

Info-Brief Nr. 12

E-Spulen Regelung: Resonanzkurvenverfahren – Ortskurvenverfahren

In „gelöschten Netzen“ wird der Strom über die Fehlerstelle mit Hilfe einer Erdschlusslöschspule (E-Spule) minimiert. Hierzu wird die E-Spule bereits im gesunden Netzbetrieb, d.h. ohne Erdschluss so eingestellt, dass im Falle eines Erdschlusses der kapazitive Anteil des Stromes über die Fehlerstelle durch einen induktiven Strom kompensiert wird. Das folgende Bild 1 zeigt das Netz im Falle eines einpoligen Erdschlusses in der Phase L1.

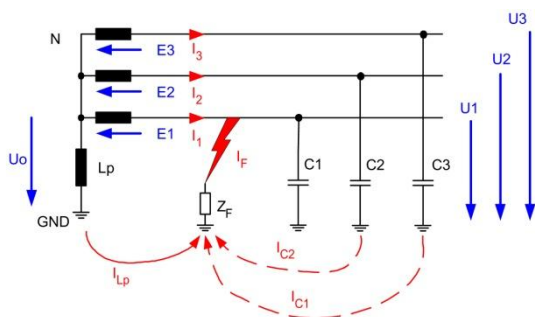


Bild 1 Prinzip der Erdschlusslöschung

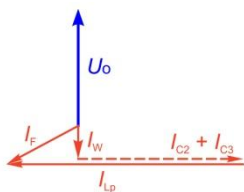


Bild 2 Zeigerdiagramm der Ströme

L_p	E-Spule (Petersenspule)
C_1, C_2, C_3	Leitungskapazitäten der Phasen L1 bis L3
Z_F	Übergangswiderstand an der Fehlerstelle
N	Sternpunkt des Transformators
E_1, E_2, E_3	Phasenspannungen
U_0	Verlagerungsspannung
I_{C1}, I_{C2}	Kapazitive Ströme der beiden gesunden Phasen
I_{LP}	Induktiver Kompensationsstrom durch die E-Spule über die Fehlerstelle
I_W	Wirkanteil
I_F	Strom über die Fehlerstelle

Die Aufgabenstellung der E-Spulen Regelung besteht nun darin, die E-Spule bereits im gesunden Netzbetrieb auf den gewünschten Wert einzustellen. Für die Regelung stehen mehrere Methoden zu Verfügung, wobei das Ersatzschaltbild für die Resonanzverfahren und das Ortskurvenverfahren ohne die Verwendung von symmetrischen Komponenten hergeleitet werden.

Vereinfachtes Ersatzschaltbild

Das vereinfachte Ersatzschaltbild soll das Netz für den Bereich vom Betriebszustand „gesundes Netz“ bis zum Betriebszustand „satter Erdschluss“ beschreiben. Zunächst werden für eine einfachere Schreibweise die Kapazitäten des Netzes und die Induktivität der E-Spule durch ihre komplexen Leitwerte (Scheinleitwerte bzw. Admittanzen) ersetzt. Es wird dabei angenommen, dass die kapazitive Unsymmetrie bzw. ohmsche Unsymmetrie im Fall eines satten Erdschlusses nur in einer Phase vorhanden ist:

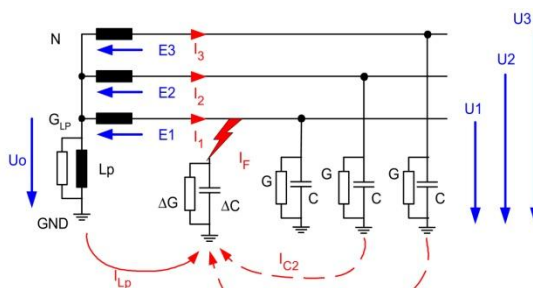


Bild 3 Dreiphasiges Ersatzschaltbild

G_{LP}	Wirkleitwert der Verluste der E-Spule
L_p	Induktivität der E-Spule
B_{LP}	Blindleitwert der E-Spule
C	Durchschnittliche Erdkapazität der drei Phasen $C = (C_1 + C_2 + C_3) / 3$
B_C	Blindleitwert von C
ΔC	Kapazitive Unsymmetrie
B_C	Blindleitwert von C
G	Durchschnittlicher Ableit-Wirkleitwert der drei Phasen $G = (G_1 + G_2 + G_3) / 3$
ΔG	Ohmsche Unsymmetrie

$$Y_{LP} = G_{LP} + \frac{1}{j\omega L_p} = G_{LP} - j B_{LP}$$

$$Y_1 = (G + \Delta G) + j\omega(C + \Delta C) = (G + \Delta G) + j(B_C + \Delta B_C)$$

$$Y_2 = G + j\omega C = G + j B_C$$

$$Y_3 = G + j\omega C = G + j B_C$$

Für den Sternpunkt N des Trafos kann die folgende Knotengleichung aufgestellt werden:

$$\underline{I}_{LP} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3$$

Wir regeln das.

Werden die Ströme aus den folgenden Maschengleichungen

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_{LP} &= \underline{I}_{LP} \\ (\underline{E}_1 - \underline{U}_0) \cdot \underline{Y}_1 &= \underline{I}_1 \\ (\underline{E}_2 - \underline{U}_0) \cdot \underline{Y}_2 &= \underline{I}_2 \\ (\underline{E}_3 - \underline{U}_0) \cdot \underline{Y}_3 &= \underline{I}_3 \end{aligned}$$

in die Knotengleichung für I_{LP} eingesetzt, so ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_{LP} = (\underline{E}_1 - \underline{U}_0) \cdot \underline{Y}_1 + (\underline{E}_2 - \underline{U}_0) \cdot \underline{Y}_2 + (\underline{E}_3 - \underline{U}_0) \cdot \underline{Y}_3$$

Wird angenommen, dass ein symmetrisches Drehstromnetz vorliegt, so können die Phasenspannungen E_2 und E_3 als um 120 Grad gedrehte Spannungen der Phase E_1 aufgefasst werden. Diese Drehung um 120 Grad kann mit dem komplexen Operator a beschrieben werden:

$$a = 1e^{-j120^\circ}$$

Die Spannungen E_2 und E_3 werden damit:

$$\begin{aligned} \underline{E}_2 &= a^2 \underline{E}_1 \\ \underline{E}_3 &= a \underline{E}_1 \end{aligned}$$

Außerdem gilt, dass die Summe der drei Spannungen Null ist:

$$0 = \underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3 = \underline{E}_1 \cdot (1 + a^2 + a)$$

Da E_1 der Phasenspannung entspricht und ungleich 0 ist, gilt weiteres:

$$0 = 1 + a^2 + a$$

Werden die Spannungen E_2 und E_3 in der obigen Gleichung $\underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_{LP} = \dots$ ersetzt und die Koeffizienten zusammengefasst, so ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\underline{U}_0 \cdot \underline{Y}_{LP} = -\underline{U}_0 \cdot (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3) + \underline{E}_1 \cdot (\underline{Y}_1 + a^2 \underline{Y}_2 + a \underline{Y}_3)$$

bzw. nach Umformung die Spannungsteiler-Formel

$$\frac{\underline{U}_0}{\underline{E}_1} = \frac{\underline{Y}_1 + a^2 \underline{Y}_2 + a \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_{LP}}$$

Werden Teile der Gleichung wieder in ihrem vollen Ausdruck betrachtet, so ergeben sich die folgenden Formeln:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_z &= \underline{Y}_1 + a^2 \underline{Y}_2 + a \underline{Y}_3 \\ &= (G + j\omega C) \cdot (1 + a^2 + a) + \Delta G + j\omega \Delta C \\ &= \Delta G + j\omega \Delta C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{n1} &= \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 \\ &= (3G + \Delta G) + j\omega \cdot (3C + \Delta C) \end{aligned}$$

Werden diese Scheinleitwerte (Admittanzen) und Y_{LP} wieder in die Spannungsteiler-Formel eingesetzt und die Koeffizienten zusammengefasst, so ergibt sich der folgende Ausdruck:

$$\frac{\underline{U}_0}{\underline{E}_1} = \frac{\Delta G + j\omega \Delta C}{(3G + \Delta G + G_{LP}) + j\omega \cdot (3C + \Delta C) - \frac{j}{\omega L_p}}$$

Der Koeffizientenvergleich mit der Spannungsteiler-Formel

$$\frac{\underline{U}_0}{\underline{E}_1} = \frac{Y_u}{Y_u + Y_w + j \cdot (B_C - B_L)} \quad \text{ergibt:}$$

$Y_u = \Delta G + j\omega \Delta C$	Unsymmetrie
$Y_w = 3G + G_{LP}$	Wirkanteil des Leitwertes
$B_C = \omega 3C$	Kapazitiver Leitwert
$B_L = \frac{1}{\omega L_p}$	Induktiver Leitwert

Damit kann das folgende einfache Ersatzschaltbild gezeichnet werden.

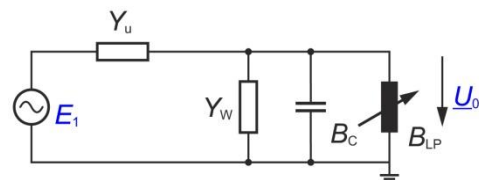


Bild 4 Einfaches einphasiges Ersatzschaltbild

Dieses Ersatzschaltbild beschreibt die Erdschlusslöschung sowohl im „gesunden Betrieb“ als auch im „Erdschlussfall“. Im gesunden Netz ist der komplexe Leitwert der Unsymmetrie Y_u sehr klein, d.h. die Unsymmetrie ist als Impedanz betrachtet sehr hochohmig. Im Erdschlussfall hingegen wird G sehr groß so dass ωC vernachlässigt werden kann. Dies entspricht einem niederohmigen Erdschluss.

Wird bei konstantem Netzzustand ausgehend von der Gleichung

$$\frac{\underline{U}_0}{\underline{E}_1} = \frac{Y_u}{Y_u + Y_w + j \cdot (B_C - B_L)}$$

die Stellung der E-Spule und somit des Blindleitwertes B_L verändert, so ändert sich das Spannungsteilverhältnis bezogen auf die Phasenspannung E_1 . Wird der Betrag der Verlagerungsspannung über der Spulenstellung aufgetragen, so erhält man die „Resonanzkurve“.

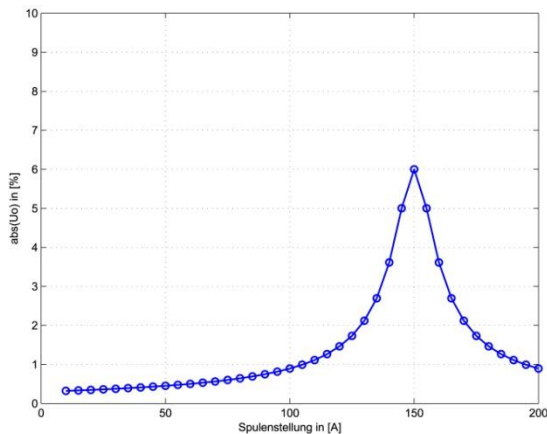


Bild 5 Resonanzkurve mit linearem U_o

Die Verlagerungsspannung ist am größten, wenn sich die Blindleitwerte im Nenner aufheben. In diesem Fall ist das System abgestimmt. In den anderen Fällen addiert sich entweder ein kapazitiver oder induktiver Anteil, so dass die Verlagerungsspannung kleiner wird.

In der Praxis wird die Verlagerungsspannung U_o meist logarithmisch aufgetragen, um auch kleine Werte von U_o bzw. dessen Änderungen zu erkennen.

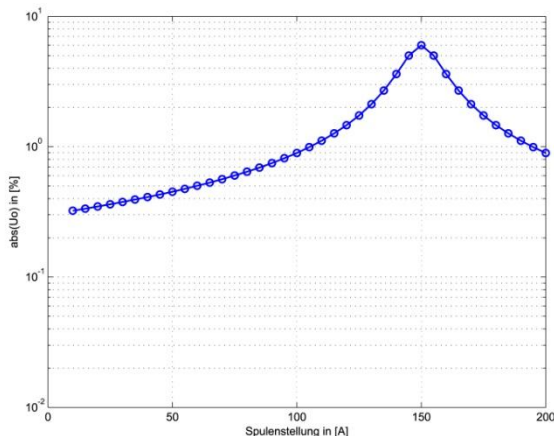


Bild 6 Resonanzkurve mit logarithmischem U_o

Die Induktivität der E-Spule wird üblicherweise nur indirekt und zwar in [A] angegeben. In der Praxis interessiert nicht die Induktivität, sondern welcher Löschstrom im Falle eines satten Erdschlusses durch die E-Spule zur Verfügung gestellt wird. Aus diesem Grund wird die Anzeige der E-Spulenstellung in [A] geeicht.

Der tatsächlich über die E-Spule fließende Strom ist im Falle eines Erdschlusses vom Fehlerwiderstand abhängig und ist im Falle eines hochohmigen Erdschlusses wesentlich kleiner.

Eine andere Darstellung der Resonanzkurve ergibt sich, wenn die Verlagerungsspannung U_o im linearen Maßstab nach Betrag und Winkel aufgetragen wird. In diesem Fall erhält man die Ortskurve von U_o . Der Winkel von U_o bezieht sich auf die Phasenspannung E_1 , die jener Phasenspannung entspricht, in der die Unsymmetrie angenommen wurde.

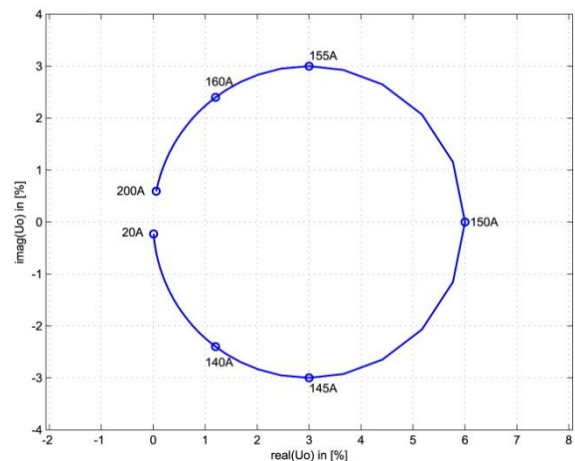


Bild 7 Ortskurve der Verlagerungsspannung U_o

In der Ortskurvendarstellung ist die Spulenposition selbst nicht direkt erkennbar. Die Spulenposition ist nur als Parameter der einzelnen Punkte verfügbar. In der obigen Darstellung wurde bei einigen Punkten die zugehörige Spulenstellung hinzugefügt.

Die Resonanzkurve bzw. Ortskurve kann unter anderem auch durch die folgenden Parameter eindeutig beschrieben werden:

- U_{res} Maximum der Verlagerungsspannung U_o im Resonanzpunkt
- I_{res} Spulenstellung, bei der das Resonanzmaximum U_{res} der Verlagerungsspannung U_o auftritt.
- d Dämpfung des Resonanzkreises

Die Dämpfung eines Schwingkreises ist durch die folgende Gleichung definiert:

$$d = \frac{\omega L}{R} = \frac{\frac{|E_1|}{I_{res}}}{\frac{|E_1|}{|I_w|}} = \frac{|I_w|}{|I_{res}|}$$

Der Wert der Dämpfung bzw. der zu erwartende Wirkstrom im Falle eines satten Erdschlusses können direkt aus der Resonanzkurve ermittelt werden. Dazu muss jene Spulenstellung I_d gesucht werden, bei der das Verhältnis des Betrages der Verlagerungsspannung auf den Wert

$$\frac{U_o}{U_{res}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$
 zurückgeht.

Begründung:

Allgemein gilt für U_o :

$$\underline{U_o} = \underline{E_1} \frac{Y_u}{Y_u + Y_w + j\Delta B} = E_1 \frac{Y_u}{Y_u + Y_w} \frac{1}{1 + j \frac{\Delta B}{Y_u + Y_w}}$$

Wir regeln das.

Bei idealer Abstimmung ist $\Delta B = 0$, so dass für U_{res} im Resonanzpunkt die folgende Gleichung gilt:

$$U_{res} = E1 \frac{Y_u}{Y_u + Y_w}$$

Eingesetzt in die obige Gleichung liefert:

$$\frac{U_o}{U_{res}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{1 + j \frac{\Delta B}{Y_u + Y_w}}$$

Daraus folgt, dass in diesem Punkt der Betrag der Fehlabbildung des Blindleitwertes ΔB gleich dem Betrag des Wirkanteiles ($Y_w + Y_u$) ist. Im betrachteten Punkt ist $Y_u \ll Y_w$, sodass Y_u vernachlässigt werden darf. Werden nun die Leitwerte mit Hilfe der Phasenspannung $E1$ auf Ströme umgerechnet, so erhält man

$$\Delta I = E1 \cdot \Delta B = Id - I_{res} \quad \text{und}$$

$$I_w = E1 \cdot Y_w = d I_{res}$$

Außerdem gilt $\Delta I / I_w = 1$.

Nach Division der Gleichungen und Multiplikation mit d auf beiden Seiten folgt:

$$d \frac{\Delta B}{Y_w} = d = \frac{\Delta I}{I_{res}} = \frac{Id - I_{res}}{I_{res}}$$

Die Dämpfung beschreibt also einerseits ob die Resonanzkurve flach oder steil ist und gibt andererseits den minimalen Strom über die Fehlerstelle im Falle eines satten Erdschlusses an. Eine flache Resonanzkurve bedeutet daher eine große Dämpfung und einen großen Wirkstrom über die Fehlerstelle. Eine steile Kurve hingegen bedeutet eine kleine Dämpfung und einen kleinen Wirkstrom über die Fehlerstelle.

In der Ortskurvendarstellung sind die entsprechenden Stromwerte bei einem Winkel von $\pm 45^\circ$ zu finden. In diesen Punkten ist der Betrag von U_o nur mehr $1/\sqrt{2}$ bezogen auf U_{res} .

Die folgenden Bilder zeigen das gleiche Netz mit einer stärkeren Dämpfung und gleichem Resonanzpunkt (U_{res} , I_{res}) wie vorher:

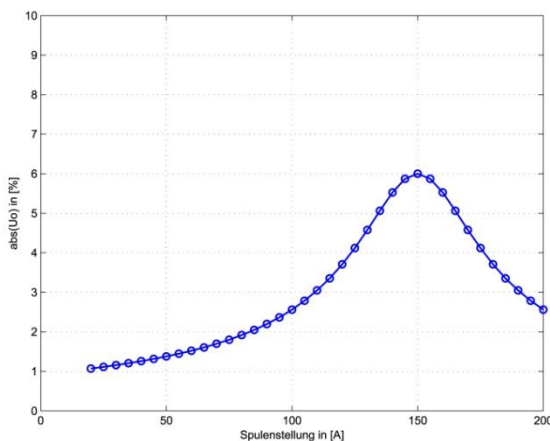


Bild 8 Resonanzkurve mit $lw = 25A$

Es ist erkennbar, dass die Resonanzkurve wesentlich flacher verläuft. Die Dämpfung $d=25A$ ist bei einer Verlagerungsspannung von 4 % direkt ablesbar.

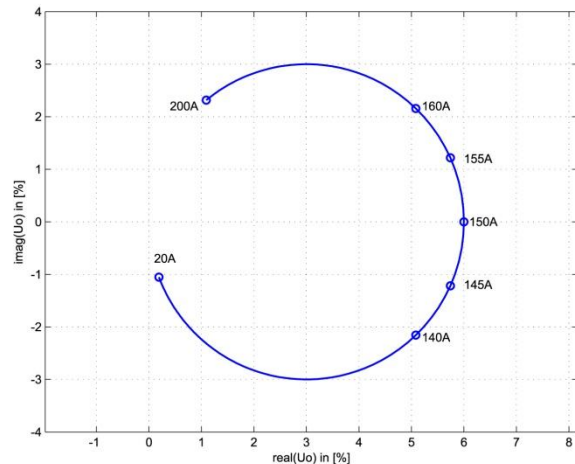


Bild 9 Ortskurve von U_o mit $lw = 25A$

In der Ortskurvendarstellung ist erkennbar, dass die Winkeländerung zwischen den einzelnen Spulenstellungen wesentlich geringer ist.

Vor- und Nachteile:

Die Realisierung der Messung des Betrages einer Spannung, wie es bei den Resonanzkurvenverfahren verwendet wird, ist relativ unkritisch und kann bis in den Bereich von einigen mV mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden. Da die Regelung der Erdschlusslöschung eine Abstimmung auf 50 Hz durchführt, wird bei der Messung von U_o ein 50 Hz Filter vorgeschaltet.

Bei der Bestimmung der Ortskurve ist ein wesentlich höherer Aufwand bei der Messung notwendig, da zusätzlich der Winkel von U_o auch für sehr kleine Spannungen ermittelt werden muss. Diese Forderung gilt speziell für Punkte, die nicht in der Nähe des Resonanzpunktes liegen. Zusätzlich wirken sich Winkelfehler der vorgeschalteten 50 Hz Filter wesentlich stärker aus.

Verfasser: Gernot Druml

Die Reihe wird fortgesetzt.

Fehlende Info-Briefe liefern wir Ihnen jederzeit gerne nach.

Ausgabe: 03-2013 / I012-1-D-1-001A04.docx