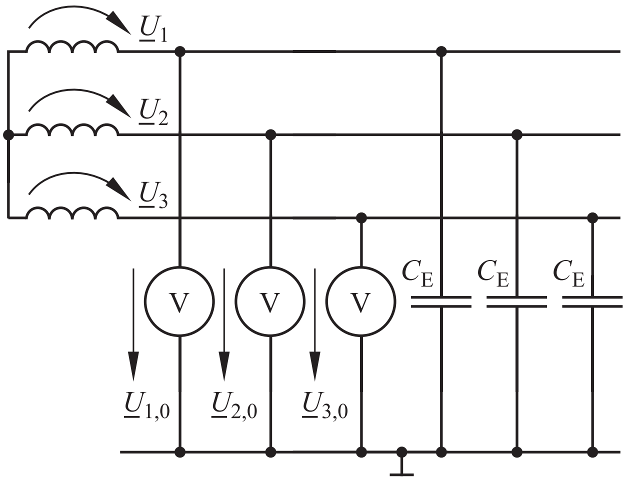
Nerreter, Grundlagen der Elektrotechnik
Carl Hanser Verlag München

7 Drehstrom

Aufgabe 7.9
Der Drehstromtransformator, dessen Sternpunkt nicht geerdet ist, speist über eine Freileitung mit den Erdkapazitäten C_E die nicht eingezeichneten Verbraucher. Auch die Primärwicklung des Transformators ist nicht dargestellt; an der Sekundärwicklung liegen die Spannungen gemäß Gl. (7.6).

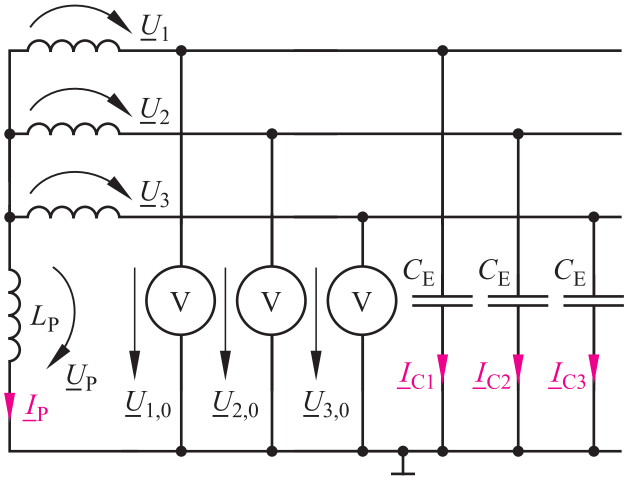


1) Welche Spannungen zeigen die Voltmeter beim ungestörten Betrieb des Netzes an?

2) Durch einen Erdschluss ist der Leiter L3 direkt mit Erde verbunden. Welche Spannungen zeigen die Voltmeter an?

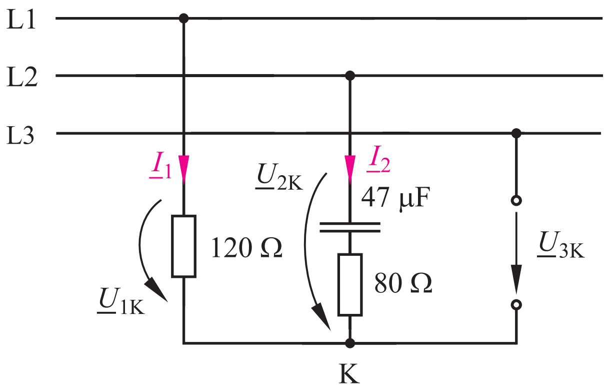
Aufgabe 7.10
Bei der Erdschlusslöschung mit der PETERSEN-Spule wird der Sternpunkt des Transformators durch eine Spule mit der Induktivität L_P mit Erde verbunden. Bewirkt ein Erdschluss des Leiters L3, dass die Spannung zwischen diesem Leiter und Erde den Wert $U_{3,0} = 0$ annimmt, so fließt bei geeignet abgestimmter Spule L_P ein Strom mit dem Effektivwert $I_{C3} = 0$. Wie muss die Induktivität L_P dimensioniert werden?

Literatur: Denzel, P.: Grundlagen der Übertragung elektrischer Energie. Springer, Berlin 1966



Waldemar Petersen, geb. 1880 in Athen, war von 1915 bis 1933 Professor für Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Darmstadt. Im Jahr 1917 erfand er die nach ihm benannte Löschspule zur Erdschlusskompensation, deren Original heute im Deutschen Museum in München zu besichtigen ist. 1926 in den Vorstand berufen, war er von 1928 bis zum Kriegsende Generaldirektor der AEG. 1946 starb Petersen in Darmstadt.

Aufgabe 7.11
Am Leiter L3 des 400-V-Netzes mit $f = 50$ Hz liegt kein Verbraucher. Berechnen Sie die Ströme $\underline{I}_1$ und $\underline{I}_2$ sowie die Spannungen $\underline{U}_{1K}$, $\underline{U}_{2K}$ und $\underline{U}_{3K}$.



Aufgabe 7.12
Der im Beispiel 7.3 beschriebene Drehstrommotor wird mit drei Kondensatoren 47 µF in Dreieckschaltung kompensiert. Welchen Leistungsfaktor hat der so kompensierte Motor?

Aufgabe 7.13
In einem Drehstrom-Vierleiternetz fließen folgende Strangströme:

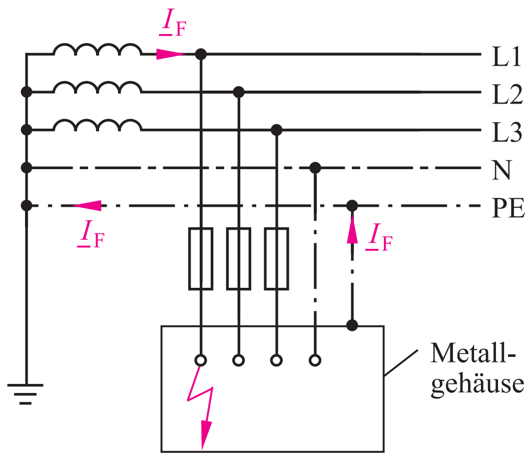
$$\underline{I}_1 = 3{,}25\ \text{A}\ \underline{/-24°}$$

$$\underline{I}_2 = 4{,}9\ \text{A}\ \underline{/15°}$$

$$\underline{I}_3 = 6{,}14\ \text{A}\ \underline{/-33°}$$

Berechnen Sie die symmetrischen Komponenten dieses unsymmetrischen Stromsystems und den Strom im Neutralleiter.

Aufgabe 7.14
In einem TN-Netz der elektrischen Energieversorgung ist der Sternpunkt der Sekundärwicklung des Transformators geerdet; die Primärwicklung des Transformators ist in der Zeichnung nicht dargestellt.
Die Metallgehäuse der Verbraucher sind über den (in der Praxis gelb/grün gekennzeichneten) Schutzleiter PE (protection earth) leitend mit dem Sternpunkt der Sekundärwicklung des Transformators verbunden.

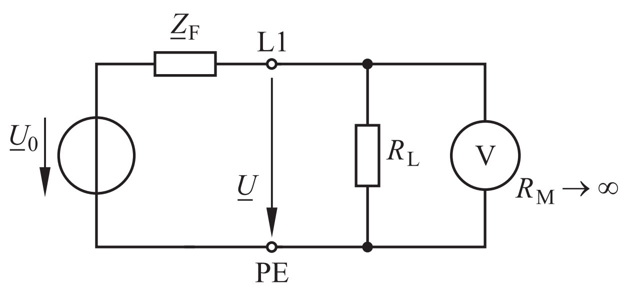


Ist durch einen Fehler im Verbraucher ein Außenleiter des Drehstromnetzes mit dem Metallgehäuse leitend verbunden, so fließt ein Fehlerstrom $\underline{I}_F$ und der fehlerbehaftete Teil des Netzes wird durch eine Überstrom-Schutzeinrichtung, z. B. eine Sicherung, abgeschaltet.
Die beschriebene Schutzmaßnahme wurde früher als „Nullung“ bezeichnet.

Damit der Fehler nur kurzzeitig besteht und für menschliche Personen ungefährlich ist, wird vom VDE (Verein Deutscher Elektrotechniker) und von den entsprechenden Normen gefordert, dass der Effektivwert I_F des Fehlerstromes mindestens so groß ist wie der Abschaltstrom I_A, der das Ansprechen der Überstrom-Schutzeinrichtung in 0,2 s bewirkt. Die Bedingung lautet:

$$I_A \leq I_F = U_0 / Z_F$$

In dieser Gleichung ist U_0 die Nennspannung zwischen einem Außenleiter und dem geerdeten Leiter. Z_F ist die Impedanz der Fehlerschleife, also des Stromweges von I_F.



Zur Bestimmung der Impedanz Z_F der Fehlerschleife wird zunächst ohne Belastung durch R_L die Spannung 231 V mit dem hochohmigen Spannungsmesser gemessen. Anschließend wird $R_{L1} = 10\ \Omega$ zugeschaltet und die Spannung $U_1 = 224{,}2$ V gemessen; schließlich wird mit $R_{L2} = 20\ \Omega$ die Spannung $U_2 = 227{,}6$ V gemessen. Berechnen Sie die Impedanz Z_F und entscheiden Sie, ob die Abschaltbedingung des TN-Netzes für $I_A = 320$ A erfüllt ist.

Lösung 7.9
1) Im ungestörten Betrieb zeigt jedes Voltmeter die Sternspannung $U_\curlywedge$ an.

2) Bei einem Erdschluss des Leiters L3 zeigt das an diesem Leiter angeschlossene Voltmeter die Spannung $U_{3,0} = 0$ an. Für das Voltmeter am Leiter L1 setzen wir die Maschengleichung an:

$$\underline{U}_{1,0} - \underline{U}_{3,0} - \underline{U}_3 + \underline{U}_1 = 0$$

Damit berechnen wir:

$$\underline{U}_{1,0} = \underline{U}_3 - \underline{U}_1 = U_\curlywedge \underline{/120°} - U_\curlywedge \underline{/0°} = \sqrt{3}\, U_\curlywedge \underline{/150°}$$

Das Voltmeter zeigt den Effektivwert an:

$$U_{1,0} = \sqrt{3}\, U_\curlywedge$$

Denselben Effektivwert zeigt auch das Voltmeter an, das am Leiter L2 angeschlossen ist.

Lösung 7.10
Wir setzen für $U_{3,0} = 0$ die Maschengleichungen

$$\underline{U}_\mathrm{P} = \mathrm{j}\,\omega\, L_\mathrm{P}\, \underline{I}_\mathrm{P} = \underline{U}_3$$

$$\underline{I}_\mathrm{C1} = \mathrm{j}\,\omega\, C_\mathrm{E}\, \underline{U}_{1,0} = \mathrm{j}\,\omega\, C_\mathrm{E}(\underline{U}_3 - \underline{U}_1)$$

$$\underline{I}_\mathrm{C2} = \mathrm{j}\,\omega\, C_\mathrm{E}\, \underline{U}_{2,0} = \mathrm{j}\,\omega\, C_\mathrm{E}(\underline{U}_3 - \underline{U}_2)$$

in die Knotengleichung

$$\underline{I}_\mathrm{P} + \underline{I}_\mathrm{C1} + \underline{I}_\mathrm{C2} + \underline{I}_\mathrm{C3} = 0$$

ein und erhalten:

$$\frac{\underline{U}_3}{\mathrm{j}\,\omega\, L_\mathrm{P}} + \mathrm{j}\,\omega\, C_\mathrm{E}(2\,\underline{U}_3 - \underline{U}_1 - \underline{U}_2) + \underline{I}_\mathrm{C3} = 0$$

Die Strangspannungen des Transformators sind symmetrisch und es gilt:

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0\,; \quad -\underline{U}_1 - \underline{U}_2 = \underline{U}_3$$

Damit lautet die Knotengleichung:

$$\frac{\underline{U}_3}{\mathrm{j}\,\omega\, L_\mathrm{P}} + \mathrm{j}\,\omega\, C_\mathrm{E} \cdot 3\,\underline{U}_3 + \underline{I}_\mathrm{C3} = 0$$

Die Bedingung

$$\underline{I}_\mathrm{C3} = 0$$

führt auf die Gleichung:

$$\frac{U_3}{\omega\, L_\mathrm{P}} - \omega\, C_\mathrm{E} \cdot 3\, U_3 = 0$$

Damit erhalten wir die Induktivität:

$$L_\mathrm{P} = \frac{1}{3\,\omega^2 C_\mathrm{E}}$$

Der Vorteil der Erdschlusslöschung besteht darin, dass durch den Erdschluss kein dauernd brennender Lichtbogen entstehen kann, der Beschädigungen hervorruft. Ist der Erdschluss die Folge eines Blitzeinschlags, so ist die Stromstärke nach dem Abfließen der durch den Blitz eingebrachten Ladungen so gering, dass kein Dauerlichtbogen entsteht und das Netz weiterbetrieben werden kann.
Die Erdschlusslöschung mit der Petersen-Spule wird in Mittelspannungs- und 110-kV-Freileitungsnetzen durchgeführt.

Lösung 7.11
Mit der Spannung (s. Bild 7.5)

$$\underline{U}_{12} = 400\ \mathrm{V}\underline{/30°}$$

und dem komplexen Widerstand

$$\underline{Z} = 200\ \Omega + \frac{1}{\mathrm{j}\omega C} = 200\ \Omega - \mathrm{j}\ 67{,}7\ \Omega$$

der Reihenschaltung berechnen wir den Strom:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}} = 1{,}894\ \mathrm{A}\underline{/48{,}7°}$$

Die Summe der Ströme ist gleich null und es gilt:

$$\underline{I}_2 = -\underline{I}_1 = 1{,}894\ \mathrm{A}\underline{/-131{,}3°}$$

Der Spannungsabfall am Widerstand 120 Ω ist:

$$\underline{U}_{1K} = 120\,\Omega \cdot \underline{I}_1 = 227{,}3\,\text{V}\,\angle 48{,}7°$$

Damit berechnen wir:

$$\underline{U}_{2K} = \underline{U}_{1K} - \underline{U}_{12} = 198{,}56\,\text{V}\,\angle -171{,}5°$$

Schließlich berechnen wir mit der Außenleiterspannung

$$\underline{U}_{23} = 400\,\text{V}\,\angle -90°$$

die Spannung an den offenen Klemmen:

$$\underline{U}_{3K} = \underline{U}_{2K} - \underline{U}_{23} = 419{,}6\,\text{V}\,\angle 117{,}9°$$

Lösung 7.12
Der unkompensierte Motor hat die Wirkleistung P_V = 26,4 kW und die Blindleistung Q_V = 19,1 kvar. Die drei Kondensatoren in Dreieckschaltung liegen an der Außenleiterspannung 400 V und haben die Blindleistung:

$$Q_C = -3\,\omega\,C\,U^2 = -7{,}1\ \text{kvar}$$

Der kompensierte Motor hat die Wirkleistung $P = P_V$ = 26,4 kW und die Blindleistung:

$$Q = Q_V + Q_C = 12{,}0\ \text{kvar}$$

Mit $\tan\varphi = Q\,/\,P = 0{,}455$ berechnen wir den Winkel $\varphi = 24{,}47°$ und damit den Leistungsfaktor:

$$\cos\varphi = 0{,}91$$

Lösung 7.13
Zunächst berechnen wir den Strom $\underline{I}_N$ als Summe der Ströme:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 3\,\underline{I}_0 = 13{,}29\,\text{A}\,\angle -14{,}8°$$

Damit berechnen wir den Nullstrom:

$$\underline{I}_0 = 4{,}43\,\text{A}\,\angle -14{,}8°$$

Nun subtrahieren wir den Nullstrom von $\underline{I}_1$ und $\underline{I}_2$, wodurch wir das Gleichungssystem erhalten:

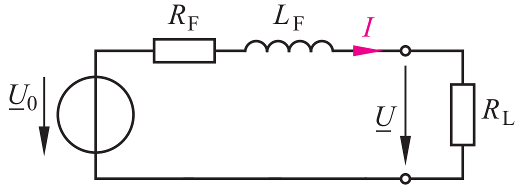
$$\underline{I}_1 - \underline{I}_0 = 1{,}328\,\text{A}\,\angle -171{,}8° = \underline{I}_m + \underline{I}_g$$

$$\underline{I}_2 - \underline{I}_0 = 2{,}44\,\text{A}\,\angle 79{,}4° = \underline{I}_m\,\angle -120° + \underline{I}_g\,\angle 120°$$

Seine Lösung lautet:

$$\underline{I}_m = 2\,\text{A}\,\angle -173{,}8° \ ; \quad \underline{I}_g = 0{,}6745\,\text{A}\,\angle 2{,}17°$$

Lösung 7.14
Wir sehen den komplexen Widerstand $\underline{Z}_F = R_F + \mathrm{j}\,X_F = R_F + \mathrm{j}\,\omega L_F$ als Reihenschaltung an.



Da nur Effektivwerte gegeben sind, setzen wir an:

$$(R_F + R_L)^2 I^2 + X_F^2 I^2 = U_0^2$$

Nun berücksichtigen wir, dass zwei Versuche durchgeführt wurden, und erhalten mit $I_1 = U_1/R_{L1} = 22{,}42$ A sowie $I_2 = U_2/R_{L2} = 11{,}38$ A:

$$(R_F + R_{L1})^2 + X_F^2 = \frac{U_0^2}{I_1^2}$$

$$(R_F + R_{L2})^2 + X_F^2 = \frac{U_0^2}{I_2^2}$$

Wir bilden die Differenz dieser Gleichungen:

$$2\,R_F\left(R_{L1} - R_{L2}\right) + R_{L1}^2 - R_{L2}^2 = \frac{U_0^2}{I_1^2} - \frac{U_0^2}{I_2^2}$$

Damit berechnen wir R_F = 294,1 mΩ, setzen dies in eine der beiden anderen Gleichungen ein und erhalten X_F = 435,3 mΩ. Die Gl. (6.42) ergibt die Impedanz Z_F = 525,3 mΩ, womit wir den Strom I_F = 439,7 A berechnen und feststellen, dass die Abschaltbedingung des TN-Netzes erfüllt ist.