

Schriftliche Prüfung

Elektrische Maschinen und Stromrichter

Prof. Dr.-Ing. Michael Braun

Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

Dennis Bräckle

Daniel Bernet

– Aufgaben zur Prüfung Nr. 137 am 14. September 2018 –

Vorname:

Nachname:

Matrikelnummer:

Lösungsblatt

Diagramm für Aufgabe 3a

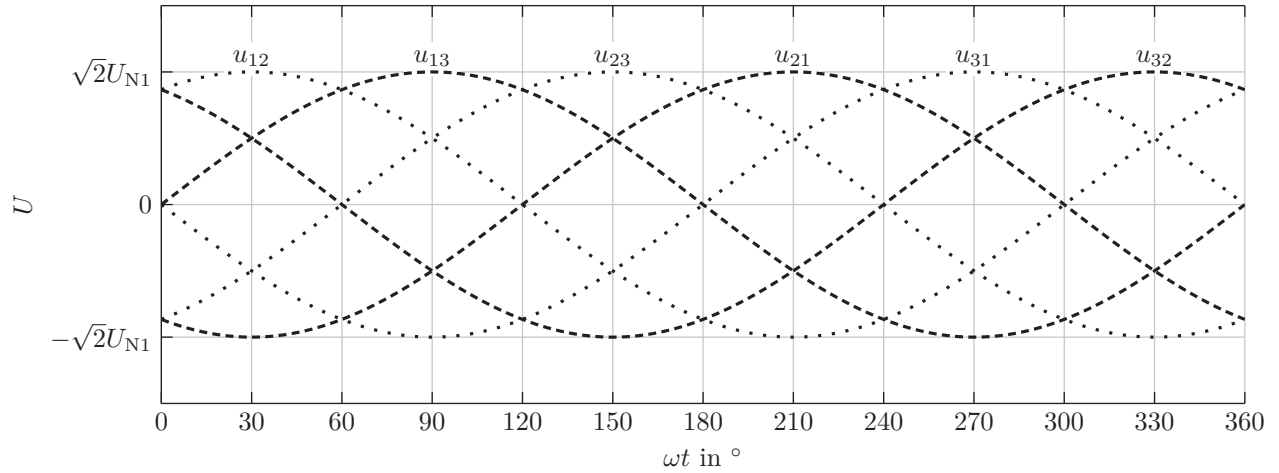


Abbildung I: Diagramm für Aufgabe 3a

Diagramm für Aufgabe 4d

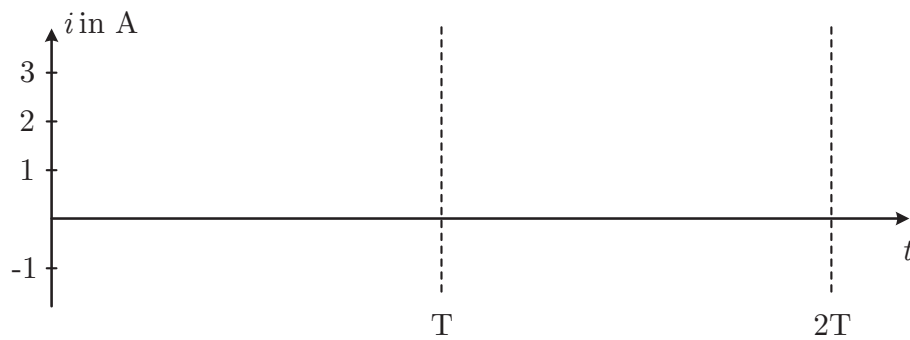


Abbildung II: Diagramm für Aufgabe 4d

Diagramm für Aufgabe 5a

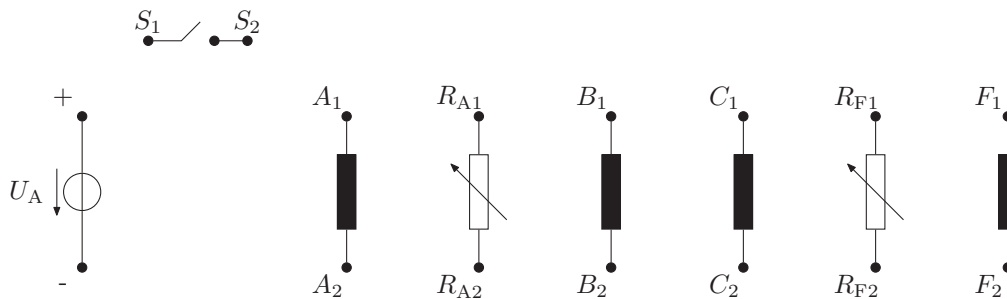


Abbildung III: Diagramm für Aufgabe 5a

1 Universalmotor

Von einer Gleichstromreihenschlussmaschine sind folgende Daten bekannt:

Vereinfachende Annahmen

- Es treten nur Stromwärmeverluste auf.
- Es treten keine Sättigungseffekte im Eisen auf.

Folgende Daten sind gegeben

U_{MN}	=	200 V	Motorspannung im Nennbetrieb
I_{MN}	=	10 A	Motorstrom im Nennbetrieb
$P_{\text{mech},N}$	=	1800 W	Mechanische Leistung im Nennbetrieb
R_f	=	0,3 Ω	Widerstand der Feldwicklung

Durch eine Messung wurden außerdem folgende Daten eines Betriebspunkts 1 ermittelt:

U_{M1}	=	100 V	Motorspannung im Betriebspunkt 1
I_{M1}	=	6,5 A	Motorstrom im Betriebspunkt 1
n_1	=	6000 min^{-1}	Drehzahl im Betriebspunkt 1

Aufgaben

1 a) Berechnen Sie den Widerstand R_A der Ankerwicklung.

Im Folgenden gilt $R_A = 1,7 \Omega$.

1 b) Berechnen Sie das Nennmoment M_N und die Nenndrehzahl n_N (in min^{-1}) des Motors.

1 c) Für welche Antriebsaufgaben wird der Universalmotor eingesetzt? Nennen Sie zwei konkrete Beispiele.

1 d) Auf welche Weise wird die Drehrichtung des Universalmotors umgekehrt?

Lösungsvorschlag Aufgabe 1

1 a)

$$P_{\text{el}} - P_{\text{mech}} = P_V = \underbrace{(R_f + R_A)}_{R_{\text{ges}}} I_A \quad (1)$$

$$R_A = \frac{P_{\text{el},N} - P_{\text{mech},N}}{I_{A,N}} - R_f \quad (2)$$

$$= \frac{U_{A,N} I_{A,N} - P_{\text{mech},N}}{I_{A,N}^2} - R_f \quad (3)$$

$$= 1,7 \Omega \quad (4)$$

1 b)

$$U_{M1} = I_{M1} R_{\text{ges}} + c\Phi_{M1} \Omega_1 \quad (5)$$

$$c\Phi_{M1} = \frac{U_{M1} - I_{M1} R_{\text{ges}}}{\Omega_1} \quad (6)$$

$$= 0,1385 \text{ V s} \quad (7)$$

Da keine Sättigungseffekte auftreten gilt

$$\frac{c\Phi_N}{c\Phi_{M1}} = \frac{I_{MN}}{I_{M1}} \quad (8)$$

$$c\Phi_N = c\Phi_{M1} \frac{I_{MN}}{I_{M1}} \quad (9)$$

$$= 0,2130 \text{ V s} \quad (10)$$

Damit gelten für das Nennmoment und die Nenndrehzahl der Maschine

$$n_N = \frac{1}{2\pi} \frac{U_{MN} - R_{\text{ges}} I_{MN}}{c\Phi_N} = 8068,97 \text{ min}^{-1} \quad (11)$$

$$M_N = c\Phi_N I_{MN} = 2,1302 \text{ Nm} \quad (12)$$

1 c) Die Reihenschlussmaschine wird auch in großer Stückzahl als Universalmotor für Gleich- und Wechselstrom benutzt. Aufgrund $M_i \propto I_A^2$ hängt die Drehmomentenrichtung nicht von der Polariät des Stromes ab. Der Wechselstromwiderstand der Wicklungen beeinflusst das Betriebsverhalten nicht wesentlich. Durch die sehr hohe Leerlaufdrehzahl und das sehr hohe Anlauf-/Blockiermoment, wird die Gleichstrom-Reihenschlussmaschine unter anderem in folgenden Geräten eingesetzt:

Handbohrmaschine, Handrührer, Staubsauger, etc.

1 d) Eine der beiden Wicklungen (Erregerwicklung oder Ankerwicklung) muss mit entgegengesetzter Polarität eingeschaltet werden, um die Drehrichtung zu ändern.

2 Drehstromasynchronmaschine

Eine von einem starren Drehspannungssystem gespeiste Drehstromasynchronmaschine mit 2 Polpaaren wird stationär als Motor betrieben. Das von der Drehzahl unabhängige konstante Lastmoment betrage 30% des Kippmoments. Die Statorfrequenz beträgt 50 Hz. Der Kippunkt des Motors liegt bei der Drehzahl $n_k = 1300 \text{ min}^{-1}$. Es gilt die Kloss'sche Formel.

Aufgaben

- 2 a) Skizzieren Sie qualitativ die Drehzahl-Drehmomentkennlinie und die Lastkennlinie in ein gemeinsames Diagramm ein und markieren Sie den stationären Arbeitspunkt AP.
- 2 b) Berechnen Sie die Drehzahl des Motors im Arbeitspunkt.
- 2 c) Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Motors im Kippunkt unter der Annahme, dass ausschließlich Verluste im Rotorwiderstand anfallen.

Lösungsvorschlag Aufgabe 2

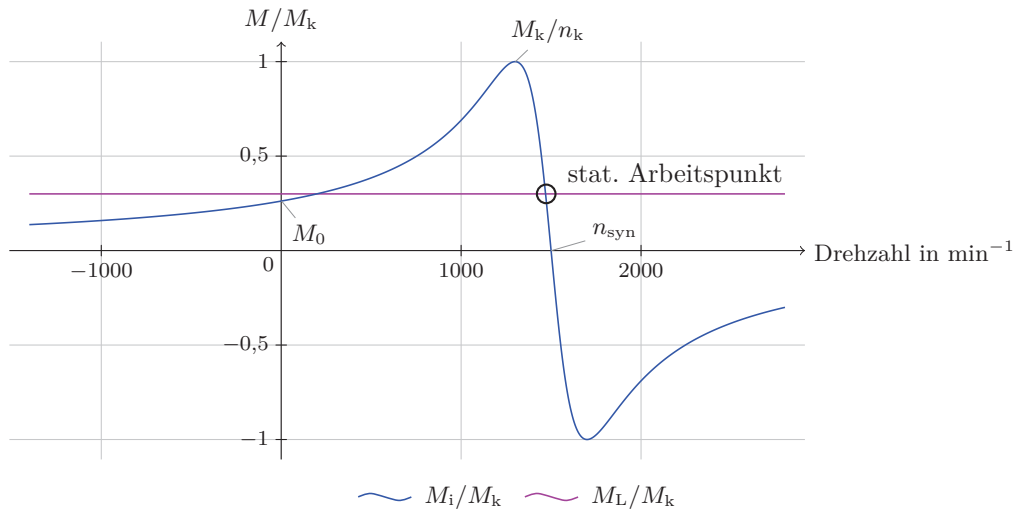


Abbildung 1: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Maschine und der Last zu Teilaufgabe 2 a)

2 a)

2 b) Es gilt die Kloss'sche Formel. Um den Schlupf im Arbeitspunkt zu ermitteln, müssen die Werte des Kipppunkts (bekannt) eingesetzt und die quadratische Gleichung gelöst werden.

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (13)$$

$$\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} - 2 \frac{M_k}{M} = 0 \quad (14)$$

$$s^2 - 2s_k \frac{M_k}{M} \cdot s + s_k^2 = 0 \quad (15)$$

$$s_{AP} = s_1 = 0,0205 < s_k, s_2 = 0,8684 > s_k \quad (16)$$

$$n_{AP} = (1 - s_{AP}) \cdot n_{syn} = 1470 \text{ min}^{-1} \quad (17)$$

Mit der Synchrondrehzahl $n_{syn} = \frac{f_s}{p} = 1500 \text{ min}^{-1}$.

2 c)

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} \quad (18)$$

$$= \frac{(1-s) P_D}{P_{el}} = \frac{(1-s) (P_{el} - \overbrace{P_{V,S}}^0)}{P_{el}} \quad (19)$$

$$= (1-s) \quad (20)$$

$$\eta_k = 1 - s_k = 0,8667 = 86,67\% \quad (21)$$

3 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Zur Übertragung elektrischer Energie von Netz 1 in Netz 2 wird die vereinfachte Schaltungsanordnung in Abb. 2 betrachtet.

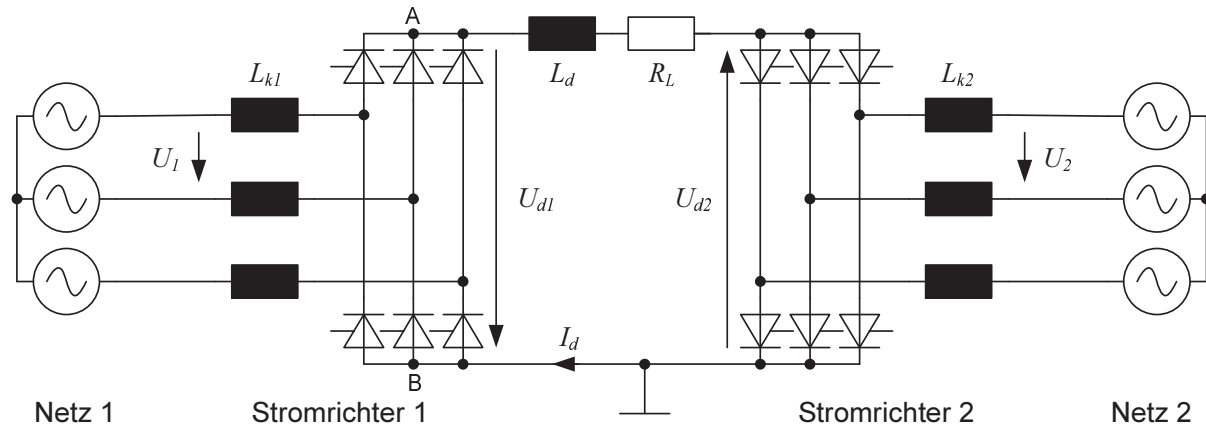


Abbildung 2: Energieübertragung zwischen den Netzen 1 und 2 mit vereinfachter Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)

Vereinfachende Annahmen

- Die Netze seien ideale Drehspannungsquellen.
- Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei.
- Der Zwischenkreisstrom I_d sei ein ideal glatter Gleichstrom.

Folgende Daten sind gegeben

U_1	=	500 kV	Effektivwert der verketteten Spannungen in Netz 1
$f_1 = f_2$	=	50 Hz	Netzfrequenzen
U_2	=	450 kV	Effektivwert der verketteten Spannungen in Netz 2
$L_{k1} = L_{k2}$	=	0 mH	Kommutierungsinduktivitäten
R_L	=	5 Ω	Gesamtwiderstand der Übertragungsstrecke

Aufgaben

3 a) Berechnen Sie für $\alpha_1 = 30^\circ$ den Mittelwert der Spannung U_{d1} und zeichnen Sie deren Zeitverlauf in das Diagramm auf der Rückseite Ihres Deckblatts ein.

Im Folgenden gilt $\bar{U}_{d1} = 600$ kV.

3 b) Berechnen Sie den Zündwinkel $\alpha_{2(b)}$ so, damit ein Zwischenkreisstrom von $I_d = 1000$ A fließt.

3 c) Berechnen Sie für $\alpha_{2(c)} = 165^\circ$ die dem Netz 1 entnommene Leistung P_1 und die ins Netz 2 eingespeiste Leistung P_2 . Begründen Sie die Differenz zwischen P_1 und P_2 .

3 d) Erklären Sie, warum die Thyristoren in Stromrichter 2 in entgegengesetzter Richtung zu den Thyristoren in Stromrichter 1 geschaltet sind.

Lösungsvorschlag Aufgabe 3

3 a)

$$\bar{U}_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{N1} \cos(30^\circ) = 584,8 \text{ kV} \quad (22)$$

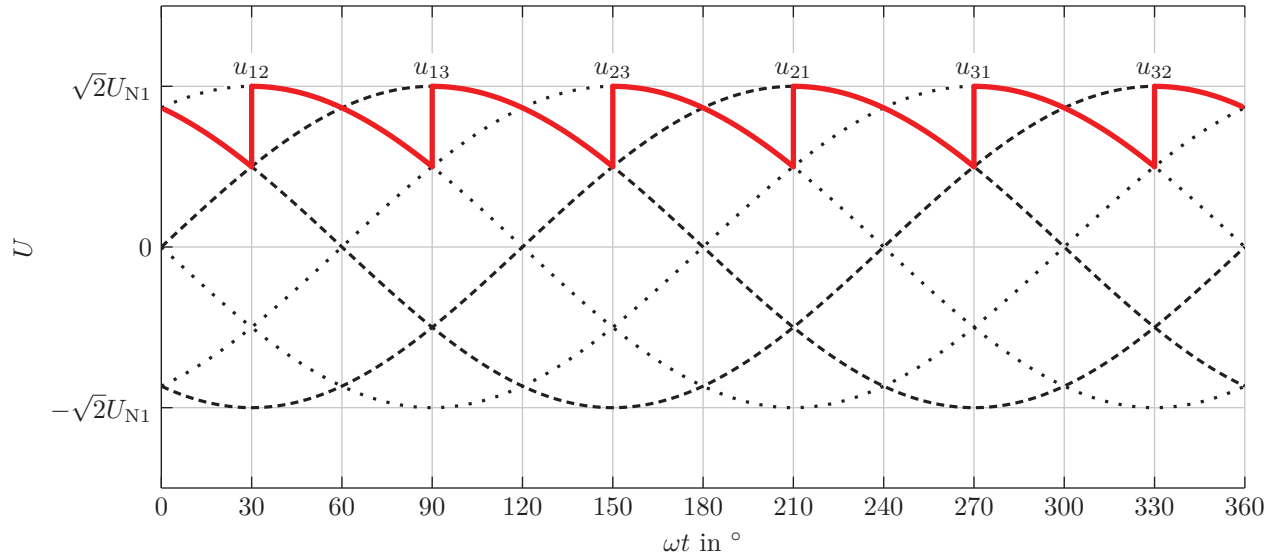


Abbildung 3: Zeitverlauf von U_{d1}

3 b) Der Maschensatz im Gleichstromzwischenkreis liefert

$$-\bar{U}_{d1} + L_d \frac{dI_d}{dt} + I_d R_L - \bar{U}_{d2} = 0 \quad (23)$$

Mit $\frac{dI_d}{dt} = 0$ folgt

$$\bar{U}_{d2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{N2} \cos(\alpha_{2(b)}) = I_d R_L - \bar{U}_{d1} \quad (24)$$

Umstellen ergibt

$$\alpha_{2(b)} = \arccos\left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}U_{N2}}(I_d R_L - \bar{U}_{d1})\right) = 168,26^\circ \quad (25)$$

3 c) Für $\alpha_{2(c)} = 165^\circ$ ergibt sich für Stromrichter 2

$$\bar{U}_{d2} = -587 \text{ kV} \quad (26)$$

und ein Gleichstrom

$$I_d = \frac{\bar{U}_{d1} + \bar{U}_{d2}}{R_L} = 2600 \text{ A} \quad (27)$$

Damit ergibt sich eine von Netz 1 abgegebene Leistung von

$$P_1 = \bar{U}_{d1} I_d = 1,56 \text{ GW} \quad (28)$$

und eine von Netz 2 aufgenommene Leistung von

$$P_2 = \bar{U}_{d2} I_d = 1,53 \text{ GW} \quad (29)$$

Die Differenzleistung entspricht exakt der Verlustleistung im Übertragungswiderstand

$$P_1 - P_2 = P_R = R_L I_d^2 = 0,03 \text{ GW} \quad (30)$$

3 d) Dies ist erforderlich, da Thyristoren den Strom nur von der Anode zur Kathode führen können. Würde man die Thyristoren von Stromrichter 2 in gleicher Richtung wie in Stromrichter 1 schalten, so könnte kein Zwischenkreisstrom fließen und es könnte keine Energie zwischen den Netzen übertragen werden.

4 LED-Fahrzeugscheinwerfer mit Tiefsetzsteller

Für die Ansteuerung eines LED-Fahrzeugscheinwerfers wird ein Tiefsetzsteller gemäß Abb. 4 eingesetzt.

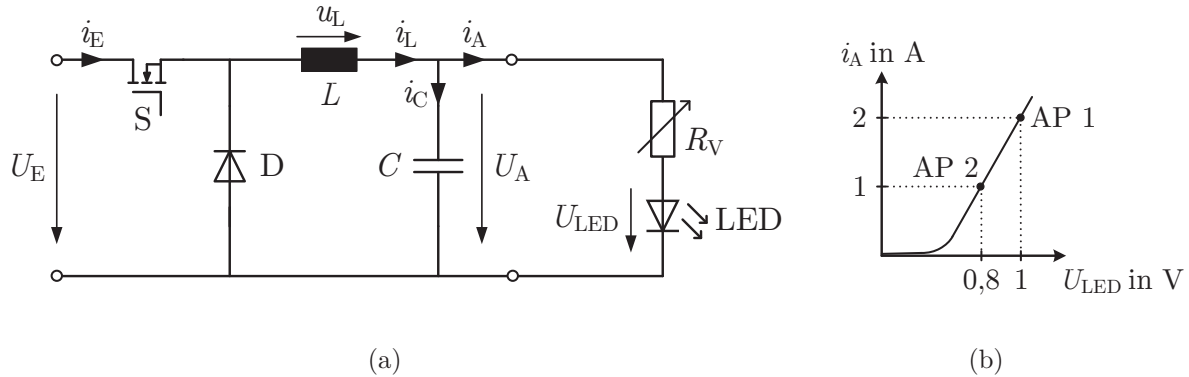


Abbildung 4: (a) LED Fahrzeugscheinwerfer mit Tiefsetzsteller (b) LED-Kennlinie

Vereinfachende Annahmen

- Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei.
- Die Ausgangsspannung U_A sei eine ideal geglättete Gleichspannung.

Folgende Daten sind gegeben

U_E	=	12 V	Eingangsspannung
L	=	1,5 mH	Induktivität des Tiefsetzstellers
f	=	1 kHz	Taktfrequenz
Δi_L	=	2 A	Stromwelligkeit in der Induktivität

Aufgaben

Um den Fahrzeugscheinwerfer aufzublenden wird die LED zunächst in AP 1 gemäß Abb. 4(b) betrieben. Dafür wird der LED ein Vorwiderstand von $R_V = 2,5 \Omega$ vorgeschaltet.

4a) Berechnen Sie die hierfür erforderliche Ausgangsspannung U_A und das Tastverhältnis a .

4b) Geben Sie für den ein- und ausgeschalteten Zustand des MOSFETs S den Spannungsabfall u_L über der Induktivität als Funktion von U_E und/oder U_A an.

Im Folgenden gilt für das Tastverhältnis $a = 0,5$.

4c) Geben Sie den arithmetischen Mittelwert des Induktivitätsstroms \bar{i}_L an und zeigen Sie, dass im ein- und ausgeschalteten Zustand von S für die Stromänderungen $|\Delta i_L(t_{\text{ein}})| = |\Delta i_L(t_{\text{aus}})| = 2 \text{ A}$ gilt.

4d) Zeichnen Sie die Zeitverläufe der Ströme i_L , i_C und i_A in das Diagramm auf der Rückseite Ihres Deckblatts ein.

Durch mechanisches Umschalten wird der LED-Vorwiderstand auf $R_V = 5,2 \Omega$ erhöht und der Fahrzeugscheinwerfer abgeblendet (LED in AP 2, siehe Abb. 4(b)). Es gilt weiterhin $a = 0,5$.

4e) Begründen Sie, weshalb es bei weiterer Erhöhung des Vorwiderstands auf Werte $R_V > 5,2 \Omega$ zum Lückbetrieb des Tiefsetzstellers kommen würde. Nennen Sie zwei Maßnahmen, mit denen die Lückgrenze hin zu kleineren Ausgangsströmen verschoben werden kann.

Lösungsvorschlag Aufgabe 4

4 a) Für den Betrieb in AP 1 mit $i_A = 2 \text{ A}$ ist eine Ausgangsspannung von

$$U_A = U_{\text{LED(AP1)}} + i_A R_V = 1 \text{ V} + 2 \text{ A} \cdot 2,5 \Omega = 6 \text{ V} \quad (31)$$

erforderlich. Dies wird durch das Tastverhältnis

$$a = \frac{U_A}{U_E} = \frac{6 \text{ V}}{12 \text{ V}} = 0,5 \quad (32)$$

erreicht.

4 b)

$$u_L = U_E - U_A \text{ für S ein} \quad (33)$$

$$u_L = -U_A \text{ für S aus} \quad (34)$$

4 c) Der mittlere Induktivitätsstrom entspricht dem Ausgangsstrom

$$\bar{i}_L = 2 \text{ A} \quad (35)$$

Während der Zeitdauer t_{ein} liegt über der Induktivität die Spannung

$$u_L = U_E - U_A \quad (36)$$

an. Umstellen der Induktivitätsgleichung und anschließende Integration liefert

$$\Delta i_L(t_{\text{ein}}) = \frac{U_E - U_A}{L} t_{\text{ein}} \quad (37)$$

Während t_{aus} folgt mit

$$u_L = -U_A \quad (38)$$

die Stromänderung

$$\Delta i_L(t_{\text{aus}}) = -\frac{U_A}{L} t_{\text{aus}} \quad (39)$$

Aus $a = 0,5$ ergibt sich

$$t_{\text{ein}} = t_{\text{aus}} = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f} = 0,5 \text{ ms} \quad (40)$$

und schließlich

$$|\Delta i_L(t_{\text{ein}})| = \left| \frac{U_E - U_A}{L} t_{\text{ein}} \right| = 2 \text{ A} \quad (41)$$

$$|\Delta i_L(t_{\text{aus}})| = \left| -\frac{U_A}{L} t_{\text{aus}} \right| = 2 \text{ A} \quad (42)$$

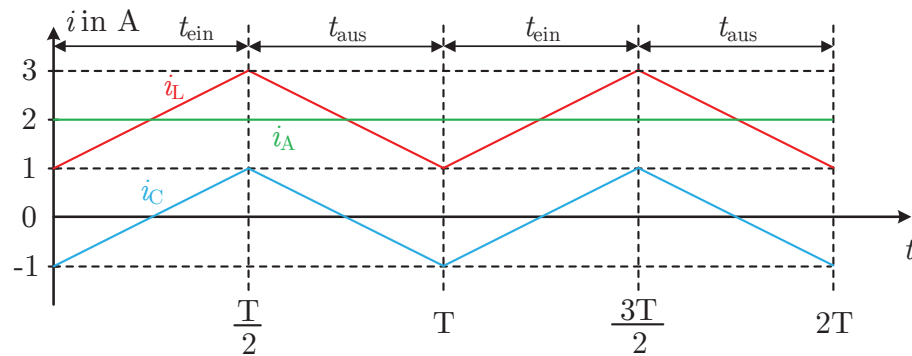


Abbildung 5: Zeitverläufe der Ströme i_L , i_C und i_A

4d)

4e) Das gleichbleibende Tastverhältnis $a = 0,5$ führt zu einer ebenfalls konstanten Stromänderung $\Delta i_L = 2 \text{ A}$. Ab einem mittleren Induktivitätsstrom von $\bar{i}_L < 1 \text{ A}$ führt die Stromwelligkeit daher zu einem zwischenzeitlichen Absinken des Induktivitätsstroms auf $i_L = 0 \text{ A}$ (Lückbetrieb).

Maßnahmen zum Herabsetzen der Lückgrenze:

- Vergrößerung der Induktivität L
- Vergrößerung der Taktfrequenz f

5 Elektrische Maschinen und Stromrichter in der Anwendung

5 a) Eine Gleichstromnebenschlussmaschine mit Ankerwicklung ($A_1 - A_2$), Wendepolwicklung ($B_1 - B_2$), Kompensationswicklung ($C_1 - C_2$) und Erregerwicklung ($F_1 - F_2$) soll von einer Gleichspannungsquelle U_A gespeist werden. Der Erregerstrom soll durch einen Vorwiderstand ($R_{F1} - R_{F2}$) eingestellt werden. Der Ankerstrom soll beim Anfahren durch einen Ankervorwiderstand ($R_{A1} - R_{A2}$) begrenzt werden. Die Wicklungen des Motors sollen mit dem Schalter ($S_1 - S_2$) mit der Spannungsquelle verbunden oder von ihr getrennt werden. Zeichnen Sie die notwendigen Leitungsverbindungen in das Schaltschema auf der Rückseite des Deckblatts ein. Geben Sie an, warum beim Ausschalten an der Schaltstrecke des Schalters ein kurzer Lichtbogen entsteht.

5 b) Abbildung 6 zeigt die Aufsicht auf die Wicklungsanordnung eines Teils der Fahrstrecke eines Synchron-Langstator-Linearmotors ("Transrapid"). Die senkrechten Striche stellen die Nuten mit den eingelegten Wicklungen dar. Die Kontur des Eisens ist gestrichelt dargestellt. Die Spulenweite ist $s = 0,5 \text{ m}$.

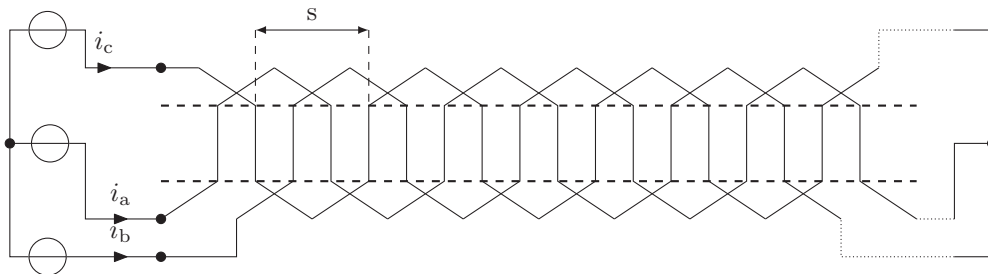


Abbildung 6: Wicklungsanordnung des Antriebssystems

Der Stator wird mit einem Drehstromsystem gespeist

$$i_a = \hat{i}_a \cos(2\pi f \cdot t) \quad (43)$$

$$i_b = \hat{i}_b \cos\left(2\pi f \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (44)$$

$$i_c = \hat{i}_c \cos\left(2\pi f \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (45)$$

Geben Sie an, ob das Fahrzeug von links nach rechts oder von rechts nach links fährt. Welcher Abstand τ_p liegt zwischen einem Nordpol und einem Südpol der Magneten des Fahrzeugs? Welche Geschwindigkeit v hat das Fahrzeug bei einer Speisefrequenz von $f = 100 \text{ Hz}$?

5 c) Die Karlsruher Stadtbahn wird von einem 750 V -Gleichspannungsnetz mit einem zulässigen Spannungsband $0,7 \cdot 750 \text{ V} \leq u_n \leq 1,2 \cdot 750 \text{ V}$ gespeist. Abb. 7 zeigt den schematischen Aufbau des elektrischen Antriebsstrangs eines Fahrzeugs, dessen Gleichspannungszwischenkreis direkt durch das Bahnnetz gespeist wird. Im Nennbetrieb beträgt die mechanische Nennleistung eines Fahrzeugs $P_{\text{mech}} = 150 \text{ kW}$. Das elektrische Gesamtsystem bestehend aus Netz, Stromabnehmer, elektrischem Antriebsstrang und Erdung wird als verlustfrei angenommen.

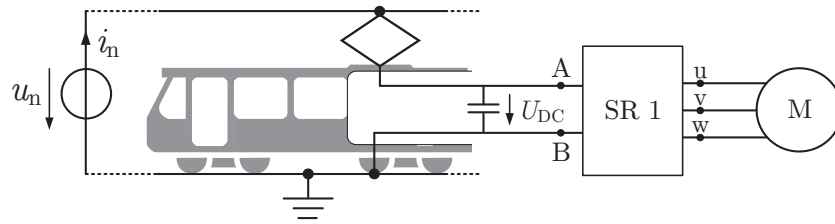


Abbildung 7: Antriebsstrang der Karlsruher Stadtbahn

Geben Sie für Nennbetrieb den maximalen Wert des Netzstroms i_n an, auf den die Fahrleitung des Bahnnetzes ausgelegt werden muss. Skizzieren Sie das Schaltbild des Stromrichters SR 1 und geben Sie die maximale effektive Motorspannung an, die mit Raumzeigermodulation des Stromrichters im gesamten Spannungsband des Gleichspannungsnetzes zu jedem Zeitpunkt erreicht werden kann. Nennen Sie zwei elektrische Maschinentypen, die in Abb. 7 als Fahrzeugmotor eingesetzt werden können.

Lösungsvorschlag Aufgabe 5

5 a)

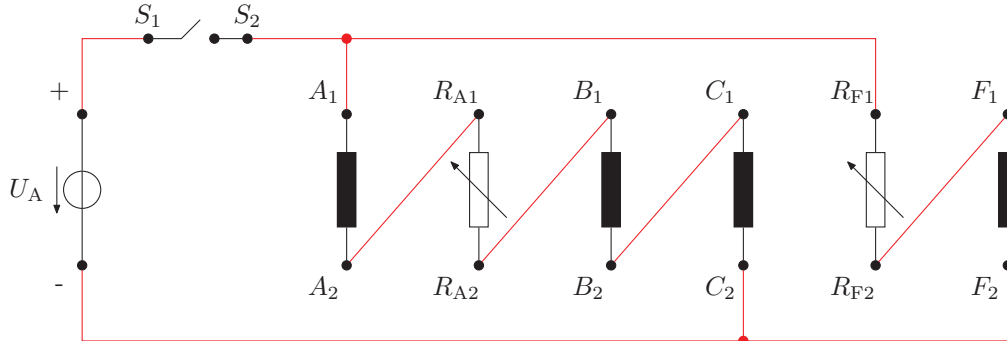


Abbildung 8: Schaltplan der Gleichstromreihenschlussmaschine

Beim Öffnen des Schalters wird der Stromfluss durch die Induktivitäten unterbrochen. Die Änderung des Stroms ergibt nach $u = L \frac{d}{dt}i$ eine Spannung an den Kontakten des Schalters, bis ein Lichtbogen entsteht um die vorhandene Feldenergie abbauen zu können.

5 b) Das Maximum des Wanderfelds tritt der Reihenfolge Phase a, Phase b und Phase c auf. Dadurch breitet sich das Wanderfeld von links nach rechts aus.

Der Abstand τ_p ist gleich der Spulenweite $s = 0,5$ m. Bei einer Frequenz von 100 Hz bewegt sich das Wanderfeld um zwei Spulenweiten weiter. Damit ist die translatorische Geschwindigkeit $v = 2 \cdot s \cdot f = 100$ m/s = 360 km/h.

5 c) Im Nennbetrieb fließt der maximale Netzstrom bei minimaler Netzspannung:

$$i_{n(\max)} = \frac{P_{\text{mech}}}{0,7 u_n} = 285,71 \text{ A} \quad (46)$$

Als Antriebsstromrichter wird ein zweistufiger Frequenzumrichter (Pulswechselrichter) eingesetzt:

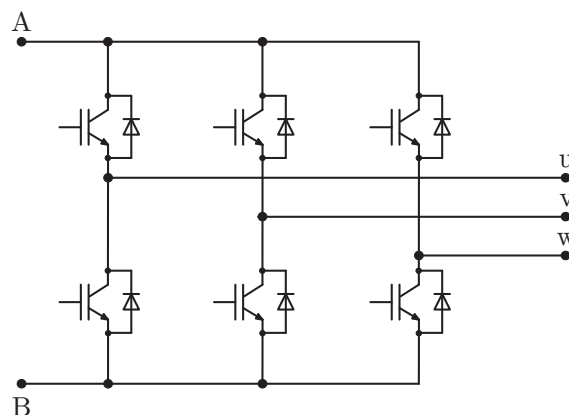


Abbildung 9: Pulswechselrichter

Die dauerhaft noch erreichbare Nennspannung des Motors ist ebenfalls durch die minimale Netzspannung bestimmt:

$$U_r = \sqrt{3} \frac{0,7 u_n}{\sqrt{6}} = 371,23 \text{ V} \quad (47)$$

Als Fahrzeugmotor können eingesetzt werden:

- DS-Synchronmaschine
- DS-Asynchronmaschine