



Name: Vorname:
Matr.-Nr.: Studiengang:


Bearbeitungszeit:

80 Minuten

Zugelassene Hilfsmittel:

Stifte, Lineal/Geodreieck, Taschenrechner (nicht programmierbar)

Wichtiger Hinweis:

 Geben Sie bei allen Berechnungen stets den *vollständigen Rechenweg* inklusive *Formeln mit eingesetztten Zahlenwerten* an!

Weitere Hinweise:

- ➡ Bitte schalten Sie Ihre Mobiltelefone aus!
- ➡ *Der Einsatz von Handys, Smartphones, Tablets o. Ä. gilt als Täuschungsversuch!*
- ➡ Bitte legen Sie Ihren Studierendenausweis und Ihren Personalausweis auf den Tisch!
- ➡ Bitte schreiben Sie Ihren Namen und Ihre Matrikelnummer *oben rechts* auf jedes verwendete Blatt!
- ➡ Bitte schreiben Sie *nicht* mit Bleistift oder Rotstift!
- ➡ Bitte verwenden Sie für die Kurzfragen die ausgeteilten Aufgabenblätter!
- ➡ Bitte verwenden Sie für die Rechenaufgaben ausschließlich das ausgehändigte Rechenpapier!
- ➡ Bitte machen Sie Ihre Aufgaben auf dem Rechenpapier mit Aufgabennummern kenntlich!
- ➡ Bitte legen Sie bei Abgabe Ihrer Klausur die Aufgabenblätter in die Doppelbögen ein!

Klausureinsicht:

Die Klausureinsicht findet am *24.03.2014* und am *14.04.2014* statt. Zusätzliche Einsichtstermine werden nicht angeboten. Weitere Informationen hierzu finden Sie auf der Insitutshomepage.

Aufgabe:	KF2	DS	SM	TR	gesamt
Punkte:	19	17	18	17	71
Erreicht:					

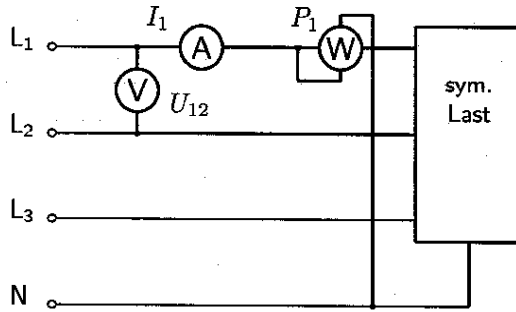
4. Kurzfragen zu Elektrotechnik 2 (19 Punkte)

KF1) Die Messinstrumente in der skizzierten Schaltung zeigen folgende Werte an:

4 P

$$P_1 \text{ 10W, } I_1 \text{ 3A, } U_{12} \text{ 10V}$$

Bestimmen Sie die neben der Schaltung stehenden Werte!



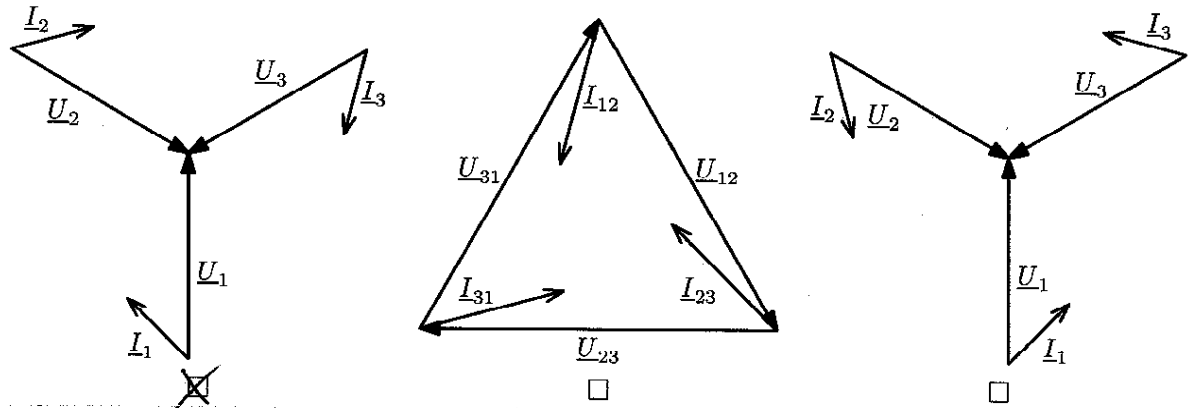
$$P_{\text{ges}} \quad \underline{30\text{W}}$$

$$S_{\text{ges}} \quad \underline{52\text{VA}}$$

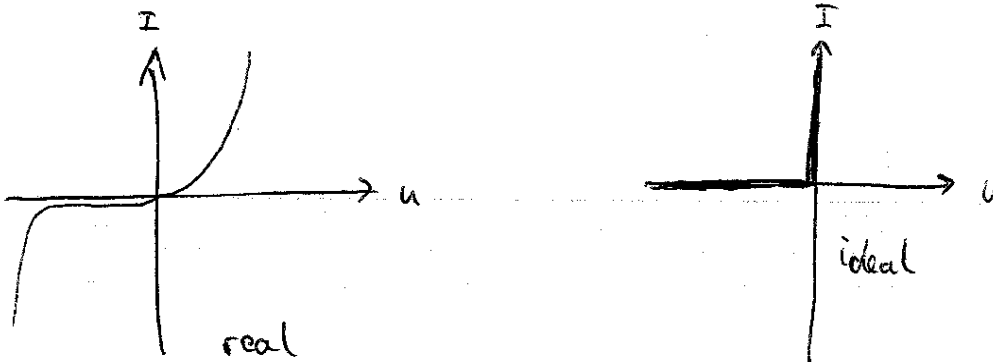
$$\cos \varphi \quad \underline{0,58}$$

$$Q_{\text{ges}} \quad \underline{42\text{Var}}$$

KF2) Welches ist das richtige Zeigerbild der Strangspannungen und Strangströme für eine symmetrische ohmsch-kapazitive Last in Sternschaltung mit einem R/X -Verhältnis von -1 ? 1 P

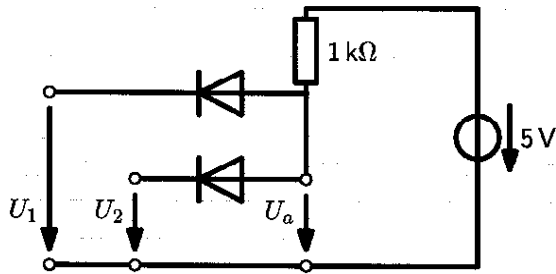


KF3) Skizzieren Sie die Kennlinien einer realen und einer idealen Diode. 2 P



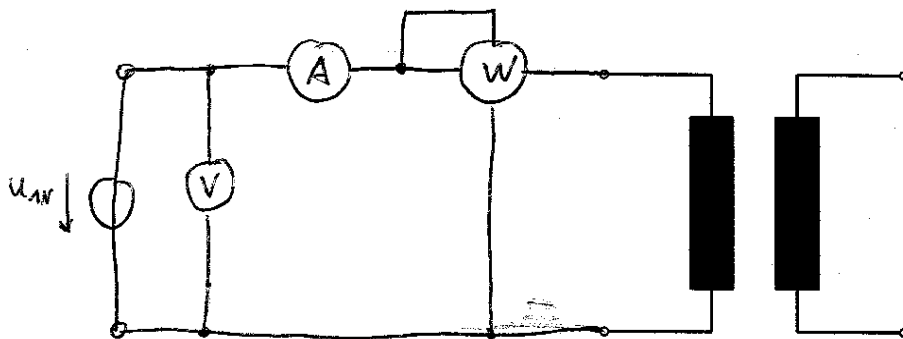
KF4) Gegeben ist die folgende Schaltung mit idealen Dioden. Die Eingangsspannungen U_1 und U_2 2P werden entsprechend der unterhalb der Schaltung stehenden Tabelle variiert.

Tragen Sie die Ausgangsspannung U_a für die jeweiligen Kombinationen in die Tabelle ein!



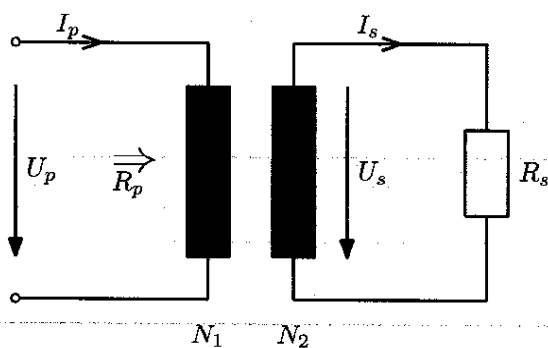
U_1	U_2	U_a
0 V	0 V	0 V
0 V	5 V	0 V
5 V	0 V	0 V
5 V	5 V	5 V

KF5) Ergänzen Sie den skizzierten Transformator um eine Messschaltung zur Ermittlung der Eisenverluste und der Hauptfeldinduktivität (Leerlaufversuch)!



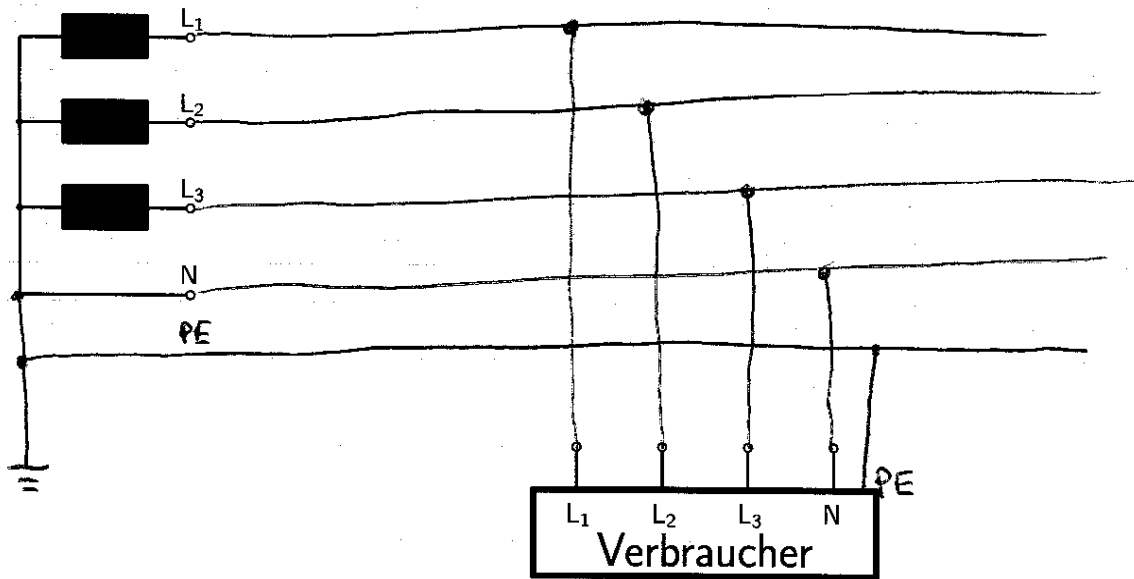
KF6) Gegeben ist ein idealer Transformator mit den Windungszahlen N_1 200 und N_2 100. Es 4P liegt eine Eingangsspannung von U_p 100V an. Außerdem ist ein Lastwiderstand R_s 50Ω angeschlossen.

Bestimmen Sie die neben der Schaltung stehenden Werte!



U_s	<u>50V</u>
I_s	<u>1A</u>
I_p	<u>0,5A</u>
R_p	<u>200Ω</u>

KF7) Ergänzen Sie die unten gezeichnete Schaltung so, dass der Verbraucher in der Netzform „TN-S 2P System“ an den Transformator angeschlossen ist!

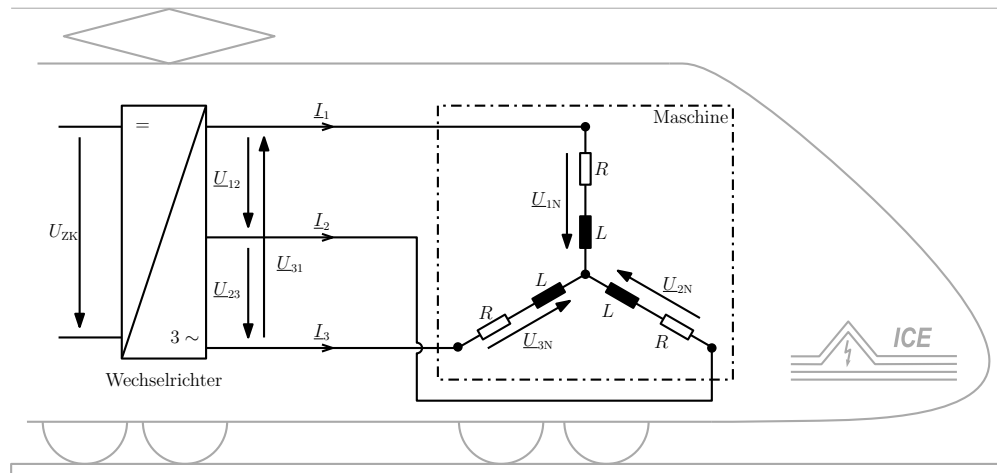


KF8) Nennen Sie die fünf Sicherheitsregeln, die beim Freischalten von elektrischen Anlagen beachtet werden müssen in der richtigen Reihenfolge! 2P

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

2. Drehstrom (17 Punkte)

Gegeben ist der dargestellte Drehstromantrieb eines ICE 401 Triebkopfes. Der Wechselrichter versorgt die Maschine mit einem Drehstromsystem variabler Frequenz. In allen Aufgabenteilen wird die Maschine mit der Nennleistung $P_{N,el}$ betrieben.



$$\underline{U}_{1N} = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{kV} \cdot e^{j0^\circ}$$

$$P_{N,el} = 1,25 \text{ MW}$$

$$\underline{U}_{2N} = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{kV} \cdot e^{-j120^\circ}$$

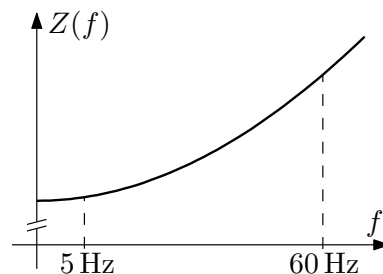
$$\cos(\varphi_N) = 0,95$$

$$\underline{U}_{3N} = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{kV} \cdot e^{+j120^\circ}$$

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

Aufgaben:

- DS1) Bestimmen Sie den Nennstrom \underline{I}_1 der Maschine nach Betrag und Phase! 2 P
- DS2) Bestimmen Sie die Beträge von Blind- und Scheinleistung im Nennbetrieb! 3 P
 Ab hier bitte mit $\underline{I}_1 = 379,83 \text{ A} \cdot e^{-j18,19^\circ}$ weiterrechnen!
- DS3) Bestimmen Sie jeweils nach Betrag und Phasenwinkel den Anteil des Leiterstromes \underline{I}_1 der die 3 P
 Wirkleistung (Wirkstrom \underline{I}_{1W}) und die Blindleistung (Blindstrom \underline{I}_{1B}) verursacht!
- DS4) Bestimmen Sie den Blindwiderstand X_L der Induktivität L , die Induktivität L und den 4 P
 Widerstand R der Maschine bei Nennfrequenz!
- DS5) Berechnen Sie den Betrag des **maximalen** Leiterstroms und den Betrag der **maximalen** 5 P
 Scheinleistung der Maschine im Frequenzbereich von 5 bis 60 Hz! Hilfestellung: qualitativer Verlauf der Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz (siehe Abbildung). Ab hier bitte mit $R = 2,89 \Omega$ und $L = 3,02 \text{ mH}$ weiterrechnen!



DS1)

$$\begin{aligned} P_N = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_{1N} &= \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_{12} \cdot \cos \varphi} \cdot e^{-j \arccos(0,95)} \\ &= \frac{1,25 \cdot 10^6 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 2000 \text{ V} \cdot 0,95} \cdot e^{-j18,19^\circ} \\ &= 379,83 \text{ A} \cdot e^{-j18,19^\circ} \end{aligned}$$

DS2)

$$\begin{aligned} S_N &= \frac{P_N}{\cos \varphi_N} = \frac{1,25 \cdot 10^6 \text{ W}}{0,95} = 1,32 \cdot 10^6 \text{ V A} = 1,32 \text{ MV A} \\ Q_N &= S_N \cdot \sin(\arccos(\varphi_N)) = 1,32 \cdot 10^6 \text{ V A} \cdot \sin(18,19^\circ) = 0,41 \text{ MVAr} \end{aligned}$$

DS3)

ohmscher Anteil: $\underline{I}_{\text{Wirk}} = \text{Re}(\underline{I}) = \underline{I} \cdot \cos \varphi = 360,8 \text{ A}$

induktiver Anteil: $\underline{I}_{\text{Blind}} = \text{Im}(\underline{I}) \cdot e^{-j90^\circ} = \underline{I} \cdot \sin(\arccos \varphi) \cdot e^{-j90^\circ} = 118,6 \text{ A} \cdot e^{-j90^\circ}$

DS4)

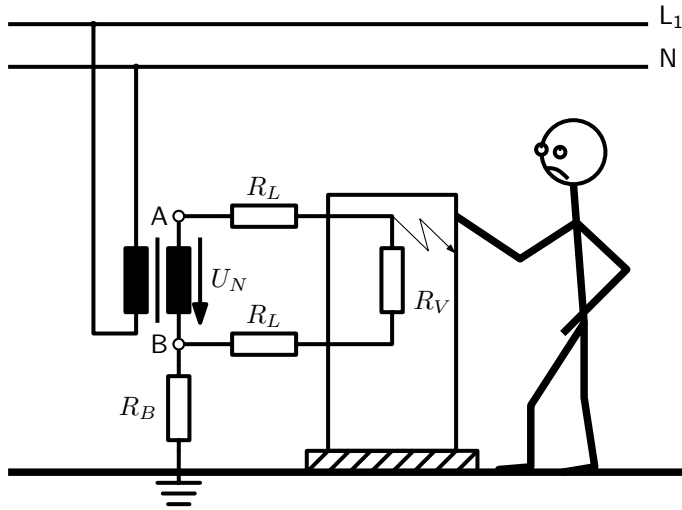
$$\begin{aligned} \underline{Z} &= \frac{\underline{U}_{1N}}{\underline{I}_1} = \frac{\frac{2000 \text{ V}}{\sqrt{3}}}{379,83 \text{ A} \cdot e^{-j18,19^\circ}} = 3,04 \Omega \cdot e^{j18,2^\circ} = 2,89 \Omega + j0,95 \Omega \\ R &= \text{Re}(\underline{Z}) = 2,89 \Omega \\ X_L &= \text{Im}(\underline{Z}) = 0,95 \Omega \\ L &= \frac{X_L}{\omega} = \frac{0,95 \Omega}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 3,02 \text{ mH} \end{aligned}$$

DS5)

$$\begin{aligned} S &= 3 \cdot \frac{U_{1N}^2}{Z} \quad \Rightarrow \quad S_{\max} = S(Z_{\min}) \\ Z &= \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \Rightarrow \quad Z_{\min} = Z(5 \text{ Hz}) = \sqrt{(2,89 \Omega)^2 + (2\pi \cdot 5 \text{ Hz} \cdot 3,02 \text{ mH})^2} \\ &= 2,89 \Omega \\ I_{L,\max} &= \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{2000 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 399,55 \text{ A} \\ S_{\max} &= 3 \cdot \frac{U_{1N}^2}{Z_{\min}} = \frac{3 \cdot \left(\frac{2000 \text{ V}}{\sqrt{3}}\right)^2}{2,89 \Omega} = 1,38 \cdot 10^6 \text{ V A} = 1,38 \text{ MV A} \\ \text{oder:} \\ S_{\max} &= \sqrt{3} \cdot U_{12} \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot U_{12} \cdot \frac{U_{12}}{Z} = \dots = 1,38 \text{ MV A} \end{aligned}$$

3. Schutzmaßnahmen (18 Punkte)

Das Wechselstromnetz speist über einen Transformator den Verbraucher R_V . Dieser hat ein leitendes Gehäuse, ist jedoch auf einer isolierenden Matte aufgestellt. Durch einen internen Defekt tritt ein Gehäuseschluss auf. Eine Person berührt das Gehäuse, wie die folgende Abbildung zeigt.

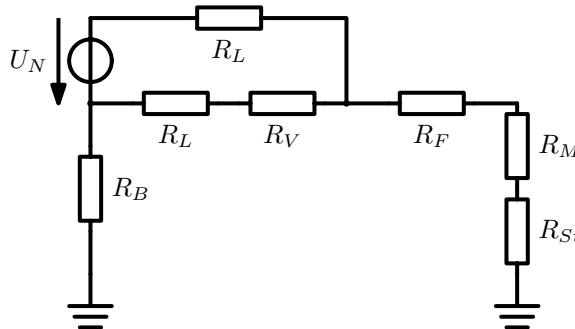


Folgende Daten sind bekannt

Versorgungsspannung	$U_N = 600 \text{ V}$
Verbraucher	$R_V = 400 \Omega$
Leitungswiderstand	$R_L = 1 \Omega$
Körperwiderstand	$R_K = 3 \text{ k}\Omega$
Standortwiderstand	$R_{St} = 1 \text{ k}\Omega$
Fehlerwiderstand	$R_F = 30 \Omega$
Erdungswiderstand des Transformators	$R_B = 10 \Omega$

Aufgaben:

SM1) Das folgende Ersatzschaltbild zeigt den Fehlerfall. Tragen Sie die Berührspannung U_B und den Fehlerstrom I_F ein! 2 P



SM2) Berechnen Sie den Gesamtwiderstand R_{ges} ! 3 P

SM3) Ist der Mensch gefährdet? Begründen Sie Ihre Aussage rechnerisch! 5 P

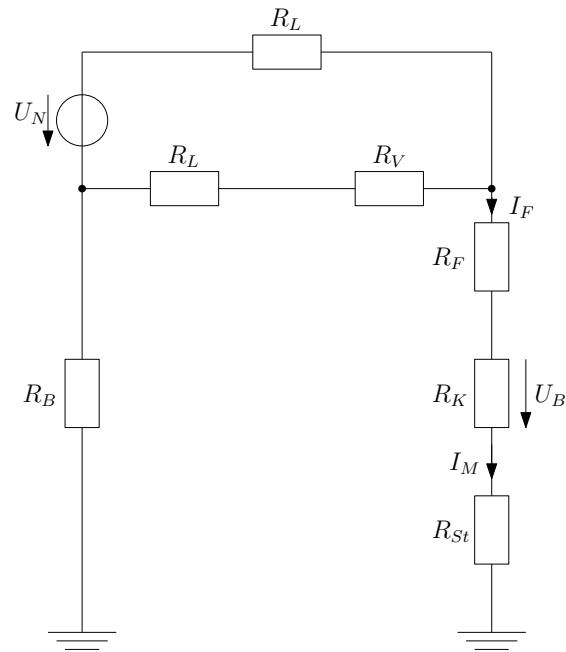
Um die Berührspannung U_B so niedrig zu halten, dass sie für Menschen ungefährlich bleibt, werden mehrere *alternative* technische Veränderungen am Gerät und dessen Anschluss diskutiert:

SM4) Alternative 1: In die Zuleitung des Verbrauchers (zwischen Punkt A und R_L) wird eine Sicherung eingebaut. Ist ein Berührungsschutz gegeben, wenn die Sicherung bei 2 A auslöst? Begründen Sie ihre Antwort! 2 P

SM5) Alternative 2: Das Gehäuse des Verbrauchers wird niederohmig ($R_E = 5 \Omega$) geerdet. Ergänzen Sie die Erdung im Ersatzschaltbild. Mit der Erdung gilt $R_{ges} = 41,45 \Omega$ und $I_M = 16,2 \text{ mA}$. Ist ein Berührungsschutz gegeben? Begründen Sie ihre Antwort! 3 P

SM6) Alternative 3: Die Transformatorerdung wird entfernt. Skizzieren Sie das Ersatzschaltbild für diesen Fall. Kann das Gehäuse jetzt ohne Gefahr berührt werden? Begründen Sie ihre Antwort! 3 P

SM1)



SM2)

$$\begin{aligned}
 R_{ges} &= R_L + [(R_L + R_V) \parallel (R_F + R_K + R_{St} + R_B)] \\
 &= 1 \Omega + [(1 \Omega + 400 \Omega) \parallel (30 \Omega + 3 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega + 10 \Omega)] \\
 &= 1 \Omega + [401 \Omega \parallel 4040 \Omega] \\
 &= 1 \Omega + \frac{1}{\frac{1}{401 \Omega} + \frac{1}{4040 \Omega}} \\
 &= 1 \Omega + 364,791 \text{ 713 6 } \Omega \\
 &= 365,791 \text{ 713 6 } \Omega \\
 &\approx 366 \Omega
 \end{aligned}$$

SM3)

$$I_{ges} = \frac{U_N}{R_{ges}} = \frac{600 \text{ V}}{366 \Omega} = 1,639 \text{ 344 262 A} \approx 1,64 \text{ A}$$

hier: $I_F = I_M$

Stromteiler:

$$\begin{aligned}
 I_M &= I_{ges} \cdot \frac{R_L + R_V}{(R_L + R_V) + (R_F + R_K + R_{St} + R_B)} \\
 &= 1,64 \text{ A} \cdot \frac{1 \Omega + 400 \Omega}{(1 \Omega + 400 \Omega) + (30 \Omega + 3 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega + 10 \Omega)} \\
 &= 1,64 \text{ A} \cdot \frac{401 \Omega}{4441 \Omega} \\
 &= 0,148 \text{ 083 764 9 A} \\
 &\approx 148 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

$$U_B = I_M \cdot R_K = 0,148 \text{ A} \cdot 3 \text{ k}\Omega = 444 \text{ V}$$

Vergleich:

$$I_M = 148 \text{ mA} > 17 \text{ mA}$$

$$U_B = 444 \text{ V} > 50 \text{ V}$$

→ Der Mensch ist gefährdet!

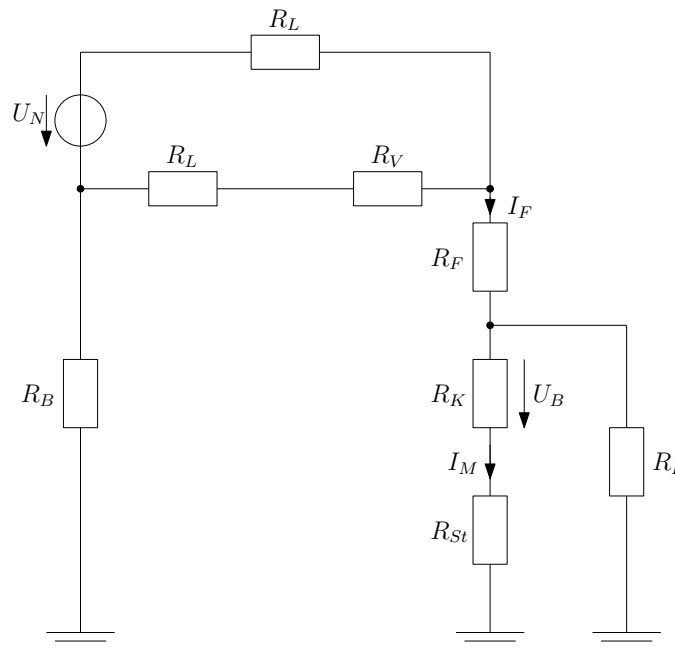
SM4) Die Sicherung wird von I_{ges} durchflossen:

$$I_{ges} = 1,64 \text{ A (s. Teilaufgabe 3)} < 2 \text{ A}$$

→ Die Sicherung löst im Fehlerfall nicht aus

→ Kein Schutz bei Gehäuseschluss!

SM5)

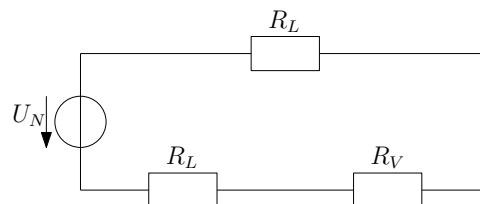


$$I_M = 16,2 \text{ mA} < 17 \text{ mA}$$

$$U_B = I_M \cdot R_K = 0,0162 \text{ A} \cdot 3000 \Omega = 48,6 \text{ V} < 50 \text{ V}$$

→ I_M und U_B liegen jetzt unterhalb der Grenzwerte, somit ist eine Berührung ungefährlich.

SM6)



Der Netzwerkteil hat keinen Potentialbezug

→ Es fließt keine Strom durch den Körper und keine Spannung fällt ab

→ $I_M = 0 \text{ A}$ und $U_B = 0 \text{ V}$

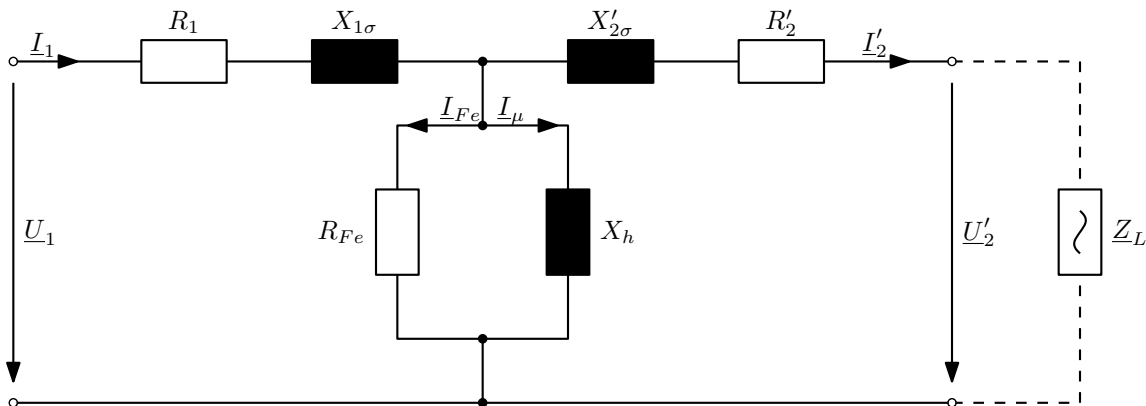
→ Berührungsschutz ist gegeben.

4. Transformator (17 Punkte)

Der Triebkopf eines Intercity-Express (ICE 401) besitzt zur Umspannung der Fahrdrachtspannung von der Oberleitung auf den Antrieb einen Wechselstromtransformator mit folgenden Kenndaten:

Scheinleistung S_N	5220 kVA
Fahrdrachtspannung (Primärspannung)	15 kV
Wicklungszahl Primärseite N_1	1250
Wicklungszahl Sekundärseite N_2	100
Nennfrequenz	16,7 Hz

Für den Transformator wird das vollständige Transformator-Ersatzschaltbild zugrunde gelegt:



Aufgaben:

- TR1) Berechnen Sie die Eingangsspannung des Antriebsumrichters (Sekundärnennspannung; Annahme: idealer Transformator). 1 P
- TR2) Berechnen Sie den Primärnennstrom I_{1N} und den Sekundärnennstrom I_{2N} (Annahme: idealer Transformator). Sollten Sie im ersten Aufgabenteil keine Ergebnisse erzielt haben, rechnen Sie mit $U_{2N} = 1200 \text{ V}$. 2 P

Aus dem Leerlauf- und Kurzschlussversuch konnten folgende Daten ermittelt werden:

Relativer Leerlaufstrom $i_0 = \frac{I_0}{I_N}$	4 %
Leerlaufverlustleistung P_0	45,4 kW
Kurzschlussverlustleistung P_k	272,4 kW
Leistungsfaktor im Kurzschluss $\cos \varphi_k$	0,6

- TR3) Berechnen Sie die folgenden Größen des Ersatzschaltbildes: R_1 , R_2' , $L_{1\sigma}$, $L_{2\sigma}'$, L_h und R_{Fe} . Die jeweils bekannten Vereinfachungen an den Ersatzschaltbildern im Leerlauf- und Kurzschlussversuch sind zulässig. Sollten Sie im zweiten Aufgabenteil keine Ergebnisse erzielt haben, rechnen Sie mit $I_{1N} = 348 \text{ A}$. 12 P
- TR4) Berechnen Sie die relative Kurzschlussspannung u_k . Sollten Sie im dritten Aufgabenteil keine Ergebnisse erzielt haben, rechnen Sie mit $I_{1N} = 348 \text{ A}$, $R_K = 2,25 \Omega$ und $X_k = 3 \Omega$. 2 P

TR1)

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1 = \frac{100}{1250} \cdot 15000 \text{ V} = 1200 \text{ V} = 1,2 \text{ kV}$$

TR2)

$$S_{1N} = U_{1N} \cdot I_{1N} \Rightarrow I_{1N} = \frac{S_{1N}}{U_{1N}} = \frac{5220 \cdot 10^3 \text{ VA}}{15000 \text{ V}} = 348 \text{ A}$$

$$S_{2N} = S_{1N} = U_{2N} \cdot I_{2N} \Rightarrow I_{2N} = \frac{S_{1N}}{U_{2N}} = \frac{5220 \cdot 10^3 \text{ VA}}{1200 \text{ V}} = 4350 \text{ A}$$

Alternativ:

$$I_{2N} = \ddot{u} \cdot I_{1N} = 12,5 \cdot 348 \text{ A} = 4350 \text{ A}$$

TR3)

Kurzschluss ($I_{1N}=I_k$):

$$P_k = I_k^2 \cdot R_k \Rightarrow R_k = \frac{P_k}{I_k^2} = \frac{272,4 \cdot 10^3 \text{ W}}{(348 \text{ A})^2} = 2,25 \Omega$$

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{2,25}{2} \Omega = 1,125 \Omega$$

$$S_k = Z_k \cdot I_k^2 = \frac{P_k}{\cos \varphi_k} \Rightarrow Z_k = \frac{P_k}{I_k^2 \cdot \cos \varphi_k} = \frac{272,4 \cdot 10^3 \text{ W}}{(348 \text{ A})^2 \cdot 0,6} = 3,75 \Omega$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k = 3,75 \Omega \cdot \sin(\arccos 0,6) = 3 \Omega$$

$$X_{1\sigma k} = X_{2\sigma k} = \frac{X_k}{2} = \frac{3 \Omega}{2} = 1,5 \Omega$$

$$L_{1\sigma k} = L'_{2\sigma k} = \frac{X_{1\sigma k}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1,5 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 16,7 \text{ Hz}} = 0,00143 \text{ H} = 14,3 \text{ mH}$$

Leerlauf:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_N} \Rightarrow I_0 = i_0 \cdot I_N = \frac{4}{100} \cdot 348 \text{ A} = 13,92 \text{ A}$$

$$P_0 = \frac{U_0^2}{R_{Fe}} \Rightarrow R_{Fe} = \frac{U_0^2}{P_0} = \frac{(15000 \text{ V})^2}{45,4 \cdot 10^3 \text{ W}} = 4955,95 \Omega$$

$$I_{Fe} = \frac{U_0}{R_{Fe}} = \frac{15000 \text{ V}}{4955,95 \Omega} = 3,03 \text{ A}$$

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{Fe}^2} = \sqrt{(13,92 \text{ A})^2 - (3,03 \text{ A})^2} = 13,59 \text{ A}$$

$$X_h = \frac{U_{1N}}{I_\mu} = \frac{15000 \text{ V}}{13,59 \text{ A}} = 1103,75 \Omega$$

$$L_h = \frac{X_h}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1103,75 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 16,7 \text{ Hz}} = 10,52 \text{ H}$$

TR4)

$$U_k = I_{1N} \cdot Z_k = 348 \text{ A} \cdot \sqrt{(2,25\Omega)^2 \cdot (3\Omega)^2} = 1305 \text{ V}$$

$$u_k = \frac{U_k}{U_N} = \frac{1305 \text{ V}}{15\,000 \text{ V}} = 8,7 \%$$