

Erdschlussströme in MS-Netzen mit Resonanzsternpunktterdung

Dietrich Stade

In Mittelspannungsnetzen sind einpolige Erdschlüsse die häufigsten Fehler. Werden diese Netze mit Resonanzsternpunktterdung betrieben, ergeben sich Vorteile, wie kleine Fehlerströme, selbsttätiges Verlöschen eines Erdschlusslichtbogens und gute Wirtschaftlichkeit. Abnehmer können trotz Erdfehlerfall unterbrechungsfrei weiter versorgt werden. Bei der Netzplanung helfen computergestützte Berechnungsprogramme.

Werden diese Netze mit Resonanzsternpunktterdung betrieben, können u. a. Vorteile, wie kleine Fehlerströme, selbsttätiges Verlöschen eines Erdschlusslichtbogens und gute Wirtschaftlichkeit mit der Möglichkeit gekoppelt werden, Abnehmer trotz Erdfehlerfall unterbrechungsfrei zu versorgen. Allerdings ist es aus der Sicht der Personensicherheit (Einhaltung zulässiger Berührungsspannungen) unumgänglich, Erdschlussrestströme auf festgelegte Werte zu begrenzen. Die Größe des Erdschlussreststroms bestimmen Erdschlussstrom, Verstimmung, Dämpfung und der Oberschwingungsanteil, der bisher nicht ausreichend genau berechnet werden kann. Seine messtechnische Ermittlung ist zeit- und kostenaufwendig, risikobehaftet und für perspektivische Planungen nur begrenzt nutzbar. Ein computergestütztes Berechnungsprogramm BOSES (Berechnung der Oberschwingungs-Erdschlussrestströme) ermöglicht ausreichend genaue Vorausrechnungen des Erdschlussreststroms und schafft damit Planungssicherheit, sichert Zeitersparnis und erlaubt prognostische Entscheidungen bei der Netzplanung und -gestaltung.

Begrenzung der Erdschlussrestströme unumgänglich

Die meisten Mittelspannungsnetze der öffentlichen Stromversorgung werden in

Deutschland mit Resonanzsternpunktterdung (RESPE) betrieben.

Bekanntlich wird hierbei die kapazitive 50-Hz-Komponente des Fehlerstroms (Erdschlussreststroms) I_{C_e} bei einpoligen Erdfehlern durch den induktiven Strom I_D einer regelbaren Erdschlussdrosselspule im Sternpunkt des Einspeisetransformators bzw. der Einspeisetransformatoren weitgehend kompensiert (Bild 1). Für den an der Fehlerstelle verbleibenden Reststrom I_{RES} gilt:

$$I_{RES} = I_{C_e} \sqrt{v^2 + d^2 + i_{RES,OS}^2}, \text{ mit} \quad (1)$$

$$I_{C_e} = \sqrt{3} \cdot U_N \omega C_e \text{ Erdschlussstrom (50-Hz-Wert).}$$

In Gl. 1 bedeuten:

$$v = 1 - \frac{I_D}{I_{C_e}} \quad \text{Verstimmung (50-Hz-Wert),}$$

$$d = \frac{I_{RES,wirk}}{I_{C_e}} \quad \text{Dämpfung, } I_{RES,wirk}: \text{ Wirkreststrom (50-Hz-Wert),}$$

$$i_{RES,OS} = \frac{I_{RES,OS}}{I_{C_e}} \quad \text{Oberschwingungsstrom bezogen auf } I_{C_e}.$$

Die Vorteile der Resonanzsternpunktterdung (RESPE) bestehen u. a. darin, dass

- ein Weiterbetreiben des Netzes bei häufig auftretenden einpoligen Erdfehlern möglich ist und damit eine weitgehend unterbrechungsfreie Stromversorgung für die Netzkunden gewährleistet ist, die auch durch regulative Maßnahmen honoriert wird,
- ein Selbstverlöschen des Erdschlusslichtbogens (vorzugsweise in Freileitungsnetzen) eintritt,
- keine Ausweitung einpoliger Fehler zu Doppelerdschlüssen oder Kurzschlüssen geschieht,

- nur eine geringe Beeinflussung benachbarter Leitungen im Erdfehlerfall vorliegt und
- vergleichsweise niedrige Aufwendungen für Erdungsanlagen nötig sind.

Will der Netzbetreiber diese Vorteile nutzen, dann muss sichergestellt sein, dass der Reststrom I_{RES} auf Werte < 60 A begrenzt wird, um die zulässige Berührungsspannung $U_{Tp} \leq 75$ V nach DIN VDE 0101 (VDE 0101):2000-01 [1] einzuhalten.

Begrenzung der Erdschlussrestströme bedeutet Reduzierung des Oberschwingungsstroms

Die technische Entwicklung der letzten Jahre hat dazu geführt, dass durch Netzausbau und Erhöhung des Kabelanteils in den Mittelspannungsnetzen eines Umspannungsbereichs Erdschlussströme I_{C_e} von 700 A bis 900 A keine Seltenheit darstellen und Werte über 1 000 A bereits erreicht werden. Der Verstimmungsgrad v kann in Netzen mit großem Kabelanteil (die gute Leitungssymmetrie hat nur kleinere Verlagerungsspannungen zur Folge) auf 0 % bis 2 % verringert werden.

Die Dämpfungsverhältnisse sind nicht beeinflussbar und werden durch die Verluste der Betriebsmittel (Drosselspule, Leitung, Transformator) bestimmt. In Netzen mit hohem Kabelanteil ist von Dämpfungswerten d zwischen 2 % bis 4 % auszugehen. In Freileitungsnetzen können witterungsabhängig auch deutlich höhere Werte auftreten.

Nicht vom Netzbetreiber direkt beeinflussbar ist der Oberschwingungsanteil $I_{RES,OS}$ im Reststrom, der unmittelbar von der Verzerrung der Versorgungsspannung bestimmt wird, und selbst bei Einhaltung der Grenzwerte für die Oberschwingungspegel in der Versorgungsspannung nach DIN EN 50160:2000-03 [2] kann der Reststrom die 60-A-Grenze überschreiten. Aus Gl. 1 folgt unmittelbar für den zulässigen bezogenen Oberschwingungsreststrom $i_{RES,OS,zul}$:

$$i_{RES,OS,zul} \leq \sqrt{\left(\frac{I_{RES}}{I_{C_e}}\right)^2 - v^2 - d^2}, \quad (2)$$

mit $I_{RES,zul} = 60$ A.

Bei $v = 2$ %, $d = 4$ % und $I_{C_e} = 800$ A ist der Oberschwingungsstrom im Erdschluss-

Prof. Dr.-Ing. habil.
Dietrich Stade (68),
VDE, ist Consulting
Engineer der H. Kleinknecht GmbH & Co. KG
in Ilmenau.



E-Mail:
dietrich.stade@kleinknecht.de

reststrom auf Werte von 6 % (48 A) zu begrenzen. Eigene Untersuchungen [3] und Messwerte [4] belegen, dass bereits bei einer Spannungsverzerrung durch die fünfte Harmonische $u_{h=5}$ von 3 % bis 4 % Oberschwingungsströme >48 A auftreten. Um zu entscheiden, in welchen Netzen begrenzende Maßnahmen zur Reduzierung der Oberschwingungsströme im Erdschlussreststrom notwendig werden, können prinzipielle zwei Wege beschränkt werden:

1. Weg: Systematische, aber aufwendige Erdschlussmessungen.
2. Weg: Vorausberechnung des Oberschwingungsanteils $I_{RES,OS}$ im Reststrom durch ein computergestütztes Berechnungsverfahren, um aus Sicht des Erdschlussstroms „kritische Netze“ zu ermitteln.

Im vorliegenden Fall wurde

- aus wirtschaftlichen Erwägungen,
 - zur Risikoabsenkung (Vermeidung der Gefahr eines Doppelerdschlusses/ Kurzschlusses) sowie aus Zeitersparnis und
 - aufgrund prognostischer Erfordernisse bei der Netzplanung
- der zweite Weg gewählt, der durch Erdschlussmessungen flankiert wurde.

Systematisierung der Netzstruktur und Analyse der Oberschwingungsverhältnisse

Die Vorausberechnung von $I_{RES,OS}$ erfordert eine Systematisierung der Netzstruktur und eine Analyse der Oberschwingungsverhältnisse. Öffentliche Stromversorgungsnetze im Mittelspannungsbereich sind weitgehend gleichartig strukturiert; in der Versorgungsspannung dominiert eine fünfte Harmonische. Den prinzipiellen Netzaufbau zeigt Bild 2.

Die Stromversorgung annähernd gleich gestalteter 20-kV-Netze erfolgt aus einem 110-kV-Netz in einem Umspannwerk mit zwei Transformatoren und einer Bemessungsleistung S_{rT} von beispielsweise 31,5 MVA sowie einer Kurzschlussleistung u_k von 12 %. Die Schaltanlage des Umspannwerks mit Einfachsammelschiene und Längskupplung ermöglicht sowohl den Ein-Transformatorbetrieb (ein Transformator speist alle 20-kV-seitigen Kabel- oder Freileitungsabgänge) als auch den Zwei-Transformatorbetrieb (jeweils ein Transformator versorgt ein 20-kV-Teilnetz). Im Mittel sind acht bis zehn Leitungsabgänge vorhanden, die in einem verzweigten Verteilnetz, das wahlweise im Stich, im offenen oder geschlossenen Ring betrieben werden kann, die Ortsnetzstationen (Haushalte) sowie Gewerbe und Industrie versorgen.

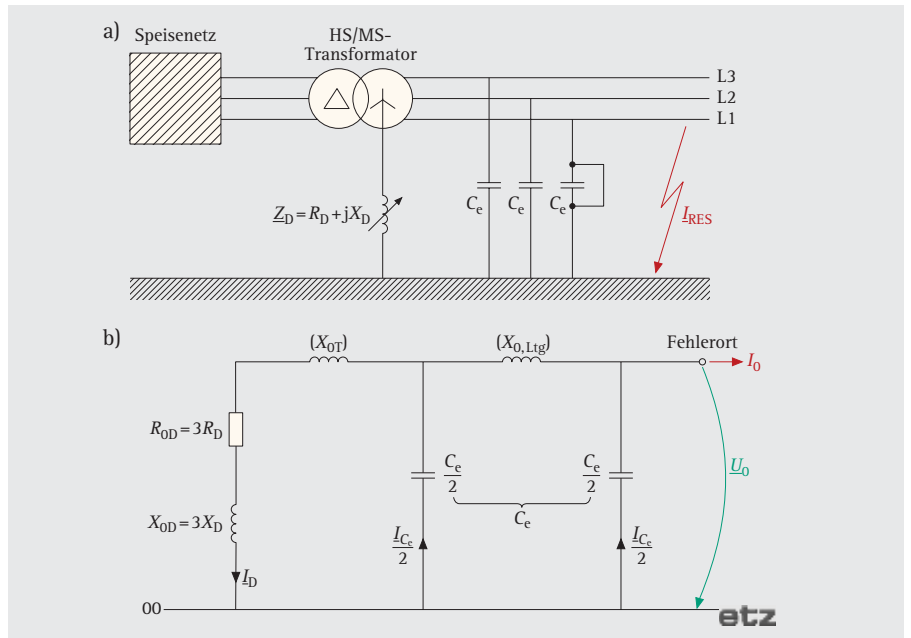


Bild 1. Erdschluss des Leiters L1 in einem Netz mit Erdschlusskompensation: a) vereinfachte Netzschaltung; b) Ersatzschaltung im Nullsystem

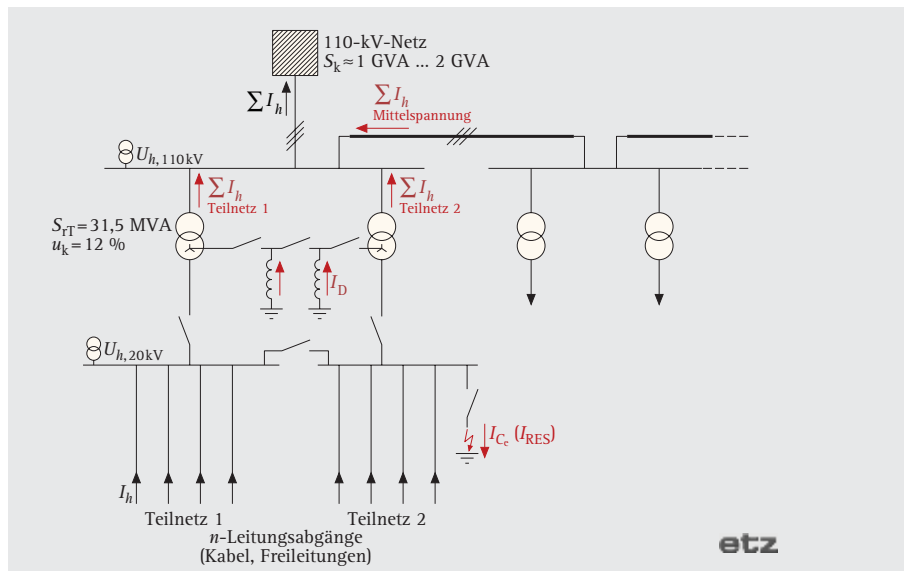


Bild 2. Die prinzipielle Netzstruktur

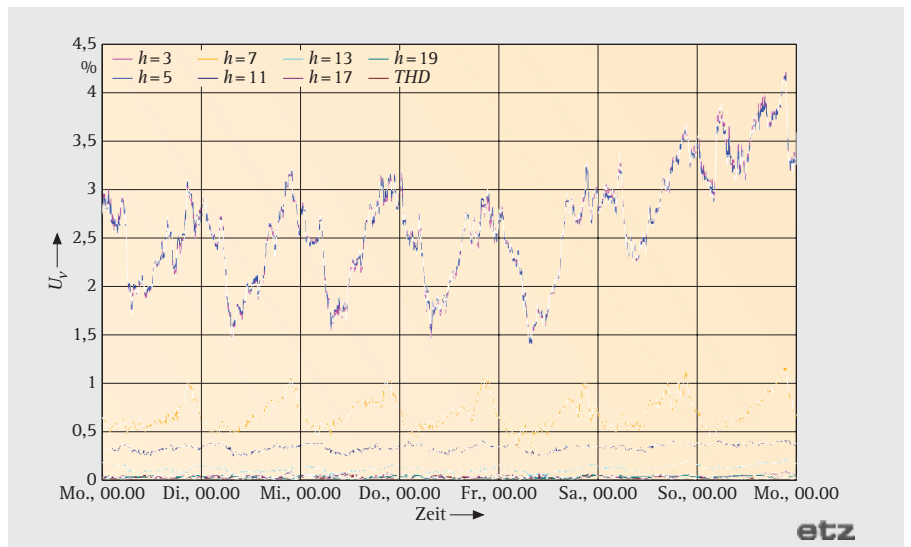


Bild 3. Verzerrung der Versorgungsspannung eines 20-kV-Netzes der öffentlichen Stromversorgung (Messwerte)



Die Spannungsverzerrung in den 20-kV-Netzen resultiert aus dem Abnehmerverhalten der vom jeweiligen Netz versorgten Kunden und der summarischen Vorbelastung des 110-kV-Netzes, die durch alle vom 110-kV-Netz gespeisten Mittelspannungsnetze entsteht. In Einzelfällen sind auch verzerrende Lasten großer Leistung im Hochspannungsnetz vorhanden, die seine Vorbelastung mitbestimmen. Bild 3 zeigt den charakteristischen zeitlichen Verlauf der Spannungsverzerrung eines 20-kV-Netzes.

Die Gesamtverzerrung der Versorgungsspannung $THDU$ wird maßgeblich durch die fünfte Spannungsharmonische $u_{h=5}$ bestimmt und ist am Wochenende und abends am größten. Anteile zu $THDU$ liefern jedoch auch eine dritte und siebente Spannungsharmonische. Während die dritte Spannungsharmonische physikalisch bedingt ein unsymmetrisches Dreiphasensystem bildet (bestehend aus Mit-, Gegen- und Nullsystem), bilden die fünfte und siebente Spannungsharmonische ein weitgehend symmetrisches Dreiphasensystem (siebente Harmonische: Mitsystem; fünfte Harmonische: Gegensystem). Die Spannungsverzerrung $THDU \approx u_{h=5}$ erreicht in den 20-kV-Netzen mehrfach bereits Werte über 4% und überschreitet in einigen Fällen (städtische Stromversorgung) zulässige Grenzwerte nach DIN EN 50160:2000-03 [2].

In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu beachten, dass Ausgleichschwingungen bei Erdschlusseintritt mit einer Frequenz von einigen 100 Hz verlaufen und somit darauf hinweisen, dass Resonanzerscheinungen im erdfehlerbehafteten Netz im Bereich der dritten bis siebenten Harmonischen nicht auszuschließen sind. Resonanzen können zur Reststromerhöhung im Fehlerfall führen, die nicht ausschließlich an Mittelspannungsnetze mit großen Erdschlussströmen ($I_{C_e} > 700$ A) gebunden ist.

Vielgestaltigkeit erschwert Vorausberechnung

Die Vielgestaltigkeit des 20-kV-Leitungsnetzes erschwert die Vorausberechnung der Oberschwingungsanteile im Reststrom $I_{RES,OS}$. Trotz der gut strukturierten prinzipiellen Netzgestaltung im 110/20-kV-Bereich (vgl. Bild 1) macht die sehr variable Gestaltung des 20-kV-Leitungsnetzes bezüglich Länge, Querschnitt und Leitungstypen der Abgänge eine treffsichere Vorausberechnung des Oberschwingungsanteils im Reststrom nur begrenzt möglich.

Eine stark vereinfachte Netzersatzschaltung soll als Kernstück des digitalen Rechenprogramms BOSES die physikalischen Zusammenhänge der Erdschlussberechnung im Oberschwingungsbereich erfassen und die Ermittlung von Ersatzgrößen ermöglichen, die aus Betriebsmitteldaten des Netzes, der Netzstruktur und der Netzlast resultieren. Für Frequenzen ab 150 Hz ($h=3$) und U_N U_h folgt unmittelbar aus Gl. 1:

$$I_{RES,OS}^2 = v^2 + d^2. \quad (3)$$

Und damit fließt fast der gesamte höherfrequente Anteil des Reststroms ausschließlich über die Fehlerstelle. Die Verstimmung

$$v = 1 - \frac{I_D}{I_{C_e}} \cdot h^{-2} \approx 1 - \frac{1}{h^2} \quad (4)$$

nimmt Werte nahe eins an. In der Erdschlussdrosselschleife fließt nur ein sehr kleiner Oberschwingungsstrom. Transformator und speisendes Hochspannungsnetz werden bisymmetrisch durch den Oberschwingungsstrom belastet und im Leitungsnetz entstehen Leiter-Erdschleifen für den Stromfluss.

Aus Bild 1 folgt die Ersatzschaltung Bild 4 für den Oberschwingungsbereich, die grundsätzlich eine Berechnung der Oberschwingungsrestströme $I_{RES,h}$ für $h=3$, $h=5$ und $h=7$ ermöglicht:

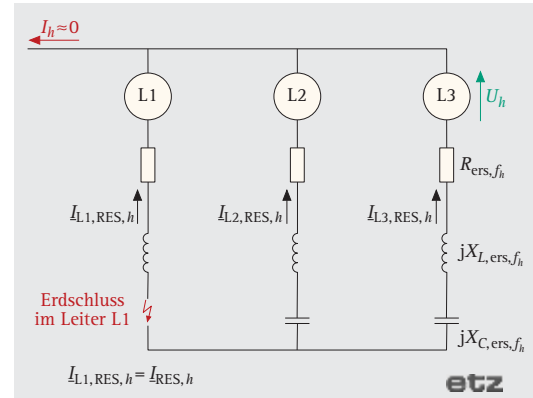


Bild 4. Vereinfachte Ersatzschaltung zur Berechnung der Oberschwingungsanteile im Erdschlussreststrom

$$I_{RES,h} = \frac{3U_h}{\sqrt{(3X_{L,ers,fh} - X_{C,ers,fh})^2 + R_{ers,fh}^2}}. \quad (5)$$

Der gesamte Oberschwingungsreststrom $I_{RES,OS}$ ergibt sich nunmehr zu:

$$I_{RES,OS} = \sqrt{\sum_h I_{RES,h}^2}. \quad (6)$$

In Gl. 5 können die Anteile $(3X_{L,ers,h} - X_{C,ers,h})$ als Verstimmung $v_{OS,fh}$ und $R_{ers,fh}$ als Dämpfung $d_{OS,fh}$ der Frequenz f_h interpretiert werden.

Computergestützte Berechnung der Oberschwingungs-Erdschlussrestströme

Die Software BOSES ermöglicht eine schnelle und ausreichend genaue Berechnung der Oberschwingungs-Erdschlussrestströme. Während

$$X_{C,ers,fh} = \frac{\sqrt{3}U_N}{I_{C_e} \cdot h} \quad (7)$$

relativ einfach bestimmbar ist, verlangt die Ermittlung von $L_{ers,fh}$ und $R_{ers,fh}$ die Kenntnis der Netzstruktur analog Bild 2 und erfordert eine zeitaufwendige Netzberechnung und Ermittlung der elektri-

Netz (nach Bild 1)	I_{C_e} in A	v in p. u.	d in p. u.	I_{RES} in A	Messwerte						Berechnung				
					u_h in %			$I_{RES,h}$ in A			$I_{RES,OS}$	$I_{RES,h}$ in A			$I_{RES,OS}$
					$h=3^*$	$h=5$	$h=7$	$h=3$	$h=5$	$h=7$	A	$h=3$	$h=5$	$h=7$	A
Ein-Transformatorbetrieb	681	0,016	0,033	25	-	1,95	0,61	-	24	2,7	36	-	27	2,5	36,8
Zwei-Transformatorbetrieb (Teilnetz 1)	287	0,01	0,044	13	0,18	1,6	0,36	2,7	15,6	7,1	21,5	2,6	17,5	4,7	22,5

*) Mitsystem: 0,18%; Gegensystem: 0,02%; Nullsystem: 0,14%

Tabelle 1. Gegenüberstellung der Berechnungs- und Messergebnisse

Formelzeichen

C_e	Erdkapazität
d	Dämpfung (50-Hz-Wert)
d_{OS, f_h}	Dämpfung bei der Frequenz f_h
f_h	Frequenz der Harmonischen h
h	Ordnungszahl einer Harmonischen (Frequenzverhältnis: $h = f_h/50$ Hz)
I	Strom (Effektivwert)
I_0	Nullstrom
I_{C_e}	kapazitiver Erdschlussstrom (Effektivwert)
I_D	Strom in der Erdschlussdrosselspule (Effektivwert)
i_h	Strom der Harmonischen h (p. u.-Wert, %-Wert)
I_h	Strom der Harmonischen h (Effektivwert)
I_{RES}	Erdschlussreststrom (Effektivwert)
$i_{RES, h}$	Erdschlussreststrom der Harmonischen h (p. u.-Wert, %-Wert)
$I_{RES, h}$	Erdschlussreststrom der Harmonischen h (Effektivwert)
$i_{RES, OS}$	Erdschlussreststrom Oberschwingungsanteil (p. u.-Wert, auf I_{C_e} bezogen)
$I_{RES, OS}$	Erdschlussreststrom Oberschwingungsanteil (Effektivwert)
$I_{RES, wirk}$	Erdschlussreststrom (Wirkanteil, Effektivwert)
v	Verstimmung (50-Hz-Wert)
v_{OS, f_h}	Verstimmung bei der Frequenz f_h
$R_D; R_{OD}$	Resistanz der Erdschlussdrosselspule; Null...
R_{ers, f_h}	Ersatzresistanz bei der Frequenz f_h
S_k	Kurzschlussleistung (minimale)
S_T	Bemessungsleistung (Transformator)
THDI	Verzerrungsfaktor des Stroms (p. u.-Wert, %-Wert)
THDU	Verzerrungsfaktor der Spannung (p. u.-Wert, %-Wert)
U	Spannung (Effektivwert)
U_0	Nullspannung
u_h	Spannung der Harmonischen h (p. u.-Wert, %-Wert)
U_h	Spannung der Harmonischen h (Effektivwert)
u_k	Kurzschlussspannung (p. u.-Wert, %-Wert)
U_N	Netznominalspannung
U_{TP}	Berührungsspannung
$X_D; X_{OD}$	Reaktanz der Erdschlussdrosselspule; Null...
X_{OT}	Nullreaktanz (Transformator)
$X_{0, Ltg}$	Nullreaktanz (Leitung)
X_{L, ers, f_h}	Ersatzresistanz (ind.) bei der Frequenz f_h
X_{C, ers, f_h}	Ersatzresistanz (kap.) bei der Frequenz f_h
ω	Kreisfrequenz (50 Hz)

schen Betriebsmitteldaten. Im Einzelnen werden mit BOSES computerunterstützt die o. g. Ersatzresistanzen und -reaktanzen ausgehend von Bild 5:

- der minimalen Kurzschlussleistung des 110-kV-Netzes,
- den elektrischen Betriebsmitteldaten unter Berücksichtigung ihrer Frequenzabhängigkeit,
- der Netzlast,
- der Leitungsstruktur im Mittelspannungsbereich sowie
- der Netzfahrweise (gekennzeichnet durch den Transformatoreinsatz, der Verstimmung v und der Dämpfung d) ermittelt und die Berechnung von $I_{RES, h}$ bzw. I_{RES} vorgenommen.

Ausblick

Die Auswertung der Gl. 5, die mithilfe von BOSES vorgenommen wurde, ergab folgende grundsätzliche Erkenntnisse für die Vorausberechnung der Erdschlussrestströme:

Die Verstimmung v_{OS, f_h} kann in Abhängigkeit von I_{C_e} und h den Wert null (Resonanz) annehmen. Der Oberschwingungsreststrom wird dann ausschließlich durch die Dämpfung d_{OS, f_h} begrenzt. Im Einzelnen wurden ermittelt:

$$\left. \begin{array}{l} h = 3 \\ h = 5 \\ h = 7 \end{array} \right\} v_{OS, f_h} = 0 \text{ bei } \begin{cases} I_{C_e} \approx 500 \text{ A} \dots 600 \text{ A} \\ I_{C_e} \approx 150 \text{ A} \dots 200 \text{ A} \\ I_{C_e} \approx 70 \text{ A} \dots 100 \text{ A} \end{cases}$$

Da die dominante Harmonische im Erdschlussstrom die fünfte ist, sind bei kleinen Netzen (I_{C_e} im Bereich 150 A bis 200 A) unter Umständen relativ hohe Restströme im Oberschwingungsbereich zu erwarten. In diesem Sinne sind städtische Versorgungsbereiche mit hoher Verzerrung der Versorgungsspannung und großer Netzlast (kleine Dämpfung) besonders kritisch zu bewerten und der

Zwei-Transformatorbetrieb ist zu beachten.

In sehr großen Netzen ($I_{C_e} > 1000$ A) ist $X_{C, ers, f_h} \cdot X_{L, ers, f_h}$. Daraus resultiert, dass der Oberschwingungsanteil im Erdschlussreststrom bei diesen Netzen kleiner wird.

Erste Vergleiche zwischen Berechnungs- und Messergebnissen (Tabelle 1) zeigen eine akzeptable Übereinstimmung und bestätigen, dass mithilfe der computergestützten Berechnungen sichere Entscheidungen getroffen werden können, in welchen Netzen Maßnahmen zur Begrenzung des Erdschlussreststroms erforderlich werden. Auf diese Weise können zeit- und kostenaufwendige Messungen drastisch reduziert werden und sind nur noch in Grenzfällen und ggf. in Vorbereitung von Abhilfemaßnahmen erforderlich (berechneter I_{RES} im Bereich von 60 A bis 70 A).

Zur Reduzierung der Erdschlussrestströme gibt es eine Vielzahl technischer Lösungen, die auf der Basis nunmehr gesicherter Berechnungsergebnisse sachkundig entschieden und hinsichtlich ihrer Realisierungskosten bewertet werden können. Infrage kommen u. a.:

- 20-kV-seitige Leitungsverbindungen zwischen den Umspannwerken,
- Erweiterung bestehender Umspannwerke um einen dritten Transformator oder Tausch der bestehenden Transformatoren gegen Dreiwicklungstransformatoren,
- Bau neuer Umspannwerke,
- Umstellung der Sternpunktbehandlung des 20-kV-Netzes auf niederohmige Sternpunktterdung (NOSPE) und
- Reduzierung des Erdschlussreststroms durch Kompensationsmaßnahmen.

Literatur

- [1] DIN VDE 0101 (VDE 0101):2000-01 Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV. Berlin·Offenbach: VDE VERLAG
- [2] DIN EN 50160:2000-03 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. Berlin: Beuth
- [3] Stade, D.; Schau, H.: Influence of voltage harmonics on single-phase earth fault currents. Session D2, Report D-24 in Proceedings of the First International Conference on Power Quality PQA '91 vom 15.10.–18.10.1991 in Paris/ Frankreich. Pleasant Hill, Kalifornien/USA: EPRI, 1992 (Schriftenreihe EPRI-TR-101260)
- [4] Brand, E.; Montebaur, A.; Schwarz, J.: Bestimmung des Erdschlussreststroms mittels Spannungsqualität im MS-Netz. etz Elektrotech. + Autom. 127 (2006) H. 8, S. 38–41 (ISSN 0948-7387)

An den Untersuchungen haben folgende Firmen mitgewirkt: E.ON edis Netz GmbH, Fürstenwalde (Spree), KEMA IEV – Ingenieurunternehmen für Energieversorgung GmbH, Dresden und H. Kleinknecht GmbH & Co. KG, Ilmenau. ■



Bild 5. Eingabe der Netzdaten im Programm BOSES