

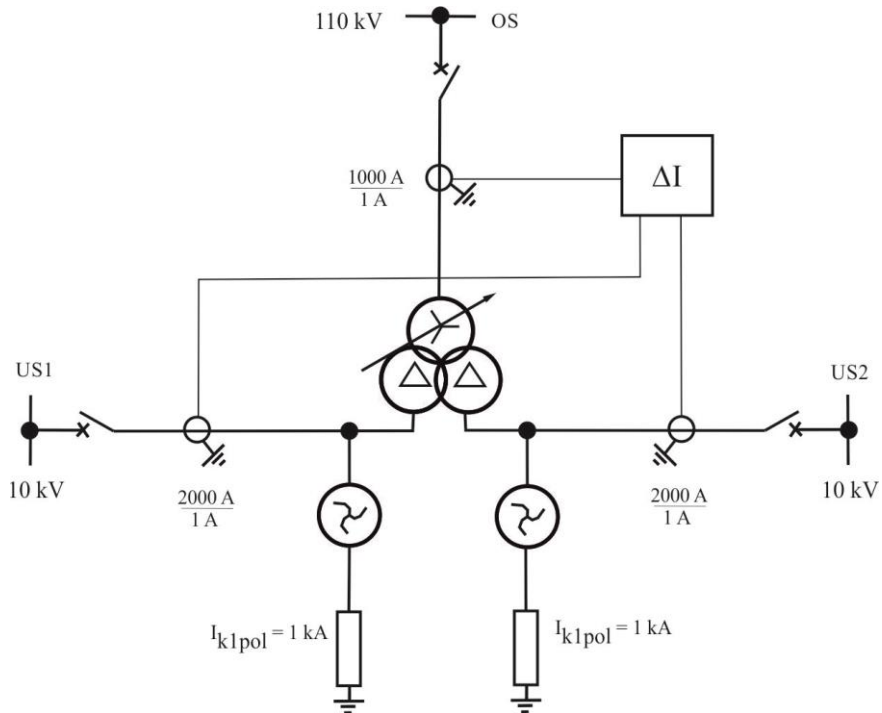
Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | GRUNDLAGEN UND VERFAHREN ZUR FEHLERANALYSE | 3 |
| 1.1 | SYMMETRISCHE KOMPONENTEN | 3 |
| 1.2 | ZEIGERBERECHNUNG | 5 |
| 1.3 | STATIONÄRES TRANSFORMATORÜBERTRAGungsverhalten | 6 |
| 1.4 | IMPEDANZBERECHNUNG | 7 |
| 2 | DIFFERENTIALSCHUTZ | 9 |
| 2.1 | WICKLUNGSSCHLUSS OHNE BUCHHOLZAUSLÖSUNG | 9 |
| 2.2 | WICKLUNGSSCHLUSS MIT ERDBERÜHRUNG IM RESPE-NETZ | 13 |
| 2.3 | TRANSFORMATORFEHLER MIT ERDBERÜHRUNG IM NOSPE-NETZ | 16 |
| 2.4 | BERÜCKSICHTIGUNG DES TRANSFORMATORSTERNPUNKTSTROMES | 21 |
| 2.5 | STROMWANDLERSÄTTIGUNG BEI GERINGEN FEHLERSTRÖMEN | 25 |
| 2.6 | STABILISIERUNG MIT UNGERADZÄHLIGEN HARMONISCHEN | 28 |
| 2.7 | PHASENSCHIEBERTRANSFORMATOREN | 31 |
| 2.8 | ÜBERSPANNUNGSABLEITER IM DIFFERENTIALSCHUTZBEREICH | 39 |
| 3 | ERDSCHLUSSSCHUTZ | 42 |
| 3.1 | INTERMITTIERENDE ERDFEHLER IM RESPE-NETZ | 42 |
| 3.2 | TRANSIENTE IN KLEINEN NETZEN | 45 |
| 4 | DISTANZSCHUTZ | 48 |
| 4.1 | FEHLERÜBERGANGSWIDERSTAND IM GEERDETEN NETZ | 48 |
| 4.2 | MEHRFACHFEHLER MIT LICHTBOGEN IM RESPE-NETZ | 56 |
| 4.3 | DOPPELERDSCHLUSS IM RESPE-NETZ | 61 |
| 4.4 | BLITZEINSCHLAG UND FEHLERSTROM OHNE NULLDURCHGANG | 65 |
| 4.5 | EINPOLIGER LICHTBOGENFEHLER IM NOSPE-NETZ | 69 |
| 5 | SAMMELSCHIENENSCHUTZ | 74 |
| 5.1 | DEFEKTER SPANNUNGSWANDLER IM NOSPE-NETZ | 74 |
| 6 | NETZENTKUPPLUNG UND SYNCHRONISIERUNG | 77 |
| 6.1 | ASYNCHRONE ZUSCHALTUNG EINER SYNCHRONMASCHINE | 77 |
| 7 | MASCHINENSCHUTZ | 81 |
| 7.1 | SCHALTÜBERSPANNUNGEN NACH UNTERERREGUNGS-AUSLÖSUNG | 81 |
| 8 | INDUKTIVE WANDLER | 85 |
| 8.1 | KIPPSCHWINGUNGEN | 85 |
| 8.2 | STROMWANDLERSÄTTIGUNG BEI MOTORANLAUF | 90 |
| 9 | LITERATURVERZEICHNIS | 97 |

2.3 Transformatorfehler mit Erdberührung im NOSPE-Netz

2.3.1 Objektbeschreibung

An einem Dreiwicklungstransformator erfolgte eine Auslösung durch den Transformator Differentialschutz. Das digitale Differentialschutzrelais hat über die integrierte Störschriebfunktion die Leiterströme der Ober- und Unterspannungsseiten US1 und US2 aufgezeichnet. Anhand des Störschriebes soll der Fehlerort ermittelt werden.



| Wicklungsdaten | W1 | W2 | W3 |
|----------------|---------|----------|----------|
| Wicklungsname | OS | US1 | US2 |
| Netzknoten | 110kV_A | 10kV_A | 10kV_B |
| Feld | E3 | J1 | J1 |
| Nennleistung | 25 MVA | 12,5 MVA | 12,5 MVA |
| Nennspannung | 115 kV | 10,5 kV | 10,5 kV |
| Nennstrom | 126 A | 687 A | 687 A |
| Schaltung | YN | d11 | d11 |

Abbildung 13 Anlagenkonfiguration und Transformatordaten

2.3.2 Messgrößen

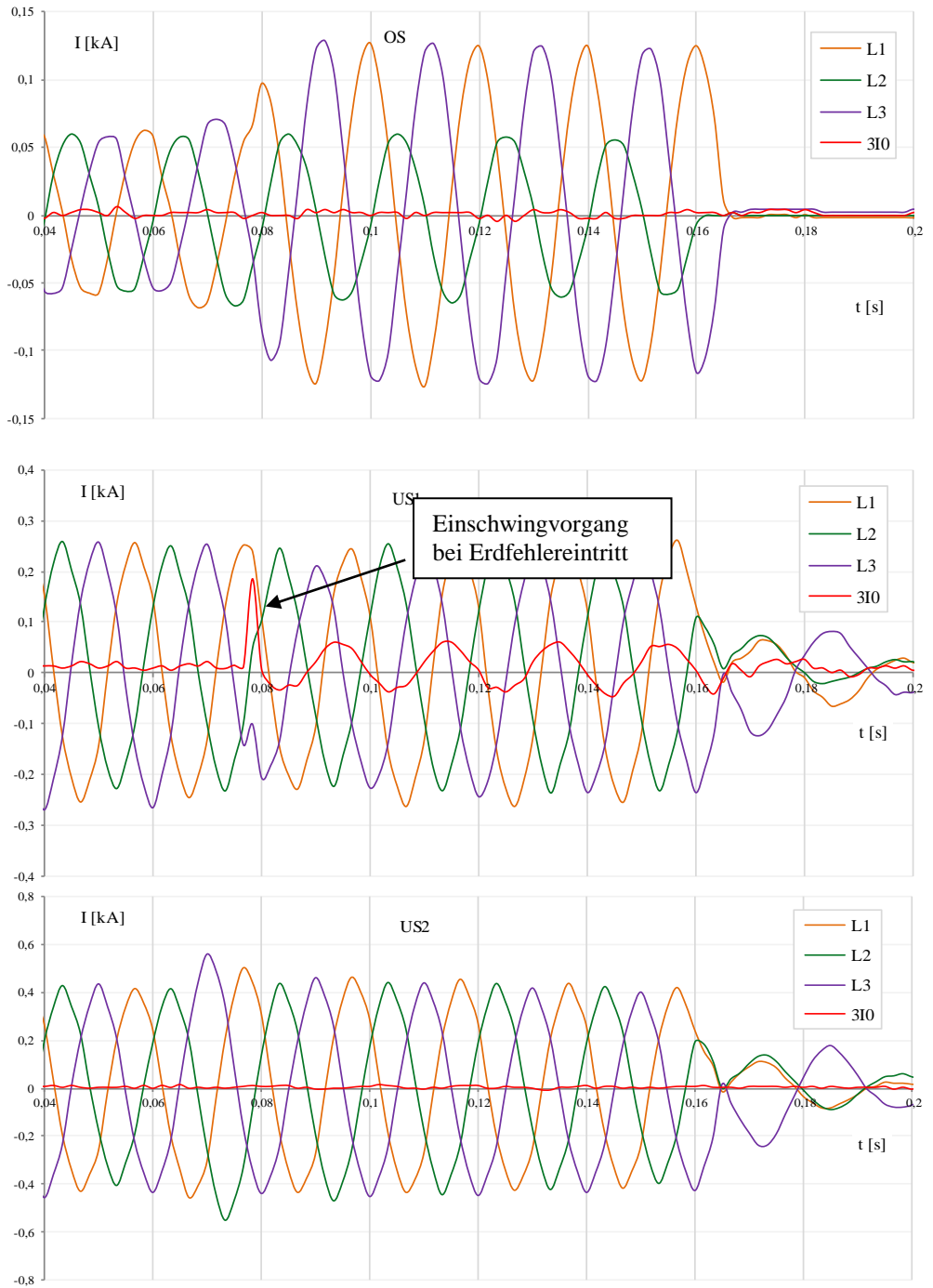


Abbildung 14 Messgrößen des Differentialsschutzes ($3i_0$ - berechneter Nullstrom)

2.3.3 Qualitative Analyse

Die Analyse des Störschriebes ergibt eine deutliche Stromänderung in den Leitern L1 und L3 der Oberspannungsseite sowie einen Phasenwinkelsprung in L3 und einen Nullstrom auf der Unterspannungsseite US1. Basierend auf diesen Feststellungen, wird ein einpoliger Fehler im Leiter L3 vermutet. Aufgrund der alleinigen Speisung aus dem 110 kV-Netz und dem geringen kapazitiven Erdschlussstrom aus dem unterlagerten 10 kV-Netz, muss sich der Erdfehler gemäß nachstehender Abbildung im Schutzbereich des Differentialschutzes befinden

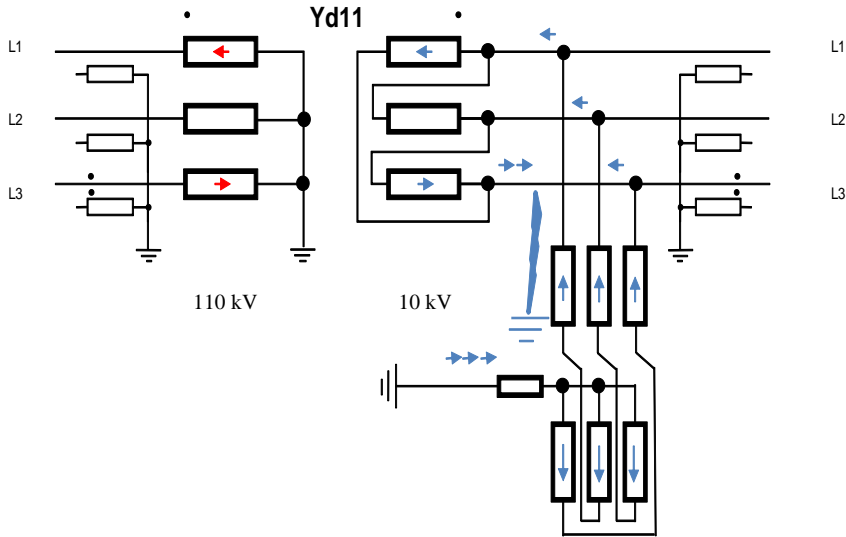


Abbildung 15 Stromverteilung beim internen US-seitigen Fehler

Im Fall des externen Fehlers, wäre ein deutlicher Kurzschlussstrom im Leiter 3 auf der 10 kV-Seite zu messen.

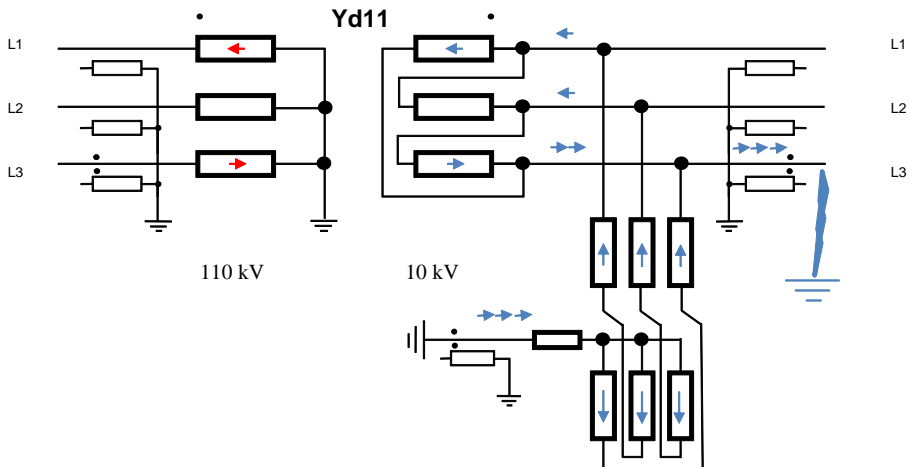


Abbildung 16 Stromverteilung beim externen US-seitigen Fehler

2.3.4 Quantitative Analyse

Die Erdungseinrichtung ist für einen maximalen einpoligen Kurzschlussstrom von 1kA beim Anlagenfehler konzipiert. Der tatsächlich geflossene Erdkurzschlussstromes $3I_0^{ZME}$ kann aus den gemessenen Strömen gemäß der Ersatzschaltung in symmetrischen Komponenten berechnet werden.

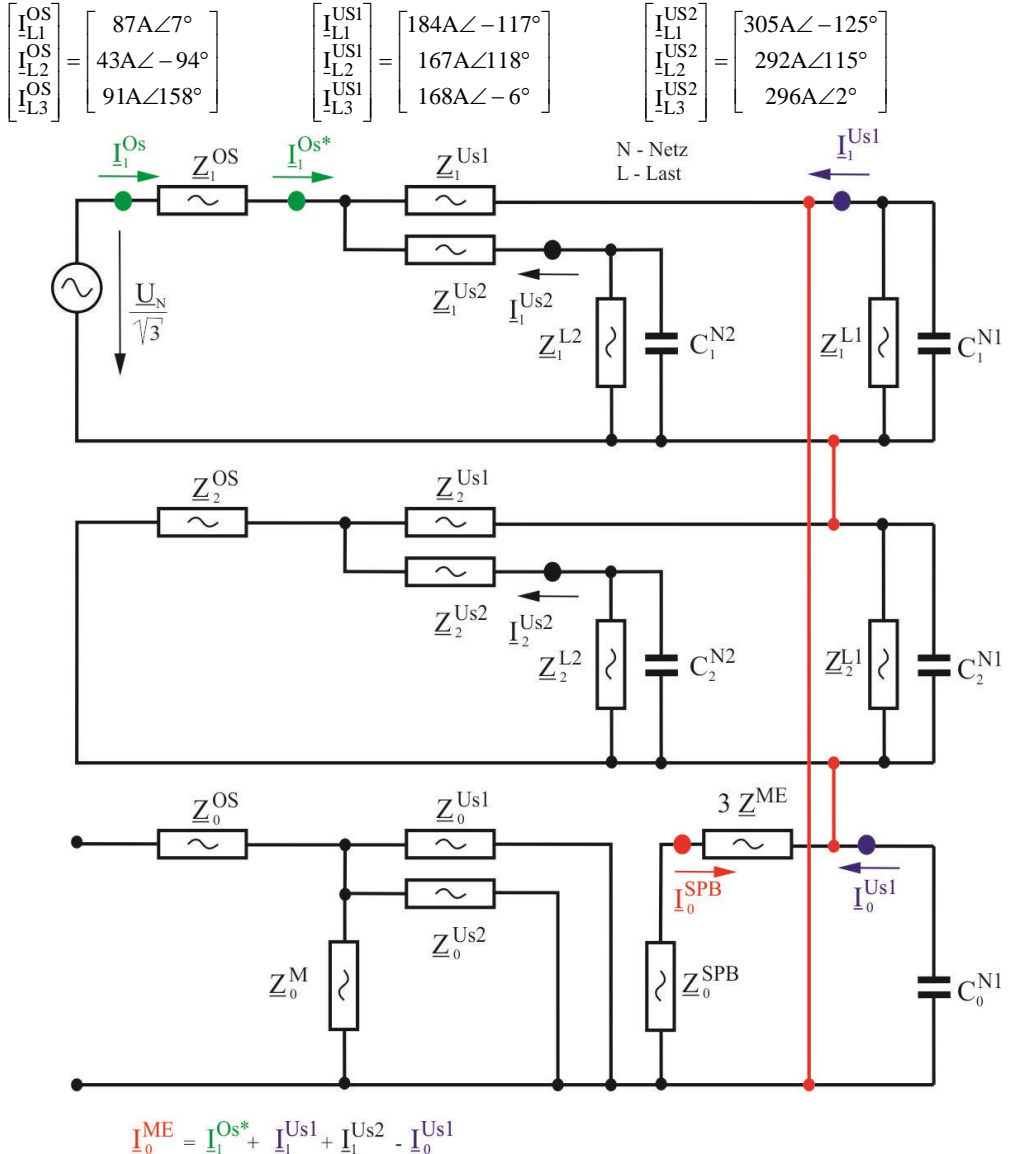


Abbildung 17 Ersatzschaltung in symmetrischen Komponenten

Vor der Symmetrierung sind die Ströme I^{OS} zunächst auf die Unterspannungsseite zu transformieren. Das Übersetzungsverhältnis des Transformators beträgt 11 (110 kV/10 kV).

$$\begin{bmatrix} I_{L1}^{OS*} \\ I_{L2}^{OS*} \\ I_{L3}^{OS*} \end{bmatrix} = \frac{11}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 87A \angle 7^\circ \\ 43A \angle -94^\circ \\ 91A \angle 158^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 661,4A \angle 30,9^\circ \\ 711,4A \angle -43,4^\circ \\ 1094,4A \angle 172,2^\circ \end{bmatrix} \text{ mit } \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix} \text{ folgt}$$

ein Nullstrom $3I_0^{SPB} = 0,98 \text{ kA}$, welcher sehr nahe am theoretischen Wert von 1 kA liegt.

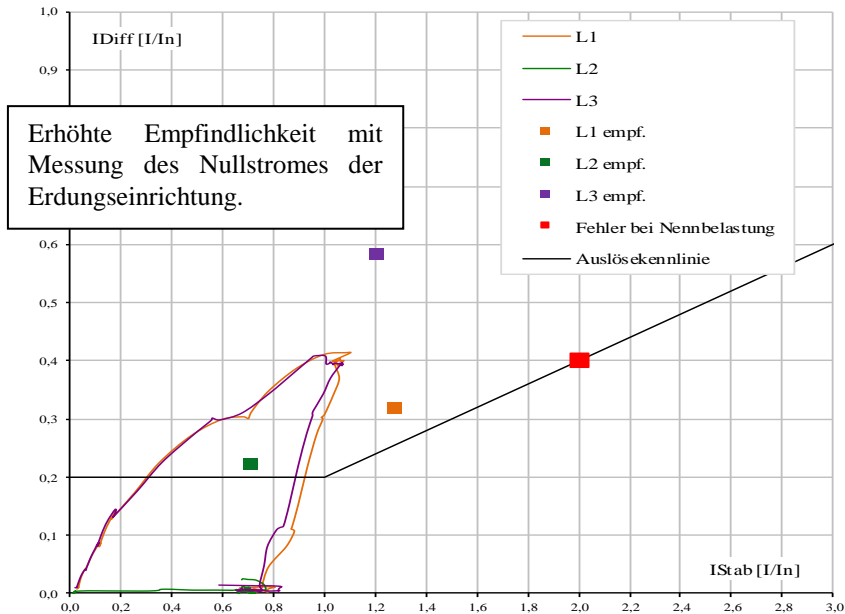


Abbildung 18 Diff/Stab-Berechnung mit $I_{Stab} = |I^{OS}| + |I^{US1}| + |I^{US2}|$

2.3.5 Zusammenfassung und Erkenntnisse

Der nahezu widerstandslose einpolige Fehler konnte qualitativ und quantitativ reproduziert werden. Es ist jedoch ersichtlich, dass die Empfindlichkeit des Differentialschutzes nicht ausreichend ist. Nimmt man bei der gewählten, empfindlichen Schutzeinstellung ($I_{diff} = 0,2 \text{ In}$ und Anstieg $m1 = 0,2$) den **gleichen Fehler** unter Nennlast an, ergibt sich ein Fehlerstrom der genau auf der Auslösekenlinie liegt. Die Empfindlichkeit bei dieser Konfiguration entspricht ca. 58% des einpoligen Fehlerstromes.

Lösungsansätze zur Verbesserung der Anregeverlässlichkeit:

- Verwendung von Erdfehlerdifferentialschutz auf den Unterspannungsseiten
- Messung der Nullströme der Erdungseinrichtungen und Verwendung modifizierter Übertragungsmatrizen für die Leiterströme (Siemens ab Siprotec V4)

$$\begin{bmatrix} I_{L1}^{US*} \\ I_{L2}^{US*} \\ I_{L3}^{US*} \end{bmatrix} = \frac{2000 \text{ A} \cdot 10,5 \text{ kV} \cdot \sqrt{3}}{25 \text{ MVA}} \cdot \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1+\sqrt{3} & 1 & 1-\sqrt{3} \\ 1-\sqrt{3} & 1+\sqrt{3} & 0 \\ 1 & 1-\sqrt{3} & 1+\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L1}^{USsek} \\ I_{L2}^{USsek} \\ I_{L3}^{USsek} \end{bmatrix} + \frac{300 \text{ A} \cdot 10,5 \text{ kV} \cdot \sqrt{3}}{25 \text{ MVA}} \cdot \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 3I_0^{USsek} \\ 3I_0^{USsek} \\ 3I_0^{USsek} \end{bmatrix}$$