

### Lösungen zur schriftlichen Prüfung aus VO Energieversorgung am 02.10.2014

**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. Betriebsparameter einer 380kV-Leitung

a. Wie groß ist die **längenbezogene symmetrische Betriebsinduktivität** der Leitung?

$$L'_B = 820,511 \frac{\mu\text{H}}{\text{km}} \quad (1.1)$$

b. Wie groß ist die **längenbezogene symmetrische Betriebskapazität** der Leitung?

$$C'_B = 13,77 \frac{\text{nF}}{\text{km}} \quad (1.2)$$

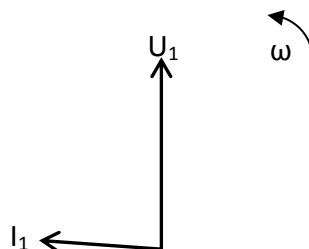
c. Wie groß ist die **komplexe Ausbreitungskonstante  $\underline{\gamma}$**  unter der zusätzlichen Annahme, dass  $G' = 0 \frac{\text{S}}{\text{km}}$ ?

$$\gamma = 0,0983 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{km}} + j1,054 \cdot 10^{-3} \frac{\text{rad}}{\text{km}} \quad (1.3)$$

d. Leiten Sie für die leerlaufende und verlustlose Leitung ( $R' = 0 \frac{\Omega}{\text{km}}$ ,  $G' = 0 \frac{\text{S}}{\text{km}}$ ) **allgemein** die Scheinleistung am Leitungsanfang als Funktion  $\underline{S}_1 = f(\underline{U}_1, Z_w, \text{Länge})$  her.

$$\underline{S}_1 = -j \cdot \frac{U_1^2 \tan(\beta \ell)}{Z_w} \quad (1.4)$$

e. Skizzieren Sie qualitativ das **Zeigerdiagramm** der leerlaufenden Leitung im Verbraucherzählpeilsystem (Strom & Spannung am Anfang der Leitung) und begründen Sie Ihre Darstellung.



Es handelt sich hier um einen Extremfall: eine unter Spannung gesetzte, aber unbelastete Leitung verhält sich kapazitiv. Dann fließt nämlich nur der geringe Ladestrom durch die Induktivitäten, während die Kapazitäten bereits voll aufgeladen sind.

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

f. Wie groß ist die **thermische Dauerstrombelastbarkeit** eines Einzeleleiters  $I_{th}$ , wenn angenommen wird, dass die natürliche Leistung der verlustlosen Leitung der thermisch übertragbaren Scheinleistung entspricht?

$$I_{th, ein} = 224,692 \text{ A} \quad (1.5)$$

g. Wie groß ist die induktive **Blindleistung** der Leitung wenn die verlustlose Leitung mit  $I_{th}$  belastet wird?

$$Q_L = 124,934 \text{ Mvar} \quad (1.6)$$

Die **gesamte Blindleistung** einer natürlich betriebenen Leitung ist gleich null, weil sich der **induktive und kapazitive Anteil der Blindleistung** gegenseitig kompensieren!

## 2. Einpoliger Erdschluss

a. Bestimmen Sie die **Elemente der Ersatzschaltung** im Mit-, Gegen- und Nullsystem.

Generator:

$$\begin{aligned} R_{G(1)} &= 0 \ \Omega \\ X_{G(1)} &= 21 \ \Omega \end{aligned} \quad (2.1)$$

Transformatoren:

$$\begin{aligned} R_{TA(1)} &= R_{TB(1)} = 0 \ \Omega \\ X_{TA(1)} &= X_{TB(1)} = Z_{T(1)} = 9 \ \Omega \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} R_{TA(0)} &= R_{TB(0)} = 0 \ \Omega \\ X_{TA(0)} &= X_{TB(0)} = 18 \ \Omega \end{aligned} \quad (2.3)$$

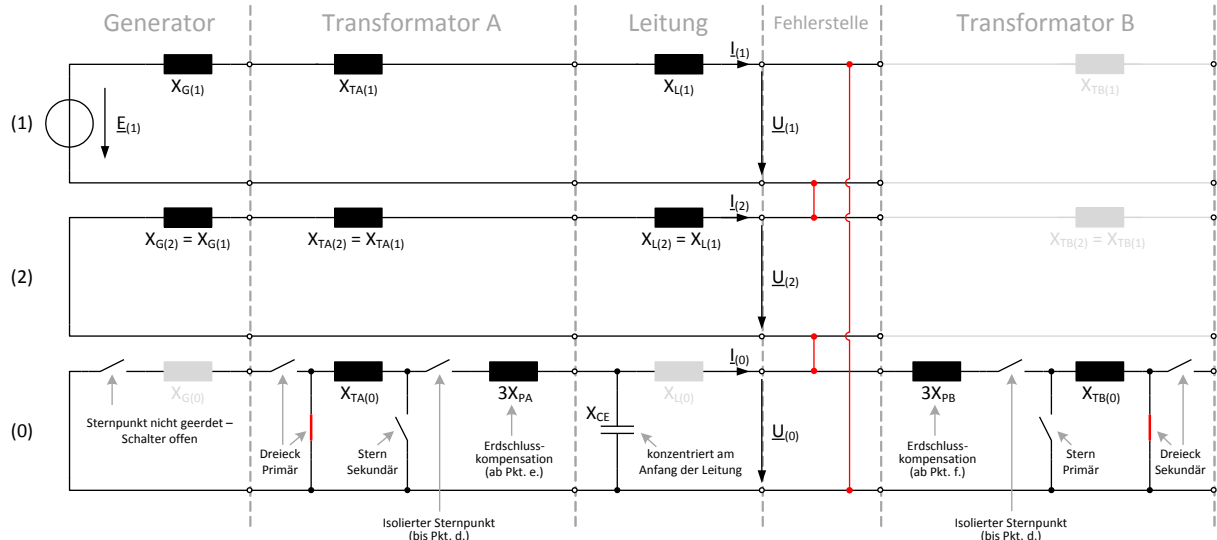
Leitung:

$$X_{L(1)} = 18,534 \ \Omega \quad (2.4)$$

$$X_{CE} = 4,244 \cdot 10^3 \ \Omega \quad (2.5)$$

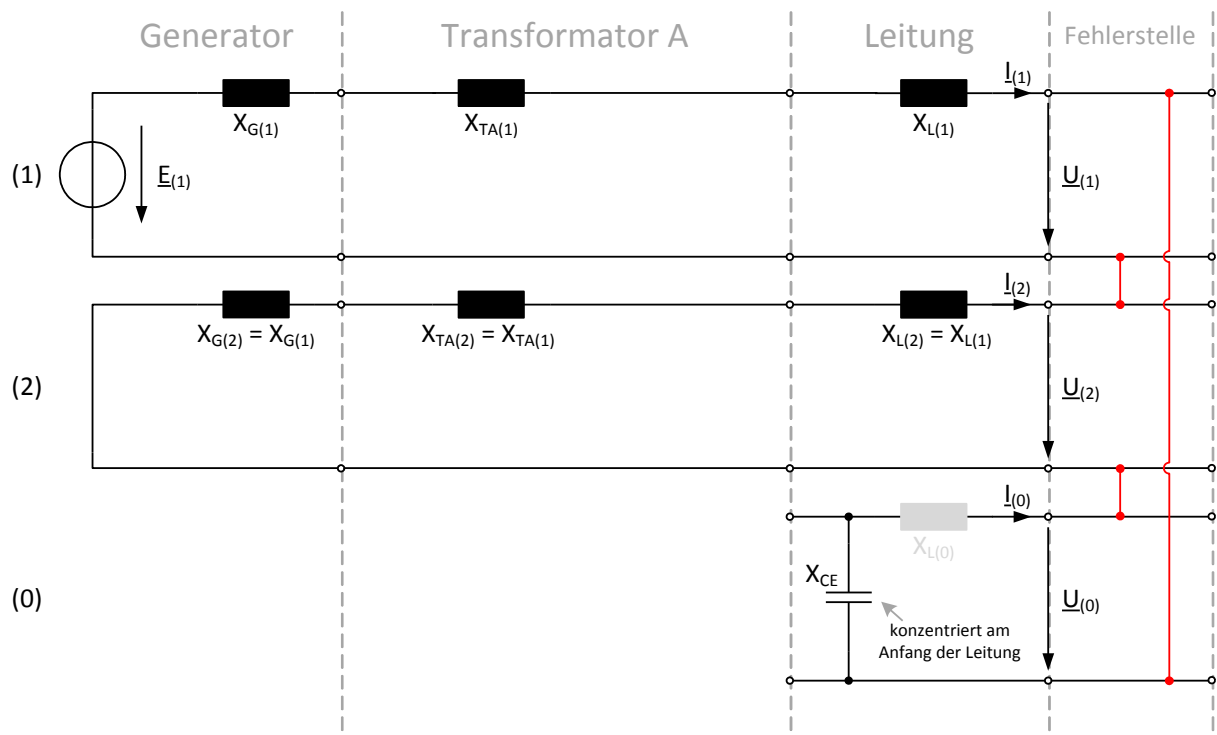
b. Zeichnen Sie das **Ersatzschaltbild** im Komponentensystem (Spannungen, Ströme, Impedanzen).

Es ergibt sich unter Einbeziehung der ermittelten Komponenten aus der Angabe bzw. Punkt a. die folgende Darstellung. Diese fasst die Gesamtsituation zusammen.



c. Wie groß ist der Betrag des einpoligen Erdschlussstroms  $I''_{k1p}$  ( $c=1,1$ )?

Für Punkt c. ist folgende Schaltung gültig (weglassen aller nichtrelevanten Elemente aus der vorhergehenden Darstellung von Punkt b.):



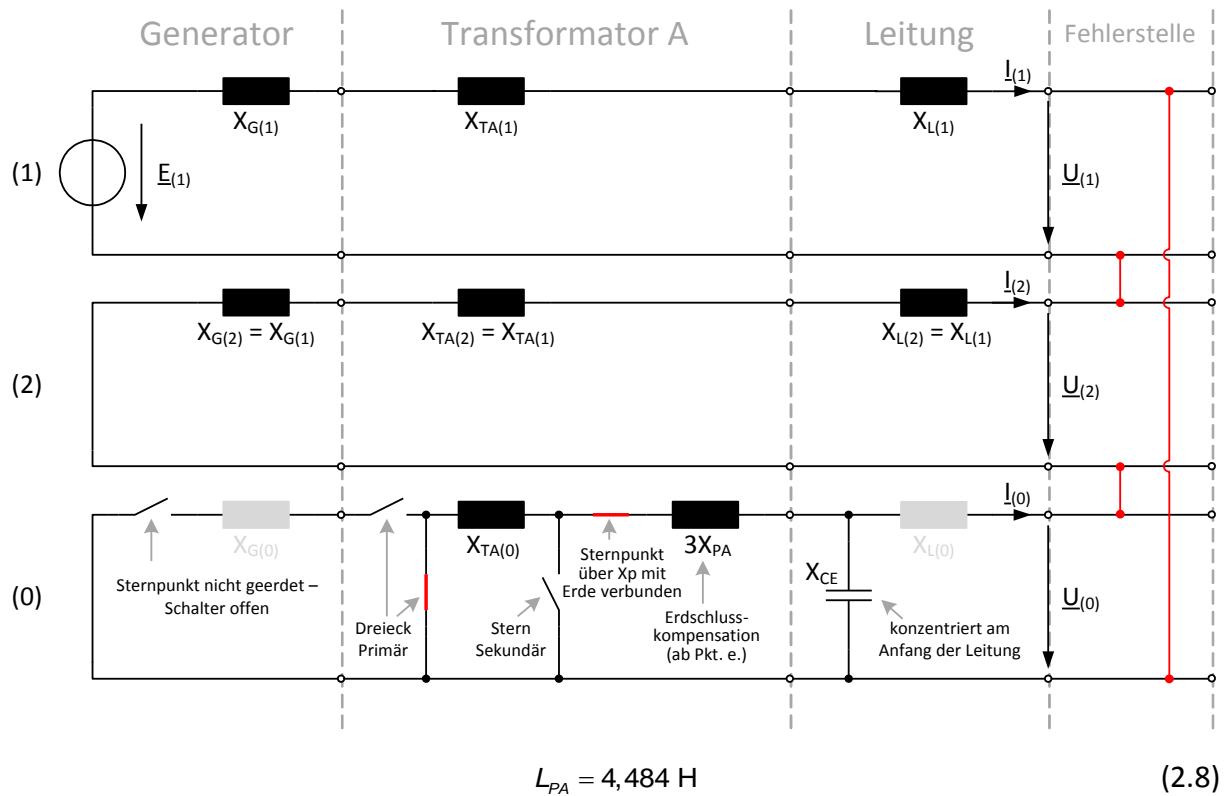
$$I''_{k1p} = 13,782 \text{ A} \quad (2.6)$$

d. Leiten Sie **allgemein** die Ausdrücke für die drei **Komponentenspannungen**  $\underline{U}_{(0)}$ ,  $\underline{U}_{(1)}$  und  $\underline{U}_{(2)}$  am Kurzschlussort her.

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(1)} &= \frac{\underline{E}_{(1)} \cdot (\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)})}{2 \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} \\ \underline{U}_{(2)} &= -\frac{\underline{E}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(1)}}{2 \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} \\ \underline{U}_{(0)} &= -\frac{\underline{E}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)}}{2 \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

e. Anstelle der isolierten Erdung wird in den Sternpunkt des Transformators A eine Petersen-Spule gegen Erde geschaltet ( $L_p$ ). Berechnen Sie die benötigte **Induktivität  $L_p$  der Spule**, sodass der einpolige Erdschlussstrom  $I''_{k1p}$  Null wird.

Für diesen Fall ist folgende Schaltung gültig:

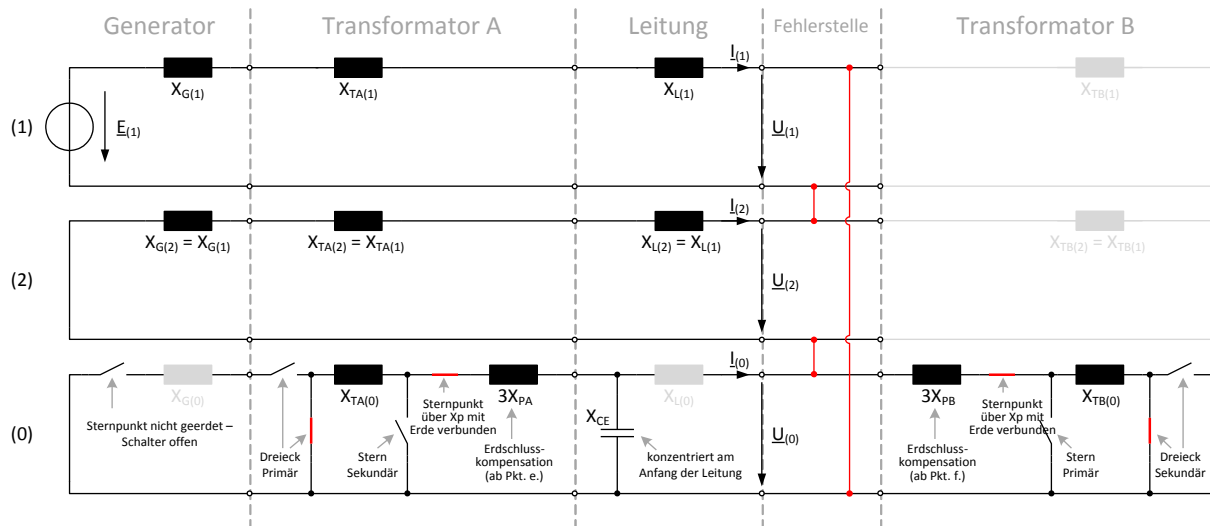


Dies entspricht einer Reaktanz von

$$X_{PA} = 1,409 \cdot 10^3 \Omega \quad (2.9)$$

f. Anstelle der isolierten Erdung wird in den Sternpunkt des Transformators B eine weitere Petersen-Spule gegen Erde geschaltet ( $L_{p2}$ ). Wie groß muss die **Summenreaktanz der beiden Spulen** sein, sodass der einpolige Erdschlussstrom  $I''_{k1p}$  Null wird?

In diesem Fall ist folgende Schaltung gültig:



Die Petersenspulen der beiden Trafos bilden eine Parallelschaltung. In Summe muss aber wieder die Resonanzbedingung erfüllt werden. Unter Vernachlässigung der Nullsystemreaktanzen der Trafosternpunkte resultiert somit der gleiche Wert für die Summen-Reaktanz der beiden Spulen wie für die einzelne Petersenspule unter Punkt e.

### 3. Speicherkraftwerk

a. Berechnen Sie das **Jahresspeichervolumen** des Kraftwerks zur Aufnahme der Jahresniederschlagsmenge.

$$V_a = 17,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \quad (3.1)$$

b. Wie groß ist das nutzbare Speichervolumen des Speicherbeckens? (Jahresspeichervolumen  $\neq$  nutzbares Speichervolumen!)

$$V_{Nutz} = 14,25 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \quad (3.2)$$

c. Wie groß ist die **mittlere Fallhöhe** des Kraftwerks?

$$h_m = 1770 \text{ m} \quad (3.3)$$

d. Wie groß ist der **nutzbare Energieinhalt** des Speichersees unter Berücksichtigung des **nutzbaren Speichervolumens**?

$$E = 68,731 \text{ GWh} \quad (3.4)$$

e. Wie hoch ist die mittlere **elektrische Leistung**  $P_{el}$  des Speicherkraftwerks?

$$P_{el,m} = 62,19 \text{ MW} \quad (3.5)$$

f. Wie **lange** dauert die vollständige **Abarbeitung** der nutzbaren gespeicherten Wassermenge bis zum Absenkziel?

$$\Delta t = 880 \text{ h} \quad (3.6)$$

#### 4. Fünf Sicherheitsregeln

Siehe Skriptum

#### 5. Wirtschaftlichkeit eines Blockheizkraftwerks

- a. Wie hoch sind die **jährlichen Energiekosten** des Betriebs, wenn dieser seinen Wärmebedarf über den Gaskessel und den Strombedarf aus dem Netz bezieht.

$$K_{\text{ges},1} = 24.392,623 \text{ €} \quad (5.1)$$

- b. Berechnen Sie die **Annuitäten (jährliche Rückzahlungen)** für die Abschreibung der Errichtungskosten des BHKWs mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 3%.

$$K_{\text{Rückzahlung}} = 2.925 \text{ €} \quad (5.2)$$

- c. Berechnen Sie die **jährlich erzeugbare elektrische und thermische Energie** durch das BHKW.

$$E_{\text{el,BHKW}} = 60.000 \text{ kWh} \quad (5.3)$$

$$E_{\text{th,BHKW}} = 12.8571,429 \text{ kWh} \quad (5.4)$$

- d. Wie hoch sind die **jährlichen Kosten** des Betriebs (jährlichen Energiekosten inkl. jährlicher Rückzahlung) für den Fall, dass das Unternehmen in das BHKW investiert?

$$K_{\text{ges},2} = 25.854,986 \text{ €} \quad (5.5)$$

- e. Welcher **Unterschied** ergibt sich zu den **Kosten** gegenüber den Annahmen in Punkt a.? Rentiert sich die Investition in das BHKW basierend auf der Betrachtung der jährlichen Energiekosten? (Begründung)

$$\Delta K = K_{\text{ges},1} - K_{\text{ges},2} = -14.362,363 \text{ €} \quad (5.6)$$

Die Investition zahlt sich nicht aus, da die Kosten mit dem BHKW höher sind als bei der Versorgung durch das Netz, dies liegt am hohen Wärmebedarf des Betriebes.