

1 Fremderregte Gleichstrommaschine

Der Ankerkreis einer fremderregten Gleichstrommaschine wird von einer Gleichspannungsquelle U_0 gespeist.

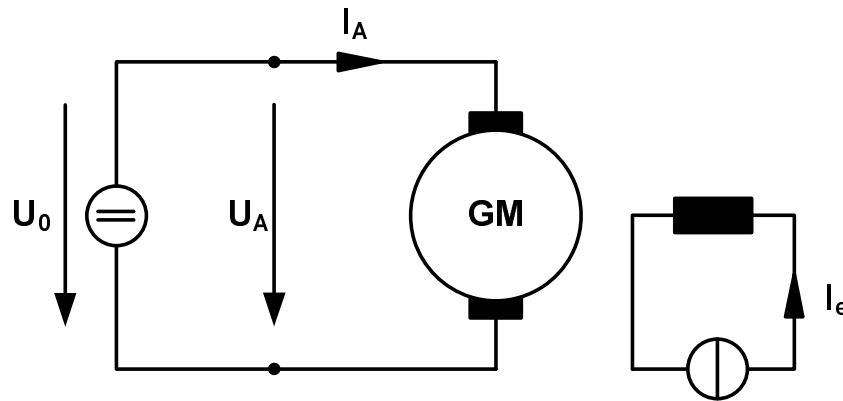


Abbildung 1: Fremderregte Gleichstrommaschine

Folgende Daten sind gegeben:

U_{AN}	=	500 V	Ankernennspannung der Gleichstrommaschine
I_{AN}	=	120 A	Ankernennstrom der Gleichstrommaschine
M_N	=	360 Nm	Nenndrehmoment der Gleichstrommaschine bei Nennerregung ($I_e = I_{eN}$)
n_N	=	1500 min ⁻¹	Nenndrehzahl der Gleichstrommaschine bei Nennerregung ($I_e = I_{eN}$)

Vereinfachende Annahmen:

- Bis auf die Stromwärmeverluste im Ankerkreis sei die Gleichstrommaschine verlustfrei.
- Berechnen Sie die Drehmoment-Drehzahlcharakteristik $\Omega = f(M_i)$ bei Nennerregung und Speisung des Ankerkreises mit $U_0 = 300$ V. Stellen Sie den Zusammenhang maßstäblich dar.
Maßstab: 10 s⁻¹/cm und 30 Nm/cm.
 - Bei Betrieb mit $U_0 = 300$ V soll die Nenndrehzahl durch Feldschwächung eingestellt werden. Dabei soll der Nennstrom I_{AN} im Ankerkreis fließen (Motorbetrieb). Berechnen Sie das Drehmoment in diesem Betriebspunkt.
 - Welche Leerlaufdrehzahl n_0 stellt sich ein, wenn die Gleichstrommaschine im Betrieb gemäß b) entlastet wird ($M_i = 0$)?

Lösung

- Aus der Ankerspannungsgleichung

$$U_A = R_A I_A + c\phi\Omega$$

folgt:

$$\Omega = \frac{U_A - R_A I_A}{c\phi}$$

Aus der Gleichung für das innere Drehmoment folgt für den Ankerstrom:

$$I_A = \frac{M_i}{c\phi}$$

Ineinander eingesetzt ergibt sich somit:

$$\Omega(M_i) = \frac{U_A}{c\phi} - \frac{R_A M_i}{(c\phi)^2}$$

$c\phi_N$ kann bestimmt werden durch:

$$c\phi_N = \frac{M_N}{I_{AN}} = 3 \text{ Vs}$$

Damit kann aus dem Nennbetrieb der Ankerwiderstand berechnet werden:

$$R_A = \frac{U_{AN} - c\phi_N \Omega_N}{I_{AN}} = 239,68 \text{ m}\Omega$$

Für $U_A = U_0 = 300 \text{ V}$ folgt dann für $\Omega = f(M_i)$:

$$\Omega = \frac{U_0}{c\phi_N} - \frac{R_A}{(c\phi_N)^2} \cdot M_i = 100 \text{ s}^{-1} - 26,63 \frac{\text{m}\Omega}{(\text{Vs})^2} \cdot M_i$$

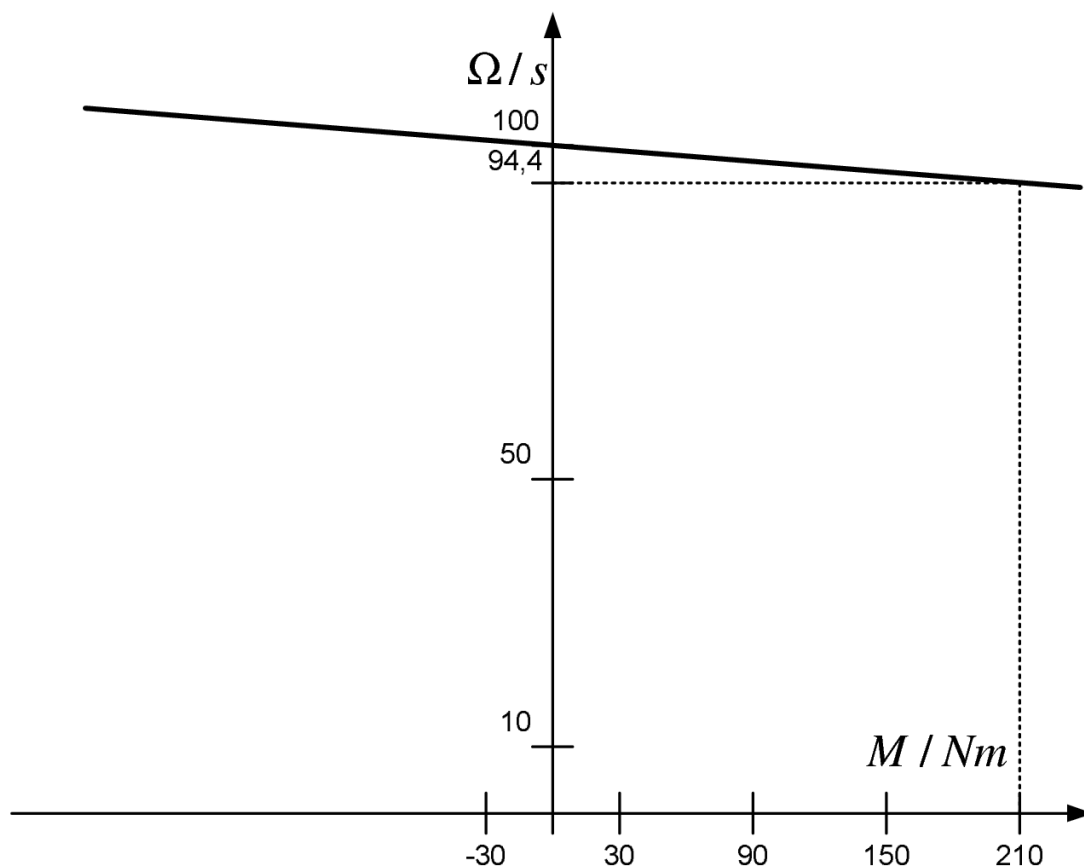


Abbildung 2: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie aus b)

b) Aus der Ankerspannungsgleichung wird $c\phi$ für diesen Betriebspunkt bestimmt:

$$c\phi = \frac{U_0 - R_A I_{AN}}{\Omega_N} = 1,727 \text{ Vs}$$

Das Drehmoment bei Ankernennstrom ist dann:

$$M = c\phi I_{AN} = 207,21 \text{ Nm}$$

c) Im Leerlauf ($M_i = 0$) ist $I_A = 0 \Rightarrow$

$$\Omega_0 = \frac{U_0}{c\phi} = 173,71 \text{ s}^{-1} \Rightarrow n_0 = \frac{\Omega_0}{2\pi} = 27,65 \text{ s}^{-1} = 1658,81 \text{ min}^{-1}$$

2 Drehstrom-Synchrongenerator

Ein vierpoliger Drehstrom-Synchrongenerator mit Vollpolläufer speist Leistung in das Netz ein.

Folgende Daten sind gegeben:

U_N	=	27 kV	Nennwert der Leiterspannung
I_N	=	30 kA	Nennstrom
f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
$\cos \varphi_N$	=	0,8 übererregt	Nennleistungsfaktor
X_d	=	0,78 Ω	Synchronreaktanzen
p	=	2	Polpaarzahl

Vereinfachende Annahmen:

- Die Synchronmaschine sei verlustfrei.
- Geben Sie das einphasige Ersatzschaltbild der Maschine an und zeichnen Sie das vollständige Zeigerdiagramm für Betrieb mit Nennstrom, Nennspannung und $\cos \varphi = 0,8$ übererregt im Maßstab 5 kV/cm und 5 kA/cm.
 - Berechnen Sie das Drehmoment an der Generatorwelle für diesen Betriebspunkt.
 - Durch welchen Stelleingriff kann bei gleicher Wirkleistung $\cos \varphi = 1$ eingestellt werden?
 - Berechnen Sie die Polradspannung U_P und den Polradwinkel ϑ für den Betriebspunkt aus Aufgabenteil c).

Lösung

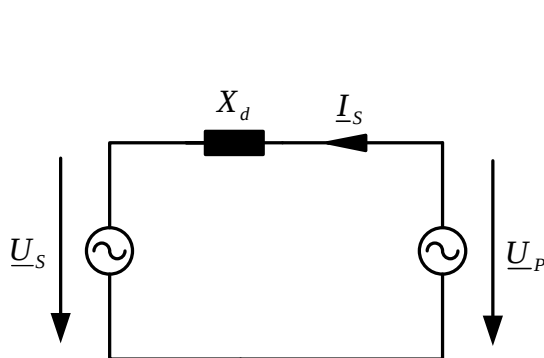


Abbildung 3: einphasiges Ersatzschaltbild

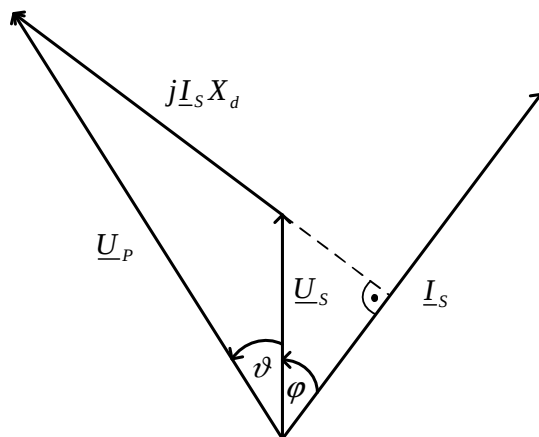


Abbildung 4: Zeigerdiagramm zu a)

- Für das Zeigerdiagramm benötigt man die Größen

$$U_S = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 15,59 \text{ kV}$$

$$\varphi_N = \arccos 0,8 = 36,87^\circ$$

$$I_S \cdot X_d = 23,4 \text{ kV}$$

b) Da die Maschine verlustfrei ist, gilt

$$P_{el} = P_{mech}$$

Die Leistungen lassen sich ausrechnen zu

$$P_{el,N} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N$$

$$P_{mech,N} = M_N \cdot \Omega_N$$

Mit der Winkelgeschwindigkeit

$$\Omega_N = \frac{2\pi \cdot f_N}{p}$$

ergibt sich für das Drehmoment durch Gleichsetzen der beiden Leistungsgleichungen

$$M_N = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N}{\Omega_N} = 7,145 \text{ MNm}$$

c) Die Polradspannung muss verringert werden. Dies ist durch Verkleinern des Erregerstroms möglich.

d) Gleiche Wirkleistung bei $\cos \varphi = 1$:

$$\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N$$

Damit gilt für den Statorstrom

$$I_S = I_{SN} \cdot \cos \varphi_N = 24 \text{ kA}$$

Mit $\cos \varphi = 1$ gilt das Zeigerdiagramm aus Bild 5.

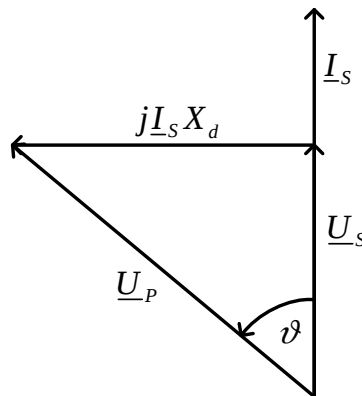


Abbildung 5: Zeigerdiagramm für $\cos \varphi = 1$

Für die Polradspannung gilt damit

$$U_P = \sqrt{U_S^2 + (I_S X_d)^2} = 24,36 \text{ kV}$$

Der Polradwinkel ergibt sich zu

$$\vartheta = \arctan \left(\frac{I_S X_d}{U_S} \right) = 50,22^\circ$$

3 Drehstromasynchronmotor mit Drehstromsteller

Ein Drehstromasynchronmotor mit kurzgeschlossener Läuferwicklung wird von einem Drehstromsteller gespeist.

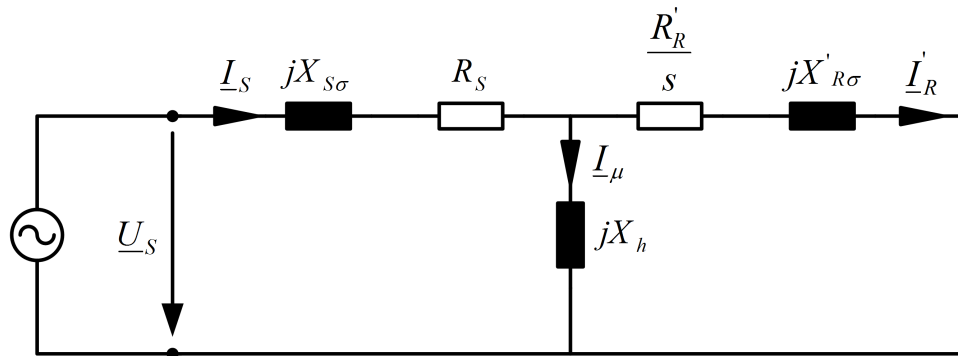


Abbildung 6: Einphasiges Ersatzschaltbild des Drehstromasynchronmotors, verbunden mit einem einphasigen Modell des Drehstromstellers

Folgende Daten sind gegeben:

Einphasiges Ersatzschaltbild des Drehstromasynchronmotors

$X_{S\sigma}$	=	0,1 Ω	Impedanz der Statorstreuinduktivität
R_S	=	0,03 Ω	Wicklungswiderstand des Stators
X_h	=	5 Ω	Impedanz der Hauptinduktivität
R'_R	=	0,05 Ω	Auf den Stator umgerechneter Wicklungswiderstand des Rotors
$X'_{R\sigma}$	=	0,2 Ω	Auf den Stator umgerechnete Impedanz der Rotorstreuinduktivität

Nennndaten des Drehstromasynchronmotors

U_N	=	400 V	Nennspannung des Asynchronmotors
I_N	=	140 A	Nennstrom des Asynchronmotors
f_N	=	50 Hz	Nennspeisefrequenz des Asynchronmotors
p	=	4	Polpaarzahl des Asynchronmotors
$\cos \varphi_N$	=	0,83	Leistungsfaktor im Nennbetrieb

Vereinfachende Annahmen:

- Der Drehstromsteller kann als ideal sinusförmige dreiphasige Spannungsquelle modelliert werden, bei der die Amplitude der Spannung frei eingestellt werden kann. Die Frequenz ist gleich der Nennspeisefrequenz f_N .
- Eisen- und Reibungsverluste des Asynchronmotors werden vernachlässigt.

- Zum Anfahren des Antriebs wird die Amplitude der Spannung so eingestellt, dass der Asynchronmotor im Stillstand ein Drehmoment von $M_i = 200 \text{ Nm}$ aufbringt. Berechnen Sie die in diesem Betriebspunkt im Rotor auftretende Verlustleistung.
- Auf welchen Wert der Drehzahl n_0 läuft der unbelastete Motor hoch, wenn die Amplitude der Spannung nach a) beibehalten wird?

- c) Jetzt wird die Spannung auf den Nennwert U_N eingestellt. Berechnen Sie den Effektivwert des Strangstroms I_{S0} im Leerlauf.
- d) Der Asynchronmotor wird bei Nennspannung so belastet, dass der Nennstrom fließt, $I_S = I_N$. Berechnen Sie das innere Drehmoment M_{iN} .
- e) Skizzieren Sie das Schaltbild des Drehstromstellers mit einem Drehstromasynchronmotor in Sternschaltung ohne Sternpunktanschluss.

Lösung

- a) Die Rotorverluste berechnen sich zu

$$P_{VR} = s \cdot P_D = s \cdot M_i \cdot \Omega_{syn}$$

Im Anlaufpunkt gilt für den Schlupf $s = 1$. Für das gegebene Drehmoment und mit der Winkelgeschwindigkeit

$$\Omega_{syn} = \frac{2\pi \cdot f_N}{p} = 78,54 \text{ s}^{-1}$$

ergibt sich

$$P_{VR} = M_i \cdot \Omega_{syn} = 15,71 \text{ kW}$$

- b) Die Höhe der Spannung ist für die Leerlaufdrehzahl unerheblich. Es gilt

$$n = n_{syn} = \frac{f_N}{p} = 750 \text{ min}^{-1}$$

- c) Im Leerlauf ist $s = 0$. Damit gilt $\frac{R'_R}{s} \rightarrow \infty$. Der gesamte Strom I_{S0} fließt demnach über die Hauptreaktanz X_h (siehe Ersatzschaltbild, Bild 6). Er lässt sich ausrechnen zu

$$I_{S0} = \frac{U_S}{\sqrt{R_S^2 + (X_{S\sigma} + X_h)^2}} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_S^2 + (X_{S\sigma} + X_h)^2}} = 45,28 \text{ A}$$

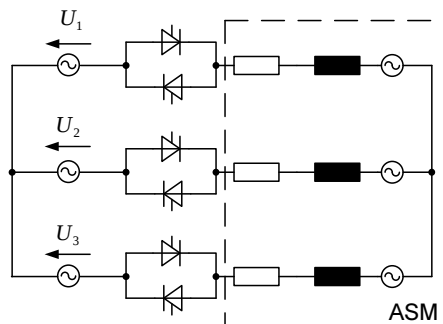
- d) Für das innere Moment gilt

$$M_i = \frac{P_D}{\Omega_{syn}}$$

Die Drehfeldleistung P_D entspricht der elektrisch zugeführten Leistung, abzüglich der ohmschen Verluste im Stator. Das innere Drehmoment M_{iN} ergibt sich dann zu

$$M_{iN} = \frac{P_{el} - 3 \cdot I_N^2 \cdot R_S}{\Omega_{syn}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N - 3 \cdot I_N^2 \cdot R_S}{\Omega_{syn}} = 1 \text{ kNm}$$

- e)



4 Netzgeführte Drehstrombrückenschaltung

Gegeben ist eine Drehstrombrückenschaltung mit einer Gleichstrommaschine als Last.

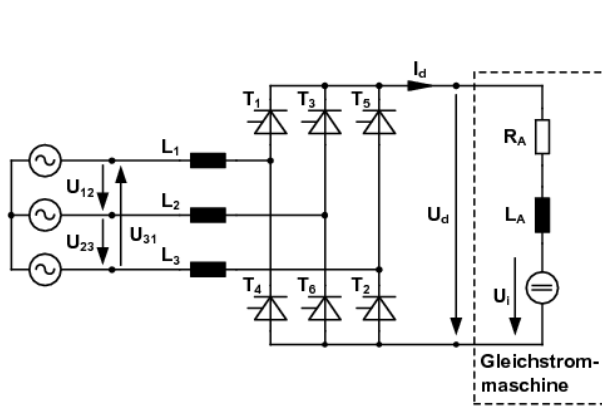


Abbildung 7: Drehstrombrücke

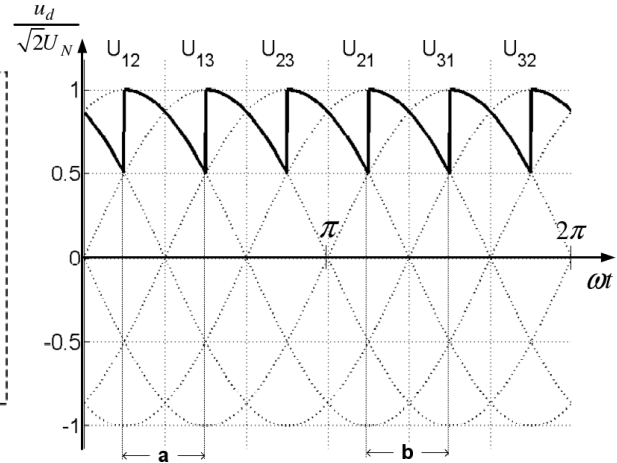


Abbildung 8: Zeitverlauf der Spannung $u_d(t)$

Folgende Daten sind gegeben:

U_N	$=$	440 V	Nennleiterspannung des Netzes
I_d	$=$	120 A	Mittelwert des Laststroms
R_A	$=$	0,25 Ω	Widerstand der Ankerwicklung der Gleichstrommaschine

Die Spannung u_d hat einen Zeitverlauf gemäß Abbildung 8.

Vereinfachende Annahmen:

- Das Netz sei ideal.
- Die Thyristoren seien ideal und verlustfrei.
- Die Auswirkungen der Kommutierungsinduktivitäten können vernachlässigt werden.
- Der Laststrom sei ideal glatt ($L_A \rightarrow \infty$).

- Berechnen Sie die ideale Gleichspannung U_{d0} .
- Welchen Wert hat der Zündwinkel α ?
- Geben Sie an, welche Thyristoren im Abschnitt **a** und welche im Abschnitt **b** der Abbildung 8 den Strom führen.
- Berechnen Sie die induzierte Spannung U_i .
- Welchen Wert der Blockierspannung müssen die Thyristoren mindestens haben, wenn der Stromrichter im Bereich $0 < \alpha < \alpha_{max}$ betrieben werden soll?

Lösung

a)

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_N = 594,2 \text{ V}$$

b) Aus Bild 8 lässt sich der Zündwinkel ablesen zu $\alpha = 30^\circ$.

c) Abschnitt a: Es liegt die Spannung U_{12} am Ausgang an. Demnach leiten die Thyristoren T_1 und T_6 .

Abschnitt b: Es liegt die Spannung U_{21} am Ausgang an. Demnach leiten die Thyristoren T_3 und T_4 .

d) Die Spannung am Ausgang ergibt sich mit dem eingestellten Zündwinkel zu

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cdot \cos \alpha = 514,59 \text{ V}$$

Da der Mittelwert der Spannung an der Drossel 0 ist, gilt für die Spannung an der Gleichstrommaschine

$$U_d = I_d \cdot R_A + U_i$$

Durch Umstellen nach der induzierten Spannung und Einsetzen der Ausgangsspannung der Drehstrombrücke ergibt sich mit dem gegebenen Mittelwert des Laststroms I_d

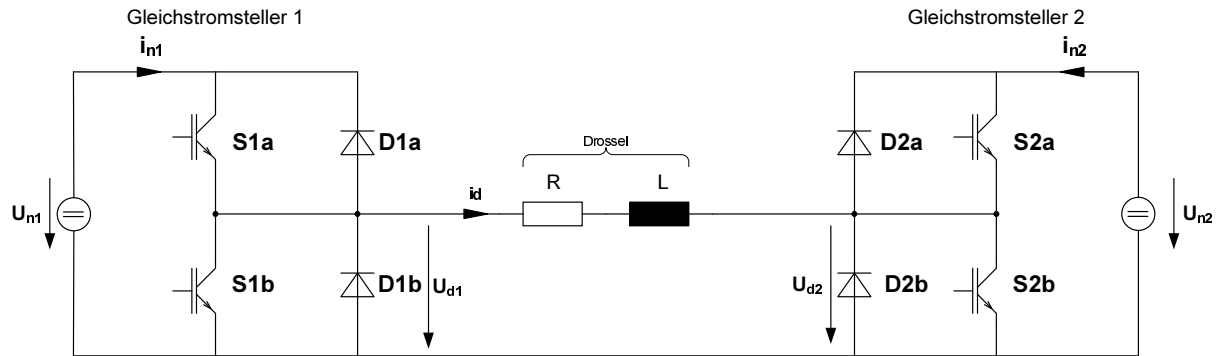
$$U_i = U_{d\alpha} - I_d \cdot R_A = 484,6 \text{ V}$$

e) Die Thyristoren müssen den Amplitudenwert der Außenleiterspannung sperren können, also

$$U_{T,Blockier} \geq \sqrt{2} \cdot U_N = 622,25 \text{ V}$$

5 Universeller Gleichstromsteller für die Automobiltechnik

Mit den Gleichstromstellern 1 und 2 kann der Leistungsfluss zwischen der Spannungsquelle 1 und der Spannungsquelle 2 in beiden Richtungen gesteuert werden.



Vereinfachende Annahmen

- Die Leistungshalbleiter seien verlustfrei.
- Die beiden Gleichstromsteller werden mit konstanter Pulsfrequenz $f = 10 \text{ kHz}$ betrieben.
- Die Induktivität der Drossel ist so groß, dass der Gleichstrom i_d für a) und b) als konstant betrachtet werden kann: $i_d = I_d = \text{konst.}$

Folgende Daten sind gegeben

U_{n1}	=	20 V	Spannung an Gleichspannungsquelle 1
U_{n2}	=	42 V	Spannung an Gleichspannungsquelle 2
R	=	20 mΩ	Wicklungswiderstand der Drossel

- a) Zunächst soll die Gleichspannungsquelle U_{n1} eine Leistung von $P = 400 \text{ W}$ abgeben ($i_{n1} \geq 0$):

Dazu wird der Transistor S_{1a} dauerhaft eingeschaltet und der Transistor S_{1b} dauerhaft ausgeschaltet. Die Transistoren S_{2a} und S_{2b} werden periodisch ein- und ausgeschaltet.

Berechnen Sie die periodisch wiederholte Einschaltdauer T_{e2b} des Transistors S_{2b} und den Effektivwert $I_{n2,eff}$ des Stroms i_{n2} .

- b) Jetzt soll die Gleichspannungsquelle U_{n2} Leistung abgeben ($i_{n2} \geq 0$):

Dazu werden die Transistoren S_{1a} und S_{1b} dauerhaft ausgeschaltet. Die Transistoren S_{2a} und S_{2b} werden periodisch ein- und ausgeschaltet.

Berechnen Sie die periodisch wiederholte Einschaltdauer T_{e2a} des Transistors S_{2a} so, dass der Gleichstrom $|I_d| = 50 \text{ A}$ beträgt.

- c) Durch eine Überspannung wird die Diode D_{2a} beschädigt und bildet einen dauerhaften Kurzschluss. Kann die Gesamtanordnung durch sofortiges Abschalten aller Transistoren in einen sicheren Zustand gebracht werden (kurze Begründung!)?

Lösung

- a) Gleichstromsteller 2 arbeitet bei diesem Betrieb als Hochsetzsteller.

Für die Einschaltdauer des Transistors S_{2b} muss die Spannung U_{d2} bekannt sein:

Um eine Leistung von 400 W abzugeben, muss der Strom i_{n1} der Gleichspannungsquelle 1

$$i_{n1} = \frac{P}{U_{n1}} = 20 \text{ A}$$

betragen. Da der Transistor S_{1a} dauerhaft eingeschaltet und verlustfrei ist, entspricht i_{n1} dem Gleichstrom I_d und die Spannung U_{d1} der Quellenspannung U_{n1} .

Durch den Strom entsteht ein Spannungsabfall am Widerstand R , so dass sich für die Spannung U_{d2}

$$U_{d2} = U_{d1} - R \cdot I_d = 19,6 \text{ V}$$

ergibt.

Für den Hochsetzsteller gilt

$$\frac{U_{n2}}{U_{d2}} = \frac{1}{1-a},$$

woraus sich die relative Einschaltdauer berechnen lässt zu

$$a = \frac{U_{n2} - U_{d2}}{U_{n2}} = 0,53.$$

Die Einschaltdauer ist damit

$$T_{e2b} = a \cdot T = a \cdot \frac{1}{f} = 53,33 \mu\text{s}$$

Während der Einschaltdauer von S_{2b} ist der Strom $i_{n2} = 0$. Während der Ausschaltzeit entspricht er dem Konstantstrom $-I_d$.

Für den Effektivwert von i_{n2} gilt dann

$$\begin{aligned} I_{n2,eff} &= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{T_{e2b}}^T (-I_d)^2 dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot I_d^2 \cdot (T - T_{e2b})} \\ &= I_d \cdot \sqrt{1-a} = 13,33 \text{ A} \end{aligned}$$

- b) In diesem Fall arbeitet der Gleichstromsteller 2 als Tiefsetzsteller.

Damit ein Strom von $|I_d| = 50 \text{ A}$ fließt, muss die Spannung U_{d2} eingestellt werden zu

$$U_{d2} = U_{n1} + |I_d| \cdot R = 21 \text{ V}$$

Für das Einschaltverhältnis des Tiefsetzstellers ergibt sich dann

$$a = \frac{U_{d2}}{U_{n2}} = 0,5$$

Die Einschaltdauer T_{e2a} ist dann

$$T_{e2a} = a \cdot \frac{1}{f} = 50 \mu\text{s}$$

- c) Nein, da ein dauerhafter Stromfluss von der höheren Spannung U_{n2} zu der niedrigeren Spannung U_{n1} über den entstandenen Kurzschluss und die Diode D_{1a} möglich ist.