



Datum: 17. September 2012
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Beck

Institut für Elektrische Energietechnik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck

Name: Vorname:

Matr.-Nr.: Studiengang:

Falls zutreffend, bitte unterschreiben!

Ich bin damit einverstanden, dass mein Prüfungsergebnis in Kombination mit meiner Matrikelnummer veröffentlicht wird.

.....
Unterschrift

Bearbeitungszeit:

80 Minuten

Zugelassene Hilfsmittel:

Stifte, Lineal/Geodreieck, Taschenrechner (nicht programmierbar)

Weitere Hinweise:

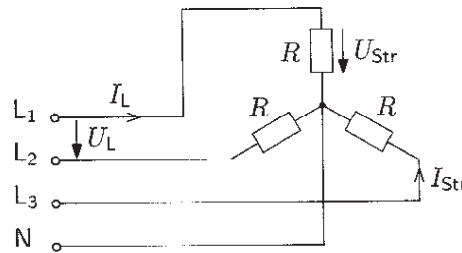
- ☛ Schalten Sie bitte Ihre Mobiltelefone aus!
Der Einsatz von Handys, Smartphones o.ä. gilt als Täuschungsversuch.
- ☛ Legen Sie bitte Ihren Studierendenausweis und Ihren Personalausweis auf den Tisch.
- ☛ Schreiben Sie bitte Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer auf jedes verwendete Blatt.
- ☛ Schreiben Sie bitte *nicht* mit Bleistift oder Rotstift!
- ☛ Verwenden Sie bitte ausschließlich das ausgehändigte Papier.
- ☛ Machen Sie bitte Ihre Aufgaben auf dem Rechenpapier mit Aufgabennummern kenntlich.

Aufgabe:	KF2	SM	TR	DS	gesamt
Punkte:	17	19	19	19	74
Erreicht:					

1. Kurzfragen zu Elektrotechnik 2 (17 Punkte)

KF1) Wie wird die Wirkleistung im skizzierten symmetrisch belasteten Drehstromnetz berechnet? 1 P

- $P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$
- $P = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str}$
- $P = U_L \cdot I_L$
- $P = \sqrt{3} \cdot U_{Str} \cdot I_{Str}$



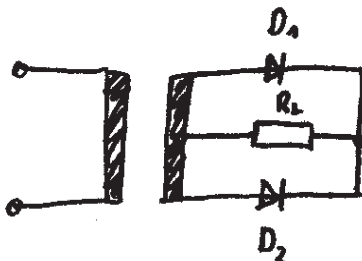
KF2) Nennen Sie einen Vorteil von Drehstromnetzen gegenüber Wechselstromnetzen! 1 P

- Einsparung von 3 Rückleitern
- Konstante Leistungsübertragung (bei Symmetrie)
- Übertragung eines Drehfeldes

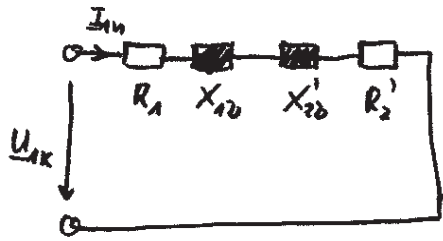
KF3) Nennen Sie die fünf Sicherheitsregeln, die beim Freischalten von elektrischen Anlagen beachtet werden müssen in der richtigen Reihenfolge! 3 P

- 1) Freischalten
- 2) Gegen Wiedereinschalten sichern
- 3) Spannungsfreiheit feststellen
- 4) Erden und Kurzschließen
- 5) Benachbarte unter Spannung stehende Teile abdecken oder abschranken

KF4) Skizzieren Sie eine aus einem einphasigen Netz gespeiste Gleichrichterschaltung in Form einer Mittelpunktschaltung (Kurzbezeichnung M2) inklusive Transformator! 4 P



KF5) Welche Größen des Transformatorersatzschaltbildes werden mit dem Kurzschlussversuch ermittelt? Welche Größen muss man dazu einstellen bzw. messen? 3 P

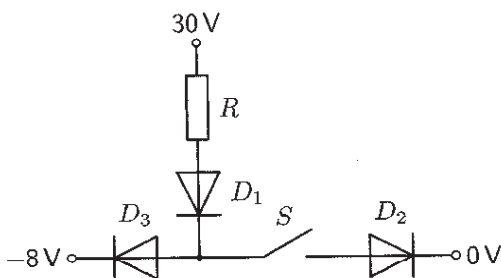


ermittelt: $R_1, R_2', X_{12}, X_{22}$
 eingestellt: I_{1n}
 gemessen: U_{1K}, P_1

KF6) Warum haben Transformatoren statt massiver Eisenkerne solche aus Dynamoblech? 1 P
 Weil dadurch ...

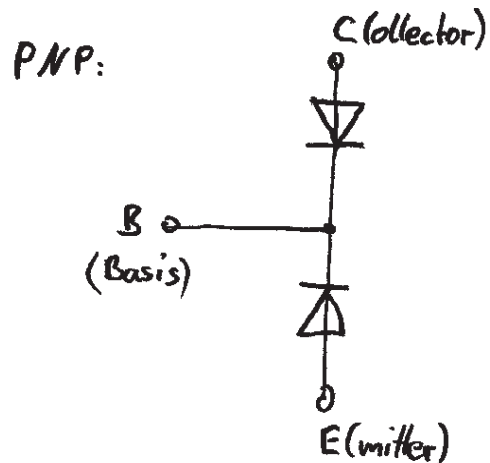
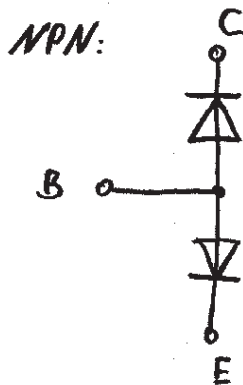
- ...der Kern elastischer wird.
- ...die Hystereseverluste verringert werden.
- ...die Wicklungsverluste kleiner sind.
- ...die Wirbelstromverluste verringert werden.
- ...das Transformatorbrummen unterdrückt wird.

KF7) Gegeben ist folgende Schaltung. Bei geöffnetem Schalter S werden die Dioden D_1 und D_3 in Durchlassrichtung betrieben. Geben Sie die Betriebszustände der Dioden D_1, D_2 und D_3 für den Fall an, wenn der Schalter S geschlossen ist! 2 P



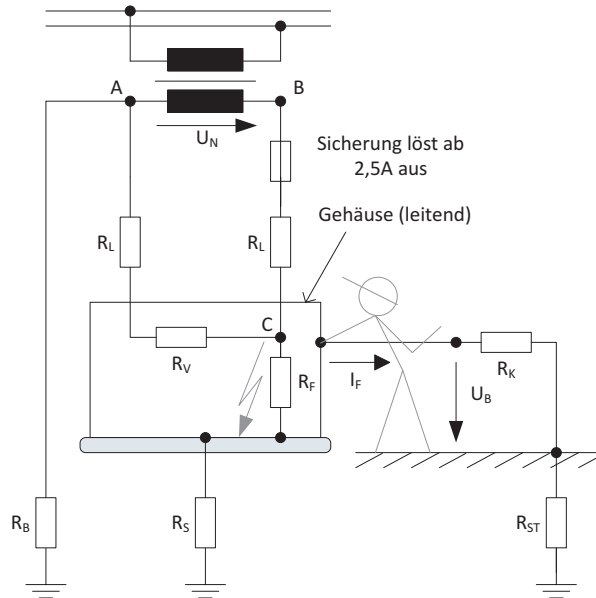
D_1, D_3 : Durchlassrichtung
 D_2 : Sperrrichtung

KF8) Skizzieren sie die Diodenersatzschaltbilder des NPN- und des PNP-Transistors und bezeichnen Sie die Anschlüsse! 2 P



2. Schutzmaßnahmen (19 Punkte)

Ein elektrischer Verbraucher R_V mit leitendem Gehäuse wird über einen Transformator an das Wechselstromnetz angeschlossen. Das Gerät wird wie in der folgenden Abbildung dargestellt schadhaft und gefährdet einen das Gehäuse berührenden Menschen.



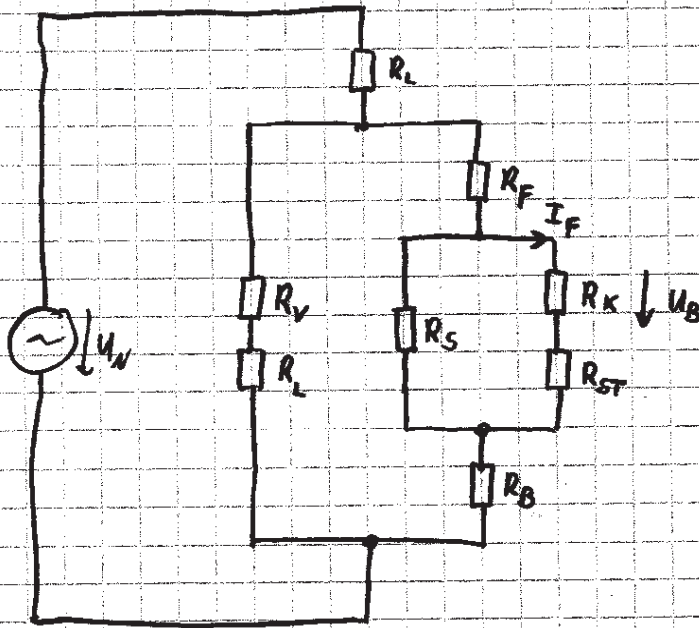
Es sind folgende Werte gegeben:

$$U_N = 500 \text{ V}, \quad R_V = 500 \Omega, \quad R_K = 3 \text{ k}\Omega, \quad R_{ST} = 0,5 \text{ k}\Omega, \quad R_L = 2 \Omega, \quad R_F = 20 \Omega$$

Aufgaben:

- SM1) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild für den Fehlerfall so, dass Sie es für die nachfolgenden Berechnungen heranziehen können! 7 P
- SM2) Berechnen Sie den Gesamtwiderstand R_{ges} (zwischen den Klemmen A und B), sowie I_F und U_B für den Fall, dass bei durchtrennter Schutzterde ($R_S \rightarrow \infty$) ein Gehäuseschluss mit dem Übergangswiderstand R_F an der Stelle C auftritt! Der Erdungswiderstand des Transformators beträgt in diesem Fall $R_B = 5 \Omega$. 7 P
- SM3) Ist der Mensch gefährdet? Begründen Sie anhand der bestimmten Zahlenwerte! 1 P
- SM4) Löst die Sicherung in diesem Fall aus? Begründen Sie anhand der bestimmten Zahlenwerte! 1 P
- SM5) Berechnen Sie nun den Gesamtwiderstand R_{ges} (zwischen den Klemmen A und B), sowie I_F und U_B für den Fall, dass bei durchtrennter Trafoerdung ($R_B \rightarrow \infty$) ein Gehäuseschluss mit dem Übergangswiderstand R_F an der Stelle C auftritt! Der Erdungswiderstand des Verbrauchers beträgt in diesem Fall $R_S = 10 \Omega$. 3 P

SM1)



• für SM2 entfällt R_S

• für SM5 entfällt R_B

(an der Stelle ist das Netzwerk jeweils offen!)

SM2)

$$R_{ges} = R_L + (R_V + R_L) \parallel (R_F + R_K + R_{ST} + R_B)$$

$$= 2\Omega + (500\Omega + 2\Omega) \parallel (20\Omega + 3000\Omega + 500\Omega + 5\Omega)$$

$$= 2\Omega + 502\Omega \parallel 3525\Omega = 2\Omega + \frac{502\Omega \cdot 3525\Omega}{502\Omega + 3525\Omega}$$

$$= 2\Omega + 439\Omega = 441\Omega$$

$$I_{ges} = \frac{U_N}{R_{ges}} = \frac{500V}{441\Omega} = 1,13A$$

Stromteilerregel:

$$I_F = I_{ges} \cdot \frac{(R_V + R_L)}{(R_V + R_L) + (R_F + R_K + R_{ST} + R_B)} = 1,13A \cdot \frac{502\Omega}{502\Omega + 3525\Omega} = 0,141A$$

$$= 141mA$$

$$U_B = R_K \cdot I_F = 3000\Omega \cdot 141mA = 423V$$

SM3) Der Mensch ist gefährdet, da $I_F = 141mA > 17mA$ bzw. $U_B = 423V > 50V$

SM4) Die Sicherung löst nicht aus, da $I_{ges} = 1,13A < 2,5A$

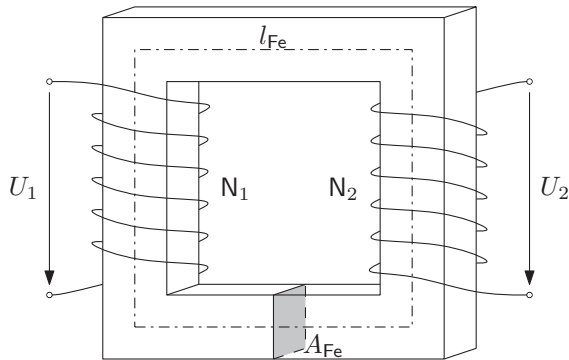
$$SM5) R_{ges} = R_L + R_V + R_L = 2\Omega + 500\Omega + 2\Omega = 504\Omega$$

$$I_{ges} = \frac{U_N}{R_{ges}} = \frac{500V}{504\Omega} = 0,992A = 992mA$$

$I_F = 0$ und $U_B = 0$ da der Netzwerkteil keinen Potenzialbezug hat
(Netzwerkteil offen, da $R_B \rightarrow \infty$)

3. Transformator (19 Punkte)

Gegeben ist folgender Wechselstrom-Transformator:



Daten:

$$U_1 = 20 \text{ kV}$$

$$S_n = 80 \text{ kVA}$$

$$f_n = 50 \text{ Hz}$$

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{9000}{180}$$

$$\hat{B} = 1 \text{ T} \quad (\text{zulässige magnetische Induktion})$$

$$l_{Fe} = 2 \text{ m} \quad (\text{mittlere Eisenlänge})$$

$$d_w = 0,3 \text{ m} \quad (\text{mittlerer Windungsdurchmesser})$$

$$S_{\max} = 2 \text{ A/mm}^2 \quad (\text{zulässige Stromdichte der Wicklungen})$$

$$\rho_{20} = 0,0172 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m} \quad (\text{spezifischer Kupferwiderstand bei } 20^\circ\text{C})$$

Hinweise:

- Für die ersten beiden Fragen soll der Transformator als ideal betrachtet werden (keine Verluste, keine Streuung, $\mu_{r,Fe} \rightarrow \infty$).
- Die Transformatorwurfsgleichung lautet: $U_1 = \frac{\hat{U}_1}{\sqrt{2}} = N_1 \cdot \frac{\hat{\Phi}_1}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi \cdot f = \sqrt{2}\pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{\Phi}_1$

Aufgaben:

- TR1) Berechnen Sie folgende Größen: U_2 , I_{1n} und I_{2n} ! *Annahme: idealer Transformator!* 3 P
- TR2) Wie groß muss der Eisenquerschnitt A_{Fe} sein, damit die zulässige magnetische Induktion \hat{B} nicht überschritten wird? *Annahme: idealer Transformator!* 2 P
- TR3) Berechnen Sie den Wicklungswiderstand $R = R_1 + R_2'$ bei einer Betriebstemperatur von 20°C . *Annahme: kreisförmige Windungen!* (Sollten Sie in TR1 keine Ergebnisse erzielt haben, rechnen Sie mit $I_{1n} = 6 \text{ A}$, $I_{2n} = 210 \text{ A}$, $U_2 = 380 \text{ V}$) 7 P
- TR4) An die Sekundärseite wird ein Amperemeter angeschlossen. 4 P
- Zeichnen Sie für diesen Versuch das vereinfachte Ersatzschaltbild des verlustbehafteten Transformators und erläutern Sie kurz, welche Vereinfachungen Sie annehmen dürfen und warum!
 - Skizzieren Sie das zugehörige Zeigerdiagramm.
- TR5) Wie groß ist die relative Kurzschlussspannung u_k , wenn im Kurzschlussversuch $\cos \varphi_k = 0,316$ bestimmt wurde? *Hinweis: Benutzen Sie das vereinfachte Ersatzschaltbild des Kurzschlussversuchs zur Berechnung.* (Sollten Sie in TR1 und TR3 keine Ergebnisse erzielt haben, rechnen Sie mit $I_{1n} = 6 \text{ A}$, $I_{2n} = 210 \text{ A}$, $U_2 = 380 \text{ V}$, $R = 119 \text{ } \Omega$) 3 P

TR1) Annahme: Idealer Transformator

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1 = \frac{180}{9000} \cdot 20\,000\text{ V} = 400\text{ V} = 0,4\text{ kV}$$

$$S_n = S_{1n} = S_{2n} \text{ (idealer Transformator, keine Verluste!)}$$

$$S_{1n} = U_{1n} \cdot I_{1n} \Rightarrow I_{1n} = \frac{S_{1n}}{U_{1n}} = \frac{80\text{ kVA}}{20\text{ kV}} = 4\text{ A}$$

$$S_{2n} = U_{2n} \cdot I_{2n} \Rightarrow I_{2n} = \frac{S_{2n}}{U_{2n}} = \frac{80\text{ kVA}}{0,4\text{ kV}} = 200\text{ A}$$

TR2) Annahme: Idealer Transformator

$$U_1 = \frac{\hat{U}_1}{\sqrt{2}} = N_1 \cdot \frac{\hat{\Phi}_1}{\sqrt{2}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{\Phi}_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{\Phi}_1$$

mit

$$\Phi = \int B \, dA \Rightarrow \hat{\Phi} = \hat{B} \cdot A$$

$$U_1 = \frac{\hat{U}_1}{\sqrt{2}} = N_1 \cdot \frac{\hat{\Phi}_1}{\sqrt{2}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{\Phi}_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{B} \cdot A_{Fe}$$

$$A_{Fe} = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{B}} = \frac{20\,000\text{ V}}{4,44 \cdot 50\text{ Hz} \cdot 9\,000 \cdot 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}} = 0,01\text{ m}^2 = 100\text{ cm}^2$$

TR3) Berechnung der Wicklungswiderstände

$$R_{1,20} = \rho_{20} \cdot \frac{l_1}{A_1}$$

$$A_1 = \frac{l_1}{s_{max}} = \frac{4\text{ A}}{2 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 2\text{ mm}^2$$

$$l_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot N_1 = \pi \cdot d_w \cdot N_1 = \pi \cdot 0,3\text{ m} \cdot 9000 = 8482,3\text{ m}$$

$$R_{1,20} = \rho_{20} \cdot \frac{l_1}{A_1} = 0,0172 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{8482,3\text{ m}}{2\text{ mm}^2} = 72,95\Omega$$

$$R_{2,20} = \rho_{20} \cdot \frac{l_2}{A_2}$$

$$A_2 = \frac{l_2}{s_{max}} = \frac{200\text{ A}}{2 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 100\text{ mm}^2$$

$$l_2 = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot N_2 = \pi \cdot d_w \cdot N_2 = \pi \cdot 0,3\text{ m} \cdot 180 = 169,65\text{ m}$$

$$R_{2,20} = \rho_{20} \cdot \frac{l_2}{A_2} = 0,0172 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{169,65\text{ m}}{100\text{ mm}^2} = 0,029\Omega$$

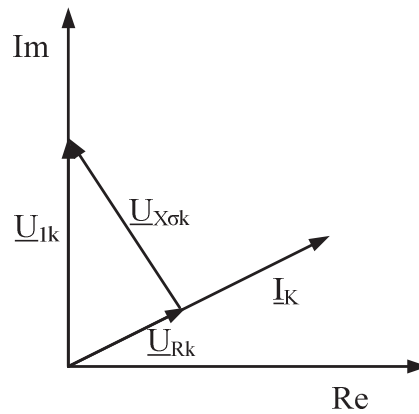
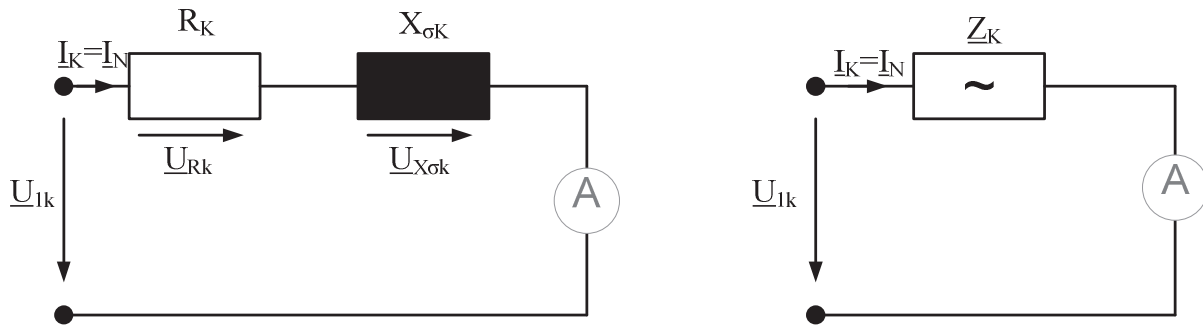
Umrechnung auf die Primärseite:

$$R'_{2,20} = R_{2,20} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = 0,029\Omega \cdot \left(\frac{9000}{180}\right)^2 = 72,5\Omega$$

Gesamtwiderstand:

$$R_{20} = R_{1,20} + R'_{2,20} = 72,95\Omega + 72,5\Omega = 145,45\Omega$$

TR4) Innenwiderstand des Amperemeters strebt gegen 0, daher handelt es sich hierbei um den Kurzschlussversuch.



Vereinfachungen:

R_k und $X_{\sigma k} \ll R_{Fe}$ und $X_h \rightarrow I_k \gg I_o$ und somit können R_{Fe} und X_h vernachlässigt werden.

TR5) Relative Kurzschlussspannung u_k :

Aufbauend auf Aufgabe 4:

$$\underline{U}_{1k} = \underline{U}_{Rk} + \underline{U}_{X\sigma k}$$

Berechnung von U_{Rk} mittels des Widerstands aus 3 und dem Nennstrom $I_N = I_{1k} = 4 \text{ A}$:

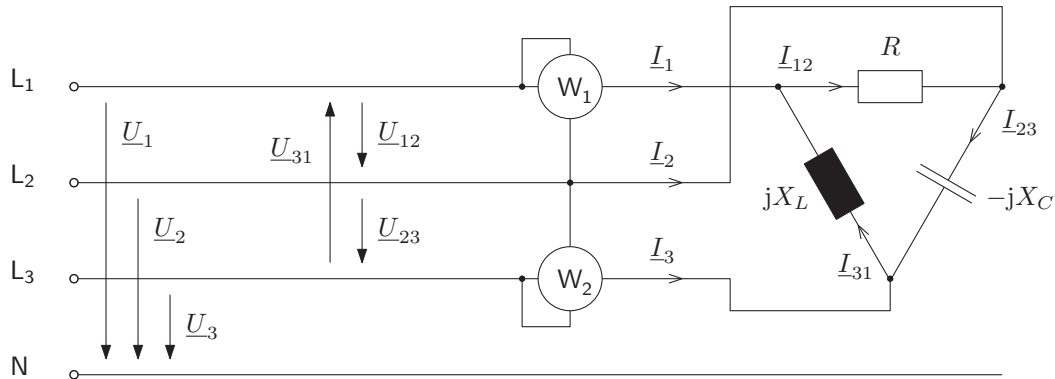
$$U_{Rk} = I_{1k} \cdot R = 4 \text{ A} \cdot 145,45 \Omega = 581,8 \text{ V}$$

$$\cos \varphi_k = \frac{U_{Rk}}{U_{1k}} \rightarrow U_{1k} = \frac{U_{Rk}}{\cos \varphi_k} = \frac{581,8 \text{ V}}{0,316} = 1841,14 \text{ V}$$

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1n}} = \frac{1841,14 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}} = 0,0921 = 9,21\%$$

4. Drehstrom (19 Punkte)

Gegeben ist die nachfolgende Schaltung, in der der Nullleiter N den Sternpunkt des symmetrischen Dreileiter-Systems L_1 - L_2 - L_3 darstellt.



Folgende Werte sind bekannt:

$$\underline{U}_1 = \frac{13\text{V}}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j30^\circ}, \quad \underline{U}_2 = \frac{13\text{V}}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j150^\circ}, \quad \underline{U}_3 = \frac{13\text{V}}{\sqrt{3}} \cdot e^{j90^\circ},$$

$$\underline{U}_{12} = 13\text{V}, \quad \underline{U}_{23} = 13\text{V} \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \underline{U}_{31} = 13\text{V} \cdot e^{j120^\circ},$$

$$R = 1\ \Omega, \quad |X_L| = |X_C| = \sqrt{3} \cdot R$$

Aufgaben:

- DS1) Berechnen Sie die Strangströme \underline{I}_{12} , \underline{I}_{23} und \underline{I}_{31} nach Betrag und Phase. 3 P
- DS2) Wie groß sind die Leiterströme \underline{I}_1 und \underline{I}_3 nach Betrag und Phase. 4 P
- DS3) Ermitteln Sie die an Widerstand, Kondensator und Induktivität jeweils umgesetzten Wirk- und Blindleistungen! 6 P
- DS4) Welche Schaltung bilden die Wattmeter? Berechnen Sie die Leistungen, die von den Instrumenten einzeln und als Summe angezeigt werden! 4 P
- DS5) Welche Ergebnisse können die beiden Wattmeter in dieser Schaltung liefern? 2 P

DS 1.) ges.: Strangströme \underline{I}_{12} , \underline{I}_{23} & \underline{I}_{31}

$$\underline{I}_{12} = \frac{U_{12}}{Z_{12}} = \frac{13V \cdot e^{j0}}{1\Omega \cdot e^{j0}} = 13A \cdot e^{j0}$$

$$\underline{I}_{23} = \frac{U_{23}}{Z_{23}} = \frac{13V \cdot e^{-j120^\circ}}{-jX_C} = \frac{13V \cdot e^{-j120^\circ}}{13\sqrt{3}\Omega \cdot e^{-j90^\circ}} = 7,5A \cdot e^{-j30^\circ}$$

$$\underline{I}_{31} = \frac{U_{31}}{Z_{31}} = \frac{13V \cdot e^{+j120^\circ}}{jX_L} = \frac{13V \cdot e^{+j120^\circ}}{13\sqrt{3}\Omega \cdot e^{j90^\circ}} = 7,5A \cdot e^{+j30^\circ}$$

DS 2.) ges.: Leiterströme \underline{I}_1 & \underline{I}_3

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}$$

$$\begin{aligned} &= 13A \cdot e^{j0} - (7,5A \cdot \cos 30^\circ + j 7,5A \cdot \sin 30^\circ) \\ &= 13A - (6,5A + j 3,75A) = 7,5A \cdot e^{j30^\circ} \end{aligned}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23}$$

$$\begin{aligned} &= (6,5A + j 3,75A) - (6,5A - j 3,75A) \\ &= j 7,5A = 7,5A \cdot e^{j90^\circ} \end{aligned}$$

DS 3.) ges.: P_{WR} , P_{BR} , P_{WC} , P_{BC} , P_{WL} , P_{BL}

$$P_{WR} = \frac{U_R^2}{R} = \frac{(13V)^2}{1\Omega} = 169W$$

$$P_{BR} = 0$$

$$P_{WC} = 0$$

$$P_{BC} = -\frac{U_C^2}{X_C} = -\frac{(13V)^2}{13\sqrt{3}\Omega} = -97,57VA_r$$

$$P_{wL} = + \frac{U_L}{X_L} = \frac{(13V)^2}{13^2 \Omega} = 97,57 \text{ VAR}$$

DS 4.) Atomschaltung

ges.: $P_1, P_2, \sum P_i = P_{WR}$

$$P_1 = \underline{U}_{12} \cdot \underline{I}_1 \cdot \cos \varphi \quad \underline{U}_{12} \text{ bzw. } \underline{I}_1 = 13V \cdot 7,5A \cdot \cos [0^\circ - 30^\circ]$$
$$= 84,44 \text{ W}$$

$$P_2 = \underline{U}_{23} \cdot \underline{I}_3 \cdot \cos \varphi \quad -\underline{U}_{23} \text{ bzw. } \underline{I}_3 = 13V \cdot 7,5A \cdot \cos [(-120 + 180) - 30^\circ]$$
$$= 84,44 \text{ W}$$

$$P_1 + P_2 = P_{WR} = 169 \text{ W}$$

DS 5.) Nur Wirkleistung
Keine Blindleistung