



Elektrische Antriebstechnik

20.03.2015

Name:					Matrikelnummer:																								
<table border="1"> <tr> <td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td> </tr> </table>																				<table border="1"> <tr> <td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td> </tr> </table>									
Vorname:																													
<table border="1"> <tr> <td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td> </tr> </table>																													
Studiengang:					<input type="checkbox"/> Fachprüfung <input type="checkbox"/> Leistungsnachweis																								
Aufgabe:	1	2	3	4	Gesamt	Note																							
(Punkte)	(14)	(16)	(15)	(15)	(60)																								

Bearbeitungszeit: 120 Minuten

Zugelassene Hilfsmittel:

- ein nichtprogrammierbarer Taschenrechner ohne grafikfähiges Display
- Zeichenmaterialien (Zirkel, Geodreieck, Lineal, Stifte...)

Bitte beachten Sie:

- Sie können nur dann an der Klausur teilnehmen, wenn Sie sich im System PAUL angemeldet haben. Falls Sie trotz fehlender Anmeldung mitschreiben, wird das Ergebnis nicht gewertet.
- Bitte Studenausweis mit Lichtbild bereitlegen!
- Bitte beschriften Sie jeden Klausurbogen mit Ihrem Namen und Ihrer Matrikelnummer. Benutzen Sie für jede Aufgabe einen neuen Klausurbogen. Verwenden Sie keine Bleistifte und keine roten Stifte.
- Bei Zahlenrechnungen sind die Maßeinheiten in jedem Schritt mitzuführen. Nichtbeachtung führt zu Punktabzug.
- Alle Lösungswege sind nachvollziehbar zu dokumentieren! Die Angabe eines Endergebnisses ohne erkennbaren Lösungsweg wird nicht gewertet.

Viel Erfolg!

Aufgabe 1: Synchronmotor
(14 Punkte)

Ein Synchronmotor wird am dreiphasigen 230/400 V Landesnetz mit der Frequenz $f_{el} = 50$ Hz betrieben. Die Maschine ist in Stern geschaltet und weist die folgenden Daten auf:

- Polpaarzahl: $p = 2$
- Erregerinduktivität: $L_E = 0,04$ H
- Nennspannung: $U_N = 400$ V
- Nennstrom: $I_N = 5,165$ A
- Phasenverschiebungswinkel (im Nennpunkt): $\varphi_N = \vartheta_N$

Mit Hilfe des Zeigerdiagramms wurde im Vorfeld untersucht, welche Kombinationen von Erregerstrom I_E und Ständerstrom I_S jeweils gleiche mechanische Drehmomente bzw. Leistungen erzeugen. Die resultierenden Stromzeigerlängen sind für 4 verschiedene Lastfälle in Abbildung 1.1 dargestellt. Der Erregerstrom ist dabei auf I_{E0} normiert. Im Minimum jeder dieser Kurven wird nur Wirkleistung aus dem Netz aufgenommen. Links von der orange gestrichelten Kurve $\cos(\varphi) = 1$ arbeitet die Maschine im untererregten, rechts davon im übererregten Betrieb. Wird der Erregerstrom zunehmend abgesenkt, erreicht der Polradwinkel ϑ den kritischen Lastwinkel von 90° (rote gestrichelte Kurve).

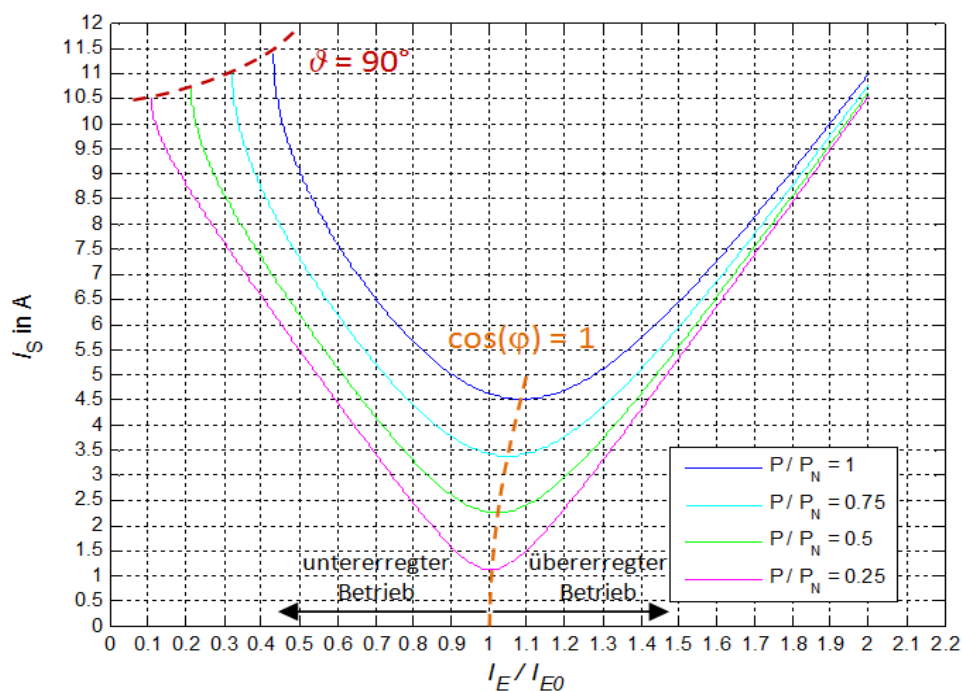


Abbildung 1.1: V-Kurven des Synchronmotors

Der Synchronmotor kann als verlustfrei angenommen werden. Die Erregerinduktivität unterliege keiner Stromsättigung und kann daher als konstant betrachtet werden.

- 1.1 Ermitteln Sie aus den oben gegebenen Daten den Erregerstrom I_{E0} für den Leerlauf.
- 1.2 Tragen Sie den Nennpunkt des Synchronmotors in Abbildung 1.1 ein. Wie groß ist der Erregernennstrom I_{EN} ? Berechnen Sie die Scheinleistung S_N sowie die Polradspannung U_{PN} im Nennpunkt.
- 1.3 Berechnen Sie die Wirkleistung P_N sowie die Blindleistung Q_N im Nennpunkt? Wie groß ist der dabei vorliegende Phasenverschiebungswinkel φ_N ?
- 1.4 Konstruieren Sie das Zeigerdiagramm für den Nennpunkt. Beginnen Sie zunächst mit der Konstruktion der Spannungszeiger \underline{U}_{SN} , \underline{U}_{PN} und $\underline{\Delta U}_N = \underline{U}_{SN} - \underline{U}_{PN}$. Ergänzen Sie das Zeigerdiagramm um die Stromzeiger \underline{I}_{k0} , \underline{I}_k und \underline{I}_N . Welche Werte ergeben sich für die Kurzschlussströme I_{k0} und I_k ? Ermitteln Sie diese Stromwerte **graphisch**. Wie groß ist die Synchronreaktanz X_s ? (Zu verwendende Maßstäbe: $25 \text{ V} \hat{=} 1 \text{ cm}$ und $1 \text{ A} \hat{=} 1 \text{ cm}$)
- 1.5 Nun wird der Erregerstrom von $I_E = I_{EN}$ kontinuierlich abgesenkt. Bei welchem Erregerstrom I_E wird die Stabilitätsgrenze erreicht und welcher Statorstrom I_S stellt sich in diesem grenzstabilen Punkt ein? Ermitteln Sie diese Werte mit Hilfe der V-Kurven in Abbildung 1.1. Wie verändern sich qualitativ die Größen P , Q , S und $\cos(\varphi)$ gegenüber dem Nennbetrieb? Begründen Sie Ihre Aussage pro physikalische Größe mit Hilfe einer geeigneten Formel und ein paar Stichworten.

Aufgabe 2: Kran mit Gleichstromantrieb

(16 Punkte)

Ein Kran mit fremderregter Gleichstrommaschine soll auf einer Baustelle Ziegelsteine auf ein im Bau befindliches Gebäude befördern. Der Kran zieht dabei die Masse m in der Zeit t auf die Höhe h hoch, wo sie abgeladen wird. Beim Hebevorgang soll die Drehzahl konstant angenommen werden. Der vorgeschaltete Gleichrichter als auch der Erregerkreis der Gleichstrommaschine können als verlustlos angenommen werden. Weitere Verluste in den Rollenlagern sowie im Getriebe sind ebenfalls zu vernachlässigen.

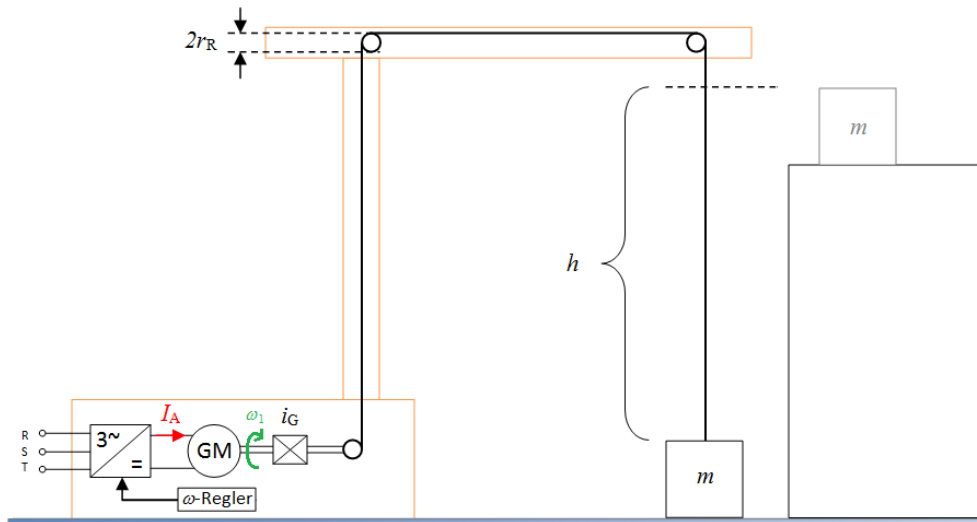


Abbildung 2.1: Kran mit Gleichstrommotor und vorgeschaltetem Gleichrichter zum Heben von Lasten

Von dem Kran sind weiterhin noch folgende Daten bekannt:

Radius einer Umlenkrolle r_R	0,2 m
Ankerwicklungswiderstand R_A	0,1 Ω
Wirksamer Erregernennfluss ψ_{EN}'	7,168 Vs
Wärmewiderstand der Gleichstrommaschine R_θ	0,15 K/W

- 2.1 Der Hubvorgang einer Masse $m = 1000$ kg dauert bis zum Erreichen der Höhe h genau $t = 60$ s. Die Hubgeschwindigkeit v ist dabei konstant. Der ideal geglättete Ankerstrom I_A beträgt während der Fahrt 70 A. Der Wirkungsgrad η der Gleichstrommaschine beträgt dabei 0,9. Welche elektrische Arbeit $W_{el,RA}$ wird während dieser Zeit im Ankerwiderstand umgesetzt? Auf welche Höhe h wurde die Masse m hochgezogen?
- 2.2 Wie groß ist die in der Masse m nach dem Hubvorgang gespeicherte potentielle Energie W_{pot} ?
- 2.3 Der wirksame Erregernennfluss ψ_{EN}' wird für den Hubvorgang vom Drehzahlregler auf 50% abgesenkt. Berechnen Sie das von der Gleichstrommaschine erzeugte Drehmoment T_1 . Welcher Wert ergibt sich damit für die noch unbekannte Getriebeübersetzung i_G und mit welcher Winkelgeschwindigkeit ω_1 dreht der Motor?

2.4 Zeichnen Sie in das nachfolgende Diagramm, das den Betriebsbereich des Gleichstrommotors zeigt, die Lastkennlinie sowie den Arbeitspunkt (T_1, ω_1) ein. Wie groß ist die Nennleistung P_N des Gleichstrommotors?

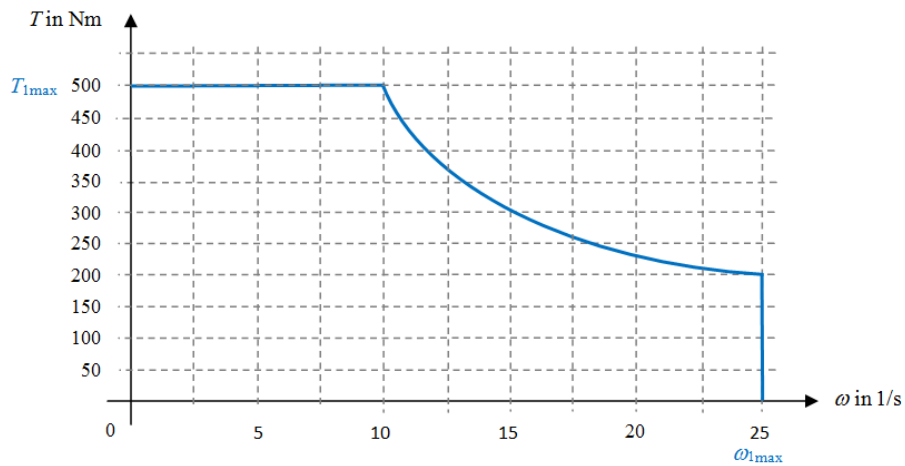


Abbildung 2.2: Betriebsbereich des Gleichstrommotors

2.5 Wie groß darf die zu hebende Masse m maximal werden, damit der zulässig erlaubte Ankerstrom nicht überschritten wird? Welcher Wert ergibt sich damit für I_{Amax} und auf welchen Wert muss der aktuelle Wert ω_1 mindestens abgesenkt werden?

2.6 Die Beförderung der Ziegelsteine kann als Aussetzbetrieb betrachtet werden, was zusätzlich die Bewegung schwererer Lasten und damit die Minimierung der gesamten Kranbetriebszeit erlaubt: Das Hochziehen der Last stellt die Betriebszeit t_b dar, die Entlade-, Abseil- und Beladephase dagegen die Pausenzeit t_p . Der Überlastfaktor $\frac{P_{VS3}}{P_{VS1}}$ ergab sich damit zu 4,4, die Temperaturschwankung $\Delta\theta_{max} - \Delta\theta_{min}$ zu 8,37 K. Ermitteln Sie den Ankerstrom $I_{A_{S3}}$, die obere und untere Temperaturgrenze $\Delta\theta_{max}$ und $\Delta\theta_{min}$ und skizzieren Sie den **stationären** Temperaturverlauf in das untenstehende Diagramm (Abbildung 2.3). Wie schwer waren jeweils die beförderten Lasten? Das thermische Modell der Gleichstrommaschine kann als einfaches, einmaschiges Netzwerk (ein Freiheitsgrad) angenommen werden. Der Aussetzbetrieb wurde ausschließlich im Ankerstellbereich durchgeführt. Desweiteren sind die Auswirkungen der Beschleunigungs- und Bremsphasen auf den Ankerstrom I_A zu vernachlässigen.

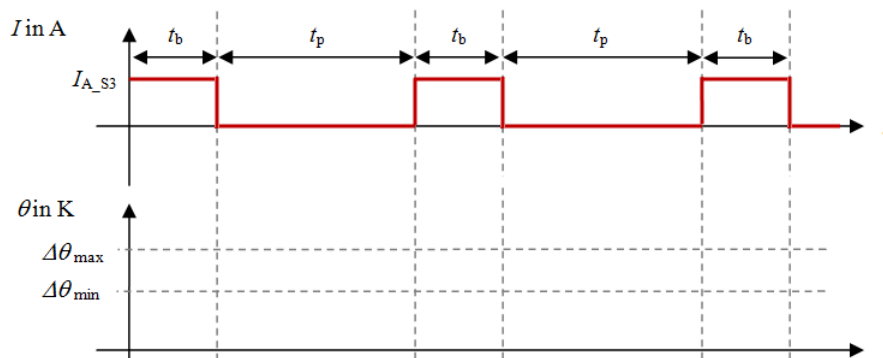


Abbildung 2.3: Aussetzbetrieb im Ankerstellbereich mit Ankerstrom- und Temperaturverlauf

Aufgabe 3: Gleichstrommaschine

(15 Punkte)

3.1 Welche drei Schaltungsarten gibt es für Gleichstrommaschinen? Zeichnen Sie die jeweiligen Ersatzschaltbilder mit den jeweiligen Strom- und Spannungsgleichungen.

Im Weiteren sei die Gleichstrommaschine mit Fremderregung mit folgenden Kenndaten betrachtet:

Ankernennspannung	$U_{A,N}$	220 V
Ankernennstrom	$I_{A,N}$	21 A
Erregernennspannung	$U_{E,N}$	220 V
Erregernennstrom	$I_{E,N}$	1,14 A
Ankerwiderstand	R_A	1,41 Ω
Nennleistung	P_N	4000 W
Nenn Drehzahl	n_N	1500 min^{-1}

3.2 Bestimmen Sie das Drehmoment T_N im Nennbetrieb.

3.3 Wie groß sind die gesamten elektrischen Verluste und welchen Wirkungsgrad η_N hat der Motor im Nennpunkt?

3.4 Bestimmen Sie nun den Anlaufankerstrom $i_{A,0}$ und das Losbrechdrehmoment T_0 für den stationären Betrieb bei Speisung mit Nennspannung.

3.5 Wie kann nun der Anlaufstrom reduziert werden? Zeichnen Sie für die beiden Möglichkeiten ein Ersatzschaltbild.

Nun soll der Motor für den Antrieb eines Aufzugs eingesetzt werden. Die Ankerspannung lässt sich dabei durch einen Transistorsteller variieren. Der Antrieb wird am einphasigen 230 V-Netz betrieben:

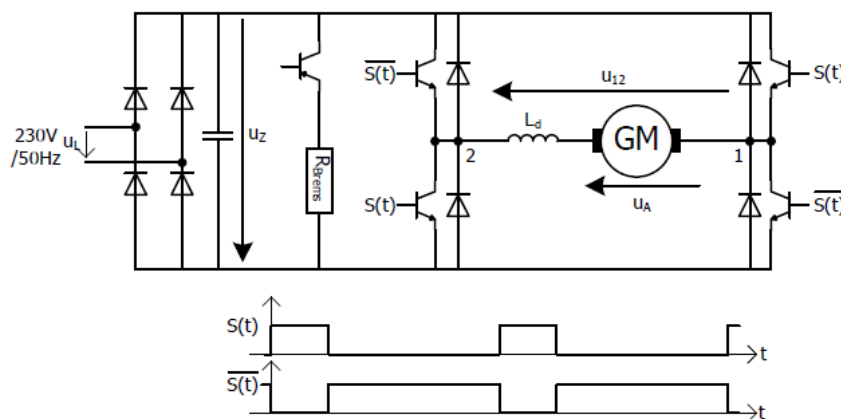


Abbildung 3.1: Gleichstrommaschine mit Transistorsteller

3.6 Leiten Sie den Zusammenhang $U_A = f(U_Z, a)$ für die über eine Pulsperiode der Dauer T gemittelte Ankerspannung U_A in Abhängigkeit der Zwischenkreisspannung U_Z und des Tastgrades a im eingeschwingenen, stationären Betrieb her.

- 3.7** Der Anlaufstrom soll nun nicht höher als 150% des Ankernennstroms werden. Welche Ankerspannung U_A ist beim Anlaufen einzustellen, damit diese Bedingung eingehalten wird? Welcher Tastgrad a muss eingestellt werden, um diese Spannung zu stellen?
- 3.8** Nun soll bei maximaler Drehzahl mit Nenndrehmoment gebremst werden. Die zurückgespeiste Leistung wird dann im Bremswiderstand vernichtet. Wie groß ist dafür der Bremswiderstand auszulegen? Die Spannung U_Z soll maximal um 50% höher als die Zwischenkreisleerlaufspannung sein.

Aufgabe 4: Asynchronmaschine
(15 Punkte)

- 4.1** Zeichnen Sie das stationäre Ersatzschaltbild des Asynchronmotors bei einer Drehzahl von $n = 0 \frac{1}{\text{min}}$.

Nun sei ein **Kurzschlussläufer** mit folgenden Kenndaten gegeben

Nennleistung	P_N	21,5 kW
Polpaarzahl	p	2
Netzfrequenz	f_N	60 Hz
Netzspannung	U_N	566 V
Nenn Drehzahl	n_N	1740 min ⁻¹
Statorwiderstand	R_s	0 Ω
Rotorwiderstand	R_r	0,1 Ω
Gegeninduktivität	L_M	70 mH
Statorinduktivität	L_s	71 mH
Rotorinduktivität	L_r	71 mH
Mechanischer Wirkungsgrad (keine mechanischen Verluste)	η_{mech}	1

- 4.2** Bestimmen Sie die Leerlaufdrehzahl n_0 der Maschine.
- 4.3** Bestimmen Sie das Drehmoment T_N und den Schlupf s_N im Nennpunkt.
- 4.4** Transformieren Sie das T-Ersatzschaltbild in ein Γ-Ersatzschaltbild des rotierenden Kurzschlussläufers mit Zuhilfenahme folgender Transformationsbeziehungen:

$$L_{\sigma r}' = \frac{\sigma}{1 - \sigma} L_s$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

$$R_r' = \frac{L_s^2}{L_m^2} R_r$$

- 4.5** Welche elektrische Leistung bezieht der Motor im Nennpunkt und wie ist der Wirkungsgrad η_N in diesem Betriebspunkt?
- 4.6** Bestimmen Sie das maximale Drehmoment T_{max} des Motors und den zugehörigen Schlupf $s_{T_{\text{max}}}$. Wie heißt dieser Betriebspunkt?
- 4.7** Wie groß ist die elektrische Leistung $P_{\text{el}, T_{\text{max}}}$ und der Wirkungsgrad $\eta_{\text{el}, T_{\text{max}}}$ in dem in 4.6 ermittelten Betriebspunkt?

Lösung**Aufgabe 1) Synchronmotor****[14 Punkte]**1.1) Erregerstrom I_{E0} zum Erreichen der Strang-Nennspannung:

$$U_P = L_E \cdot I_{E0} \cdot \omega_{el} = U_{SN} \quad \rightarrow \quad I_{E0} = \frac{U_{SN}}{L_E \cdot \omega_{el}} = \frac{\frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3}}}{0,04 \text{ H} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = \underline{\underline{18,38 \text{ A}}}$$

[1 Punkt]1.2) Nennpunkt aus Diagramm (blaue V-Kurve $P/P_N = 1$, untererregter Betrieb) ablesen, liefert:

$$\frac{I_{EN}}{I_{E0}} = 0,88 \quad \rightarrow \quad I_{EN} = 0,88 \cdot 18,38 \text{ A} = \underline{\underline{16,17 \text{ A}}}$$

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 5,165 \text{ A} = \underline{\underline{3578,42 \text{ VA}}}$$

$$U_{PN} = L_E \cdot I_{EN} \cdot \omega_{el} = 0,04 \text{ H} \cdot 16,17 \text{ A} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} = \underline{\underline{203,2 \text{ V}}}$$

[3 Punkte]

1.3) Wirkleistung, Blindleistung und Phasenverschiebungswinkel bei Bemessungsbetrieb:

$$P_N = 3 \cdot U_{SN} \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_N) = 3 \cdot U_{PN} \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_{U_{PN}, I_N})$$

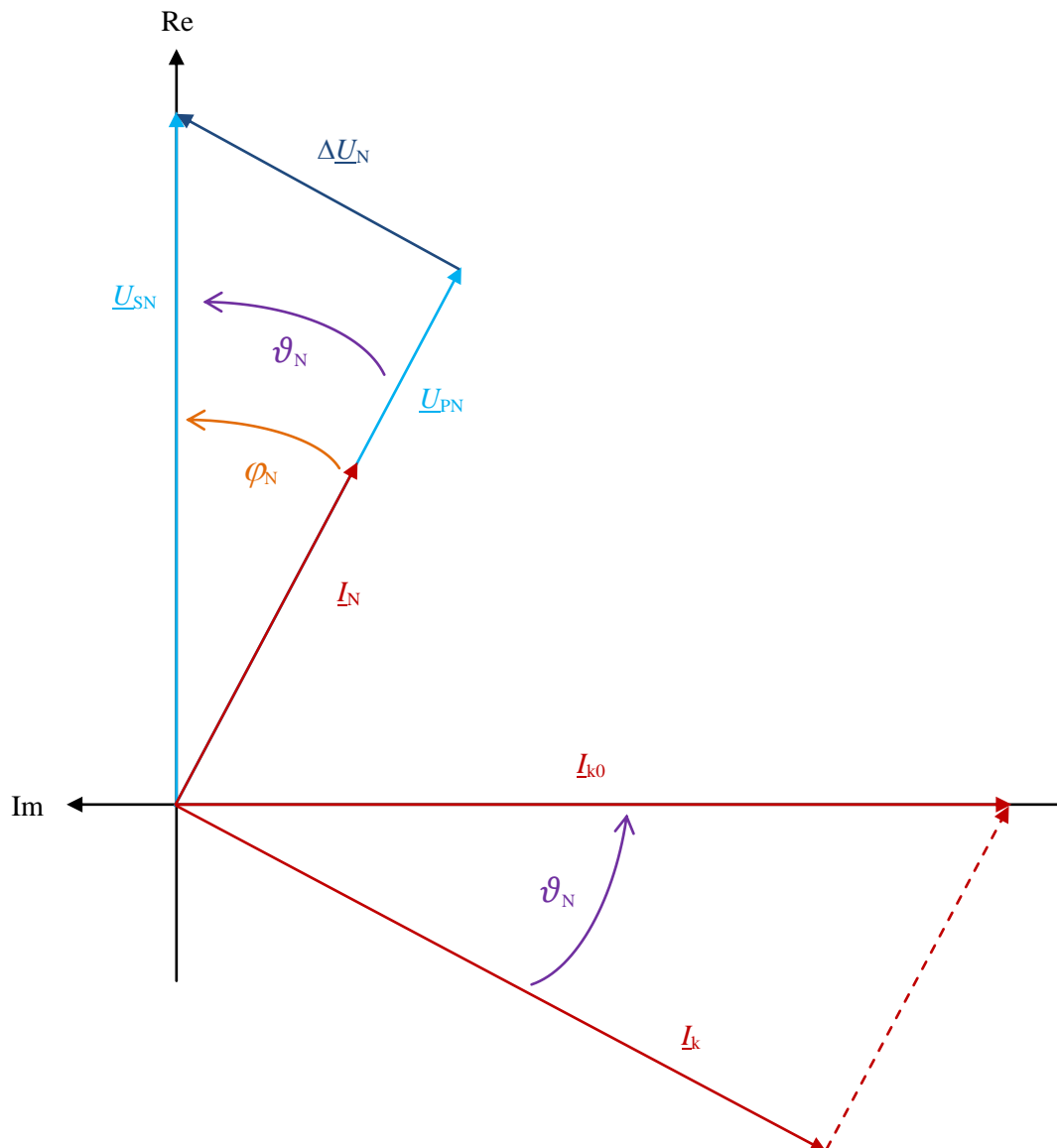
$$P_N = 3 \cdot U_{PN} \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_{U_{PN}, I_N}) = 3 \cdot 203,2 \text{ V} \cdot 5,165 \text{ A} \cdot \cos(0^\circ) = \underline{\underline{3148,58 \text{ W}}}$$

$$Q_N = \sqrt{S_N^2 - P_N^2} = \sqrt{(3578,42 \text{ VA})^2 - (3148,58 \text{ W})^2} = \underline{\underline{1700,44 \text{ VA}}}$$

$$\cos(\varphi_N) = \frac{P_N}{S_N} = \frac{3148,58 \text{ W}}{3578,42 \text{ VA}} = 0,88 \quad \rightarrow \quad \varphi_N = \arccos(0,88) = \underline{\underline{28,37^\circ}}$$

[3 Punkte]

1.4) Zeigerdiagramm, graphische Bestimmung der Kurzschlussströme und Synchronreaktanz:



- Winkellage sowie Länge des Statorstromzeigers bekannt
- die Winkellagen der Kurzschlussströme sind ebenfalls bekannt
- Auftragen der Kurzschlussstromzeiger und Einpassen des Statorstromzeigers liefert die Längen der beiden Kurzschlussstromzeiger:

$$I_{k0} = 11,13 \text{ cm} \cdot 1 \frac{\text{A}}{\text{cm}} = \underline{\underline{11,13 \text{ A}}}$$

$$I_k = 9,8 \text{ cm} \cdot 1 \frac{\text{A}}{\text{cm}} = \underline{\underline{9,8 \text{ A}}}$$

$$X_s = \frac{\Delta U_N}{I_N} = \frac{107,18 \text{ V}}{5,165 \text{ A}} = \underline{\underline{20,75 \Omega}} \quad (\text{alternativ: } X_s = \frac{U_{SN}}{I_{k0}} = \frac{230,9 \text{ V}}{11,13 \text{ A}} = \underline{\underline{20,75 \Omega}})$$

[5 Punkte]

1.5) Erregerstrom für grenzstabilen Betrieb:

Punkt aus Diagramm (blaue V-Kurve, linker Ast, Schnittpunkt mit θ_{90° -Kurve) ablesen:

$$\frac{I_E}{I_{E0}} = 0,425 \quad \rightarrow \quad I_E = 0,425 \cdot I_{E0} = \underline{\underline{7,81 \text{ A}}}$$

$$I_S = \underline{\underline{11,4 \text{ A}}}$$

Änderung der Größen P , Q , S und $\cos(\varphi)$:

Scheinleistung wird größer (um 220,72%), da Statorstrom ansteigt:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_S > S_N$$

Wirkleistung bleibt unverändert, da sich Lastdrehmoment nicht ändert:

$$P = \omega_{mN} \cdot T_N = P_N$$

Blindleistungsaufnahme aus dem Netz nimmt zu (um 444,8%):

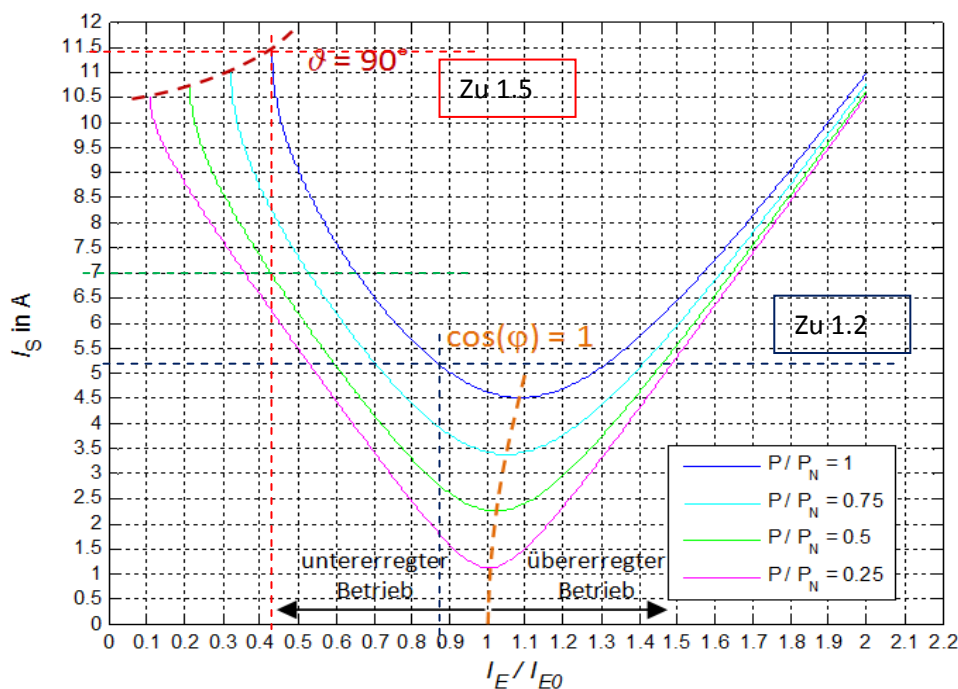
$$Q = \sqrt{S^2 - P_N^2} > Q_N$$

Der Leistungsfaktor nimmt aufgrund des höheren Blindleistungsanteils ab:

$$\cos(\varphi) < \cos(\varphi_N)$$

[2 Punkte]

V-Kurven mit den eingetragenen Punkten:



Aufgabe 2) Kran mit Gleichstromantrieb**[16 Punkte]**

2.1) Überwundene Höhendifferenz der Masse:

$$W_{el_RA} = R_A \cdot I_A^2 \cdot t = 0,1 \Omega \cdot (70 \text{ A})^2 \cdot 60 \text{ s} = \underline{\underline{29400 \text{ Ws}}}$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_V} \rightarrow \eta \cdot P_m + \eta \cdot P_V = P_m$$

$$P_m = \frac{\eta \cdot P_V}{1 - \eta} = \frac{\eta \cdot R_A \cdot I_A^2}{1 - \eta} = \frac{0,9 \cdot 0,1 \Omega \cdot (70 \text{ A})^2}{1 - 0,9} = 4410 \text{ W}$$

$$P_m = \frac{m \cdot g \cdot h}{t} \rightarrow \underline{h} = \frac{P_m \cdot t}{m \cdot g} = \frac{4410 \text{ W} \cdot 60 \text{ s}}{1000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \underline{\underline{26,97 \text{ m}}}$$

Alternative Lösung: $\frac{W_{\text{pot}}}{W_{\text{pot}} + W_{el_RA}} = 0,9 \rightarrow W_{\text{pot}} = \frac{0,9 \cdot W_{el_RA}}{0,1} = 264,6 \text{ kJ}$

$$h = \frac{W_{\text{pot}}}{m \cdot g} = \frac{264,6 \text{ kJ}}{1000 \text{ m} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 26,97 \text{ m}$$

[3 Punkte]

2.2) Potentielle Energie:

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = 1000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 26,97 \text{ m} = \underline{\underline{264,6 \text{ kJ}}}$$

[1 Punkt]

2.3) Motordrehmoment, Getriebeübersetzung und Winkelgeschwindigkeit:

$$T_1 = 0,5 \cdot \psi'_{EN} \cdot I_A = 0,5 \cdot 7,168 \text{ Vs} \cdot 70 \text{ A} = \underline{\underline{250,88 \text{ Nm}}}$$

$$i_G = \frac{T_2}{T_1} = \frac{m \cdot g \cdot r_R}{T_1} = \frac{1000 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,2 \text{ m}}{250,88 \text{ Nm}} = \frac{1962 \text{ Nm}}{250,88 \text{ Nm}} = \underline{\underline{7,82}}$$

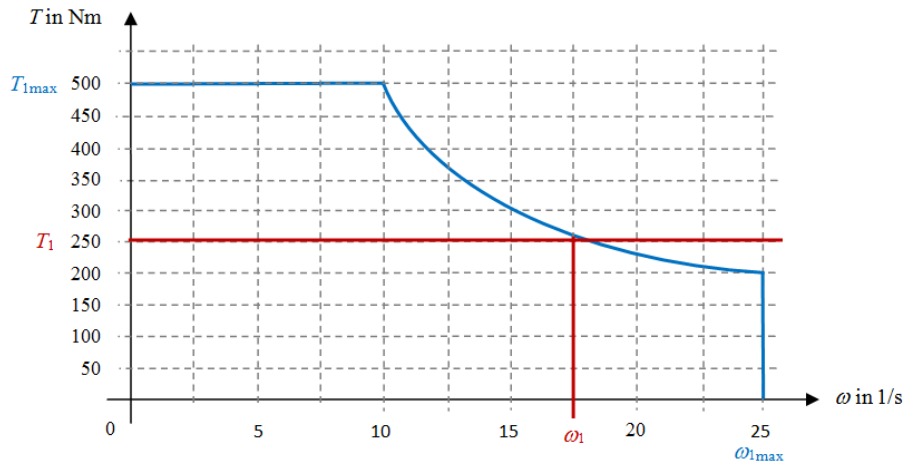
$$\omega_1 = i_G \cdot \omega_2 = 7,82 \cdot \frac{26,97 \text{ m}}{60 \text{ s} \cdot 0,2 \text{ m}} = \underline{\underline{17,576 \frac{1}{\text{s}}}}$$

[3 Punkte]

2.4) Lastkennlinie und Nennleistung der Gleichstrommaschine:

Vom Drehzahlregler eingestellter Arbeitspunkt (gelber Punkt):

$$\omega_1 = \omega_1^* = 17,576 \frac{1}{s} \quad T_1 = 250,88 \text{ Nm}$$



Lastkennlinie eines Krans ist konstant und damit unabhängig von der Drehzahl.

$$P_N = 500 \text{ Nm} \cdot 10 \frac{1}{s} = 200 \text{ Nm} \cdot 25 \frac{1}{s} = \underline{\underline{5,0 \text{ kW}}}$$

[2 Punkte]

2.5) Maximale Hublast und maximaler Ankerstrom:

Betrachtung im Ankerstellbereich:

$$I_{A\max} = \frac{T_{1\max}}{\psi_{EN'}} = \frac{500 \text{ Nm}}{7,168 \text{ Vs}} = 69,754 \text{ A} \approx I_A = \underline{\underline{70 \text{ A}}}$$

 \Rightarrow klar, da $I_A = I_{A\max}$ im Flussschwächbereich

$$m_{\max} = \frac{T_{\max} \cdot i_G}{g \cdot r_R} = \frac{500 \text{ Nm} \cdot 7,82}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,2 \text{ m}} = \underline{\underline{1992,86 \text{ kg}}}$$

$$\omega_1 < 10 \frac{1}{s}$$

[3 Punkte]

2.6) Beförderte Lasten, Ankerstrom im S3-Betrieb und Übertemperaturgrenzen:

Endtemperatur bei S1-Betrieb (= obere Temperaturschranke bei S3-Betrieb:)

$$\Delta\theta_{\max} = P_{VS1} \cdot R_{\theta} = R_A \cdot I_{A\max}^2 \cdot R_{\theta} = 0,1 \, \Omega \cdot (70 \, \text{A})^2 \cdot 0,15 \frac{\text{K}}{\text{W}} = \underline{\underline{73,5 \, \text{K}}}$$

Untere Temperaturschranke:

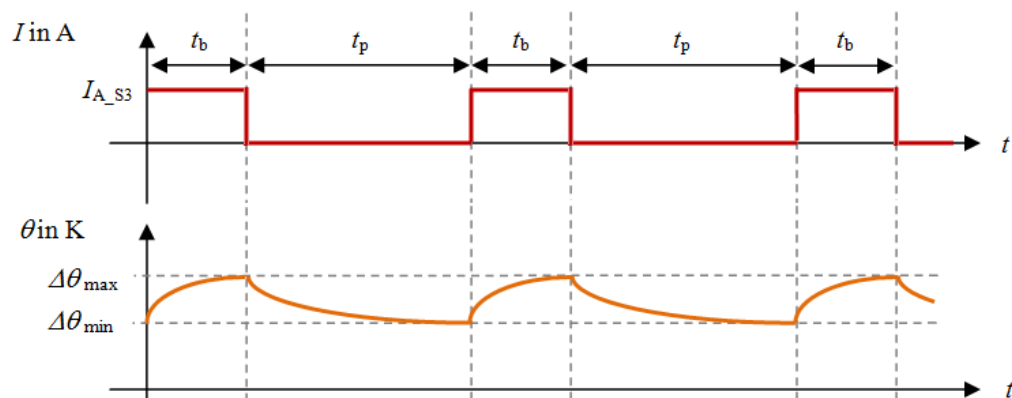
$$\Delta\theta_{\min} = \Delta\theta_{\max} - \Delta\theta = 73,5 \, \text{K} - 8,37 \, \text{K} = \underline{\underline{65,13 \, \text{K}}}$$

Ankerstrom im S3-Betrieb:

$$I_{AS3} = \sqrt{\frac{P_{VS3}}{P_{VS1}}} \cdot I_{A\max} = \sqrt{4,4} \cdot 70 \, \text{A} = \underline{\underline{146,83 \, \text{A}}}$$

Masse der gehobenen Lasten:

$$m = \frac{T_1 \cdot i_G}{g \cdot r_R} = \frac{\psi_{EN} \cdot I_{AS3} \cdot i_G}{g \cdot r_R} = \frac{7,168 \, \text{Vs} \cdot 146,83 \, \text{A} \cdot 7,82}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,2 \, \text{m}} = 4194,98 \, \text{kg} \approx \underline{\underline{4195 \, \text{kg}}}$$



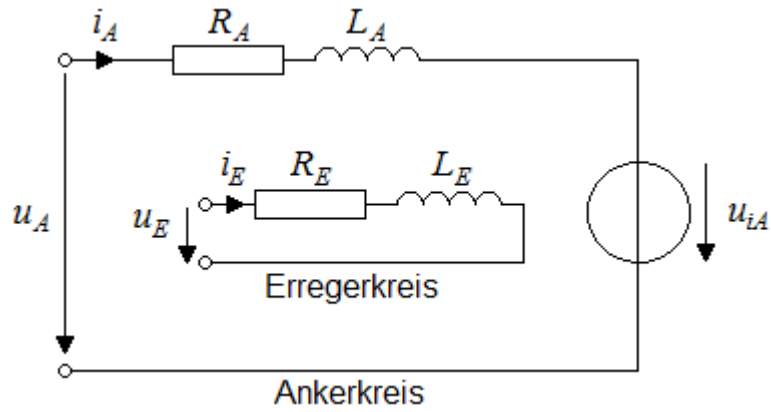
[4 Punkte]

Aufgabe 3) Gleichstrommaschine

[15 Punkte]

3.1) Ersatzschaltbilder

Fremderregte Gleichstrommaschine

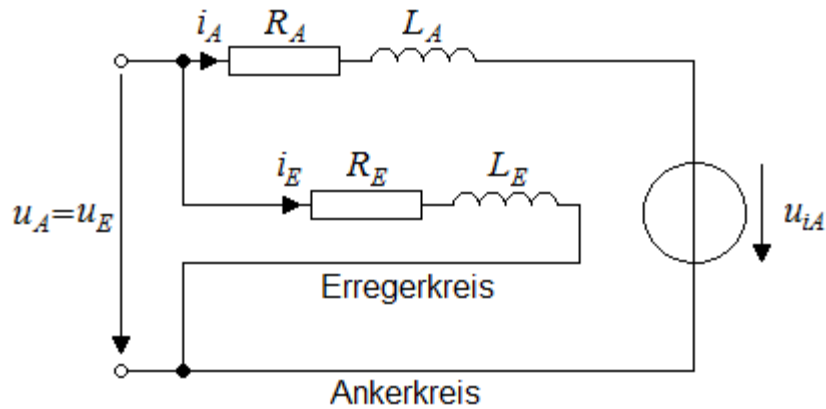


Ankerkreis

$$u_A = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + u_{iA}$$

$$u_E = R_E i_E + L_E \frac{di_E}{dt}$$

Gleichstromnebenschlussmaschine

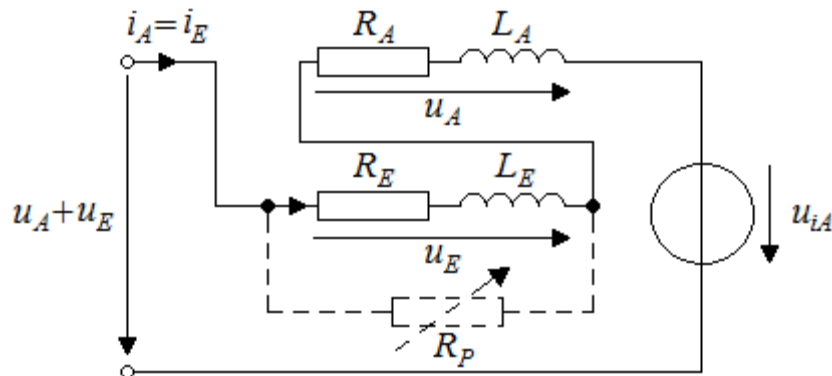


Ankerkreis

$$I = I_A + I_E$$

$$U_E = U_A$$

Gleichstromreihenschlussmaschine



$$U = U_A + U_E$$

$$I_E = I_A$$

[2 Punkte]

3.2) Bemessungsdrehmoment:

$$P_N = T_N \cdot \omega_N$$

$$\omega_N = 2\pi \cdot n_N \frac{\text{min}}{60\text{s}}$$

$$T_N = \frac{P_N \cdot 60\text{s}}{2\pi \cdot n_N \cdot \text{min}} = \frac{4000\text{W} \cdot 60\text{s}}{2\pi \cdot 1500 \frac{1}{\text{min}} \cdot \text{min}} = \frac{240000}{3000 \cdot \pi} \text{Nm} = 25\text{Nm}$$

[1 Punkte]

3.3) Nennwirkungsgrad:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{\text{el},N}} = \frac{P_N}{U_{AN} I_{AN} \cdot U_{EN} I_{EN}} = \frac{4000\text{W}}{220\text{V} \cdot 21\text{A} + 220\text{V} \cdot 1,14\text{A}} = \frac{4000\text{W}}{4870,8\text{W}} = 82\% \quad \text{[1 Punkt]}$$

3.4) Anlaufankerstrom:

$$U_A = R_A i_A + U_I = R_A i_A + \psi_E' \cdot \omega$$

$$\text{Da } \omega = 0$$

$$\Rightarrow U_A = R_A i_{A,0}$$

$$\Rightarrow i_{A,0} = \frac{U_A}{R_A} = \frac{220\text{V}}{1,41\Omega} = 156\text{A}$$

Losbrechdrehmoment

$$T = \psi_E' \cdot i_A$$

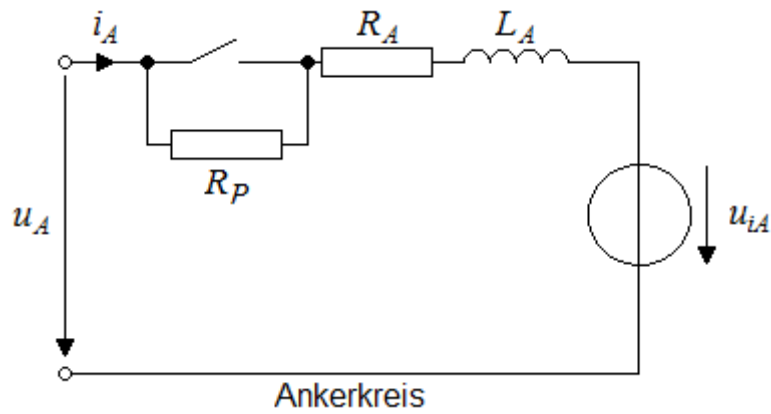
$$\Rightarrow \psi_E' = \frac{T}{i_A} = \frac{T_N}{i_{AN}}$$

$$T_0 = \psi_E' \cdot i_{A,0} = \frac{25\text{Nm}}{21\text{A}} \cdot 156\text{A} = 186\text{Nm}$$

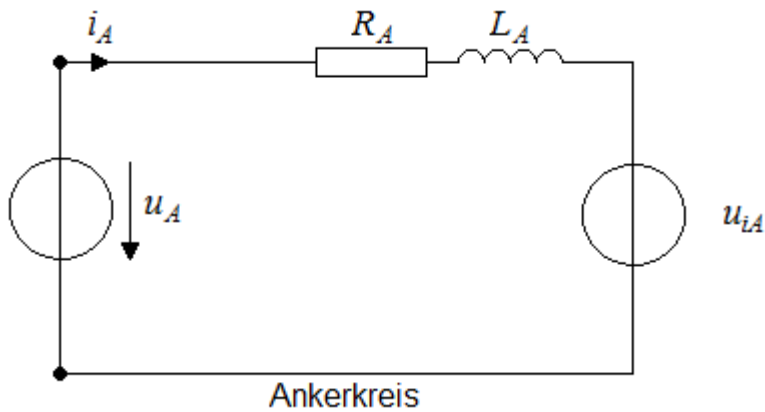
$$n_N = \frac{1}{p} (1 - s_N) f_N \rightarrow f_N = \frac{n_N p}{1 - s_N} = \frac{48,68 \frac{1}{\text{s}} \cdot 1}{1 - 0,035} = 50,45 \text{ Hz} \approx \underline{\underline{50 \text{ Hz}}}$$

[2 Punkt]

3.5) Zuschaltbarer Widerstand im Ankerkreis



Variieren der Anlaufspannung



[2 Punkte]

3.6) Herleitung der mittleren Ankerspannung U_A in Abhängigkeit von U_Z und a

Maschengleichung:

$$u_A = u_{12} - L_A \frac{di_A}{dt}$$

$$\bar{u}_A = \frac{1}{T} \int_0^T u_A \cdot dt = \bar{u}_A = \frac{1}{T} \int_0^T u_{12} \cdot dt - \frac{L_d}{T} \int_0^T \frac{di_A}{dt} \cdot dt$$

$$\bar{u}_A = \frac{1}{T} \int_0^{aT} U_Z \cdot dt + \frac{1}{T} \int_{aT}^T (-U_Z) \cdot dt - \frac{L_d}{T} \int_0^T \frac{di_A}{dt} \cdot dt$$

$$\bar{u}_A = \frac{U_Z}{T} (aT - 0 + (-T) + aT) - \frac{L_d}{T} (i_A(T) - i_A(0))$$

$$\bar{u}_A = \frac{U_Z}{T} (2aT - T) - \frac{L_d}{T} (i_A(T) - i_A(0)) = U_Z(2a - 1) - \frac{L_d}{T} (i_A(T) - i_A(0))$$

Im eingeschwungenen Zustand besitzt der Strom i_A zu Beginn ($t=0$) der Schaltperiode den gleichen Wert wie am Ende der Schaltperiode ($t=T$). Somit errechnet sich die mittlere Ankerspannung \overline{U}_A zu:

$$\overline{U}_A = U_z(2a - 1)$$

[2 Punkte]

3.7) Ankerspannung bei Anlaufstrom 150% von Ankernennstrom

$$U_A = R_A i_A = R_A \cdot 1,5 \cdot i_{AN} = 1,41\Omega \cdot 1,5 \cdot 21A = 44,415V$$

Tastgrad

$$\begin{aligned}\overline{U}_A &= U_z(2a - 1) \\ \frac{\overline{U}_A}{U_z} &= 2a - 1 \\ \frac{\overline{U}_A}{U_z} + 1 &= 2a \\ a &= \frac{\frac{\overline{U}_A}{U_z} + 1}{2} \\ a &= \frac{\frac{44,415V}{230V} + 1}{2} = 0,6\end{aligned}$$

[2 Punkte]

3.8) Maximale Drehzahl:

$$\begin{aligned}U_i &= \psi_E' \cdot \omega \\ \omega &= \frac{U_i}{\psi_E'} \\ U_A &= R_A I_A + U_i \\ U_i &= U_A - R_A I_A \\ \omega &= \frac{U_A - R_A I_{AN}}{\psi_E'} = \frac{U_A - R_A I_{AN}}{\frac{T_N}{I_{AN}}} \\ \Rightarrow \omega_{max} &= \frac{U_{A,max} - R_A I_{AN}}{\frac{T_N}{I_{AN}}} \\ U_{A,max} &= 1,5 \cdot U_z = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 230V = 488V \\ \Rightarrow \omega_{max} &= \frac{488V - 1,41\Omega \cdot 21A}{\frac{25Nm}{21A}} = 385 \frac{1}{s} \\ n_{max} &= \frac{\omega_{max} \cdot 60s}{2\pi \cdot min} = \frac{385 \frac{1}{s} \cdot 60s}{2\pi \cdot min} = 3676 \frac{1}{min}\end{aligned}$$

Mechanische Leistung wird auf Ankerwiderstand und Bremswiderstand aufgeteilt:

$$P_M = P_V + P_{Brems}$$

$$P_{Brems} = P_M - P_V$$

$$\frac{U_A^2}{R_{Brems}} = T_N \omega_{max} - R_A I_{AN}$$

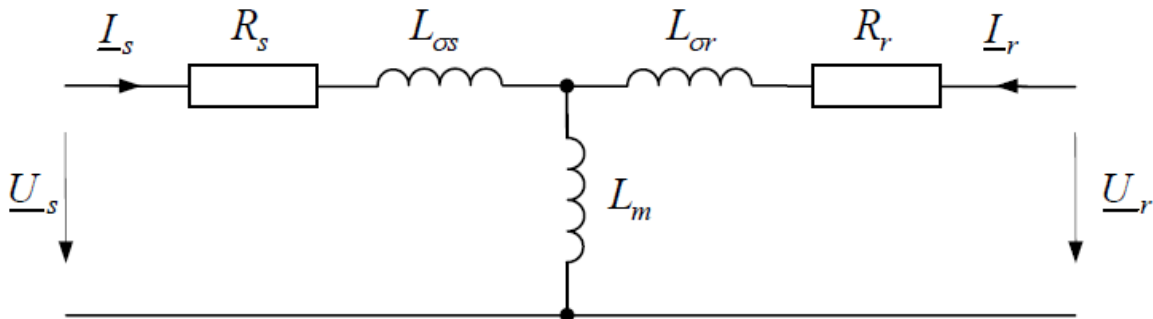
$$R_{Brems} = \frac{U_A^2}{T_N \omega_{max} - R_A I_{AN}} = \frac{(488V)^2}{25Nm \cdot 385 \frac{1}{s} - 1,41\Omega \cdot 21A} = \frac{238144V^2}{9625 \frac{Nm}{s} - 29,61\Omega A} = 25\Omega$$

[3 Punkte]

Aufgabe 4) Asynchronmaschine

[15 Punkte]

4.1) Theoriefrage:



[1 Punkt]

4.2) Leerlaufdrehzahl

$$n_0 = f_{mech,0} \frac{60s}{min}$$

$$p = \frac{\omega_{rs}}{\omega_{mech}}$$

$$\omega_{rs} = \omega_s - \omega_r$$

$$s = \frac{\omega_r}{\omega_s}$$

Im Leerlauf gilt $s = 0$ und damit $\omega_r = 0$

$$p = \frac{\omega_{rs}}{\omega_{mech,0}} = \frac{2\pi f}{2\pi f_{mech,0}}$$

$$f_{mech,0} = \frac{f}{p} = \frac{60Hz}{2} = 30Hz$$

$$n_0 = 30Hz \cdot \frac{60s}{min} = 1800 \frac{1}{min}$$

[2 Punkte]

4.3) Bemessungsdrehmoment und Schlupf im Nennpunkt:

$$P_N = \omega_{mech,N} T_N$$

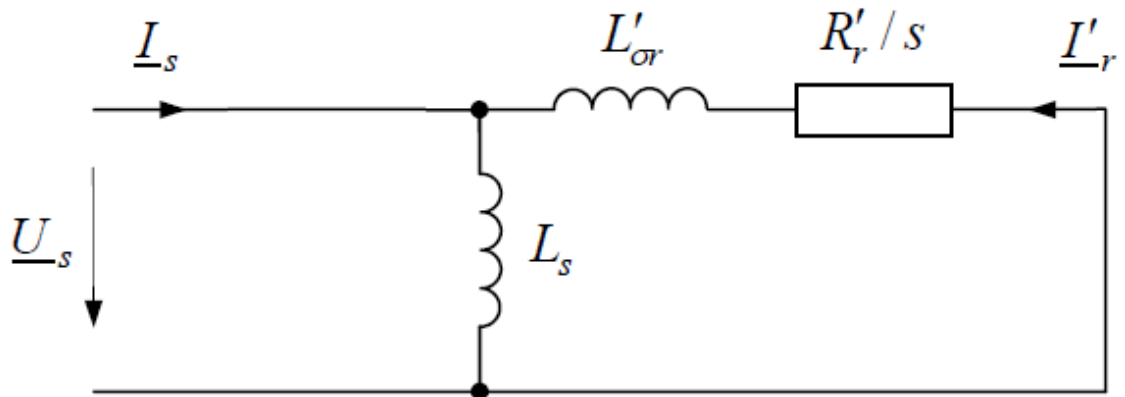
$$T_N = \frac{P_N}{\omega_{mech,N}} = \frac{P_N}{n_N \cdot 2\pi \frac{min}{60s}} = \frac{21,5kW}{1740 \frac{1}{min} 2\pi \frac{min}{60s}} = 118Nm$$

$$s = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_{rs}}{\omega_s} = \frac{\omega_s - p \cdot \omega_{mech}}{\omega_s} = \frac{f - p \cdot f_{mech}}{f}$$

$$s_N = \frac{f - p \cdot f_{mech,N}}{f} = \frac{60\text{Hz} - 2 \cdot 1740 \frac{1 \text{ min}}{\text{min } 60\text{s}}}{60\text{Hz}} = \frac{1}{30} = 0,0333$$

[2 Punkte]

4.4) Γ-Ersatzschaltbild des rotierenden Kurzschlussläufers



[1 Punkte]

4.5) el.Leistung und Wirkungsgrad im Nennpunkt:

$$\eta_N = 1 - s_N = 1 - \frac{1}{30} = 96,7\%$$

$$P_{el,N} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{21,5 \text{ kW}}{0,967} = 22,23 \text{ kW}$$

[2 Punkte]

4.6) Maximales Drehmoment und Schlupf in dem Betriebspunkt:

$$\omega_{rk} = \frac{R'_r}{L'_{\sigma r}} = \frac{R_r}{\sigma L_r} = \frac{R_r}{L_r - \frac{L_M^2}{L_s}} = \frac{0,1\Omega}{0,071\text{H} - \frac{(0,07\text{H})^2}{0,071\text{H}}} = 50 \frac{1}{\text{s}}$$

$$s_k = \frac{\omega_{rk}}{\omega_s} = \frac{50 \frac{1}{\text{s}}}{2\pi \cdot 60 \frac{1}{\text{s}}} = 0,133$$

$$\frac{T}{T_K} = \frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}$$

$$T_k = \frac{T_N \left(\frac{s_N}{s_k} + \frac{s_k}{s_N} \right)}{2} = 250 \text{ Nm}$$

Dieser Punkt heisst Kippunkt!

[3 Punkt]

4.7) Wirkungsgrad und el. Leistung im Kippunkt:

$$\eta_k = 1 - s_k = 1 - 0,133 = 86,7\%$$

$$P_{el,K} = \frac{P_k}{\eta_k} = \frac{T_k \omega_{rk}}{\eta_k} = \frac{250Nm \cdot 50 \frac{1}{s}}{0,867} = 14,42 kW$$

[2 Punkt]