

Kritikalität der Parallelführung eines 110-kV-Netzes mit einem Mittelspannungs-Netz und der Einfluss der Nichtlinearität der Petersenspule

Elisabeth Hufnagl*, Lothar Fickert, Wolfgang Leitner

Institut für Elektrische Anlagen / TU Graz, Inffeldgasse 18/I, 8010 Graz, +43 316/873-7552,
elisabeth.hufnagl@tugraz.at, www.ifea.tugraz.at

Kurzfassung: Von einer Parallelführung eines Mittelspannungs-Netzes mit einem 110-kV-Netz auf einem gemeinsamen Gestänge über die Länge von wenigen Kilometern ausgehend, ergibt sich basierend auf der Möglichkeit von Sonderschaltzuständen (welche zum Betrieb eines Klein-Netzes führen, das mit einer Petersenspule gelöscht wird) die Frage, ob es aufgrund der Unsymmetrien in Zusammenhang mit der Parallelführung beider Systeme im Falle eines 110-kV-Erdschlusses zu unzulässigen Spannungsüberhöhungen in einem solchen Klein-Netz kommen kann.

Mit Bezug auf diese Fragestellung wird untersucht, wie sich die Unsymmetrien des Netzes im fehlerfreien Zustand auf die Verlagerungsspannung und die resultierenden Leiter-Erde-Spannungen des unterlagerten Mittelspannungs-Netzes im stationären Betrieb auswirken. In weiterer Folge wird auch der Einfluss der unsymmetrischen Leiteranordnung unter Berücksichtigung eines möglichen Erdschlusses im 110-kV-Netz auf die Leiter-Erde-Spannungen des Mittelspannungs-Netzes untersucht, wobei auch denkbare Doppelerdschluss-Varianten (mit gemeinsamen Fußpunkt) analysiert werden.

Abschließend wird das Potential der Reduktion der Verlagerungsspannung (auf der Mittelspannungs-Seite) im Resonanzfall – basierend auf der Nichtlinearität der Löserspule untersucht und bewertet.

Keywords: Erdschluss, Sternpunktbehandlung, Petersenspule, Parallelführung

1 Ermittlung der Systemparameter

Um den Einfluss der Unsymmetrie auf die Verlagerungsspannung am Sternpunkt des Mittelspannungs-Netzes zu ermitteln, müssen zunächst die Koppelkapazitäten zwischen den beiden Spannungssystemen für den parallelgeführten Leitungsabschnitt sowie die jeweils wirksamen Eigenkapazitäten bestimmt werden. Hierfür erfolgt eine Analyse des Mastkopfbildes (Abbildung 1) wonach die Kapazitäten gemäß der Leiterseilanordnung berechnet werden.

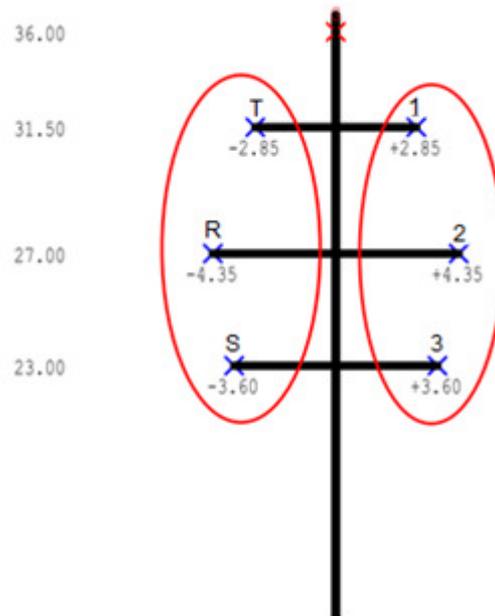


Abbildung 1: Untersuchtes Mastkopfbild

2 Ermittlung der Verlagerungsspannung

Für die Ermittlung der Verlagerungsspannung wird zunächst ein linearer numerisch-analytischer Ansatz gewählt, welcher in 2.1 erläutert wird. Dieser ist für alle Erdschluss-Betrachtungen hinreichend und mit vertretbarem Aufwand lösbar, sofern die Petersenspule in einem linearen Betriebspunkt betrieben wird und keine perfekte Resonanzabstimmung vorliegt. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, muss das Sättigungsverhalten der Löschspule berücksichtigt werden, welches unter anderem durch einen spannungsabhängigen Verlustwiderstand charakterisiert wird. Um die Verlagerungsspannung am Sternpunkt des Mittelspannungs-Netzes zu ermitteln, wird das in 2.2 beschriebene Vorgehen gewählt.

2.1 Numerisch-Analytische Lösung

Um die an der Parallelschaltung aus L_{NG} und R_{NG} abfallende Verlagerungsspannung U_{NE} zu bestimmen, wird ein auf dem in Abbildung 2 dargestellten Schaltbild basierendes Gleichungssystem aufgestellt. Die Leiter-Erde-Spannungen des 110-kV-Netzes und die Leiter-Sternpunkt-Spannungen des Mittelspannungs-Netzes werden bezüglich Betrag und Winkel vorgegeben, wodurch der Spannungsstern diverser Fehlerszenarien definiert und als Ausgangswert für die Berechnung der Verlagerungsspannung an der Löschspule des Mittelspannungs-Netzes herangezogen werden kann.

Zunächst werden die durch Unsymmetrie bedingten Phasenströme mit Hilfe von Knotengleichungen berechnet. Anschließend wird die resultierende Spannung U_{NE} ermittelt. Die in Abbildung 2 eingezeichneten Kapazitäten gegen Erde (G) entsprechen der Summe der Kapazitäten gegen das Erdseil und der Kapazitäten gegen Erde.

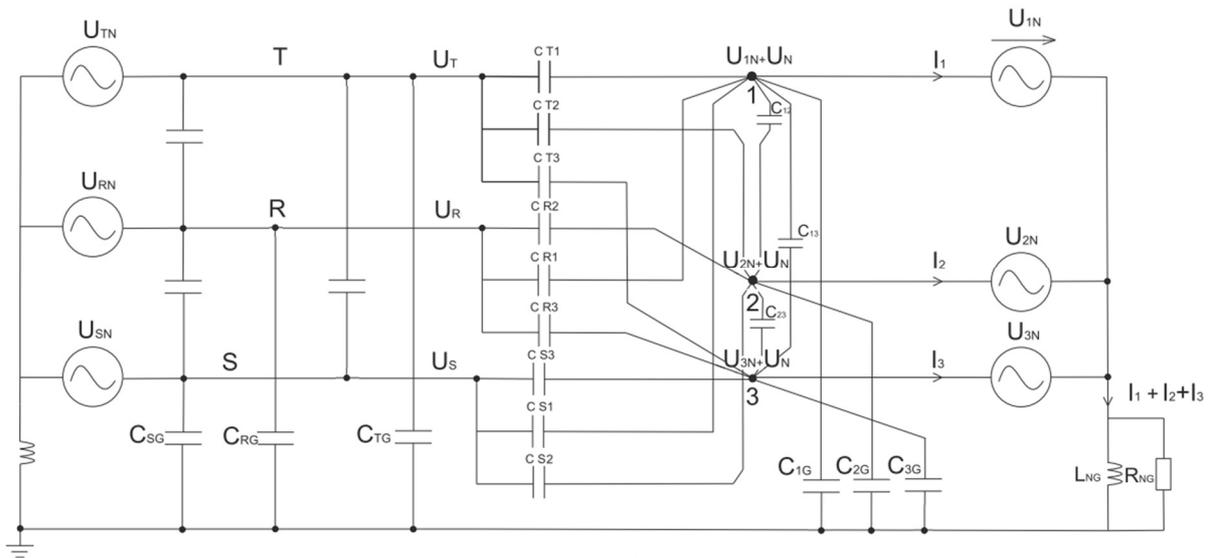


Abbildung 2: Verbindung des 110-kV-Leitungssystems mit dem Mittelspannungs-Leitungssystem über Koppelkapazitäten

2.1.1 Einphasiger Erdschluss

Bedingt durch die innere Unsymmetrie wird ein kapazitiver Strom hervorgerufen, welcher einerseits vom Spannungsstern des 110-kV-Systems und des Mittelspannungs-Systems abhängt, andererseits aber auch von den durch die jeweilige Leiterseilanordnung gegebenen Koppelkapazitäten.

Ein einphasiger Erdschluss führt im Allgemeinen zu einer Anhebung der Leiter-Erde-Spannungen der gesunden Phasen auf deren $\sqrt{3}$ -fachen Wert, also auf den Betrag der verketteten Spannung, und zu einer Verzerrung des Spannungssternes durch die damit einher gehende Änderung der Winkel. Der Sternpunkt verschiebt sich um eine Verlagerungsspannung U_N , welche als Indikator für die durch die Koppelkapazitäten hervorgerufenen Ströme betrachtet werden kann.

In Abbildung 3 ist der Spannungsstern der 110-kV-Seite für den Fall eines Erdschlusses in Phase T unter der Berücksichtigung einer Restspannung von 1 kV dargestellt. Als Grundlage für die Berechnung dienen die wirkenden Koppelkapazitäten, welche auf eine Leiterlänge von wenigen Kilometern bezogen werden. Der Spannungsstern der Mittelspannungs-Seite ist um 180° gedreht, da der Transformator die Schaltgruppe YNyn6 hat. Um die vom Erdschluss betroffene Phase sowie die resultierende Mittelspannungs-Verlagerungsspannung sichtbar zu machen, wurden diese stark vergrößert.

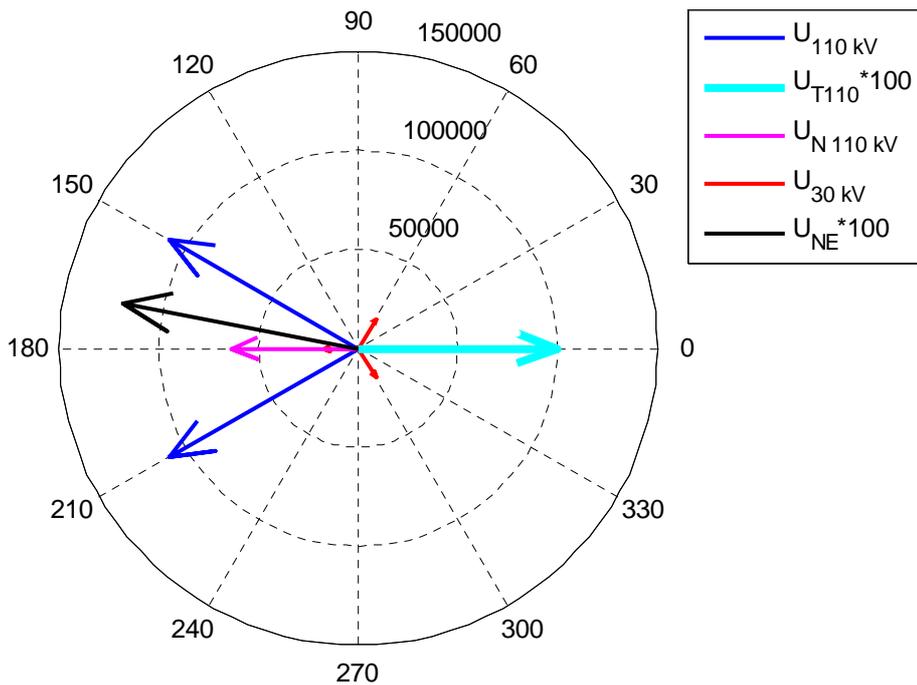


Abbildung 3: Spannungsstern der 110-kV-Seite bei Erdschluss in der Phase T (Restspannung 1 kV)

Die Verlagerungsspannung der Mittelspannungs-Seite (U_{NE}) beträgt 1,20 kV bei einem Winkel von rund 169° . Dies liegt ausreichend weit unter der Phasenspannung und stellt somit keine außergewöhnliche Anforderung für die Petersenspule dar.

Diese Untersuchung wurde für den einphasigen Erdschluss in der Phase S und der Phase R durchgeführt. Ein Erdschluss in Phase T erweist sich hierbei als Worst-Case, bei dem die höchste Verlagerungsspannung U_{NE} erreicht wird.

2.1.2 Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung

Während sich beim zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung (unter der Annahme eines gemeinsamen Fußpunktes) die Leiter-Erde-Spannungen der betroffenen Phasen reduzieren, erhöht sich die Spannung der gesunden Phase hin zum um die Verlagerungsspannung U_N verschobenen Sternpunkt. Die Auswirkungen dieses Fehlerfalles auf die eingekoppelten kapazitiven Ströme werden im Folgenden untersucht.

In Abbildung 4 ist der Spannungsstern der 110-kV-Seite für den Fall eines Doppelerdschlusses der Phasen R und S im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung dargestellt.

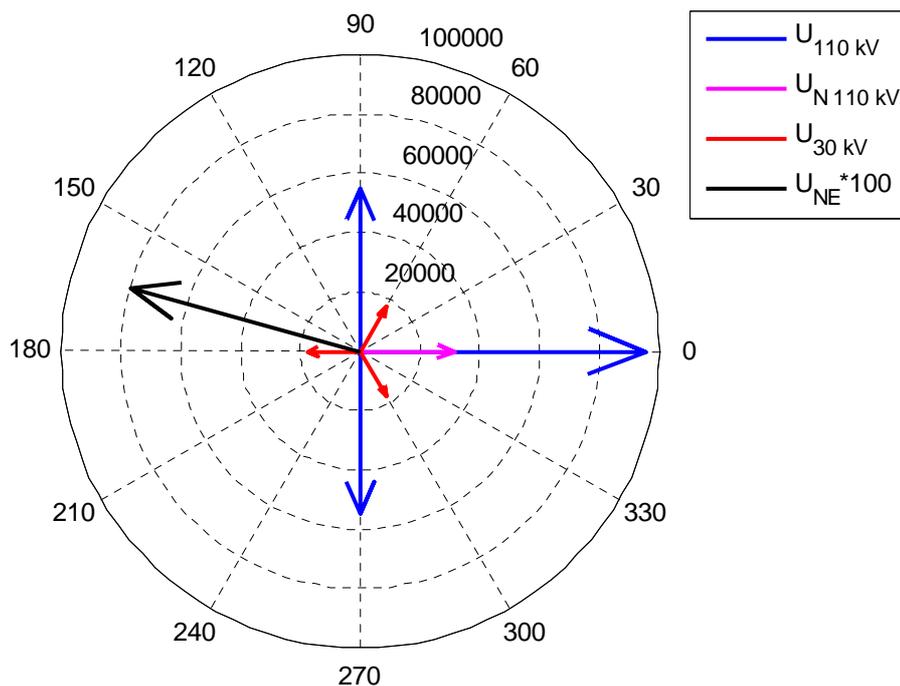


Abbildung 4: Spannungstern für zweipoligen Kurzschluss (Phasen S und R) mit Erdberührung

Diese Untersuchung wurde für den Doppel-Erdschluss mit gemeinsamen Fußpunkt der Phasen R mit T sowie T mit S durchgeführt. Die Kombination Phase R mit T erweist sich hierbei als Worst-Case, bei dem die höchste Verlagerungsspannung U_{NE} von 1,03 kV erreicht wird.

2.1.3 Ergebnisse

Die maximale, durch kapazitive Einkopplungen, im Fehlerfall zu erwartende Verlagerungsspannung auf der Mittelspannungs-Seite U_{NE} beträgt 1,2 kV, für den Fall eines einphasigen Erdschlusses der Phase T auf der 110-kV-Seite.

In Tabelle 1 werden alle auftretenden Ströme I_{NE} sowie die daraus resultierenden Verlagerungsspannungen U_{NE} auf der Mittelspannungs-Seite für die jeweiligen Fehler auf der 110-kV-Seite noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse für den linearen Betrieb der Petersenspule

		I _{NE}	U _{NE}
		A	kV
Einpoliger Erdschluss	T-E	0,21	1,20
	R-E	0,15	0,88
	S-E	0,13	0,77
Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung	T-R-E	0,18	1,03
	R-S-E	0,14	0,80
	S-T-E	0,17	0,98

2.2 Sonderfall Resonanz

Die Problematik des Sonderfalles Resonanz besteht in der Möglichkeit eines ungünstigen Schaltzustandes des Netzes, welcher zu einer Parallelresonanz führt. Träte dieser Schaltzustand im ungesättigten Fall auf, würde durch die steigende Spannung der Resonanzpunkt durch die eintretende Sättigung wieder verlassen. Gesucht ist nun eine Netzkapazität die, im Falle des nichtlinearen Verhaltens der Petersenspule, die Reaktanz der Löschspule aufhebt. Wenn sich die Ströme zwischen Spule und Netzkapazität aufheben wirkt nur noch der Verlustwiderstand der Petersenspule, welcher wiederum von der anliegenden Spannung abhängt. Unter Berücksichtigung der Nichtlinearität wird die (größtmögliche) Verlagerungsspannung U_{NE} der Mittelspannungs-Seite gesucht, welche vorerst mit U_{NE}* bezeichnet wird. Das Sättigungsverhalten der Petersenspule führt dazu, dass der wirksame Verlustwiderstand für die jeweilige Spannung bestimmt werden muss, um diesen für einen Spannungsteiler mit der Koppelkapazität C_K verwenden zu können.

In Abbildung 5 sind alle Elemente der beschriebenen Problemstellung dargestellt. In Formel (1) ist der vollständige Spannungsteiler für diese Anordnung gegeben.

$$\frac{U_{NE}}{U_Q} = \frac{|Z_{parallel}|}{\sqrt{|Z_{parallel}|^2 + X_K^2}} \quad (1)$$

$$Z_{parallel} = \frac{1}{\frac{1}{j \omega \cdot L_{Pet}} + j \omega \cdot C_{Netz} + \frac{1}{R}} \quad (2)$$

X_K wird nach (3) berechnet.

$$X_K = \frac{1}{\omega \cdot C_K} \quad (3)$$

Anhand dieses Spannungsteilers kann nun bei Variation der Netzkapazität X_C die Resonanzkurve für das lineare Verhalten der Petersenspule berechnet werden. Für die Berechnung des Verlaufs der Resonanzkurve nach Überschreiten der Kniespannung muss das Verhalten des spannungsabhängigen Verlustwiderstandes der Petersenspule ermittelt werden. Es gilt weiterhin (1), wobei R in (2) zu $R(U_{NE}^*)$ und U_{NE} in (1) mit Überschreiten der Kniespannung zu U_{NE}^* wird.

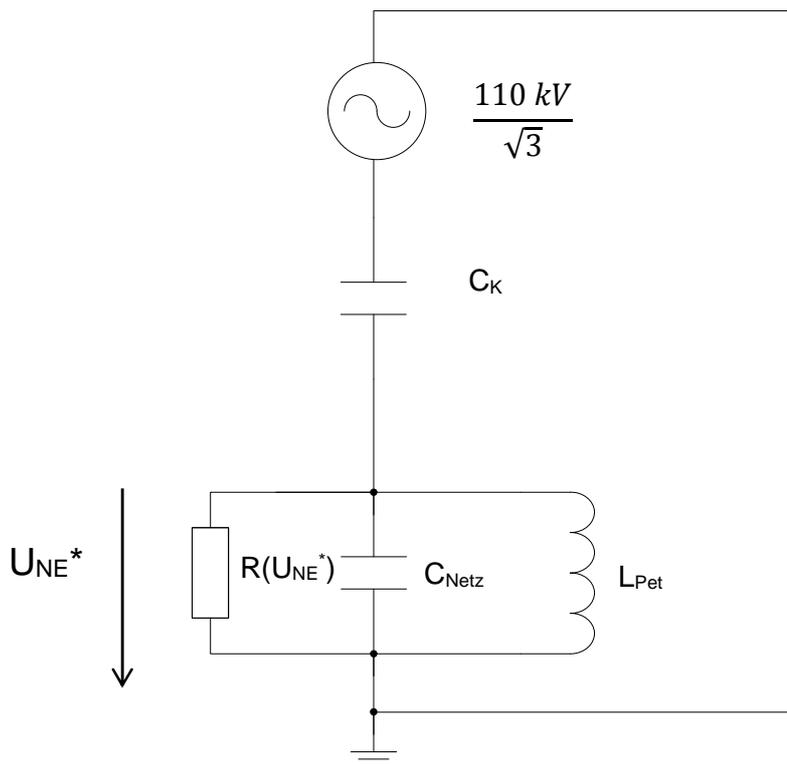


Abbildung 5: Parallelschwingkreis mit Koppelkapazität C_K

2.2.1 Bestimmung der Koppelkapazität C_K

Im Nullsystem können die Koppelkapazitäten zwischen dem 110-kV-System und dem Mittelspannungs-System aufgrund ihrer Verschaltung addiert werden (siehe Abbildung 6). Im konkreten Fall ergibt sich eine Koppelkapazität $C_K = 18,89$ nF.

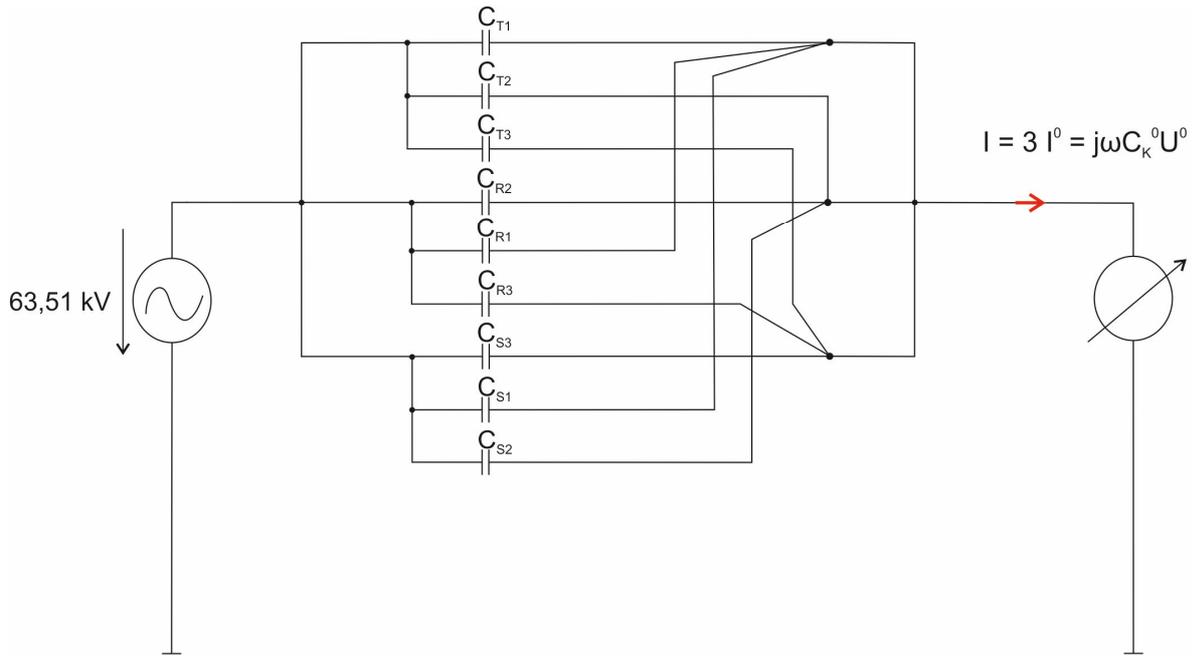


Abbildung 6: Bestimmung der Koppelkapazität C_K im Nullsystem

2.2.2 Bestimmung des spannungsabhängigen Verlustwiderstandes $R(U_{NE}^*)$

Da bei Resonanz erwartungsgemäß die größtmögliche Verlagerungsspannung auftritt, wird dieser Punkt bestimmt. Die Induktivität der Petersenspule und die Netzkapazität heben sich auf, womit ein Spannungsteiler, bestehend aus der Koppelimpedanz X_K und $R(U_{NE}^*)$, verbleibt (siehe Abbildung 7). Für die Berechnung des Widerstandes liegen der Spulenstrom sowie die Verlustleistung für ausgewählte Spannungen U_{NE}^* vor. Gesucht ist die Spannung U_{NE}^* , für die (4) gilt.

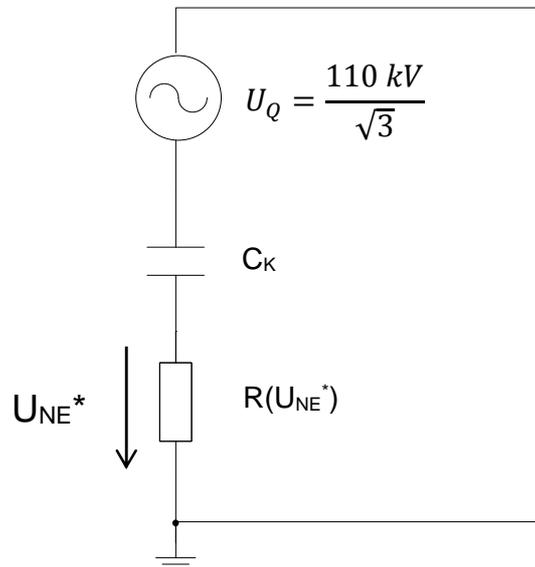


Abbildung 7: Spannungsteiler unter der Annahme einer Parallelresonanz der Petersenspule mit der Netzkapazität

$$U_{NE}^* - U_Q \cdot \frac{R(U_{NE}^*)}{\sqrt{R(U_{NE}^*)^2 + X_K^2}} = 0 \quad (4)$$

Eine Berechnung mit den vom Spulen-Hersteller bekannt gegebenen Werten zeigt, dass Gleichung (4) zwischen $U_{NE}^* = 21,00 \text{ kV}$ und $U_{NE}^* = 22,52 \text{ kV}$ erfüllt ist. Um die Verlagerungsspannung genauer zu bestimmen, wurden Betriebspunkte interpoliert. Die so ermittelte Verlagerungsspannung $U_{NE}^* = 21254,57 \text{ V}$ erfüllt oben angegebene Gleichung. Mit dieser Spannung geht im konkreten Fall eine abzuführende Verlustleistung von 7,5 kW einher, welche eine große thermische Beanspruchung der Löschspule darstellt.

3 Fazit

Die Unsymmetrie der vorliegenden Netzkonfiguration führt im fehlerfreien Betrieb zu keiner unzulässigen Verlagerungsspannung am Sternpunkt des Mittelspannungs-Netzes.

Im Fall eines Erdschlusses wird über die Kopplung der Nullkapazitäten ein (kapazitiver) Strom im als gesund angenommenen Mittelspannungs-Netz hervorgerufen. Da diese Kapazitäten sehr klein sind, handelt es sich hier um einen Strom von maximal 0,21 A, der über eine Parallelschaltung der Leiter-Erde-Kapazitäten des gesamten Netzes mit der Petersenspule des Mittelspannungsnetzes gegen Masse abfließen muss. Die in diesem Fall erreichten Verlagerungsspannungen liegen jeweils deutlich unter der Kniespannung der Löschspule und sind somit akzeptierbar.

Als bedenklich wird der Fall einer ungewollten Parallelresonanz betrachtet, da in diesem Fall eine signifikante Verlustleistung von der Spule abgeführt werden muss, wobei die Erwärmungszeitkonstanten sehr klein sind (wenige Minuten). Die Erwärmung des Transformatorbleches kann bei andauernden Sättigungsbetrieb sehr hohe Werte annehmen und somit schwere Folgeschäden verursachen.

Es sollte daher entweder eine Parallelführung vermieden werden, oder der Fall einer Parallelresonanz der Netzkapazitäten mit der Löschspule des Mittelspannungsnetzes unbedingt betrieblich ausgeschlossen werden.

Man kann zeigen, dass der eingeprägte Strom durch die Höhe der Verlagerungsspannung (U_{NE}) des 110-kV-Netzes bestimmt wird.

Im Fall eines Doppelerdschlusses (mit verteilten Fußpunkten) ist die Verlagerungsspannung des 110-kV-Netzes nicht größer als die Phasenspannung. Daher wird dieser Fehlerfall im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung durch den oben diskutierten Erdschlussfall abgedeckt.

Die maximale, durch kapazitive Einkopplungen, im Fehlerfall zu erwartende Verlagerungsspannung auf der Mittelspannungs-Seite U_{NE} beträgt 1,2 kV, für den Fall eines einphasigen Erdschlusses der Phase T auf der 110-kV-Seite.