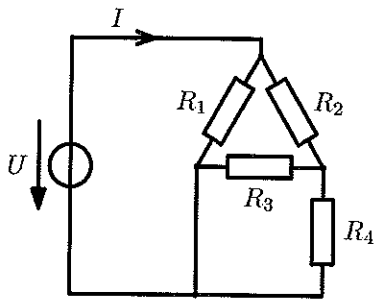


1. Kurzfragen zu Elektrotechnik 1 (18 Punkte)

KF1) Bestimmen Sie den Widerstand R_2 in der skizzierten Schaltung für den Fall, dass $U = 10\text{ V}$, $I = 2\text{ A}$ und $R_1 = R_3 = R_4 = 10\ \Omega$ sind!



$$R_{\text{ges}} = \frac{U}{I} = \frac{10\text{ V}}{2\text{ A}} = 5\ \Omega$$

und

$$R_{\text{ges}} = R_1 \parallel (R_2 + (R_3 \parallel R_4))$$

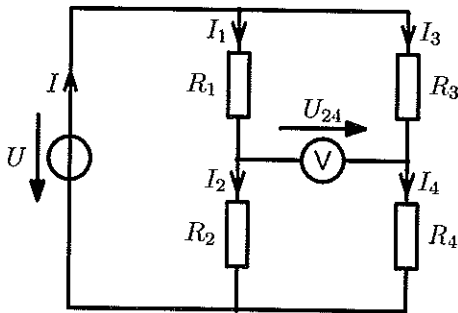
$$= 10\ \Omega \parallel (R_2 + (10\ \Omega \parallel 10\ \Omega)) = 10\ \Omega \parallel (R_2 + 5\ \Omega)$$

$$\Rightarrow 5\ \Omega \stackrel{!}{=} 10\ \Omega \parallel (R_2 + 5\ \Omega)$$

$$\Rightarrow R_2 = 5\ \Omega$$

KF2) Welche Bedingung ist erfüllt, wenn die dargestellte Wheatstone-Brücke abgeglichen ist?

1 P



$$U_{24} = 0$$

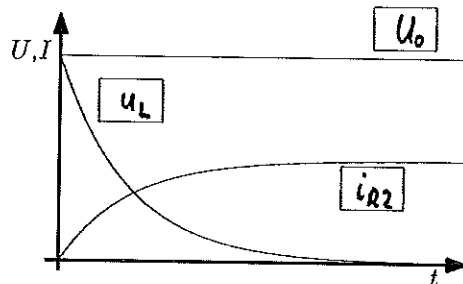
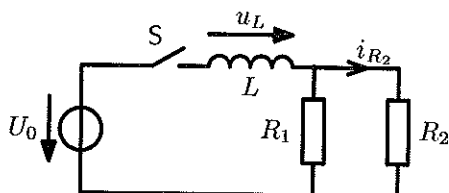
oder

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

KF3) In der dargestellten Schaltung ist der Schalter S zunächst geöffnet. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird der Schalter dann geschlossen.

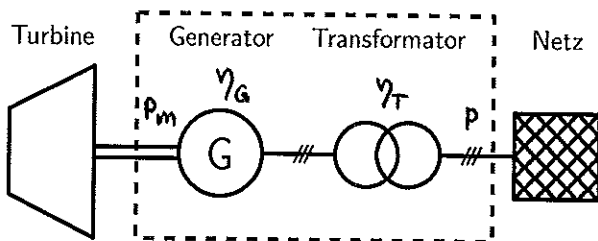
3 P

Beschriften Sie die Verläufe im Diagramm des Schaltvorgangs mit den entsprechenden Größen des Schaltbildes!



KF4) In einem Wasserkraftwerk wird die mechanische Leistung der Turbine von einem Generator in 1 P elektrische Leistung gewandelt und über einen Transformator in das elektrische Versorgungsnetz eingespeist. Die Wirkungsgrade von Generator und Transformator betragen $\eta_G = 0,92$ und $\eta_T = 0,96$.

Bestimmen Sie die Verlustleistung des Wasserkraftwerks (nur Generator und Transformator), für den Fall, dass es eine elektrische Leistung von $P = 150 \text{ MW}$ an das Netz abgibt!



$$P = \eta_G \cdot \eta_T \cdot P_m$$

$$\Rightarrow P_m = \frac{P}{\eta_G \cdot \eta_T} = \frac{150 \text{ MW}}{0,92 \cdot 0,96}$$

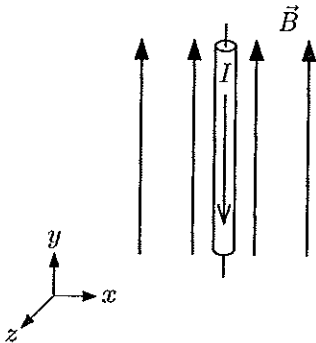
$$= 169,8 \text{ MW}$$

$$P_V = P_m - P = 169,8 \text{ MW} - 150 \text{ MW}$$

$$= 19,8 \text{ MW}$$

KF5) Ein mit dem Gleichstrom $I = 1 \text{ A}$ durchflossener Leiter der Länge $l = 5 \text{ cm}$ befindet sich in 1 P einem homogenen Magnetfeld mit der Flussdichte $B = 0,5 \text{ T}$.

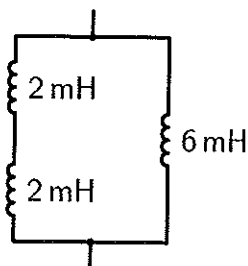
Wie groß ist die Kraft F , die auf den Leiter wirkt?



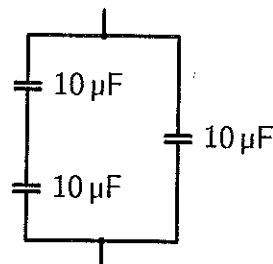
$$\vec{F} = I \cdot (\vec{e} \times \vec{B}) = 0$$

da \vec{e} und \vec{B} parallel

KF6) Gegeben sind die beiden Schaltungen. Bestimmen Sie die Gesamtinduktivität L_{ges} und die 1 P Gesamtkapazität C_{ges} !

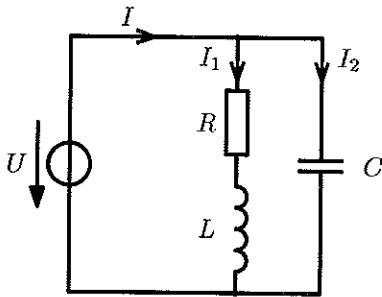


$$L_{\text{ges}} = \underline{2,4 \text{ mH}}$$



$$C_{\text{ges}} = \underline{15 \mu\text{F}}$$

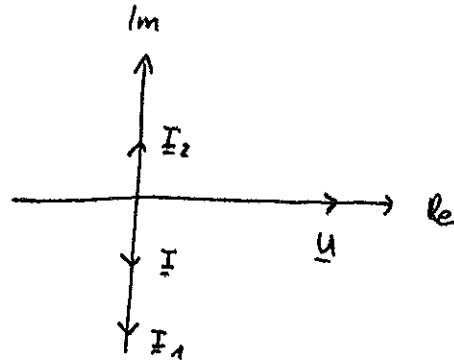
KF7) Geben Sie für die nachstehende Schaltung für die Werte $R = 0$, $L = 79,6 \mu\text{H}$, $C = 159 \mu\text{F}$, 4P $U = 10\text{V}$ und $f = 1000\text{Hz}$ die Beträge der Impedanzen der beiden Schaltungszweige an und skizzieren Sie das zugehörige Zeigerdiagramm aller Spannungen und Ströme!



$$Z_1 = \omega \cdot L \quad \text{da } R=0$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot 1000\text{Hz} \cdot 79,6 \mu\text{H} = 0,5 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000\text{Hz} \cdot 159 \mu\text{F}} = 1 \Omega$$



KF8) Bestimmen Sie aus der komplexen Scheinleistung $\underline{S} = 400\text{W} + j300\text{var}$ und der Spannung 5P $\underline{U} = 120\text{V} + j50\text{V}$ den zugehörigen Strom \underline{I} nach Real- und Imaginärteil!

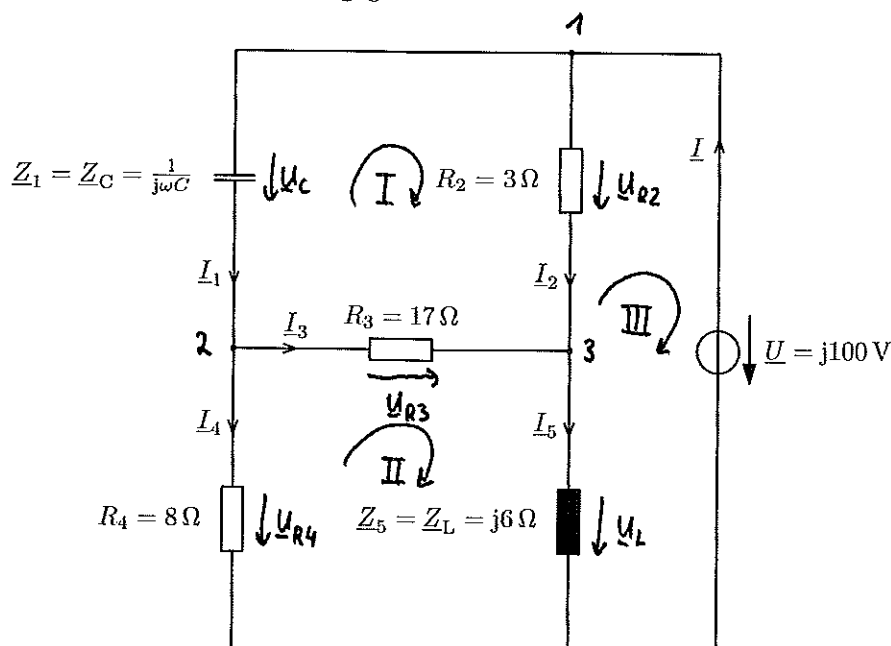
$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^*$$

$$\Rightarrow \underline{I}^* = \frac{\underline{S}}{\underline{U}} = \frac{400\text{W} + j300\text{var}}{120\text{V} + j50\text{V}} = \frac{500\text{W} \cdot e^{j36,87^\circ}}{130\text{V} \cdot e^{j22,62^\circ}} = 3,85\text{A} \cdot e^{j14,25^\circ}$$

$$\Rightarrow \underline{I} = 3,85\text{A} \cdot e^{-j14,25^\circ} = 3,73\text{A} - j0,947\text{A}$$

2. Wechselstrom (18 Punkte)

Es ist folgendes Wechselstromnetzwerk gegeben:



Aufgaben:

- WS1) Stellen Sie alle linear unabhängigen Maschen- und Knotenpunktgleichungen auf! 6 P
- WS2) Berechnen Sie den Strom \underline{I}_2 unter der Voraussetzung, dass R_3 gegen unendlich geht ($R_3 \rightarrow \infty$)! 3 P
- WS3) Bestimmen Sie die Kapazität C so, dass bei einer Frequenz von $f = 50 \text{ Hz}$ der Strom \underline{I}_3 für das gegebene R_3 zu null wird! 4 P
- WS4) Zeichnen Sie die Zeiger von \underline{I} und \underline{U} in ein Diagramm! Wählen Sie dabei folgende Skalierung: 1 cm $\hat{=}$ 20 V und 1 cm $\hat{=}$ 2,5 A. Zeichnen Sie zusätzlich den für den Leistungsfaktor entscheidenden Winkel φ ein! 5 P
- Falls Sie in den vorherigen Aufgaben keine Lösung erzielen konnten, gehen Sie von folgenden Werten aus: $\underline{I}_1 = 5 \text{ A} - j10 \text{ A}$, $\underline{I}_2 = -8,33 \text{ A} - j6,67 \text{ A}$.*

$$\text{WS1) (I)} \quad -\underline{U}_C + \underline{U}_{R2} - \underline{U}_{R3} = 0$$

$$\text{(II)} \quad -\underline{U}_{R4} + \underline{U}_{R3} + \underline{U}_L = 0$$

$$\text{(III)} \quad -\underline{U}_{R2} + \underline{U} - \underline{U}_L = 0$$

$$\text{(1)} \quad -\underline{I}_1 - \underline{I}_2 + \underline{I} = 0$$

$$\text{(2)} \quad \underline{I}_1 - \underline{I}_3 - \underline{I}_4 = 0$$

$$\text{(3)} \quad \underline{I}_3 + \underline{I}_2 - \underline{I}_5 = 0$$

$$\text{WS2) (III)} \quad -\underline{U}_{R2} + \underline{U} - \underline{U}_L = 0$$

$$\Rightarrow -R_2 \cdot \underline{I}_2 + \underline{U} - \underline{Z}_L \cdot \underline{I}_2 = 0$$

$$\Rightarrow \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{R_2 + \underline{Z}_L} = \frac{j 100V}{3\Omega + j6\Omega} \cdot \frac{3\Omega - j6\Omega}{3\Omega - j6\Omega} = 13,33A + j6,67A$$

$$\text{WS3) } \underline{I}_3 \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow \text{Brücke ist abgeglichen}$$

$$\Rightarrow \frac{\underline{Z}_C}{R_4} = \frac{R_2}{\underline{Z}_L}$$

$$\Rightarrow \underline{Z}_C = \frac{R_2 \cdot R_4}{\underline{Z}_L} = \frac{3\Omega \cdot 8\Omega}{j6\Omega} = -j4\Omega$$

$$\underline{Z}_C = -j \frac{1}{\omega C}$$

$$\Rightarrow C = -j \frac{1}{\omega \underline{Z}_C} = -j \frac{1}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot (-j4\Omega)} = 0,796 \text{ mF}$$

$$\text{WS4) (I)} \quad -\underline{U}_C + \underline{U}_{R2} + \underline{U}_{R3} = 0 \quad \text{mit } \underline{U}_{R3} = 0$$

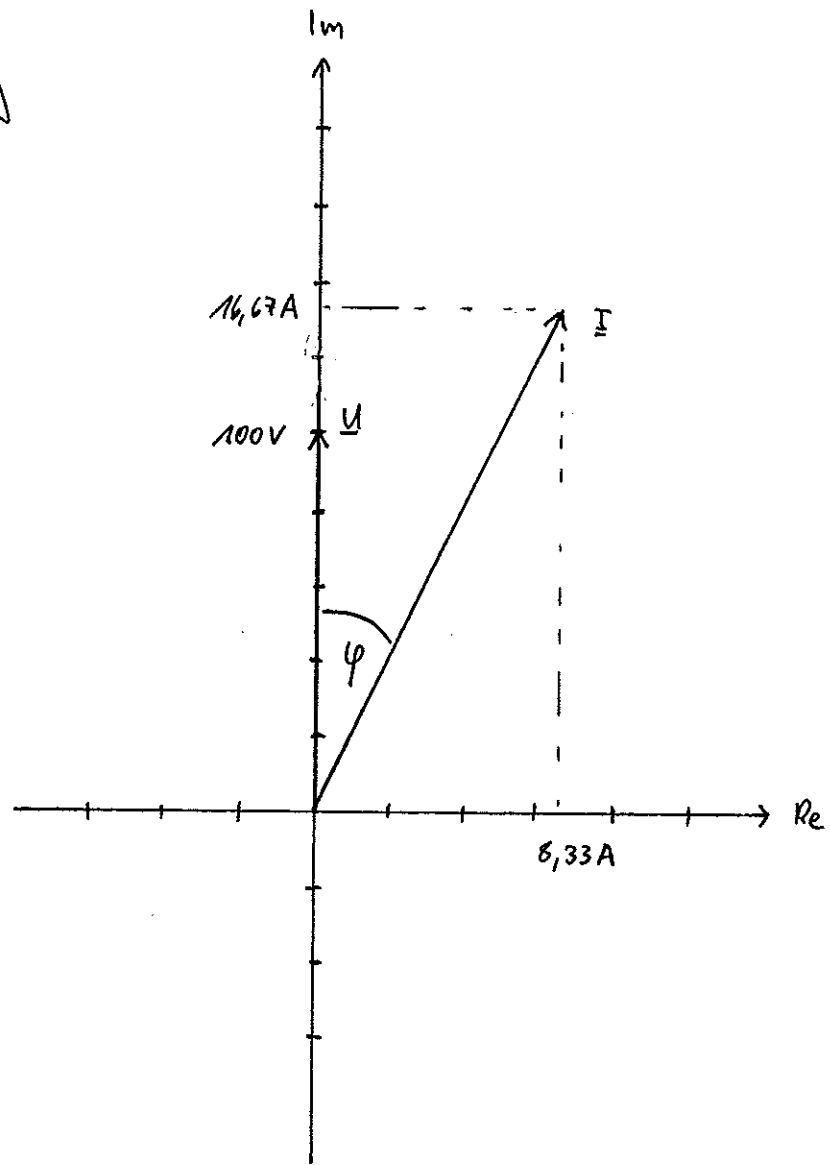
$$\Rightarrow -\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_C + \underline{I}_2 \cdot R_2 = 0$$

$$\Rightarrow \underline{I}_1 = \frac{R_2}{\underline{Z}_C} \cdot \underline{I}_2 = \frac{3\Omega}{-j4\Omega} \cdot (13,33A + j6,67A) = -5A + j10A$$

$$\text{(1)} \quad -\underline{I}_1 - \underline{I}_2 + \underline{I} = 0$$

$$\Rightarrow \underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = -5A + j10A + 13,33A + j6,67A = 8,33A + j16,67A$$

WS4) Fortsetzung



3. Elektrisches Feld (18 Punkte)

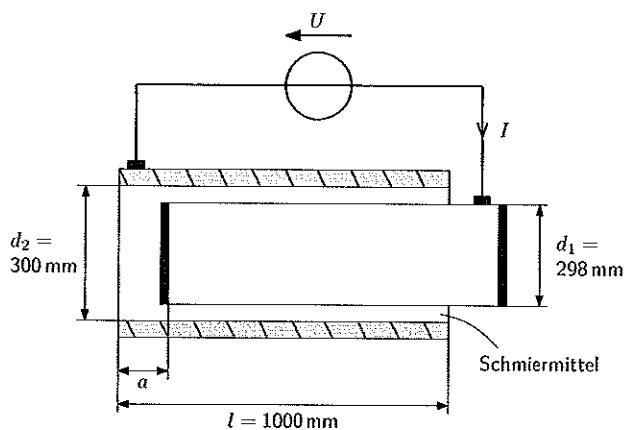


Bild 1: Schnittbild der Messanordnung

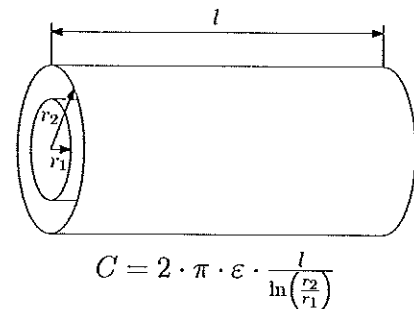


Bild 2: Kapazität des Zylinderkondensators

Sie sollen für die Versuchsanordnung aus Bild 1 die Kapazität messtechnisch bestimmen. Bei dem Aufbau handelt es sich um ein leitfähiges Rohr, in dem ein konzentrischer, zylinderförmiger Kolben mit leitendem Mantel und nicht leitenden Enden geführt wird. Der Raum zwischen Kolben und Rohr ist vollständig durch ein nicht leitendes Schmiermittel ausgefüllt. Der Kolben ist anfangs vollständig in das Rohr eingeschoben ($a = 0$).

Zur Bestimmung der Kapazität geben Sie einen Spannungssprung von 100 V über zwei Zuleitungen auf die Anordnung. Der dabei von Ihnen gemessene Stromverlauf lässt sich über die folgende Gleichung beschreiben:

$$i(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{mit } I_0 = 0,1 \text{ A}, \quad \tau = 23,28 \mu\text{s}.$$

Aufgaben:

Hinweis: Für die Berechnungen ist die Kondensator-Anordnung als ideal anzunehmen; Randeffekte sowie Verluste im Dielektrikum können vernachlässigt werden. Alle Feldlinien verlaufen parallel.

- EF1) Bestimmen Sie die Ladungsmenge Q die durch den Schaltvorgang in der Anordnung verschoben wurde! (*Hinweis: Gehen Sie davon aus, dass der Ladevorgang für $t \rightarrow \infty$ abgeschlossen ist.*) 5 P
- EF2) Bestimmen Sie mit Hilfe der zuvor berechneten Ladungsmenge die Kapazität der Anordnung! (*Wenn Sie in EF1 die Ladung nicht bestimmen konnten, rechnen Sie mit $Q = 2,33 \mu\text{As}$ weiter.*) 3 P
- EF3) Berechnen Sie die relative Permittivität ϵ_r des Schmiermittels mithilfe von Bild 2! (*Wenn Sie in EF2 die Kapazität nicht bestimmen konnten, rechnen Sie mit $C = 23,3 \text{ nF}$ weiter.*) 3 P
- EF4) Nachdem Sie Ihre Messung durchgeführt haben, klemmen sie die Spannung ab, ohne eine Entladung durchgeführt zu haben. Beim Ladevorgang befand sich der Kolben bei $a = 0$. Der Kolben wird nun auf eine Position von $a = 50 \text{ cm}$ bewegt. Berechnen Sie die Spannung U , die sich auf dieser Position einstellt! 5 P
- EF5) Geben Sie die Formel für die im elektrischen Feld gespeicherte Energie in Abhängigkeit von der Position a des Kolbens im Rohr bei fester Spannung U_0 an! 2 P

$$\begin{aligned}
 \text{EF1)} \quad Q &= \int_0^{\infty} i(t) dt = \int_0^{\infty} I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \left[-\tau \cdot I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]_0^{\infty} \\
 &= 0 - (-\tau \cdot I_0) = \tau \cdot I_0 \\
 &= 23,28 \mu\text{s} \cdot 0,1 \text{ A} = 2,33 \mu\text{As}
 \end{aligned}$$

$$\text{EF2)} \quad C = \frac{Q}{U} = \frac{2,33 \mu\text{As}}{100 \text{ V}} = 23,3 \text{ nF}$$

$$\text{EF3)} \quad C = 2\pi \cdot \epsilon \cdot \frac{l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{l}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow \epsilon_r &= \frac{C \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi \epsilon_0 \cdot l} = \frac{23,3 \text{ nF} \cdot \ln\left(\frac{300 \text{ mm}}{298 \text{ mm}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 1 \text{ m}} \\
 &= 2,8
 \end{aligned}$$

$$\text{EF4)} \quad Q = C_{\text{alt}} \cdot U_{\text{alt}} = C_{\text{neu}} \cdot U_{\text{neu}}$$

$$\Rightarrow U_{\text{neu}} = \frac{C_{\text{alt}}}{C_{\text{neu}}} \cdot U_{\text{alt}}$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{l}{\ln\left(\frac{d_2}{r_1}\right)}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{(l-a)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}} \cdot U_{\text{alt}} = \frac{l}{l-a} \cdot U_{\text{alt}}$$

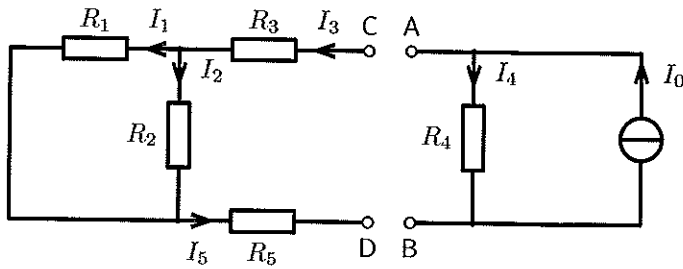
$$= \frac{1 \text{ m}}{1 \text{ m} - 0,5 \text{ m}} \cdot 100 \text{ V} = 200 \text{ V}$$

$$\text{EF5)} \quad W(a) = \frac{1}{2} \cdot C(a) \cdot U_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{l-a}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot U_0^2$$

$$= \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{l-a}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot U_0^2$$

4. Gleichstrom (18 Punkte)

Es ist folgende Schaltung mit nebenstehenden Werten gegeben:



$$\begin{aligned}
 I_0 &= 10 \text{ mA} \\
 R_1 &= 4 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 6 \text{ k}\Omega \\
 R_3 &= 9,6 \text{ k}\Omega \\
 R_4 &= 5 \text{ k}\Omega \\
 R_5 &= 8 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

Aufgaben:

- GS1) Wandeln Sie die Stromquelle I_0 bezüglich der Klemmen A und B in eine Spannungsquelle um und geben Sie die Spannung dieser an! 2 P
- GS2) Zeichnen Sie ein Ersatzschaltbild für die Ersatzspannungsquelle! 2 P
- GS3) Zeichnen Sie die U-I-Kennlinie dieser Ersatzspannungsquelle! Wählen Sie hierzu einen geeigneten Maßstab und kennzeichnen Sie die relevanten Punkte (mit Zahlenwerten)! 5 P

Die Klemme A wird mit der Klemme C und die Klemme B mit der Klemme D des abgebildeten Netzwerks verbunden.

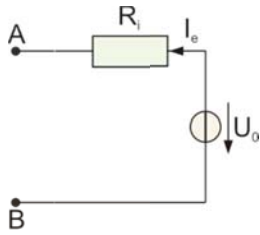
- GS4) Bestimmen Sie die Ströme I_1 , I_2 und I_3 die im Netzwerk fließen! 6 P

Nun wird das Netzwerk wieder von der Quelle getrennt und ein Verbraucher mit einem variablen Innenwiderstand R_a wird an die Klemmen A und B der Quelle angeschlossen.

- GS5) Wie groß ist die am Verbraucher umgesetzte Leistung nach erfolgter Leistungsanpassung? 3 P

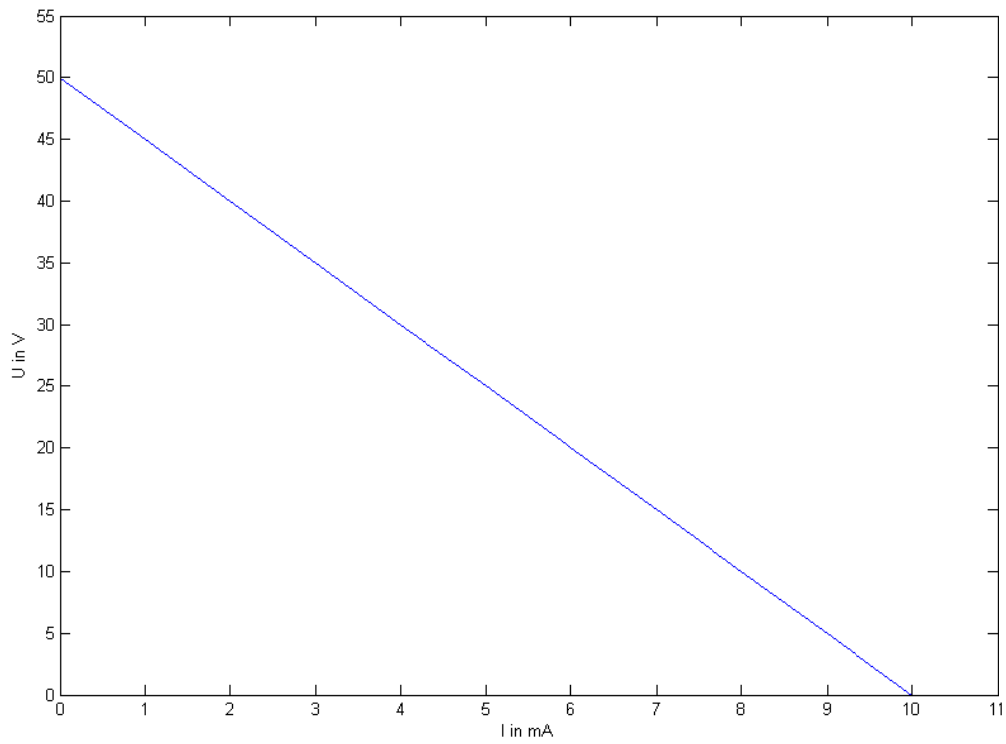
GS1) $U_0 = R_4 \cdot I_0 = 5000 \Omega \cdot 0,01 \text{ A} = 50 \text{ V}$

GS2)

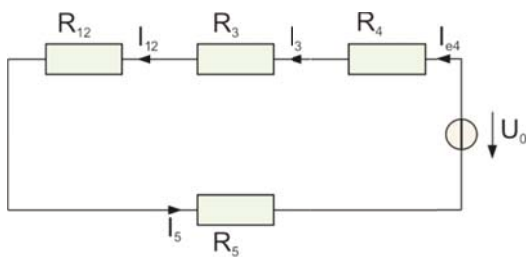


GS3) $I_K = I_0 = 0,01 \text{ A}$

$U_0 = 50 \text{ V}$



GS4)



$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6000 \Omega \cdot 4000 \Omega}{6000 \Omega + 4000 \Omega} = 2400 \Omega$$

$$I_{12} = I_3 = I_5 = \frac{U_0}{R_4 + R_3 + R_{12} + R_5} = \frac{50 \text{ V}}{5000 \Omega + 9600 \Omega + 2400 \Omega + 8000 \Omega} = 0,002 \text{ A}$$

$$U_3 = R_3 \cdot I_3 = 9600 \Omega \cdot 0,002 \text{ A} = 19,2 \text{ V}$$

$$U_5 = R_5 \cdot I_5 = 8000 \Omega \cdot 0,002 \text{ A} = 16 \text{ V}$$

$$U_1 = U_2 = R_{12} \cdot I_{12} = 2400 \Omega \cdot 0,002 \text{ A} = 4,8 \text{ V}$$

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{4,8 \text{ V}}{4000 \Omega} = 0,0012 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{4,8 \text{ V}}{6000 \Omega} = 0,0008 \text{ A}$$

GS5) Bedingung: $R_a = R_i = 5000 \Omega$

$$P = I^2 \cdot R_a = \left(\frac{U_0}{R_i + R_a} \right)^2 \cdot R_a = \left(\frac{50 \text{ V}}{10000 \Omega} \right)^2 \cdot 5000 \Omega = 0,125 \text{ W}$$

5. Kurzfragen zu Elektrotechnik 2 (18 Punkte)

KF1) In einem Bahnhof ist ein Fehler an einer Oberleitung aufgetreten, der nun beseitigt werden muss. Nennen Sie zu den aufgeführten Tätigkeiten die jeweils passende Sicherheitsregel! 4P

Hinweis: Nicht jede Tätigkeit passt zu einer Sicherheitsregel und es kommen nicht alle Sicherheitsregeln vor.

- Den Strom in der Oberleitung messen.

keine Sicherheitsregel

- Den Hauptschalter ausschalten.

Freischalten

- Die Baustelle großräumig absperren.

keine Sicherheitsregel

- Den Hauptschalter mit einem Schloss in ausgeschalteter Position fixieren.

Gegen Wiedereinschalten sichern

- Die Spannung zwischen der ausgeschalteten Oberleitung und den Schienen messen.

Spannungsfreiheit feststellen

- Das Personal mit der elektrischen Anlage vertraut machen und über die Arbeitssicherheit aufklären.

keine Sicherheitsregel

- Die Oberleitung leitfähig mit den Schienen verbinden.

Erden und Kurzschließen

- Leitfähige Teile an Zügen und an der Oberleitung kennzeichnen.

keine Sicherheitsregel

- Den Boden der Baustelle mit isolierendem Material abdecken.

keine Sicherheitsregel

KF2) Ein dreiphasiger Motor wird an ein symmetrisches Drehstromnetz angeschlossen. Der in Dreieck geschaltete Motor nimmt im Leerlauf eine Blindleistung von $Q_{\Delta} = 10 \text{ kvar}$ auf. 2 P

a) Welche Blindleistung Q_{λ} nimmt derselbe Motor auf, wenn man ihn in Stern schaltet?

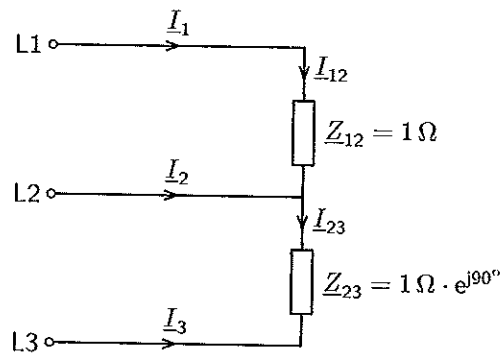
$$Q_{\lambda} = \frac{1}{3} Q_{\Delta} = \frac{1}{3} \cdot 10 \text{ kvar} = 3,3 \text{ kvar}$$

b) Warum kann bei einigen dreiphasigen Motoren im Betrieb zwischen Stern- und Dreieckschaltung umgeschaltet werden?

- Um die Ströme beim Anlauf des Motors zu verringern.
- Um die Baugröße der Maschine zu verringern.
- Um bei kleiner Last weniger Wirkleistung zu benötigen.

KF3) Gegeben ist der dargestellte, unsymmetrische Drehstromverbraucher. 2 P

Berechnen Sie den Phasenwinkel φ_{23} zwischen dem Strom I_{23} und der Spannung U_{23} !



$$\varphi_{23} = \varphi_{U_{23}} - \varphi_{I_{23}} = 90^\circ$$

KF4) An einer Bahnbaustelle soll die Versorgung einer Großmaschine ($P = 5 \text{ MW}$) über die Oberleitung geschehen. Dazu wird ein einphasiger Transformator mit folgenden Daten angeschlossen: $u_k = 6\%$, $U_{1N} = 15 \text{ kV}$, $f = 16,7 \text{ Hz}$, $\ddot{u} = 15$ 4 P

a) Berechnen Sie die Sekundärspannung im Leerlauf!

$$U_2 = \frac{U_{1N}}{\ddot{u}} = \frac{15 \text{ kV}}{15} = 1 \text{ kV}$$

b) Geben Sie die den Sekundärstrom im Leerlauf an!

$$I_2 = 0 \quad (\text{Leerlauf bedeutet keine Last angeschlossen und damit kein Stromfluss})$$

c) Geben Sie die Sekundärspannung im Kurzschlussfall an!

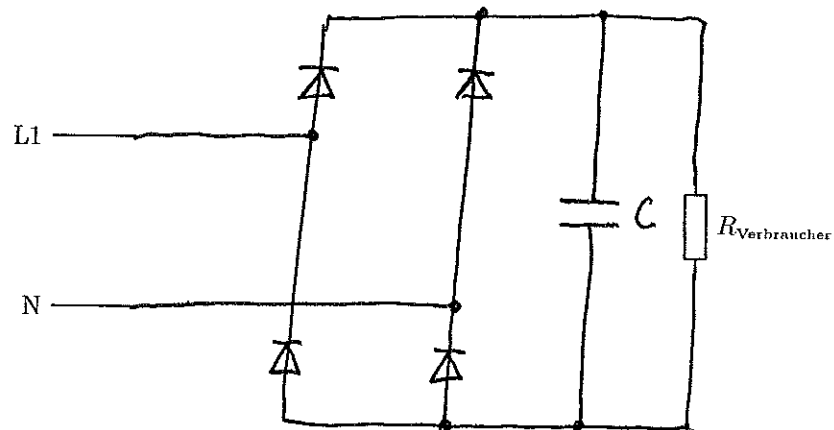
$$U_2 = 0 \quad (\text{Kurzschluss bedeutet der Widerstand ist null und damit gibt es keinen Spannungsabfall})$$

d) Geben Sie den *Primärstrom* beim Kurzschlussversuch an (ohne Rechnung, kurze Beschreibung genügt)!

$$I_{1K} = I_{1N}$$

KF5) Ein Gleichspannungsverbraucher soll über einen Gleichrichter an einem einphasigen Wechselstromnetz betrieben werden. 3 P

- a) Zeichnen Sie eine B2-Schaltung mit einer Einrichtung zur Spannungsglättung in das Schaltbild ein!

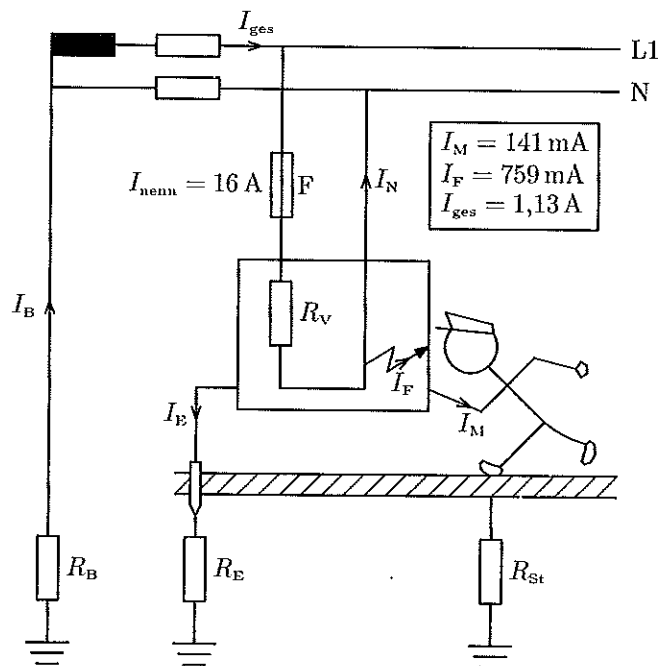


- b) Was ist der Vorteil einer B2-Schaltung gegenüber einer E1-Schaltung?

- Die Ventile der B2-Schaltung werden nur 1/4 so stark belastet, wie das Ventil in der E1-Schaltung (Kosteneinsparung, Lebensdauer).
- Bei der lückenden Ausgangsspannung der E1-Schaltung funktionieren Glättungseinrichtungen nicht.

Die B2-Schaltung liefert eine glattere Ausgangsspannung.
(Nennen Sie hier einen Vorteil, falls die angegebenen Antworten nicht zutreffen!)

KF6) Ein Mensch steht auf leitendem Untergrund und berührt das Gehäuse einer defekten Maschine. Das Gehäuse der Maschine ist lokal über einen Erdspieß geerdet. 3 P



a) Ist der Mensch trotz des Einsatzes einer Sicherung gefährdet? Begründen Sie Ihre Antwort!

Der Mensch ist gefährdet, da $I_M = 141 \text{ mA} > 17 \text{ mA}$

b) Berechnen Sie die Ströme I_N und I_E !

$$I_N = I_{ges} - I_F = 1,13 \text{ A} - 759 \text{ mA} = 371 \text{ mA}$$

$$I_E = I_F - I_M = 759 \text{ mA} - 141 \text{ mA} = 618 \text{ mA}$$

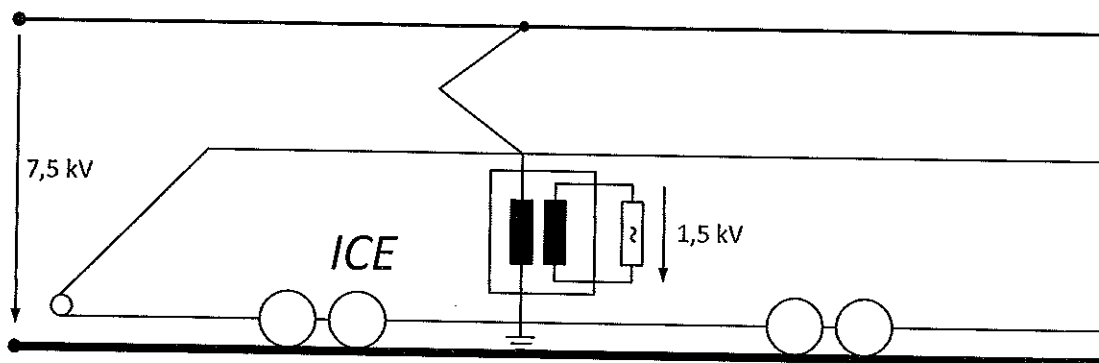
c) Nennen Sie *eine* Maßnahme, um den Menschen zu schützen, ohne die Funktion der Maschine im regulären Betrieb zu beeinflussen!

- Erdungswiderstand R_E des Erdspießes verringern
- Boden im Bereich der Maschine isolieren
- Maschine mit Schutzisolierung versehen
- Einsatz eines Fehlerstromschutzschalters (RCD)
- ...

6. Transformator (17 Punkte)

Der unten skizzierte Intercity-Express (ICE 403) besitzt zur Umspannung der Fahrdrabtspannung (hier $U_{1N} = 7,5 \text{ kV}$) auf die Eingangsspannung des Antriebsumrichters ($U_{2N} = 1,5 \text{ kV}$) einen Wechselstromtransformator mit folgenden Kenndaten:

Scheinleistung S_N	3000 kVA
Primärspannung U_{1N}	7,5 kV
Sekundärspannung U_{2N}	1,5 kV
Wicklungszahl Sekundärseite N_2	200
Nennfrequenz f_N	16,7 Hz



Aufgaben:

Geben Sie die Ergebnisse gerundet auf drei Nachkommastellen an!

- TR1) Berechnen Sie die primäre Wicklungszahl N_1 des Transformators! (Annahme: idealer Transformator). 1 P
- TR2) Berechnen Sie den Primärnennstrom I_{1N} und den Sekundärnennstrom I_{2N} ! (Annahme: idealer Transformator). 2 P
- TR3) Zeichnen Sie das vollständige Ersatzschaltbild des *verlustbehafteten* Transformators und beschriften Sie alle vorkommenden Elemente, sowie Spannungen und Ströme! Erläutern Sie zusätzlich die Elemente *kurz!* 5 P

Zur Ermittlung bestimmter Verluste wird der Transformator sekundärseitig kurzgeschlossen. Bei diesem Kurzschlussversuch wurden die folgenden Messwerte aufgenommen:

Kurzschlussverlustleistung P_k	200 kW
Leistungsfaktor im Kurzschluss $\cos \varphi_k$	0,416

- TR4) Berechnen Sie die Elemente R_1 , R'_2 , $L_{1\sigma}$, $L'_{2\sigma}$, R_2 und $L_{2\sigma}$ des vereinfachten Ersatzschaltbildes für den Kurzschluss! *Sollten Sie im zweiten Aufgabenteil keine Ergebnisse erzielt haben, rechnen Sie mit $I_{1N} = 0,4 \text{ kA}$* 7 P
- TR5) Berechnen Sie die relative Kurzschlussspannung u_k . *Sollten Sie im vierten Aufgabenteil keine Ergebnisse erzielt haben, rechnen Sie mit $I_{1N} = 0,4 \text{ kA}$, $R_K = 1,25 \Omega$ und $X_k = 2,7 \Omega$.* 2 P

TR1) Annahme: idealer Transformator

$$\dot{U} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \Rightarrow N_1 = N_2 \cdot \frac{U_1}{U_2} = 200 \cdot \frac{7,5kV}{1,5kV} = 1000$$

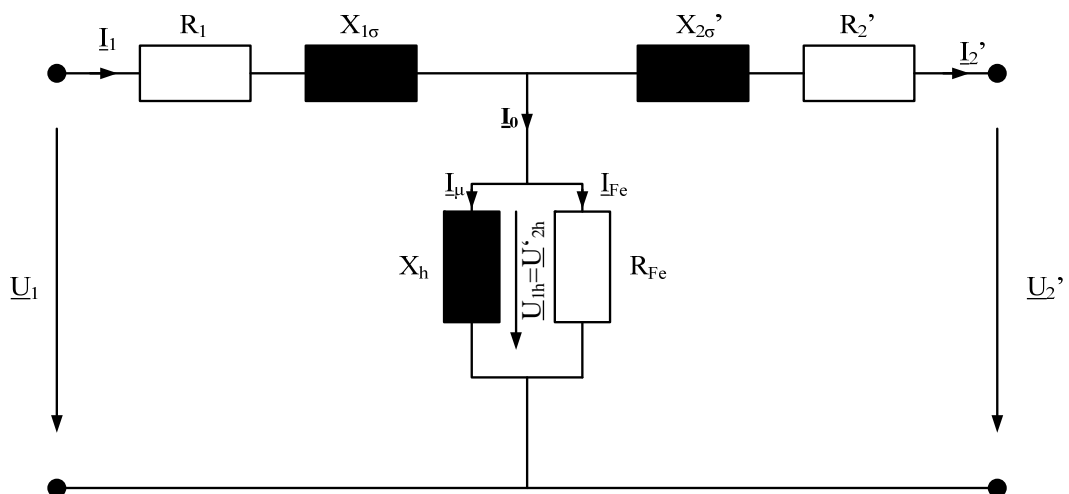
TR2) Annahme: idealer Transformator

$$S_N = U_N \cdot I_N \Rightarrow I_N = \frac{S_N}{U_N}$$

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{3000 \text{ kVA}}{7500 \text{ V}} = 0,4 \text{ kA} = 400 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{3000 \text{ kVA}}{1500 \text{ V}} = 2 \text{ kA} = 2000 \text{ A}$$

TR3)



Element:	Bezeichnung:	Bedeutung:
R_1, R'_2	Ohmsche Wicklungswiderstände	Wicklungsverluste
$X_{\sigma 1}, X'_{\sigma 2}$	Streuinduktanzen/Streuinduktivitäten	Streufeld
X_h	Hauptfeldreaktanz/Hauptfeldinduktivität	Hauptfeld
R_{Fe}	Ohmscher Widerstand für Eisenverluste	Eisenverluste (Wirbelströme, Hysterese)

TR 4) Kurzschlussversuch: mit $I_{1N}=I_{1K}$ folgt

$$P_k = I_k^2 \cdot R_k \Rightarrow R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{200\,000\text{ W}}{(400\text{ A})^2} = 1,25\ \Omega$$

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{1,25\ \Omega}{2} = 0,625\ \Omega$$

$$S_k = Z_k \cdot I_k^2 = \frac{P_k}{\cos\varphi_k} \Rightarrow Z_k = \frac{P_k}{I_k^2 \cdot \cos\varphi_k} = \frac{200\,000\text{ W}}{(400\text{ A})^2 \cdot 0,416} = 3,005\ \Omega$$

$$X_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = \sqrt{(3,005\ \Omega)^2 - (1,25\ \Omega)^2} = 2,733\ \Omega$$

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = \frac{X_k}{2} = \frac{2,733\ \Omega}{2} = 1,3665\ \Omega$$

$$L_{1\sigma} = L_{2\sigma}' = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_N} = \frac{1,3665\ \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 16,7\text{ Hz}} = 0,01302\text{ H} = 13,02\text{ mH}$$

$$L_{2\sigma}' = \ddot{u}^2 \cdot L_{2\sigma} \Rightarrow L_{2\sigma} = \frac{L_{2\sigma}'}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2} = \frac{13,02\text{ mH}}{\left(\frac{1000}{200}\right)^2} = 0,5208\text{ mH}$$

$$R_2' = \ddot{u}^2 \cdot R_2 \Rightarrow R_2 = \frac{R_2'}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2} = \frac{0,625\ \Omega}{\left(\frac{1000}{200}\right)^2} = 0,025\ \Omega$$

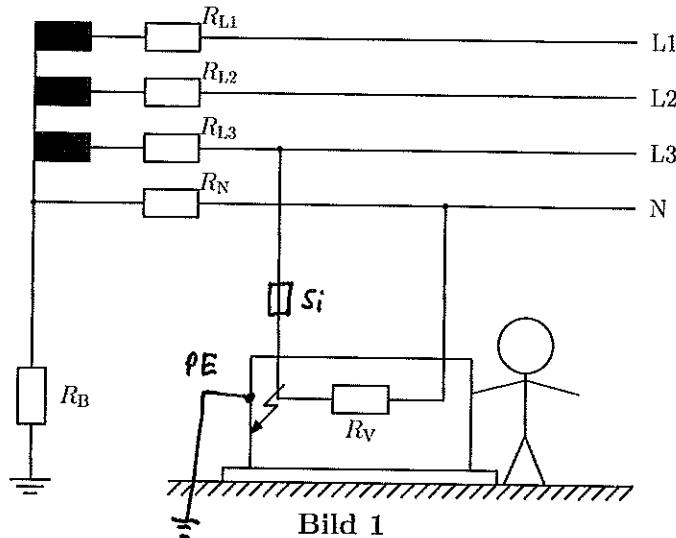
TR5)

$$U_k = I_k \cdot Z_k = I_k \cdot \sqrt{(R_k^2 + X_k^2)} = 0,4\text{ kA} \cdot \sqrt{(1,25\ \Omega)^2 + (2,733\ \Omega)^2} = 1202,1174\text{ V}$$

$$u_k = \frac{U_k}{U_N} = \frac{1202,1174\text{ V}}{7500\text{ V}} = 0,1603 \Rightarrow 16,03\%$$

7. Schutzmaßnahmen (23 Punkte)

Im dargestellten geerdeten Drehstromnetz (400/230 V, 50 Hz) hat ein ungeschützter Verbraucher einen Gehäuseschluss. Der Verbraucher steht auf isoliertem Grund, jedoch nicht der Mensch, der das Gehäuse berührt. Ein Sicherungsautomat soll den Menschen schützen.



Folgende Daten sind bekannt

Strangspannung	$U = 230 \text{ V}$
Fehlerwiderstand	$R_F = 20 \Omega$
Widerstand des Menschen	$R_M = 3 \text{ k}\Omega$
Erdungswiderstand des Transformators	$R_B = 5 \Omega$
Leitungswiderstand	$R_L = 3 \Omega$
Leitungswiderstand Verbraucher	$R_N = 3 \Omega$
Verbraucher	$R_V = 600 \Omega$
Standortwiderstand des Menschen	$R_{St} = 1 \text{ k}\Omega$

Bild 1

Aufgaben:

- SM1) Zeichnen Sie in Bild 1 die Sicherung so ein, dass sie im Zusammenhang mit einer noch zu wählenden Schutzmaßnahme den Menschen schützen kann! 2 P
- SM2) Das folgende Ersatzschaltbild (Bild 2) zeigt den Fehlerfall. Tragen Sie den Fehlerstrom I_F sowie die am Menschen abfallende Berührspannung U_B ein! 2 P

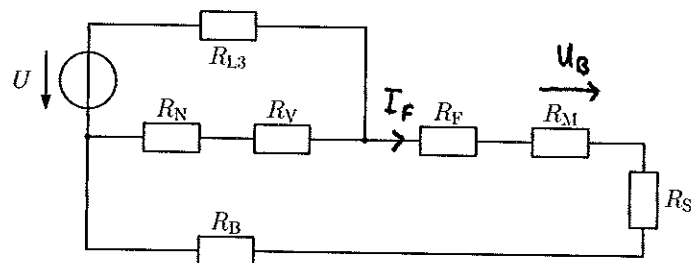


Bild 2

- SM3) Berechnen Sie zu Bild 2: Gesamtwiderstand R_{ges} , Fehlerstrom I_F und Berührspannung U_B ! 7 P
- SM4) Wird die Sicherung ($I_{NSi} = 10 \text{ A}$) in genügend kurzer Zeit ausgelöst? Begründen Sie, ob der Mensch gefährdet ist! 3 P

Der Anlagenbetreiber will als Anlagenkonzept ein TT-Netz realisieren.

- SM5) Ergänzen Sie Bild 1 zu einem TT-Netz! Kennzeichnen Sie den PE-Leiter! 3 P
- SM6) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild (ESB) nach dem Umbau auf TT-Netz! Zeichnen Sie außerdem den neuen Fehlerstrom I_{F^*} und die Berührspannung U_{B^*} ein! 3 P
- SM7) Begründen Sie (ohne Rechnung), ob der Mensch im Fehlerfall nun sicher ist! 3 P

$$\begin{aligned}
 \text{SM3)} \quad R_{\text{ges}} &= R_{L3} + ((R_V + R_N) \parallel (R_F + R_M + R_{st} + R_B)) \\
 &= 3\Omega + ((600\Omega + 3\Omega) \parallel (20\Omega + 3000\Omega + 1000\Omega + 5\Omega)) \\
 &= 3\Omega + (603\Omega \parallel 4025\Omega) \\
 &= 3\Omega + 524,4\Omega \\
 &\approx 527\Omega
 \end{aligned}$$

$$I_{\text{ges}} = \frac{U}{R_{\text{ges}}} = \frac{230\text{V}}{527\Omega} = 436\text{mA}$$

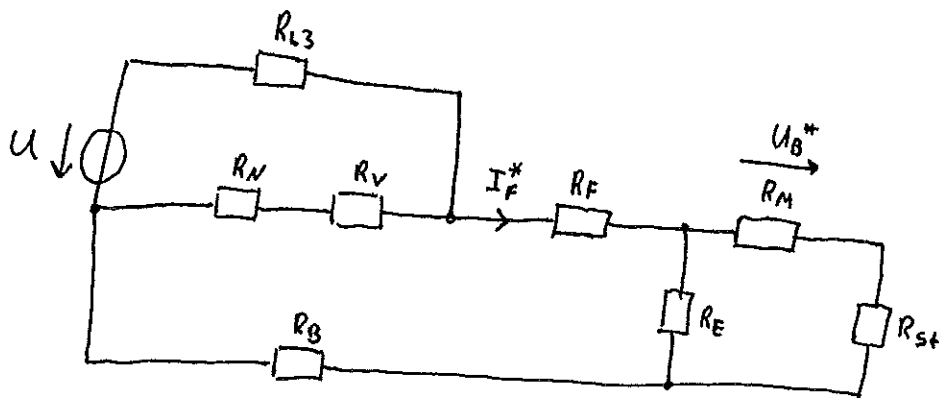
Stromteiler:

$$\begin{aligned}
 I_F &= I_{\text{ges}} \cdot \frac{R_V + R_N}{(R_V + R_N) + (R_F + R_M + R_{st} + R_B)} \\
 &= 436\text{mA} \cdot \frac{603\Omega}{603\Omega + 4025\Omega} = 436\text{mA} \cdot \frac{603\Omega}{4628\Omega} = 56,8\text{mA}
 \end{aligned}$$

$$U_B = I_F \cdot R_M = 56,8\text{mA} \cdot 3000\Omega = 170\text{V}$$

SM4) Die Sicherung löst gar nicht aus, da $I_{\text{ges}} = 436\text{mA} \ll 10\text{A} = I_{\text{HS}}$!
 Der Mensch ist gefährdet, da $I_F = I_M = 56,8\text{mA} > 17\text{mA}$ und
 $U_B = 170\text{V} > 50\text{V}$!

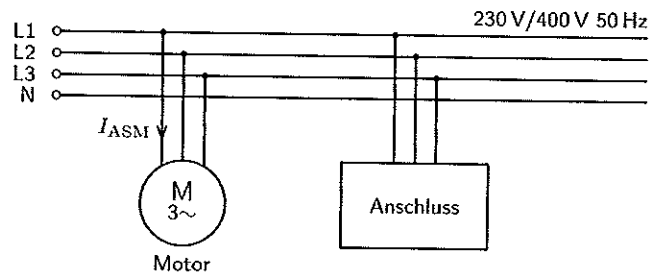
SM6)



SM7) Der Erdungswiderstand R_E ist in der Regel klein gegenüber dem Körperwiderstand des Menschen und dem Standortwiderstand, so dass der größte Teil des Fehlerstroms über R_E fließt. Der Mensch ist somit im Fehlerfall sicher, wenn die Sicherung schnell genug auslöst.

8. Drehstrom (15 Punkte)

In einem mittelständischen Unternehmen steht ein symmetrisches 400 V/50 Hz Drehstromnetz entsprechend folgender Skizze zur Verfügung.

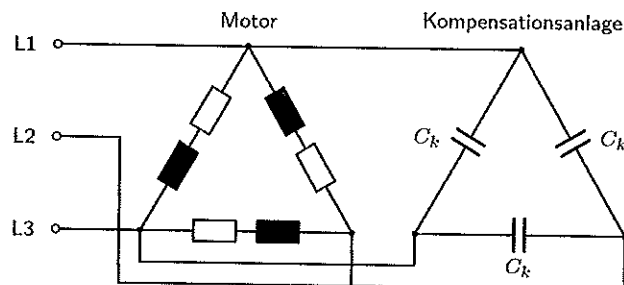


Das Typenschild des Motors zeigt folgende Daten: $U_N = 400$ V (verkettete Spannung), $P_N = 70$ kW (abgegebene mechanische Leistung), $\cos \varphi = 0,93$, $f = 50$ Hz. Der Wirkungsgrad des Motors wurde zu $\eta = 0,83$ bestimmt.

Aufgaben:

- DS1) Bestimmen Sie den Betrag des Nennstroms I_{ASM} in einer Stickleitung zum Motor! 2 P
- DS2) Die induktive Blindleistung sei *vollständig kompensiert*. Bestimmen Sie den Betrag des Nennstroms I_{ASM} für diesen Betriebsfall! 2 P

Der symmetrische Motor soll mit Kondensatoren kompensiert werden, die parallel zum Motor in einer Blindstromkompensationsanlage untergebracht sind (s. Skizze).



- DS3) Bestimmen Sie die Kapazität C_k der Kondensatoren! 4 P
- DS4) Es wurden Kondensatoren mit einer Kapazität $C_k = 300 \mu\text{F}$ verwendet. Handelt es sich bei der Verwendung dieser Kondensatoren um eine Unter- oder Überkompensation der Blindleistung? 2 P
- DS5) Bestimmen Sie den Betrag des Nennstroms I_{ASM} für $C_k = 300 \mu\text{F}$! 2 P

An einem weiteren, symmetrisch belasteten Drehstromanschluss im Versorgungsnetz wurden folgende Daten gemessen: Leiterspannung: 400 V, Leiterstrom: 10 A, Phasenwinkel: 150° .

- DS6) Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistung! Handelt es sich um einen Motor oder um einen Generator? 3 P

$$DS1) P_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{ASM} \cdot \cos \varphi \cdot \eta$$

$$\Rightarrow I_{ASM} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{70 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,93 \cdot 0,83} = 130,9 \text{ A}$$

DS2) Bei vollständiger Blindleistungskompensation gilt: $\cos \varphi = 1$

$$\Rightarrow I_{ASM} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \eta} = \frac{70 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,83} = 121,7 \text{ A}$$

DS3) Die Kapazität wird aus der zu kompensierenden Blindleistung bestimmt.

$$Q_{ges} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{ASM} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{ASM} \cdot \sin(\arccos(\cos \varphi))$$

$$= \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 130,9 \text{ A} \cdot 0,368 = 33,3 \text{ kvar}$$

$$Q_{str} = \frac{Q_{ges}}{3} = \frac{33,3 \text{ kvar}}{3} = 11,1 \text{ kvar}$$

$$Q_{str} = \frac{U_N^2}{|X_c|} = \frac{U_N^2}{\frac{1}{\omega C_k}} = U_N^2 \cdot \omega \cdot C_k$$

$$\Rightarrow C_k = \frac{Q_{str}}{U_N^2 \cdot \omega} = \frac{11,1 \text{ kvar}}{(400 \text{ V})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 221 \mu\text{F}$$

$$DS4) Q_{ges}^1 = 3 \cdot Q_{str}^1 = 3 \cdot U_N^2 \cdot \omega \cdot C_k^1 = 3 \cdot (400 \text{ V})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 300 \mu\text{F}$$

$$= 45,2 \text{ kvar}$$

$$Q_{ges}^1 = 45,2 \text{ kvar} > 33,3 \text{ kvar} = Q_{ges}$$

\Rightarrow Überkompensation

$$DS5) Q_{neu} = Q_{ges}^1 - Q_{ges} = 45,2 \text{ kvar} - 33,3 \text{ kvar} = 11,9 \text{ kvar}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_{neu}^2} = \sqrt{\left(\frac{P_N}{\eta}\right)^2 + Q_{neu}^2} = \sqrt{\left(\frac{70 \text{ kW}}{0,83}\right)^2 + (11,9 \text{ kvar})^2} = 83,5 \text{ kVA}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{ASM}$$

$$\Rightarrow I_{ASM} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{83,5 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 120,5 \text{ A}$$

$$DS6) \quad P = \sqrt{3} U_N \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 10A \cdot \cos 150^\circ = -6000 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3} U_N \cdot I \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 10A \cdot \sin 150^\circ = 3464 \text{ var}$$

Es handelt sich um einen Generator, da $P < 0$!