

### Lösungen zur schriftlichen Prüfung aus VO Energieversorgung am 11.11.2014

Hinweis: Bei den Berechnungen wurden alle Zwischenergebnisse in der technischen Notation<sup>1</sup> (Format ENG) dargestellt und auf drei Nachkommastellen gerundet. Für die weitere Rechnung wurde das gerundete Ergebnis verwendet.

Abhängig vom Rechenweg kann es aber dennoch zu leicht abweichenden Ergebnissen kommen!

#### 1. Leitungsgleichung

a. Wie groß sind die **längenbezogene symmetrische Betriebsinduktivität** der Leitung und die **längenbezogene symmetrische Betriebskapazität** der Leitung?

$$L' = 902,409 \frac{\mu\text{H}}{\text{km}} \quad (1.1)$$

$$C' = 12,379 \frac{\text{nF}}{\text{km}} \quad (1.2)$$

b. Wie groß ist die Spannung  $\underline{U}_1$  am **Anfang** der **Leitung**, wenn am Ende die Spannung das 1,1-fache der Nennspannung beträgt und dort eine Wirkleistung von 50% der natürlichen Leistung entnommen wird?

Phasenspannung:

$$\underline{U}_{1,a} = 195,003\text{kV} + j \cdot 58,752\text{kV} = 203,661 \cdot e^{j0,293 \text{ rad}} \text{ kV} \quad (1.3)$$

Außenleiterspannung:

$$\underline{U}_{1,a,b} = 352,752 \cdot e^{j0,293 \text{ rad}} \text{ kV} \quad (\text{wenn } \arg(\underline{U}_{2,a,b}) = 0 \text{ rad}) \quad (1.4)$$

c. Wie groß ist die **Eingangsimpedanz** der Leitung bei dem Betriebszustand unter b.?

$$\underline{Z}_1 = 336,47 e^{-j0,76 \text{ rad}} \Omega \quad (1.5)$$

d. Dimensionieren Sie das **Bauelement**, welches am Ende der Leitung für eine **ideale Kompensation** der Leitung zugeschaltet wird, damit im Leerlauf der Betrag der Spannung am Ende auf den 1,1-fachen Wert der Nennspannung reduziert wird. Geben Sie die **Ver-schaltung** des Bauelements an.

Damit die Spannung am Ende der leerlaufenden Leitung auf den gegebenen Wert reduziert wird, wird am Ende der Leitung eine parallele Induktivität zugeschaltet.

$$L_2 = 5,01\text{H} \quad (1.6)$$

e. Welche **Gesamt-Scheinleistung** weist das Kompensationselement am Ende der Leitung auf?

$$Q_2 = 111,01 \text{ Mvar} \quad (1.7)$$

<sup>1</sup> [http://de.wikipedia.org/wiki/Wissenschaftliche\\_Notation](http://de.wikipedia.org/wiki/Wissenschaftliche_Notation)

## 2. Drehstromkomponentensystem

a. Ermitteln Sie für diesen Drehstromverbraucher entsprechend der obigen Schaltung die **Null-, Mit- und Gegenimpedanz**  $\underline{Z}_{(0)}$ ,  $\underline{Z}_{(1)}$ ,  $\underline{Z}_{(2)}$ .

$$\underline{Z}_{(0)} = 6 \Omega \quad (2.1)$$

$$\underline{Z}_{(1)} = \frac{16}{5} \Omega \quad (2.2)$$

$$\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)} = \frac{16}{5} \Omega \quad (2.3)$$

b. Geben Sie für den symmetrischen Drehstromverbraucher die **Null-, Mit- und Gegenimpedanz**  $\underline{Z}_{(0)}$ ,  $\underline{Z}_{(1)}$ ,  $\underline{Z}_{(2)}$  an.

$$\underline{Z}_{(0)} = 7 \Omega \quad (2.4)$$

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = 4 \Omega \quad (2.5)$$

c. Berechnen Sie die **symmetrischen Spannungskomponenten**  $\underline{U}_{(0)}$ ,  $\underline{U}_{(1)}$ ,  $\underline{U}_{(2)}$ .

$$\underline{U}_{(0)} = -\frac{20}{3} \text{V} \quad (2.6)$$

$$\underline{U}_{(1)} = \frac{220\text{V}}{3} \quad (2.7)$$

$$\underline{U}_{(2)} = -\frac{20}{3} \text{V} \quad (2.8)$$

d. (6) Berechnen Sie die **Stromkomponenten**  $\underline{I}_{(0)}$ ,  $\underline{I}_{(1)}$ ,  $\underline{I}_{(2)}$  und den **Strom in Phase a**.

$$\underline{I}_{(0)} = -0,952\text{A}$$

$$\underline{I}_{(1)} = 18,333\text{A} \quad (2.9)$$

$$\underline{I}_{(2)} = -1,667\text{A}$$

$$\underline{I}_a = 15,714\text{A} \quad (2.10)$$

## 3. Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung

a. Wie groß sind die drei **Phasenströme**  $\underline{I}_a$ ,  $\underline{I}_b$  und  $\underline{I}_c$  am **Kurzschlussort?** (komplexe Darstellung)

Winkel können beliebig festgelegt werden, daher  $\underline{I}_b$  mit Winkel  $0^\circ$ . Daraus ergibt sich

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= 0 \\ \underline{I}_b &= 417 \text{ A} \\ \underline{I}_c &= -417 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.1)$$

da  $\sum \underline{I} = 0$ .

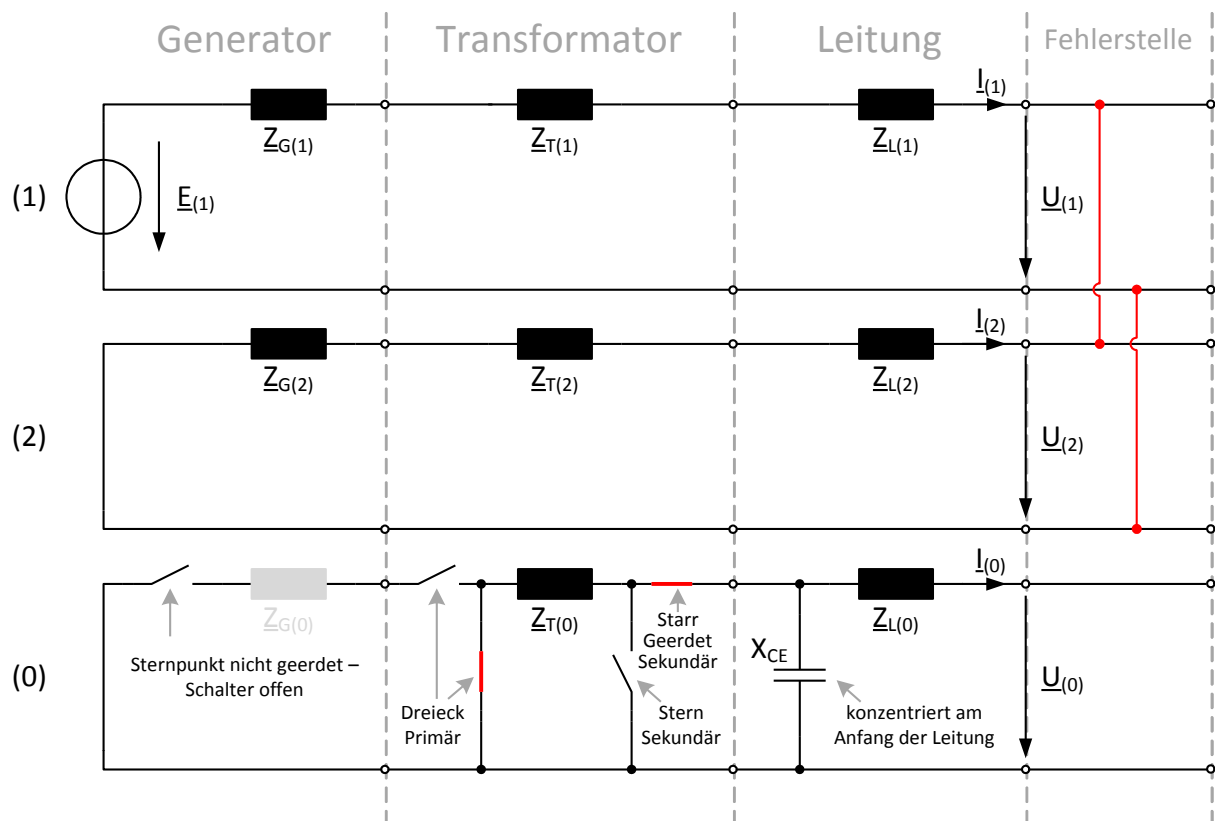
b. Wie groß sind die drei **Komponentenströme**  $\underline{I}_{(0)}$ ,  $\underline{I}_{(1)}$  und  $\underline{I}_{(2)}$  am **Kurzschlussort?** (komplexe Darstellung)

$$\underline{I}_{(0)} = 0 \text{ A} \quad (3.2)$$

$$\underline{I}_{(1)} = j240,755 \text{ A} \quad (3.3)$$

$$\underline{I}_{(2)} = -j240,755 \text{ A} \quad (3.4)$$

c. Leiten Sie anhand der Ergebnisse aus Punkt b die korrekte **Ersatzschaltung** im Mit-, Gegen- und Nullsystem für diesen Fehlerfall ab (mit kurzer Erklärung!).



Relevant sind nur die Bedingungen an der Fehlerstelle: Da  $\underline{I}_{(2)} = -\underline{I}_{(1)}$  ergibt sich obige Verschaltung von Mit- und Gegensystem. Da  $\underline{I}_{(0)} = 0$  ist das Nullsystem nicht beteiligt, was auch naheliegend ist, da keine Erdberührung stattfindet.

d. Berechnen Sie für diesen Kurzschlussfall die wirksame **Gesamtipedanz** (komplexe Darstellung) bezogen auf die Kurzschlussseite (Leitung).

Generator:

$$\begin{aligned} Z_{G(1)} &= X_{G(1)} = 16,714 \ \Omega \\ R_{G(1)} &= 0 \ \Omega \\ X_{G(2)} &= X_{G(1)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Transformator:

$$Z_{T(1)} = X_{T(1)} = 16,875 \ \Omega \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} R_{T(1)} &= 0 \\ X_{T(2)} &= X_{T(1)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Leitung:

$$\begin{aligned} X_{L(1)} &= 6 \, \Omega \\ X_{L(2)} &= X_{L(1)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Nullsystemreaktanzen und Erdkapazität liefern keine Beiträge, daher sind diese auch nicht relevant für die wirksame Gesamtimpedanz!

Gesamtimpedanz:

$$\underline{Z}_{\text{Ges}} = j79,178 \, \Omega \quad (3.9)$$

e. Berechnen Sie den Betrag des **dreiphasigen Anfangs-Kurzschlussstroms**  $I''_{k3p}$  im Fall eines dreipoligen Kurzschlusses ( $c = 1,1$ ).

$$I''_{k3p} = 481,259 \, \text{A} \quad (3.10)$$

#### 4. Fünf Sicherheitsregeln

Siehe Skriptum

#### 5. Barwertvergleich von Leitungssystemen

a. Wie groß sind die **jährlichen Energieverluste** für beide Leitungssysteme?

FL ... Freileitung

KA ... Kabel

$$\begin{aligned} V_{E,FL} &= 28,277 \cdot 10^6 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \\ V_{E,KA} &= 7,778 \cdot 10^6 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \end{aligned} \quad (5.1)$$

b. Wie groß sind die **jährlichen Aufwendungen** für den leistungsabhängigen Anteil der Verlustkosten für beide Leitungssysteme?

$$\begin{aligned} K_{P,FL} &= 1,463 \cdot 10^6 \frac{\text{€}}{\text{a}} \\ K_{P,KA} &= 382,5 \cdot 10^3 \frac{\text{€}}{\text{a}} \end{aligned} \quad (5.2)$$

c. Wie groß sind die **jährlichen Zahlungen** für beide Leitungssysteme in den ersten 9 Jahren und in den restlichen 16 Jahren?

Die gesamten Kosten in den ersten neun Jahren:

$$Z_{FL,9a} = 4,096 \cdot 10^6 \frac{\text{€}}{\text{a}} \quad (5.3)$$

$$Z_{KA,9a} = 1,105 \cdot 10^6 \frac{\text{€}}{\text{a}} \quad (5.4)$$

Für die Jahre 10 bis 25 ergeben sich:

$$Z_{FL,16a} = 3,276 \cdot 10^6 \frac{\text{€}}{\text{a}} \quad (5.5)$$

$$Z_{KA,16a} = 879,736 \cdot 10^3 \frac{\text{€}}{\text{a}} \quad (5.6)$$

d. Wie groß ist der **Barwert der 110kV Freileitung** zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme?

$$B_{0,FL} = 58,597 \cdot 10^6 \text{ €} \quad (5.7)$$

e. Wie groß ist der **Barwert des 110kV Kabels** zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme?

$$B_{0,KA} = 25,699 \cdot 10^6 \text{ €} \quad (5.8)$$

f. Welches Leitungssystem ist **wirtschaftlich günstiger** bezogen auf den Betrachtungszeitpunkt von 25 Jahren?

Aufgrund des deutlich niedrigeren Barwerts ist wirtschaftlich das Kabelsystem vorzuziehen!