

Klausur

Elektrische Energiesysteme / Grundlagen der Elektrotechnik 3

05.10.2012

- Die Klausur besteht aus 4 Aufgaben. Pro richtig beantworteter Teilaufgabe a), b), c) oder d) sind unabhängig vom Schwierigkeitsgrad jeweils 3 Punkte erreichbar.
- Die einzelnen Fragen können weitgehend unabhängig voneinander beantwortet werden.
- Bei 48 von 48 erreichbaren Punkten wird die Note 1,0 gegeben; entsprechend bei 24 Punkten eine 4,0. Halbe Punkte werden nicht gegeben.
- zulässige Hilfsmittel: Zirkel, Lineal, Winkelmesser, nicht kommunikationsfähiger Taschenrechner, 1 DIN A4 Blatt handgeschriebene Formelsammlung
- Dauer der Klausur: 2 h

Name (in Blockbuchstaben):

Matrikelnummer:

Musterlösung

Studienrichtung:

Unterschrift:

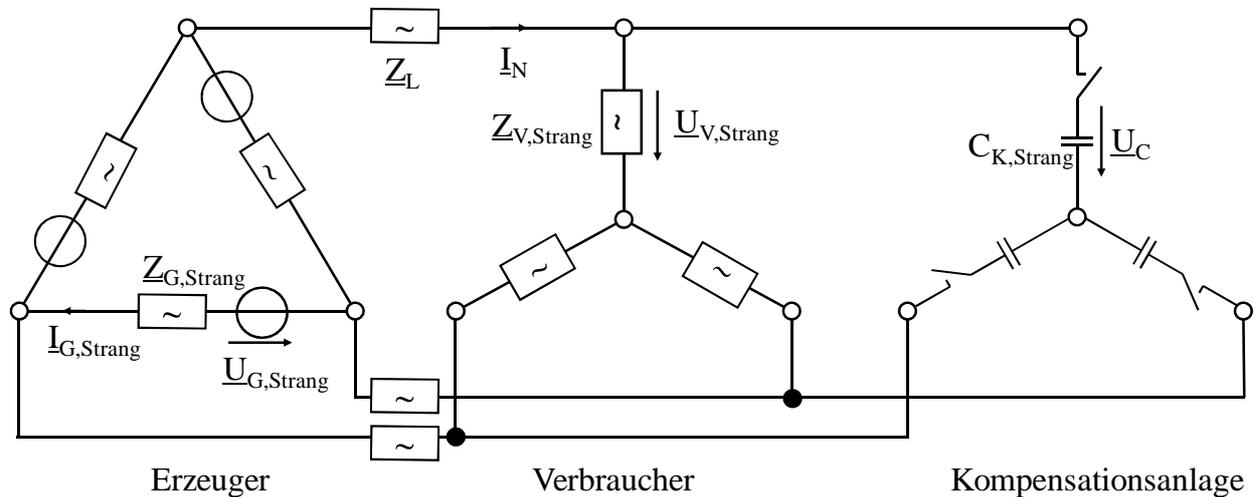
Bereich für die Korrektur

Aufgabe	Punkte	
1		
2		
3		
4		
Summe		
Note		

Aufgabe 1

Ein symmetrisches Niederspannungs-Drehspannungsnetz wird von einem Generator in Dreieckschaltung mit $U_{G,Strang} = 690\text{ V}$ mit $f_G = 50\text{ Hz}$ und $Z_{G,Strang} = j10\ \Omega$ gespeist.

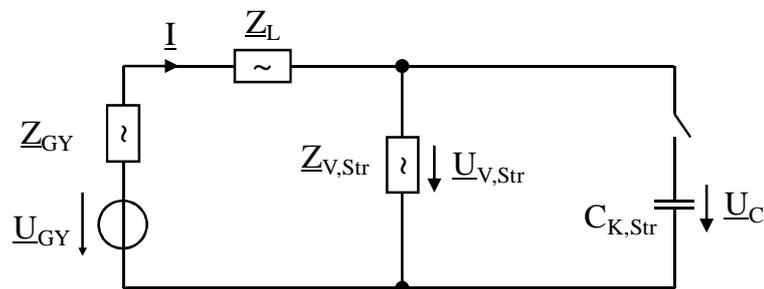
Die Energie wird über eine Drehstromleitung mit $Z_L = 0,8\ \Omega$ an den Verbraucher mit $Z_{V,Strang} = (80+j60)\ \Omega$ übertragen.



- a) Die gesamte Schaltung soll mit Hilfe eines Y-Ersatzschaltbilds berechnet werden. Die Kondensatoren seien zunächst abgeschaltet.
 Skizzieren Sie ein einphasiges Ersatzschaltbild mit einer Generatorspannung \underline{U}_{GY} und der Generator-Innenimpedanz \underline{Z}_{GY} ! (1 Punkt)
 Geben Sie die Größen von \underline{U}_{GY} und \underline{Z}_{GY} an! (2 Punkte)
- b) Berechnen Sie den Netzstrom \underline{I}_N nach Betrag und Phase! (2 Punkte)
 Hinweis 1: die Phasenlage von \underline{U}_{GY} beträgt 0° !
 Hinweis 2: wenn Sie a) nicht gelöst haben, nehmen Sie folgende Werte an: $\underline{U}_{GY} = 400\text{V}$ und $\underline{Z}_{GY} = j3\ \Omega$.
 Wie groß ist die Spannung $\underline{U}_{V,Strang}$ an der Verbraucherimpedanz $\underline{Z}_{V,Strang}$? (1 Punkt)
- c) Nun soll eine Blindstromkompensation des Verbrauchers durchgeführt werden. Dazu werden die Kondensatoren eingeschaltet.
 Berechnen Sie die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom am Verbraucher $\underline{Z}_{V,Strang}$! (1 Punkt)
 Berechnen Sie den Blindstromanteil im Verbraucher! (1 Punkt)
 Hinweis: wenn Sie b) nicht gelöst haben, verwenden Sie $\underline{U}_{V,Strang} = 390\text{V}$.
 Berechnen Sie den Wert von $C_{K,Strang}$, mit dem eine vollständige Blindstromkompensation erfolgt. (1 Punkt)
- d) Wie groß ist die Impedanz \underline{Z}_{VC} , die aus der Parallelschaltung des Verbrauchers mit den Kompensationskondensatoren besteht? (1 Punkt)
 Hinweis: wenn Sie c) nicht gelöst haben, verwenden Sie $C_{K,Strang} = 19,1\ \mu\text{F}$.
 Berechnen Sie \underline{I}_N' bei eingeschalteten Kompensationskondensatoren! (1 Punkt)
 Wie groß wird die Spannung am Verbraucher \underline{U}_V' bei Kompensation? (1 Punkt)

Lösung zu Aufgabe 1:

a)



mit:

$$U_{GY} = \frac{U_{G,Str}}{\sqrt{3}} = 398,4\text{V}$$

$$\underline{Z}_{GY} = \frac{\underline{Z}_{G,Str}}{3} = j3,33\Omega$$

b)

$$\underline{I}_N = \frac{U_{GY}}{\underline{Z}_{GY} + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{V,Str}} = \frac{398,4\text{V}}{(j3,33 + 0,8 + 80 + j60)\Omega} = 3,88\text{A}e^{-j38,1^\circ}$$

$$U_{V,Str} = \underline{Z}_{V,Str} \cdot \underline{I}_N = \sqrt{(80\Omega)^2 + (60\Omega)^2} \cdot 3,88\text{A} = 388\text{V}$$

c)

Die Phasenverschiebung von Spannung und Strom am Verbraucher entspricht dem Winkel der Verbraucherimpedanz:

$$\varphi = \arg(\underline{Z}_{V,Str}) = \text{atan}\left(\frac{60\Omega}{80\Omega}\right) = 36,87^\circ$$

Wird die Spannung am Verbraucher in die reelle Achse gelegt, gilt für den Strom:

$$\underline{I}_N = \frac{U_{V,Str}}{\underline{Z}_{V,Str}} = \frac{388\text{V}}{100\Omega e^{j36,87^\circ}} = 3,88\text{A} e^{-j36,87^\circ}$$

$$\Rightarrow I_b = I_N \cdot \sin(-36,87) = -2,33\text{A}$$

$$I_C = -I_b = \omega C \cdot U_C \Rightarrow C = \frac{-I_b}{\omega U_C} = \frac{2,33\text{A}}{2\pi \cdot 50\text{s}^{-1} \cdot 388\text{V}} = 19,1\mu\text{F}$$

Fortsetzung Lösung zu Aufgabe 1:

d)

$$\underline{Z}_{VC} = \underline{Z}_{V,Str} \parallel \frac{1}{j\omega C} = \frac{(80 + j60)\Omega \cdot \frac{1}{j\omega C}}{(80 + j60)\Omega + \frac{1}{j\omega C}} = 125\Omega$$

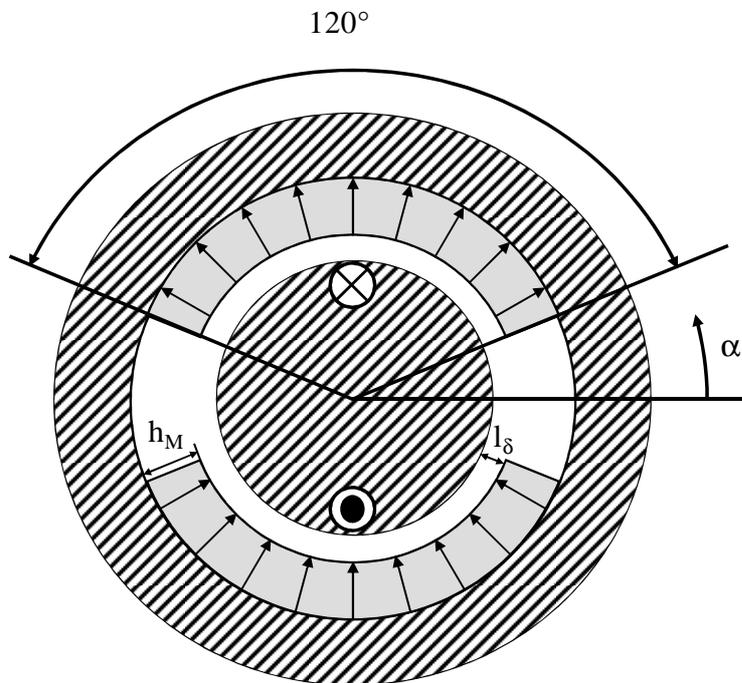
$$I_N' = \frac{U_{GY}}{|\underline{Z}_{GY} + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{VC}|} = \frac{398,4V}{\sqrt{(125\Omega + 0,8\Omega)^2 + (3,33\Omega)^2}} = 3,17A$$

$$U_V' = I_N' \cdot Z_{VC} = 395,7V$$

Fortsetzung Lösung zu Aufgabe 1:

Aufgabe 2

Gegeben seien der untenstehende Querschnitt eines magnetischen Kreises aus einer vereinfacht dargestellten permanenterregten Gleichstrommaschine. Die Permeabilität des Weicheisens (schraffierter Bereich) darf als unendlich groß angenommen werden. Die Permanentmagnete (grau) sind in der eingezeichneten Art radial magnetisiert.



$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

- a) Geben Sie die Polpaarzahl p an. (1 Punkt)
Tragen Sie den qualitativen Verlauf der magnetischen Feldstärke im Luftspalt über dem Drehwinkel für $I = 0\text{A}$ in die Skizze auf dem Lösungsblatt ein! Die Streuung darf vernachlässigt werden. (2 Punkte)
- b) Der Strom im Anker betrage weiterhin $I = 0\text{A}$. Die radiale Magnethöhe beträgt $h_M = 8\text{mm}$ und der Luftspalt hat eine radiale Länge von $l_\delta = 1\text{mm}$. Nehmen Sie eine näherungsweise gleichbleibende Fläche von Magnet und Luftspalt an!
Zeichnen Sie die Scherungsgerade in das Lösungsblatt auf der nächsten Seite! (1 Punkt)
Geben Sie die magnetische Flussdichte im Magneten B_m an! (1 Punkt)
Um welches Permanentmagnetmaterial könnte es sich handeln? (1 Punkt)
- c) Die eingezeichnete Spule der Windungszahl $w = 200$ wird mit $I = 10\text{A}$ bestromt.
Welcher Arbeitspunkt stellt sich im ungünstigsten Fall im Magneten ein? (2 Punkte)
Ist mit einer dauerhaften Schädigung des Magneten zu rechnen (Begründung erforderlich)? (1 Punkt)
- d) Ergänzen Sie folgende Gleichungen, so dass Zusammenhänge zwischen elektrischen und mechanischen Größen einer Gleichstrommaschine beschrieben werden!

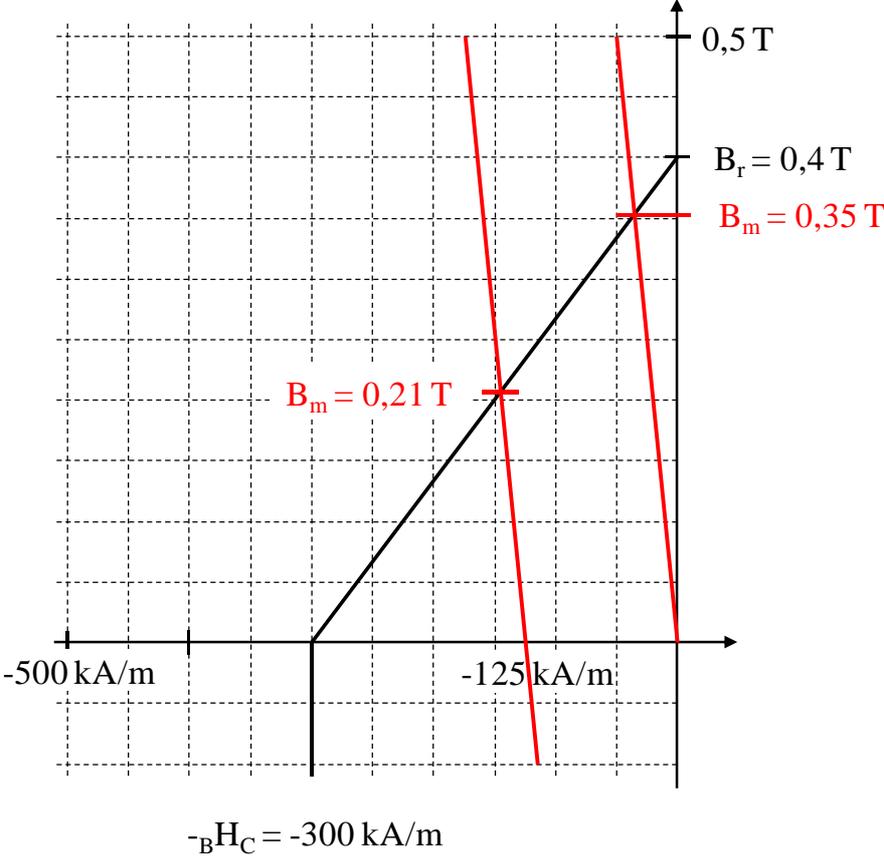
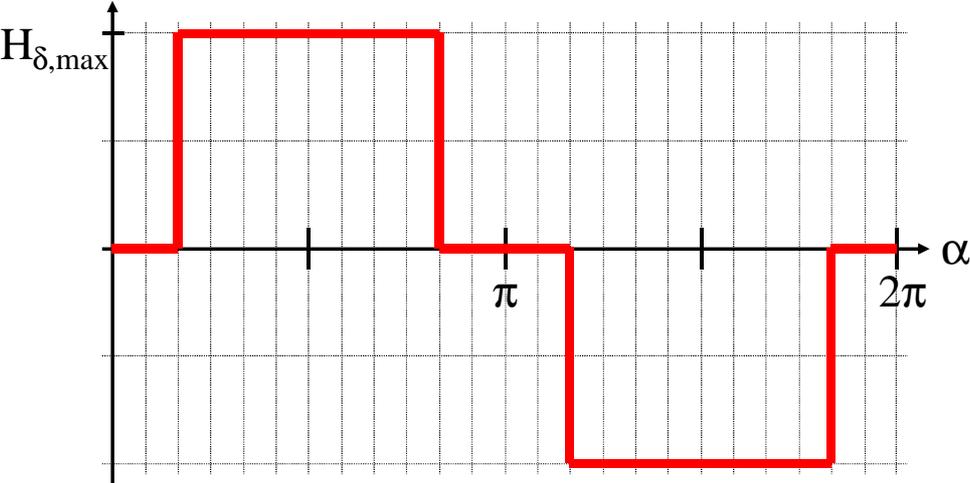
$M =$ (1 Punkt)

$U_i =$ (1 Punkt)

Geben Sie einen Zusammenhang für die innere elektrische Leistung an:

$P_{i,el} =$ (1 Punkt)

Lösung zu Aufgabe 2:



Fortsetzung Lösung zu Aufgabe 2:

a)

$$p = 1$$

b)

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = 2 l_{\delta} \cdot H_{\delta} + 2 h_M \cdot H_M = w \cdot I$$

$$A_M = A_{\delta} \Rightarrow B_M = B_{\delta} = \mu_0 \cdot H_{\delta} \Rightarrow H_{\delta} = \frac{B_M}{\mu_0}$$

$$\begin{aligned} B_M &= -\mu_0 \frac{h_M}{l_{\delta}} \cdot H_M + \left(\frac{\mu_0}{2 l_{\delta}} \cdot w \cdot I \right) \\ &= 1,01 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} H_M \quad (\text{für } I = 0) \end{aligned}$$

 B_M : siehe Skizze

Es handelt sich um eine typische Kennlinie für Hartferrit

c)

Die Scherungsgerade verschiebt sich nun aufgrund des fließenden Stromes. Der Achsenabschnitt auf der B-Achse liegt außerhalb des Diagramms, deshalb wird die Scherungsgerade nach H_M umgestellt:

$$\begin{aligned} H_M &= -\frac{2 l_{\delta}}{2 h_M} \cdot \frac{B_M}{\mu_0} + \frac{\pm w \cdot I}{2 h_M} \\ &= SG|_{(I=0)} \pm 125 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Je nach Stromrichtung verschiebt sich die Scherungsgerade. Eingezeichnet ist nur der Fall, bei dem das Magnetmaterial stärker entmagnetisiert wird.

Der neue Arbeitspunkt liegt deutlich vor dem Kennlinienknick, daher kann eine irreversible Entmagnetisierung ausgeschlossen werden.

d)

$$M = \frac{k\Phi}{2\pi} \cdot I_a$$

$$U_i = k\Phi \cdot n$$

$$P_{i,el} = U_i \cdot I_a$$

Fortsetzung Lösung zu Aufgabe 2:

Aufgabe 3

Von einem dreisträngigen Kurzschlussläufer-Asynchronmotor sind die strangbezogenen Größen Leerlaufstrom $I_{0,\text{Strang}} = 10 \text{ A} \cdot e^{-j90^\circ}$, Bemessungsspannung $U_N = 230 \text{ V}$ und Bemessungsfrequenz $f_N = 50 \text{ Hz}$ bekannt. Das Kipp-Drehmoment beträgt 250 Nm . Der Bemessungsstrom $I_N = 30 \text{ A}$ tritt bei der Bemessungsdrehzahl $n_N = 1425 \text{ min}^{-1}$ auf.

Alle Verluste außer den Rotor-Stromwärmeverlusten dürfen vernachlässigt werden.

- a) Zeichnen Sie den Leerlaufstrom I_0 in ein Diagramm! (s. nächste Seite, geeigneter Strommaßstab: z. B. 10 A entspricht 1 cm) (1 Punkt)
 Berechnen Sie den Wirkanteil des Kippstroms $I_{W,Kipp}$! (1 Punkt)
 Zeichnen Sie die Ortskurve des Statorstroms! (1 Punkt)
- b) Zeichnen Sie den Bemessungsstrom ein! (1 Punkt)
 Geben Sie den Leistungsfaktor $\cos\phi_N$ an! (1 Punkt)
 Wie groß ist die mechanische Leistung P_N im Bemessungspunkt? (1 Punkt)
- c) Zeichnen Sie eine Schlupfgerade in das Diagramm! (1 Punkt)
 Berechnen Sie den Schlupf s_N im Bemessungspunkt! (1 Punkt)
 Zeichnen Sie den Kurzschluss-Strom I_K in das Diagramm! (1 Punkt)
- d) Durch welche Maßnahme können Sie die Leerlaufdrehzahl einer Asynchronmaschine verändern? (1 Punkt)
 Bis zu welchem Wert kann das Anlaufdrehmoment durch einen Vorwiderstand bei Schleifringläufern angehoben werden? (1 Punkt)
 Auf wieviel Prozent sinkt das Anlauf-Drehmoment bei Verwendung der Stern-Dreieck-Umschaltung? (1 Punkt)

a)

I_0 : siehe Diagramm

Für die elektrische Leistung im Kippunkt gilt:

$$P_{el,Kipp} = 3 \cdot U_{Str} \cdot \underbrace{I_{Str,Kipp} \cdot \cos\phi_{Kipp}}_{I_{W,Kipp}}$$

Für die ASM gilt weiterhin unter Vernachlässigung von R_1

(dann ist die Luftspaltleistung P_δ gleich der elektrischen Leistung; die Luftspaltleistung ergibt sich aus dem Moment und der Leerlaufdrehzahl):

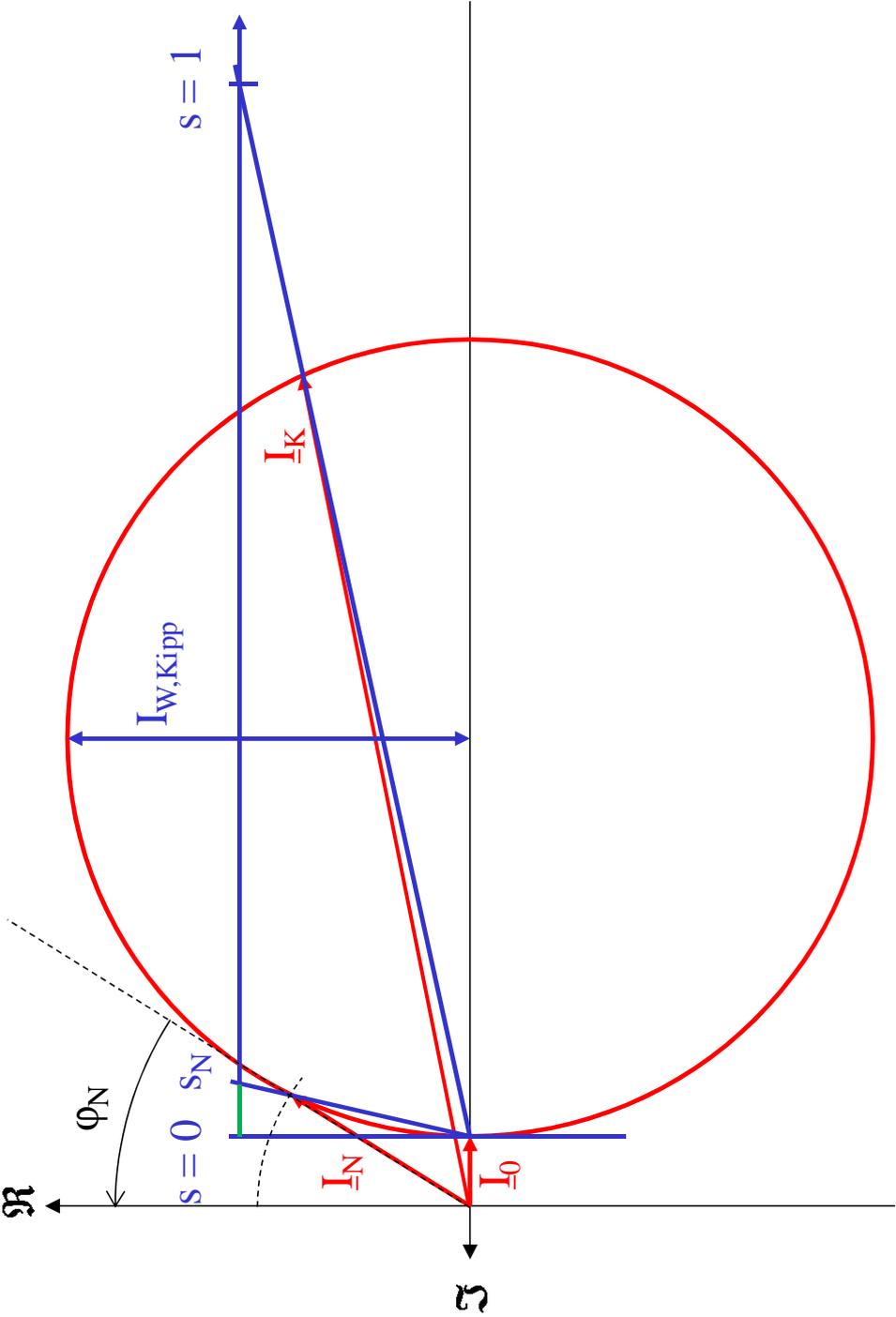
$$M \cdot 2\pi \cdot n_0 = P_{el} \Rightarrow M_{Kipp} \cdot 2\pi \cdot n_0 = P_{el,Kipp}$$

somit gilt:

$$I_{W,Kipp} = \frac{M_{Kipp} \cdot 2\pi \cdot n_0}{3 \cdot U} = \frac{250 \text{ Nm} \cdot 2\pi \cdot 25 \text{ s}^{-1}}{3 \cdot 230 \text{ V}} = 56,9 \text{ A}$$

$I_{W,Kipp}$ stellt im Diagramm den Kreisradius dar. Der Mittelpunkt liegt auf der Im-Achse.

Lösung zu Aufgabe 3:



Fortsetzung Lösung zu Aufgabe 3:

b)

Bemessungsstrom: siehe Diagramm

$$\varphi_N = 32^\circ \text{ (abgelesen)}$$

$$\Rightarrow \cos \varphi_N = 0,848$$

$$P_N = M_{Kipp} \cdot \frac{I_N \cdot \cos \varphi_N}{I_{W,Kipp}} \cdot 2\pi \cdot n_N = 250 \text{ Nm} \cdot \frac{30 \text{ A} \cdot 0,857}{56,9 \text{ A}} \cdot 2\pi \cdot \frac{1425 \text{ min}^{-1}}{60 \text{ s/min}} = 16,68 \text{ kW}$$

c)

Die Schlupfgerade ist eine Parallele zur Im-Achse. Der Abstand sollte so gewählt werden, dass $s = 1$ noch auf das Blatt passt.

$$s_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = 5\%$$

Skalierung der Schlupfgeraden:

$$s_N = 0,05 \cong 7,5 \text{ mm} \Rightarrow s_K = 1 \cong 15 \text{ cm}$$

Für die Skalierung werden Geraden von I_0 ausgehend eingezeichnet!

d)

Die Leerlaufdrehzahl kann durch die Polpaarzahl oder die Statorfrequenz geändert werden.

Das Anlaufmoment M_K kann maximal M_{Kipp} erreichen.

Die Strangspannung wird um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{3}}$ reduziert. Das Moment ändert sich aber quadratisch mit der Spannung (bei gleicher Frequenz), daher beträgt das Anlaufdrehmoment nur noch 33%.

Fortsetzung Lösung zu Aufgabe 3:

Aufgabe 4

Eine Wechselstrom-Kommutatormaschine für eine Platinen-Bohrmaschine weist folgende Daten auf: Bemessungsspannung $U_N = 230 \text{ V}$, Bemessungsstrom $I_N = 1,95 \text{ A}$, $n_N = 4000 \text{ 1/min}$, $P_N = 250 \text{ W}$, $\cos\varphi_N = 0,85$, $f_N = 50 \text{ Hz}$.

Es sollen zunächst nur die Stromwärmeverluste im Anker- und Erregerwiderstand berücksichtigt werden. Der magnetische Kreis darf als linear angesehen werden.

- a) Berechnen Sie die aufgenommene elektrische Leistung $P_{el,N}$ im Bemessungspunkt! (1 Punkt)
- Geben Sie das Bemessungs-Drehmoment der Maschine an! (1 Punkt)
- Wie groß ist der Wirkungsgrad der Maschine im Bemessungspunkt? (1 Punkt)
- b) Berechnen Sie die Verluste im Bemessungspunkt P_{VN} ! (1 Punkt)
- Wie groß ist der Gesamtwiderstand ($R_a + R_f$)? (1 Punkt)
- Wie groß ist die Gesamtreaktanz ($X_{La} + X_{Lf}$)? (1 Punkt)
- c) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild der Maschine! (1 Punkt)
- Bestimmen Sie die induzierte Spannung im Bemessungsbetrieb $U_{i,N}$. (1 Punkt)
- Hinweis 1: die induzierte Spannung \underline{U}_i ist in Phase mit dem Strom!
- Hinweis 2: wenn Sie b) nicht gelöst haben, verwenden Sie $(R_a + R_f) = 30 \Omega$ und $(X_{La} + X_{Lf}) = 60 \Omega$.
- Wie groß ist die Konstante $k \cdot k' = \frac{k\Phi}{I}$? (1 Punkt)
- d) Welcher Strom stellt sich im Kurzschluss ($n_K = 0$) ein? (1 Punkt)
- Wie können Sie die Maschine vor Überhitzung bei Überlast schützen? (1 Punkt)
- Mit welcher Frequenz pulsiert das Drehmoment der Maschine? (1 Punkt)

Lösung zu Aufgabe 4:

a)

$$P_{el,N} = U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N = 381,2 \text{ W}$$

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{250 \text{ W}}{2\pi \cdot \frac{4000 \text{ min}^{-1}}{60 \text{ s/min}}} = 0,597 \text{ Nm}$$

$$\eta_N = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} = \frac{P_N}{P_{el,N}} = \frac{250 \text{ W}}{381,2 \text{ W}} = 65,6\%$$

b)

$$P_{V,N} = P_{auf} - P_{ab} = P_{el,N} - P_N = 131,2 \text{ W}$$

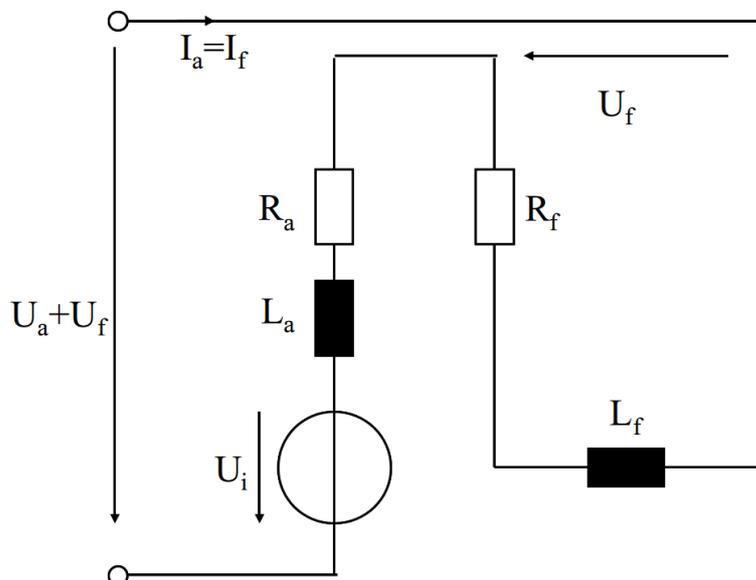
Diese Verluste entstehen ausschließlich in den Widerständen:

$$(R_a + R_f) = \frac{P_{V,N}}{I_N^2} = 34,5 \Omega$$

Weil die Blindleistung der Maschine nur durch die Reaktanzen verursacht wird, können diese ebenfalls berechnet werden:

$$(X_{L_a} + X_{L_f}) = \frac{Q_N}{I_N^2} = \frac{U_N \cdot I_N \cdot \sin \varphi_N}{I_N^2} = 62,1 \Omega \quad \text{mit: } (\varphi_N = \arccos(0,85) = 31,8^\circ)$$

c)



Fortsetzung Lösung zu Aufgabe 4:

Berechnung der induzierten Spannung:

$$(1) U_{i,N} = \frac{P_N}{I_N} = 128,2\text{V}$$

$$(2) k\Phi_N = \frac{2\pi}{I_N} M_N = 1,924\text{Vs} \Rightarrow U_{i,N} = k\Phi_N \cdot \frac{n_N}{60\text{s/min}} = 128,2\text{V}$$

$$(3) U_{i,N} = \sqrt{U_N^2 - (X_{La} + X_{Lf})^2 I_N^2} - (R_a + R_f) \cdot I_N = 128,2\text{V}$$

$$(4) \varphi_N = 31,8^\circ \Rightarrow U_{i,N} = \left| U_N - I_N e^{-j\varphi_N} \cdot ((R_a + R_f) + j(X_{La} + X_{Lf})) \right| = 128,2\text{V}$$

Die Konstante $k \cdot k'$ erhält man durch:

$$U_{i,N} = \underbrace{k\Phi_N}_{k \cdot k' \cdot I_N} \cdot \frac{n_N}{60\text{s/min}} \Rightarrow k \cdot k' = \frac{U_{i,N}}{I_N \cdot \frac{n_N}{60\text{s/min}}} = 0,986 \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

d)

Bei Drehzahl Null gilt:

$$U_i = 0\text{V}.$$

Für den Strom folgt:

$$I_K = \frac{230\text{V}}{\sqrt{(R_a + R_f)^2 + (X_{La} + X_{Lf})^2}} = 3,24\text{A}$$

Schutz vor Überlast bietet ein Motorschutzschalter, der wie ein Leitungsschutz funktioniert. Auch Thermosicherungen in der Wicklung wären möglich.

Nicht gilt: Kühlung (das beeinflusst den Bemessungspunkt). Auch der Einsatz eines Vorwiderstandes schützt nicht vor Überhitzung.

Das Drehmoment pulsiert mit $2 \cdot f_0 = 100\text{Hz}$