unterbrochenen Phasen nachgebildet. 3-polige Unterbrechungen benötigen keine Verbindungsleitung. Bei reinen Kurz- bzw. Erdschlüssen wird die Verbindungsleitung in allen Phasen nachgebildet.

Kurz- und Erdschlüsse

Diese Fehler werden analog zu Fehlern am Knoten in internen Knoten nachgebildet.

Fehler auf Zweigen ausgenommen Leitungen

Das Ersatzschaltbild zeigt vereinfacht (einphasige Darstellung) die interne Nachbildung von Fehlern auf Zweigelementen.

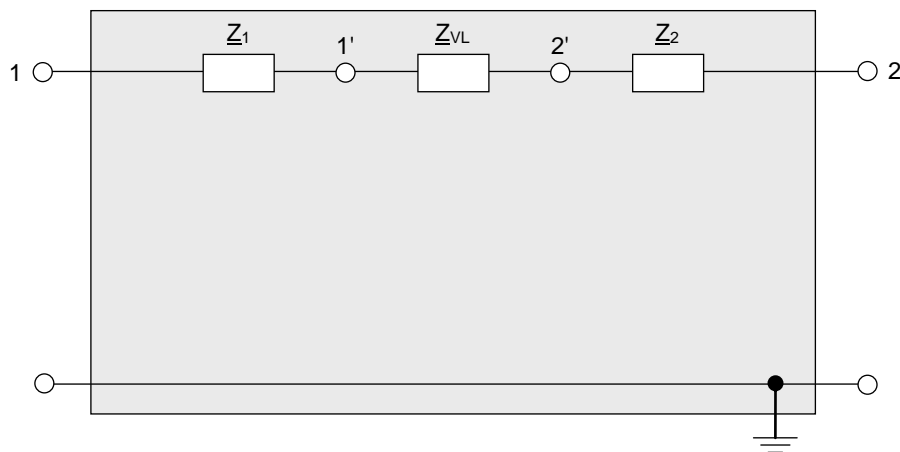


Bild: Nachbildung bei Fehlern auf Zweigen

Die Nachbildung erfolgt abhängig von der Zuordnung des Fehlerorts zu den Anschlüssen des Zweiges.

- **Fehlerort im Anschluss 1:**

Vorhandene Kurz- und Erdschlüsse werden im Knoten 2' nachgebildet. Bei einer vorhandenen dreipoligen Unterbrechung entfällt die Verbindungsleitung zwischen Knoten 1' und 2'.

- **Fehlerort im Anschluss 2:**

Vorhandene Kurz- und Erdschlüsse werden im Knoten 1' nachgebildet. Bei einer vorhandenen dreipoligen Unterbrechung entfällt die Verbindungsleitung zwischen Knoten 1' und 2'.

Die komplette Impedanz des Netzelementes wird je nach Entfernungsangabe vor oder nach dem Fehlerort eingebaut.

Fehlerort im Anschluss 1:

$$f_E = f_{EA}$$

Fehlerort im Anschluss 2:

$$f_E = 100 - f_{EA}$$

Wenn $f_E < 50\%$ gilt:

$$\underline{Z}_{1L} = \underline{Z}_{\text{Element}}, \underline{Z}_{2L} = 0$$

Wenn $f_E \geq 50\%$ gilt:

$$\underline{Z}_{1L} = 0, \underline{Z}_{2L} = \underline{Z}_{\text{Element}}$$

$\underline{Z}_{\text{Element}}$... Impedanz des Netzelementes

f_{EA} ... Entfernung von Fehleruntersuchung zum Anschluss

f_E ... Entfernung zum Anfangsknoten 1

\underline{Z}_1 ... Impedanz Abschnitt 1

\underline{Z}_2 ... Impedanz Abschnitt 2

\underline{Z}_{VL} ... Impedanz Verbindungsleitung

Fehler auf Leitungen

Das folgende Ersatzschaltbild zeigt vereinfacht (einphasige Darstellung) die interne Nachbildung von Fehlern auf Leitungen.

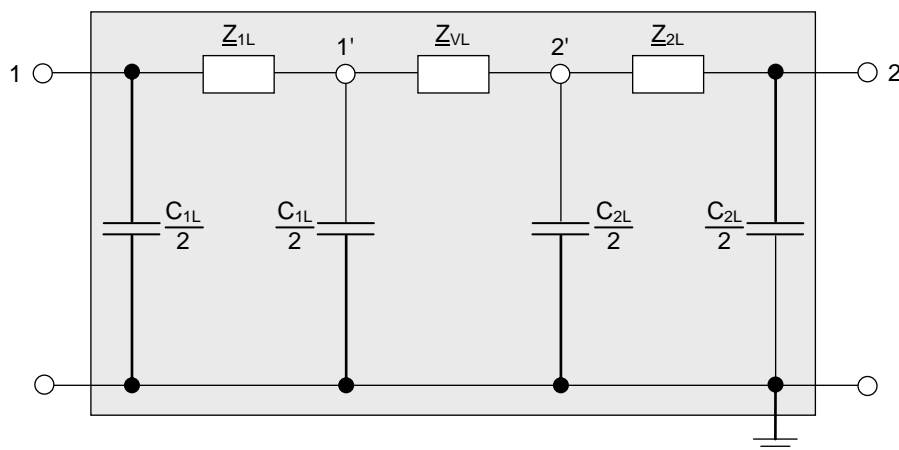


Bild: interne Nachbildung von Fehlern auf Leitungen

Die Nachbildung erfolgt abhängig von der Zuordnung des Fehlerorts zu den Anschlüssen der Leitung.

- **Fehlerort im Anschluss 1:**

Vorhandene Kurz- und Erdschlüsse werden im Knoten 2' nachgebildet. Bei einer vorhandenen dreipoligen Unterbrechung entfällt die Verbindungsleitung zwischen Knoten 1' und 2'.

- **Fehlerort im Anschluss 2:**

Vorhandene Kurz- und Erdschlüsse werden im Knoten 1' nachgebildet. Bei einer vorhandenen dreipoligen Unterbrechung entfällt die Verbindungsleitung zwischen Knoten 1' und 2'.

Bei einer Entfernungsangabe kleiner 0,01 oder größer 99,99 Prozent wird die Impedanz des Netzelementes nicht aufgeteilt. Die kapazitiven Quersätze verbleiben natürlich in der Nachbildung.

Die Leitungsimpedanzen und Kapazitäten werden je nach Abstand des Fehlerorts zum Anschluss errechnet.

Fehlerort im Anschluss 1:

$$f_E = f_{EA}$$

Fehlerort im Anschluss 2:

$$f_E = 100 - f_{EA}$$

Damit ergeben sich folgende Impedanzen und Kapazitäten:

$$\underline{Z}_{1L} = \underline{Z}_L * \frac{f_E}{100}$$

$$\underline{Z}_{2L} = \underline{Z}_L * \left(1 - \frac{f_E}{100}\right)$$

$$C_{1L} = C_L * \frac{f_E}{100}$$

$$C_{2L} = C_L * \left(1 - \frac{f_E}{100}\right)$$

\underline{Z}_L ... Leitungsimpedanz

C_L ... Leitungskapazität

f_{EA} ... Entfernung von Fehleruntersuchung zum Anschluss

f_E ... Entfernung

\underline{Z}_{1L} ... Leitungsimpedanz Abschnitt 1

C_{1L} ... Leitungskapazität Abschnitt 1

\underline{Z}_{2L} ... Leitungsimpedanz Abschnitt 2

C_{2L} ... Leitungskapazität Abschnitt 2

\underline{Z}_{VL} ... Impedanz Verbindungsleitung

3. Anwendungsbeispiel für Mehrfachfehler

Im Folgenden soll das Verfahren **Mehrfachfehler** anhand eines einfachen Anwendungsbeispiels dargestellt werden. In den Beschreibungen werden

- das [Voreinstellen der Berechnungsparameter](#),
- das [Erfassen von Fehleruntersuchungen](#),
- das [Definieren von Fehlerpaketen](#),
- das [Starten der Mehrfachfehlerberechnung](#) sowie
- das [Darstellen und Auswerten der Ergebnisse](#)

erläutert.

Grundlagen

Alle Beschreibungen basieren auf folgendem Netz.

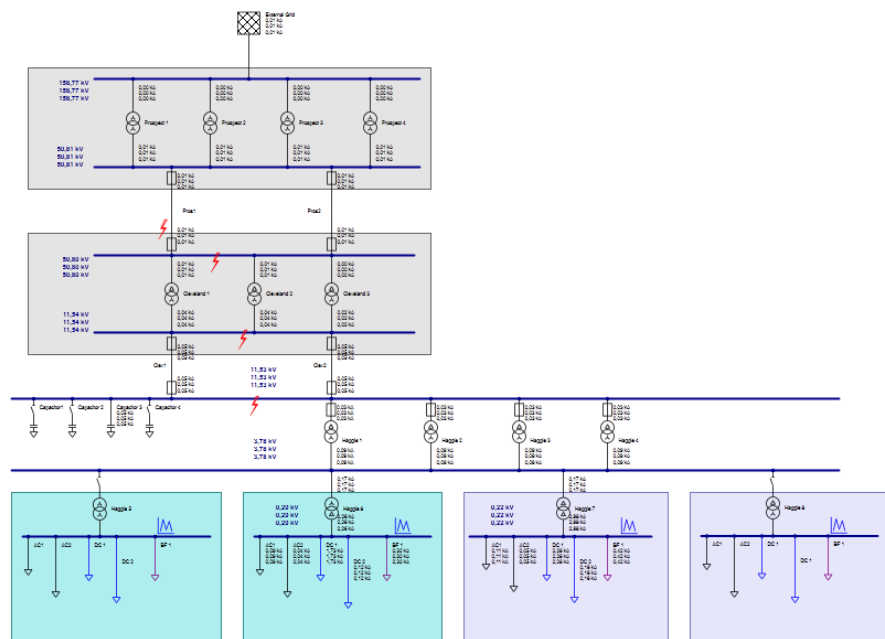


Bild: Beispielsnetz für die Mehrfachfehlerberechnung

Dieses Netz ("Example Ele2") wird bei der Installation von PSS SINCAL automatisch bereitgestellt und kann zum Testen des Simulationsverfahrens eingesetzt werden.

Voraussetzung für die Mehrfachfehlerberechnung ist, dass der Punkt **Mehrfachfehler** im Menü **Berechnen – Methoden** (siehe Handbuch Bedienung, Kapitel Benutzeroberfläche, Abschnitt Voreinstellen der Berechnungsmethoden) aktiviert ist.

3.1 Voreinstellen der Berechnungsparameter

Die Mehrfachfehlerberechnung basiert auf dem Berechnungsverfahren Kurzschluss. Für die Bestimmung der Kurzschlussströme wird das voreingestellte Kurzschlussverfahren verwendet. Dies kann über die Kurzschluss Berechnungsparameter definiert werden.

3.2 Erfassen von Fehleruntersuchungen

Voraussetzung für die Mehrfachfehlerberechnung ist ein bestehendes elektrisches Netz, in dem die für die Kurzschlussberechnung relevanten Daten korrekt eingegeben wurden. Zusätzlich müssen Fehleruntersuchungen definiert werden, welche die im Netz gleichzeitig auftretenden Fehlerzustände beschreiben.

Mit der Fehleruntersuchung können an Knoten und an den Anschlüssen von Netzelementen "Fehler" im Netz platziert werden.

Die Fehleruntersuchung wird von den folgenden Simulationsverfahren verwendet:

- Schutzsimulation
- Mehrfachfehler
- Dynamik

Am einfachsten kann das Erfassen der Fehleruntersuchungen über das Kontextmenü durchgeführt werden. Hierbei wird das Kontextmenü durch Drücken der rechten Maustaste über dem Anschluss jenes Netzelementes aufgeklappt, auf dem eine Fehleruntersuchung erfasst werden soll.

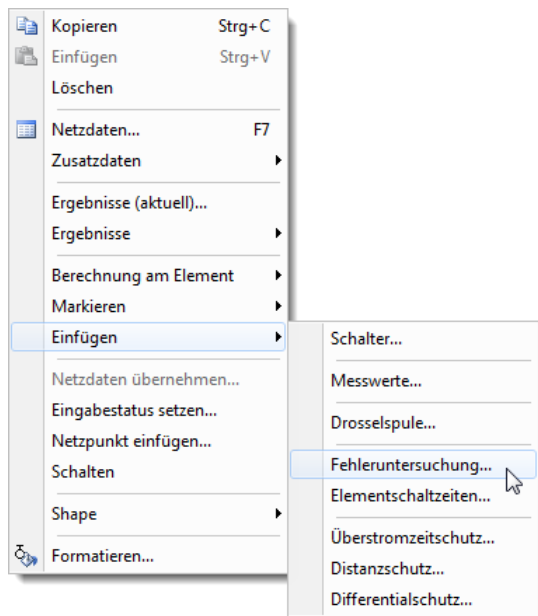


Bild: Erfassen einer Fehleruntersuchung über das Kontextmenü

Danach erscheint die Eingabemaske für die Fehleruntersuchung.

The screenshot shows the 'Fehleruntersuchung' (Fault Investigation) dialog box with the 'Basisdaten' (Basic Data) tab selected. The dialog contains the following fields and options:

- Schaltzustand**: A dropdown menu set to 'Ein' (On).
- Fehlerort**: A dropdown menu set to 'Zweig' (Branch).
- Anschluss**: A dropdown menu set to 'Cleveland 88 kV/Pros1'.
- Name**: A text field containing 'Line 5%'.
- Fehlerpaket**: A dropdown menu set to '(kein)' (none).
- Fehler auf Leiter**: A dropdown menu set to 'Keine' (None).
- Unterbrochene Leiter**: A dropdown menu set to 'L12'.
- Entfernung**: A text field containing '5,0' followed by a '%' symbol.
- Zusatzdaten Fehler**: A dropdown menu set to '(kein)' (none).
- Checkboxes**: Two checkboxes are present: 'Fehler Rückleiter' (Fault Return Line) and 'Fehler Erde' (Fault Earth), both of which are currently unchecked.
- Buttons**: 'OK' and 'Abbrechen' (Cancel) buttons are located at the bottom right of the dialog.

Bild: Datenmaske Fehleruntersuchung – Basisdaten

Eine genaue Beschreibung der Eingabedaten für Fehleruntersuchungen ist im Handbuch Eingabedaten, Kapitel Allgemeine Steuer- und Eingabedaten, Abschnitt Fehleruntersuchung zu finden.

3.3 Definieren von Fehlerpaketen

Mit Hilfe von Fehlerpaketen können verschiedene Fehleruntersuchungen zusammengefasst werden. Die so zusammengefassten Fehleruntersuchungen werden von der Mehrfachfehlerberechnung als ein gleichzeitig auftretender Fehlerfall betrachtet.

Fehlerpakete werden über den Menüpunkt **Daten – Erweiterte Daten – Fehlerpaket** definiert.

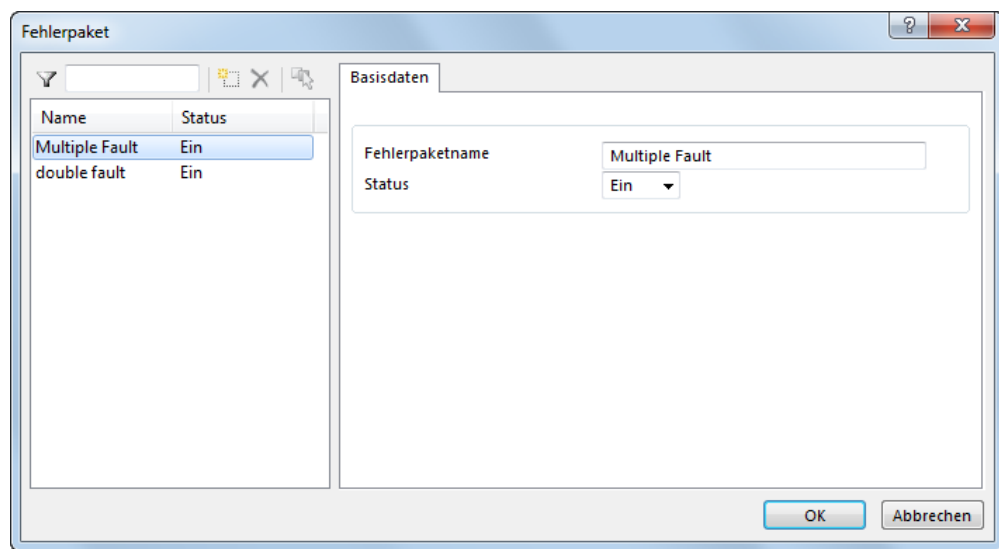


Bild: Datenmaske Fehlerpaket

Beim Fehlerpaket werden lediglich ein **Fehlerpaketname** und ein **Status** vorgegeben. Der Status kennzeichnet, ob das Paket in der Mehrfachfehlerberechnung berücksichtigt werden soll oder nicht.

Die Zuordnung der einzelnen Fehleruntersuchungen zu den Fehlerpaketen erfolgt direkt in den Basisdaten der Fehleruntersuchung. Hierzu wird im Feld **Fehlerpaket** das gewünschte Paket ausgewählt.

3.4 Starten der Mehrfachfehlerberechnung

Die Mehrfachfehlerberechnung wird über den Menüpunkt **Berechnen – Mehrfachfehler** gestartet.

Soll die Berechnung nur für ein Fehlerpaket durchgeführt werden, dann muss für jene Fehleruntersuchung, die dem Fehlerpaket zugewiesen ist, das Kontextmenü aufgeklappt werden. Im Menü **Berechnung am Fehler** wird der Punkt **Mehrfachfehlerpaket** gewählt.

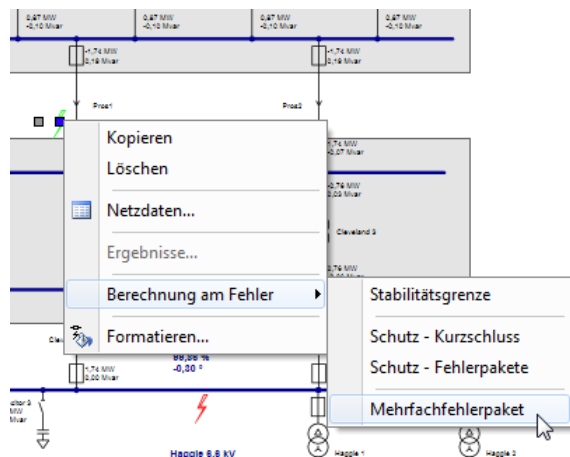


Bild: Start der Mehrfachfehlerberechnung über das Kontextmenü

3.5 Darstellen und Auswerten der Ergebnisse

Die Mehrfachfehlerberechnung wird über das Menü **Berechnen – Mehrfachfehler** gestartet. Nach dem Berechnen werden Ergebnisse für alle Netzelemente bereitgestellt. Die Ergebnisse sind

- in der Netzgrafik,
- in den Datenmasken und der Tabelle

verfügbar.

3.5.1 Ergebnisse in der Netzgrafik

Die Ergebnisse der Mehrfachfehlerberechnung werden in der Netzgrafik bei allen Netzelementen bereitgestellt. Diese Ergebnisse sind nach den Fehlerpaketen gruppiert.

Über das Kontextmenü der Netzelemente kann die Ergebnismaske geöffnet werden.

Anwendungsbeispiel für Mehrfachfehler

Knotenergebnisse Mehrfachfehler

Ergebnisse **Komponenten**

Knoten: Prospect 275 kV

Netzebene: 275kV (275 kV)

Netzdarstellung: Sym. Komponenten

Fehlertyp: Kurzschluss

Fehlerpaketname: Multiple Fault

| | | Absolut | Real | Imaginär | |
|-------------------------|-----|---------|---------|----------|----|
| Spannung - L1 | UL1 | 158,771 | 158,771 | 0,000 | kV |
| Spannung - L2 | UL2 | 158,771 | -79,386 | -137,500 | kV |
| Spannung - L3 | UL3 | 158,771 | -79,386 | 137,500 | kV |
| Spannung - Verschiebung | U0 | 0,000 | -0,000 | 0,000 | kV |

OK Abbrechen

Bild: Datenmaske Knotenergebnisse Mehrfachfehler

Für die Knoten werden die Spannungswerte in allen Leitern bereitgestellt.

Im Register **Komponenten** werden die hier ausgewiesenen Spannungen in Form von symmetrischen Komponenten ausgegeben.

Zweigergebnisse Mehrfachfehler

Ergebnisse **Komponenten**

Anfangsknoten: Prospect 88 kV
 Endknoten: Cleveland 88 kV
 Elementname: Pros1
 Netzebene: 88kV (88 kV)

Netzdarstellung: Sym. Komponenten
 Fehlertyp: Kurzschluss

Fehlerpaketname: Multiple Fault

| | | Absolut | Real | Imaginär | |
|-------------------------|-----|---------|---------|----------|----|
| Strom - L1 | IL1 | 0,011 | -0,011 | -0,001 | kA |
| Strom - L2 | IL2 | 0,011 | 0,005 | 0,011 | kA |
| Strom - L3 | IL3 | 0,011 | 0,007 | -0,009 | kA |
| Strom - Rückleitung | 3I0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | kA |
| Spannung - L1 | UL1 | 50,807 | 50,807 | -0,021 | kV |
| Spannung - L2 | UL2 | 50,807 | -25,422 | -43,989 | kV |
| Spannung - L3 | UL3 | 50,807 | -25,385 | 44,011 | kV |
| Spannung - Verschiebung | U0 | 0,000 | -0,000 | 0,000 | kV |

1/2 OK Abbrechen

Bild: Datenmaske Zweigergebnisse Mehrfachfehler

Für die Knotenelemente und Zweigelemente werden die Leiterströme und -spannungen bereitgestellt.

Im Register **Komponenten** werden die hier ausgewiesenen Ströme und Spannungen in Form von symmetrischen Komponenten ausgegeben.

Ergebnisse Fehleruntersuchung Mehrfachfehler

Ergebnisse **Komponenten**

Fehleruntersuchung: |

Netzdarstellung: Sym. Komponenten

Fehlertyp: Kurzschluss

Fehlerpaketname: double fault

| | | Absolut | Real | Imaginär | |
|-------------------------|-----|---------|---------|----------|----|
| Strom - L1 | IL1 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | kA |
| Strom - L2 | IL2 | 11,086 | 10,780 | 2,584 | kA |
| Strom - L3 | IL3 | 11,086 | -10,780 | -2,584 | kA |
| Strom - Rückleitung | 3I0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | kA |
| Spannung - L1 | UL1 | 50,807 | 50,807 | -0,021 | kV |
| Spannung - L2 | UL2 | 25,400 | -25,400 | 0,037 | kV |
| Spannung - L3 | UL3 | 25,400 | -25,400 | 0,037 | kV |
| Spannung - Verschiebung | U0 | 0,018 | -0,003 | -0,018 | kV |

OK Abbrechen

Bild: Datenmaske Fehleruntersuchung Mehrfachfehler

Für die Fehleruntersuchungen werden die Leiterströme und -spannungen bereitgestellt.

Im Register **Komponenten** werden die hier ausgewiesenen Ströme und Spannungen in Form von symmetrischen Komponenten ausgegeben.