
Schriftliche Prüfung

Elektrische Maschinen und Stromrichter

Prof. Dr.-Ing. Michael Braun

Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

Dennis Bräckle

Daniel Bernet

– Aufgaben zur Prüfung Nr. 136 am 27. März 2018 –

Vorname:

Nachname:

Matrikelnummer:

Lösungsblatt

Diagramme für Aufgabe 3

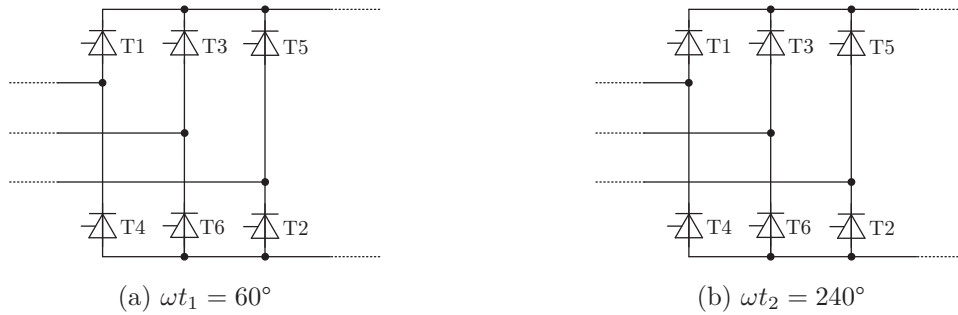


Abbildung 1: Diagramme für Aufgabe 3e

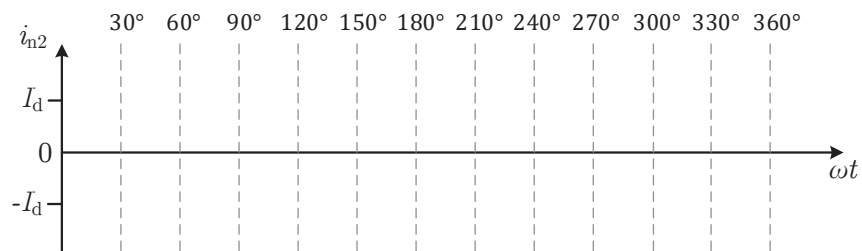


Abbildung 2: Diagramme für Aufgabe 3f

Diagramm für Aufgabe 5

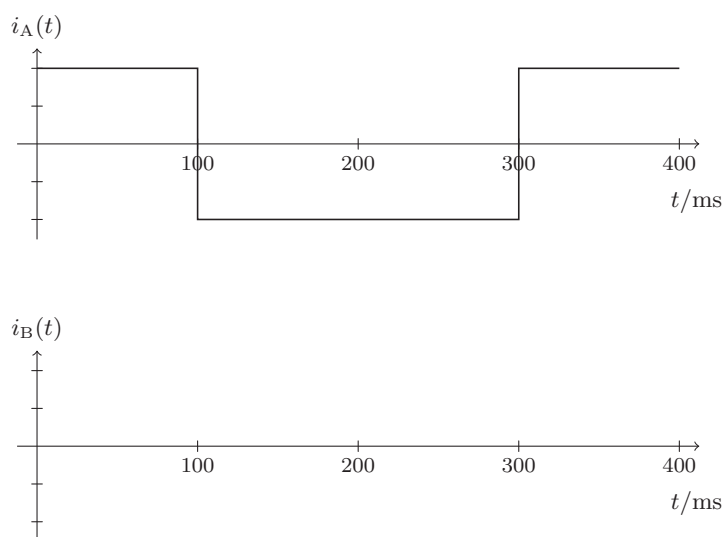


Abbildung 3: Diagramm für Aufgabe 5a

1 Gleichstromantrieb

Ein Antrieb mit einer fremderregten kompensierten Gleichstrommaschine soll auf Nenndrehzahl beschleunigt werden.

Vereinfachende Annahmen

- Die Ankerkreisinduktivität kann vernachlässigt werden.
- Reibungsmomente können vernachlässigt werden.
- Der Motor wird von einer idealen einstellbaren Spannungsquelle gespeist.

Folgende Daten sind gegeben

J	$=$	2 kg m^2	Läuferträgheitsmoment
$P_{N,el}$	$=$	6 kW	elektrische Nennleistung
n_{0N}	$=$	1000 min^{-1}	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und Nennerregung
$I_{A,max}$	$=$	$2 \cdot I_{AN}$	maximal zulässiger Ankerstrom
U_{AN}	$=$	240 V	Ankernennspannung
n_N	$=$	900 min^{-1}	Nenndrehzahl
M_L	$=$	30 Nm	konstantes Lastmoment

Aufgaben

Die Maschine wird mit Nennerregung betrieben.

1 a) Berechnen Sie die Nenndurchflutung $c\Phi_N$, den Ankerwiderstand R_A und das maximale Drehmoment $M_{el,max}$ der Maschine.

1 b) Berechnen Sie die Zeitdauer und die Anzahl der Umdrehungen, wenn der Antrieb mit einem Moment von $M_{el} = 100 \text{ Nm}$ vom Stillstand auf Nenndrehzahl beschleunigt wird.

1 c) Sobald der Motor die Nenndrehzahl erreicht hat, wird der Ankerstrom soweit reduziert, dass die Drehzahl konstant bleibt ($n = n_N$). Berechnen Sie den Wert des Ankerstroms.

1 d) Geben Sie an, zu welchem Zeitpunkt die Ankerspannung U_A bei dem Anlaufvorgang nach Teilaufgaben 1 b) und 1 c) den höchsten Wert hat. Berechnen Sie diesen Höchstwert $U_{A,max}$.

Lösungsvorschlag Aufgabe 1

1 a) Für die Durchflutung gilt mit den Leerlaufdaten ($I_A = 0 \text{ A}$)

$$U_{AN} = c\Phi_N \Omega_0 \quad (1)$$

$$c\Phi_N = 2,2918 \text{ Vs} \quad (2)$$

Das elektrische Maximalmoment wird bei maximalem Ankerstrom erreicht. Der Nennankerstrom lässt sich über die elektrische Leistung im Nennbetrieb berechnen

$$I_{AN} = \frac{P_{el,N}}{U_{AN}} \quad (3)$$

$$= 25 \text{ A} \quad (4)$$

Und damit das maximale Drehmoment

$$M_{el,max} = c\Phi_N \cdot I_{A,max} = c\Phi_N \cdot 2 I_{A,N} \quad (5)$$

$$M_{el,max} = 114,5916 \text{ Nm} \quad (6)$$

Für den Ankerwiderstand gilt

$$R_A = \frac{U_{AN} - c\Phi_N \Omega_N}{I_{AN}} \quad (7)$$

$$= 0,96 \Omega \quad (8)$$

1 b) Die mechanische Gleichung für die kreisförmige Beschleunigung liefert

$$M_B = M_{el} - M_L = J \cdot \dot{\Omega} \quad (9)$$

Da es sich um einen gleichförmig beschleunigten Vorgang handelt, wird Gl. (9) zur Differenzengleichung. Mit $t_0 = 0 \text{ s}$, $\Omega_0 = 0 \text{ s}^{-1}$ und $\Omega_1 = \Omega_N$ gilt für die Zeit t_1 bis die Gleichstrommaschine ihre Nenndrehzahl erreicht hat

$$\Delta t = t_1 - t_0 = \frac{J \Omega_N}{M_{el} - M_L} = 2,6928 \text{ s} \quad (10)$$

Die Anzahl der Umdrehungen N lässt sich durch Integration der Drehzahl ermitteln. Aus Gl. (10) folgt für den Zeitverlauf der Drehzahl und damit den Winkel und die Anzahl N der Umdrehungen

$$N = \frac{1}{2\pi} \int_{t_0}^{t_1} \Omega(t) dt \quad (11)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{t_0}^{t_1} \frac{M_{el} - M_L}{J} t dt \quad (12)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2} \frac{M_{el} - M_L}{J} t_1^2 \quad (13)$$

$$= 20,1960 \quad (14)$$

1 c) Damit das Beschleunigungsmoment M_B zu null wird und die Drehzahl konstant bleibt, muss für das elektrische Drehmoment gelten $M_{el} = c\Phi_N \cdot I_A = M_L$ und damit

$$I_A = \frac{M_{el}}{c\Phi_N} = \frac{M_L}{c\Phi_N} = 13,0900 \text{ A} \quad (15)$$

1 d) Die Ankerspannung wird maximal, für maximalen Ankerstrom und maximale Drehzahl. Das bedeutet, dass Sie nach dem Beschleunigen zur Nenndrehzahl in Teilaufgabe 1 b) und vor der Reduzierung des Ankerstroms aus Teilaufgabe 1 c) den maximalen Wert annimmt. Der Ankerstrom beträgt beim Beschleunigungsvorgang

$$I_A = \frac{M_{el}}{c\Phi_N} \quad (16)$$

$$= 43,6332 \text{ A} \quad (17)$$

und damit gilt für die maximale Ankerspannung

$$U_{A,\max} = R_A I_A + c\Phi_N \Omega_N \quad (18)$$

$$= 257,8879 \text{ V} \quad (19)$$

2 Asynchronmotor für ein 60 Hz-Netz

Vereinfachende Annahmen

- Außer Stromwärmeverlusten treten keine weiteren Verlustleistungen auf.

Folgende Daten sind gegeben

f_N	=	60 Hz	Nennfrequenz
U_N	=	560 V	Leiternennspannung (Effektivwert)
I_N	=	100 A	Nennstrom (Effektivwert)
$\cos(\varphi_N)$	=	0,7	Nennleistungsfaktor (induktiv)
n_N	=	1700 min^{-1}	Nennzahl
R_S	=	$0,2 \Omega$	Kupferwiderstand der Statorwicklung

Aufgaben

2 a) Ermitteln Sie die Polpaarzahl unter der Annahme, dass der Nennschlupf kleiner als 10 % ist.

2 b) Berechnen Sie das elektrisch erzeugte Drehmoment im Nennpunkt der Maschine.

2 c) Bestimmen Sie den Wirkungsgrad im Nennbetrieb.

Der Blindstrom des Motors soll im Nennbetrieb vollständig kompensiert werden.

2 d) Zeichnen Sie das Schaltbild bestehend aus dem Netz, dem Motor und den in Stern geschalteten Kompensationskondensatoren.

2 e) Berechnen Sie die vom Motor aufgenommene Blindleistung und den Effektivwert des Netzstroms.

Lösungsvorschlag Aufgabe 2

2 a) Für die Synchrondrehzahl gilt

$$n_0 = \frac{f}{p} \quad (20)$$

für eine Polpaarzahl $p = 2$ ergibt sich eine Synchrondrehzahl von $n_0 = 1800 \text{ min}^{-1}$ und ein Schlupf von

$$s = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = 0,0556 < 10 \% \quad (21)$$

2 b) Für das innere Moment im Nennpunkt der Maschine gilt

$$M_{i,el} = \frac{P_D}{\Omega_0} \quad (22)$$

$$= \frac{P_{el} - P_{V,S}}{\Omega_0} = \frac{P_{el} - 3 R_S I_N^2}{\Omega_0} = \frac{\sqrt{3} U_N I_N \cos(\varphi_N) - 3 R_S I_N^2}{\Omega_0} \quad (23)$$

$$= 328,3706 \text{ Nm} \quad (24)$$

2 c) Es treten nur Stromwärmeverluste auf. Deshalb gilt

$$\eta_N = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{M_{i,el} \Omega_N}{P_{el}} = 86,10 \% \quad (25)$$

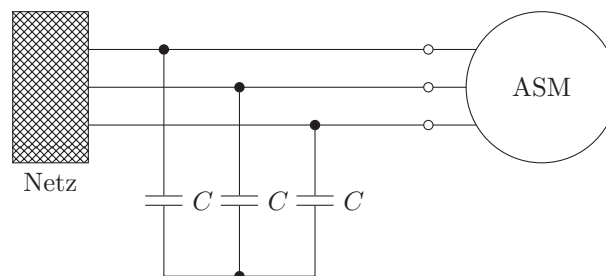


Abbildung 1: Schaltbild zu Teilaufgabe 2 d)

2 d)

2 e) Der Motor wird im Nennpunkt betrieben. Damit gilt für die Scheinleistung, den Phasenwinkel und die aufgenommene Blindleistung

$$S_N = \sqrt{3} U_N I_N \quad (26)$$

$$= 96,9948 \text{ kVA} \quad (27)$$

$$\varphi_N = \arccos(0,7) = 0,7954 \text{ rad} = 45,5730^\circ \text{ induktiv} \quad (28)$$

$$Q_N = S_N \cdot \sin(\varphi_N) = 69,2682 \text{ kvar induktiv} \quad (29)$$

Da die Kompensationskondensatoren die Blindleistung vollständig kompensieren, besteht der Netzstrom nur aus dem Wirkanteil des Maschinenstroms

$$I_{\text{Netz}} = I_{\text{ASM},N} \cdot \cos(\varphi_N) = 70 \text{ A} \quad (30)$$

3 Netzgeführte Drehstrombrückenschaltung im Gleichrichterbetrieb

Zur Speisung einer Gleichstrommaschine wird eine netzgeführte Drehstrombrückenschaltung gemäß Abb. 2 als Netzgleichrichter eingesetzt. Die Verläufe der dreiphasigen Netzspannung sowie der Gleichrichterspannung $u_d(\omega t)$ sind in Abb. 3 für eine Netzperiode $0^\circ \leq \omega t \leq 360^\circ$ dargestellt.

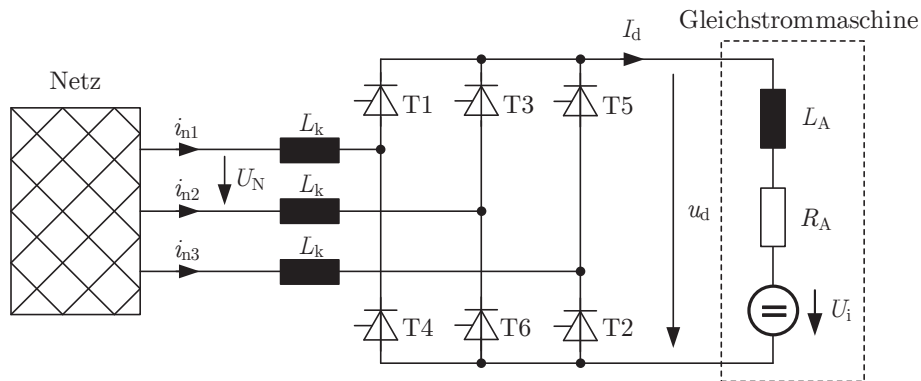


Abbildung 2: Netzgeführte Drehstrombrückenschaltung zur Speisung einer Gleichstrommaschine

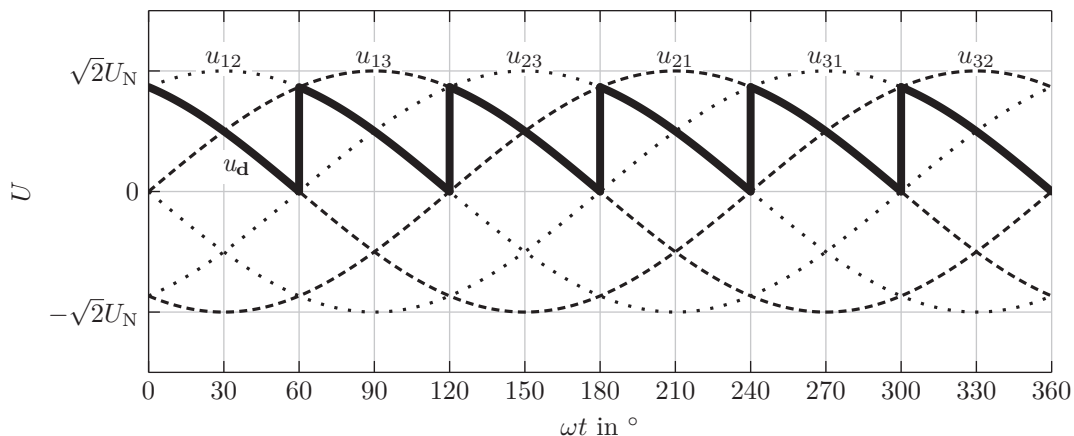


Abbildung 3: Verläufe der verketteten Netzspannungen sowie der Gleichrichterspannung $u_d(\omega t)$ für $L_k = 0$

Vereinfachende Annahmen

- Die Leistungshalbleiter seien ideale Schalter.
- Die dreiphasigen Netzspannungen seien ideal sinusförmig.
- Der Strom I_d sei wegen $L_A \rightarrow \infty$ ideal geglättet.

Folgende Daten sind gegeben

Daten des Gleichstromantriebs

U_N	= 400 V	Effektivwert der verketteten Netzspannung
f_N	= 50 Hz	Netzfrequenz
I_d	= 50 A	Gleichstrom

Aufgaben

Zunächst erfolgt ein Betrieb mit Kommutierungsinduktivitäten von $L_k = 0$.

3 a) Geben Sie für den Betrieb gemäß Abb. 3 den Zündwinkel α_1 an und berechnen Sie die mittlere Gleichspannung $\bar{u}_d$.

3 b) Welcher Zündwinkel α_D würde sich bei der Verwendung von Dioden anstelle der Thyristoren T1-T6 einstellen? Begründen Sie.

Im Folgenden gilt $L_k > 0$.

3 c) Für welchen Zündwinkel α_2 wird die mittlere Gleichspannung $\bar{u}_d$ maximal? Berechnen Sie für α_2 den maximalen Wert der Kommutierungsinduktivitäten L_k , für den eine mittlere Gleichspannung von $\bar{u}_d \geq 0,9 u_{di}$ noch erreicht werden kann. ($u_{di} \dots$ ideelle Gleichrichtspannung)

3 d) Nennen Sie zwei Funktionen der Kommutierungsinduktivitäten.

Im Folgenden gilt weiterhin $L_k > 0$ und der Zündwinkel α_1 gemäß Abb. 3 aus Aufgabenteil a.

3 e) Zeichnen Sie die Strompfade während der Kommutierung für die Zeitpunkte $\omega t_1 = 60^\circ$ sowie $\omega t_2 = 240^\circ$ in die Diagramme auf der Rückseite Ihres Deckblatts ein.

3 f) Zeichnen Sie für eine Netzperiode den Verlauf des Netzstroms i_{n2} in das Diagramm auf der Rückseite Ihres Deckblattes ein.

Lösungsvorschlag Aufgabe 3

3 a) Der Zündwinkel ergibt sich aus Abb. 3 zu

$$\alpha_1 = 60^\circ \quad (31)$$

Daraus ergibt sich die Gleichspannung

$$\bar{u}_d = u_{di} \cos(\alpha_1) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_N \cos(\alpha_1) = 270,1 \text{ V} \quad (32)$$

3 b) Bei der Verwendung von Dioden stellt sich der Zündwinkel $\alpha_D = 0^\circ$ ein, da Dioden keine Blockierspannung führen können und somit passiv im natürlichen Zündzeitpunkt einschalten.

3 c) Die maximale Gleichrichtspannung wird für $\alpha = 0^\circ$ erreicht. Um noch eine Gleichspannung von $u_d \geq 0,9 u_{di}$ erreichen zu können, muss die Ungleichung

$$0,9 u_{di} \leq u_{di} - \frac{3}{\pi} \omega L_k I_d \quad (33)$$

erfüllt werden. Umstellen nach der Kommutierungsinduktivität

$$L_k \leq \frac{0,1 u_{di}}{\frac{3}{\pi} \omega I_d} \quad (34)$$

ergibt den maximalen Wert

$$L_k \leq 3,6 \text{ mH} \quad (35)$$

3 d)

- Begrenzung der Stromanstiegsgeschwindigkeit $\frac{di}{dt}$ zum Schutz der Thyristoren (ein zu hoher Stromanstieg kann infolge der Stromeinschnürung während der Kommutierung zu einer thermischen Zerstörung der Thyristoren führen)
- Glättung des Netzstroms / Verringerung der Netzrückwirkung

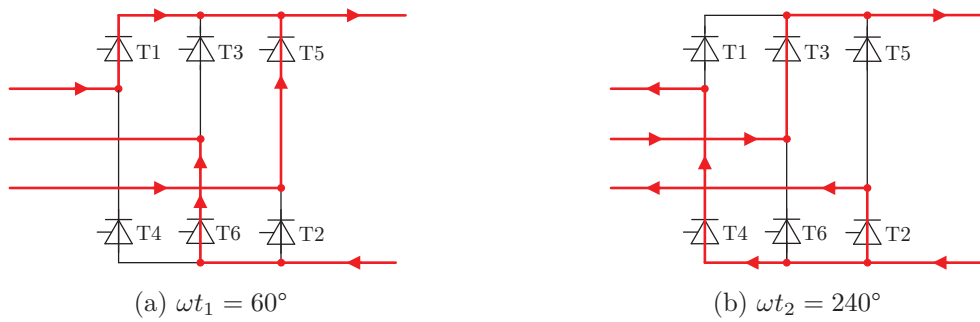
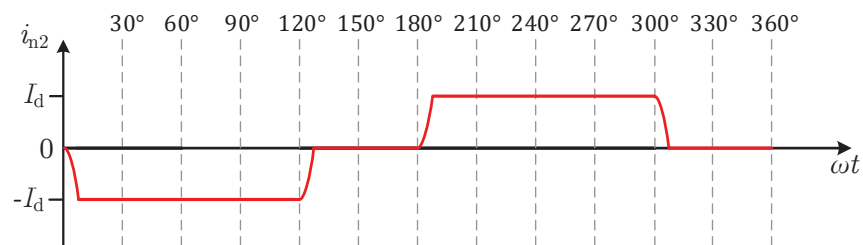


Abbildung 4: Diagramm für Teilaufgabe 3 e)

3 e)



Lineare Verläufe während der Kommutierung werden akzeptiert!

Abbildung 5: Diagramme für Teilaufgabe 3 f)

3 f)

4 Gleichstromantrieb mit Vierquadrantensteller

Als Antrieb für einen elektrischen Gabelstapler kommt ein Vierquadrantensteller mit Gleichstrommaschine zum Einsatz. Der Vierquadrantensteller wird durch einen batterieseitigen Stromrichter SR gespeist, der mit der Batterie des Gabelstaplers verbunden ist und sowohl Energie aus der Batterie entnehmen als auch in die Batterie zurückspeisen kann.

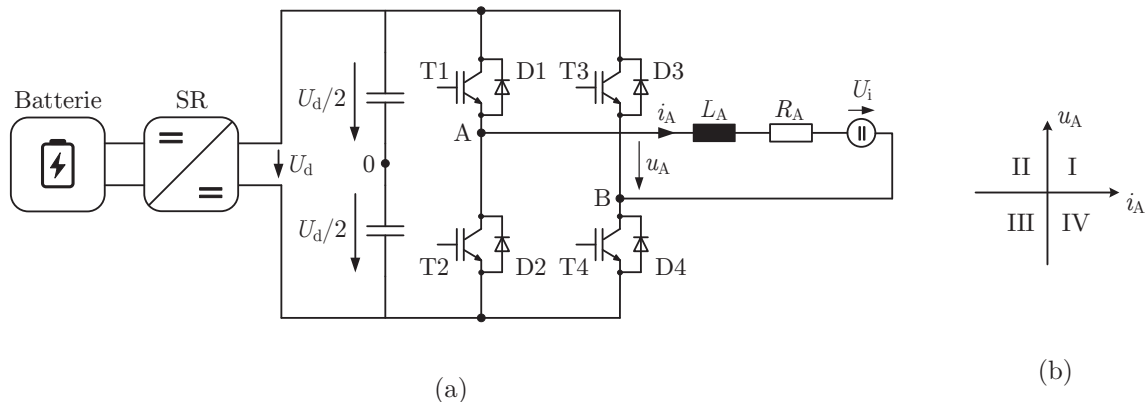


Abbildung 6: (a) Vierquadrantensteller mit angeschlossener Gleichstrommaschine
(b) Quadranten des Vierquadrantenstellers

Vereinfachende Annahmen

- Die Leistungshalbleiter seien ideale Schalter.
- Der Stromrichter SR sei ideal.
- Die Gleichspannung U_d sei konstant.
- Der Ausgangsstrom i_A sei ideal geglättet.

Folgende Daten sind gegeben

Daten des Gleichstromantriebs

U_d	= 150 V	Eingangsgleichspannung
$c\Phi$	= 0,8 V s	Produkt von Maschinenkonstante und magnetischem Nennfluss der Gleichstrommaschine
R_A	= 0,1 Ω	Innenwiderstand der Gleichstrommaschine
Ω_N	= 100 $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Nenndrehzahl der Gleichstrommaschine

Aufgaben

4a) Nennen Sie für einen positiven Ausgangsstrom $i_A > 0$ alle möglichen Ausgangsspannungen u_A des Vierquadrantenstellers und ordnen Sie jeder Ausgangsspannung alle Möglichkeiten der dabei stromführenden Leistungshalbleiter zu.

Gemäß Abb. 7 fährt der Gabelstapler zum Beladen eines Lastwagens mit der Nenndrehzahl Ω_N über eine Rampe. Im Folgenden wird der Vierquadrantensteller des Gabelstaplers mit gleichzeitigem Takten betrieben, bei dem die IGBTs T1 und T4 sowie T2 und T3 gleichzeitig geschaltet werden. Es gilt das Steuergesetz $\bar{u}_A = (2d - 1)U_d$ mit dem Tastverhältnis $d = \frac{T_{\text{ein}}}{T}$ der IGBTs T1 und T4.

4b) Ordnen Sie den Abschnitten A und B der Rampenüberquerung gemäß Abb. 7 den jeweiligen Quadranten aus Abb. 6(b) zu, in dem der Vierquadrantensteller betrieben wird.

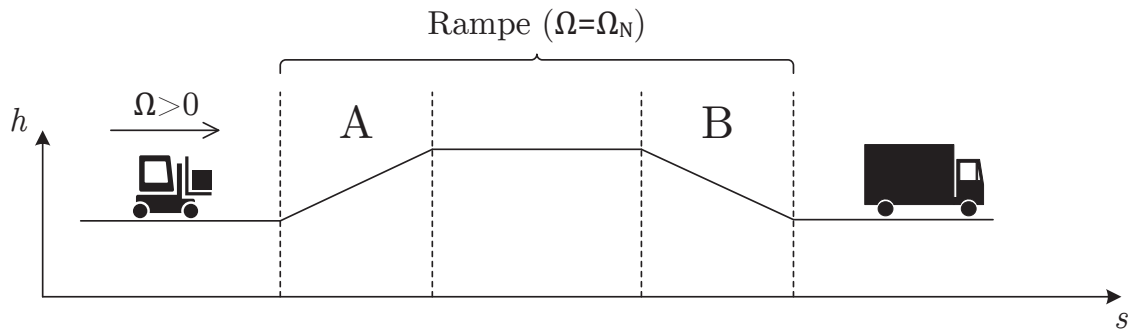


Abbildung 7: Rampenüberquerung des Gabelstaplers mit konstanter Drehzahl Ω_N

- 4 c) Bei der Rampenabfahrt in Abschnitt B ist durch den Gleichstromantrieb ein negatives Drehmoment (Bremsmoment) von $M = -200 \text{ Nm}$ aufzubringen, um die Geschwindigkeit des Gabelstaplers konstant zu halten. Berechnen Sie das hierfür erforderliche Tastverhältnis d des Vierquadrantenstellers.
- 4 d) Bei welchem Tastverhältnis d_1 bringt der Gleichstromantrieb das maximale Bremsmoment und bei welchem Tastverhältnis d_2 das maximale Beschleunigungsmoment auf? Begründen Sie.
- 4 e) Skizzieren Sie für das Tastverhältnis $d = \frac{1}{3}$ den Verlauf der Ausgangsspannung u_A für zwei Taktperioden.

Lösungsvorschlag Aufgabe 4

4 a) Für einen positiven Ausgangsstrom $i_A > 0$ ergeben sich folgende Möglichkeiten:

$$u_A = U_d \quad \text{für T1 \& T4 leitend} \quad (36)$$

$$u_A = 0 \quad \text{für } \begin{cases} \text{T1 \& D3 leitend} \\ \text{D2 \& T4 leitend} \end{cases} \quad (37)$$

$$u_A = -U_d \quad \text{für D2 \& D3 leitend} \quad (38)$$

4 b) A: QI, B: QII

4 c) Aus dem Drehmoment $M = -200 \text{ Nm}$ folgt der erforderliche Ankerstrom

$$i_A = \frac{M}{c\Phi} = -250 \text{ A} \quad (39)$$

Die Ankerspannungsgleichung

$$u_A = U_i + R_A i_A \quad (40)$$

$$= c\Phi\Omega_N + R_A i_A \quad (41)$$

ergibt mit dem in Aufgabenteil b berechneten Steuergesetz

$$U_d(2d - 1) = c\Phi\Omega_N + R_A i_A \quad (42)$$

Das Umformen nach dem Tastverhältnis ergibt

$$d = \frac{c\Phi\Omega + R_A i_A + U_d}{2U_d} \quad (43)$$

$$= 0,683 \quad (44)$$

4 d) Durch Einsetzen der Drehmoment- und Induktionsgleichung in die Ankerspannungsgleichung erhält man das Drehmoment

$$M = \frac{c\Phi(U_d(2d - 1) - c\Phi\Omega)}{R_A} \quad (45)$$

Das betragsmäßig maximale Bremsmoment ergibt sich somit für $d_1 = 0$ und das maximale Beschleunigungsmoment bei $d_2 = 1$.

Für einen ideal geglätteten Strom i_A ist der Ankerstrom durch

$$i_A = \frac{\bar{u}_A - U_i}{R_A} \quad (46)$$

gegeben, wobei ein positiver Strom zu einem Beschleunigungsmoment und ein negativer Strom zu einem Bremsmoment führt. Der betragsmäßig größte positive Strom wird folglich für die höchste Ausgangsspannung $\bar{u}_A(d_2 = 1) = U_d$ und der betragsmäßig größte negative Strom für die niedrigste Ausgangsspannung $\bar{u}_A(d_1 = 0) = -U_d$ erreicht.

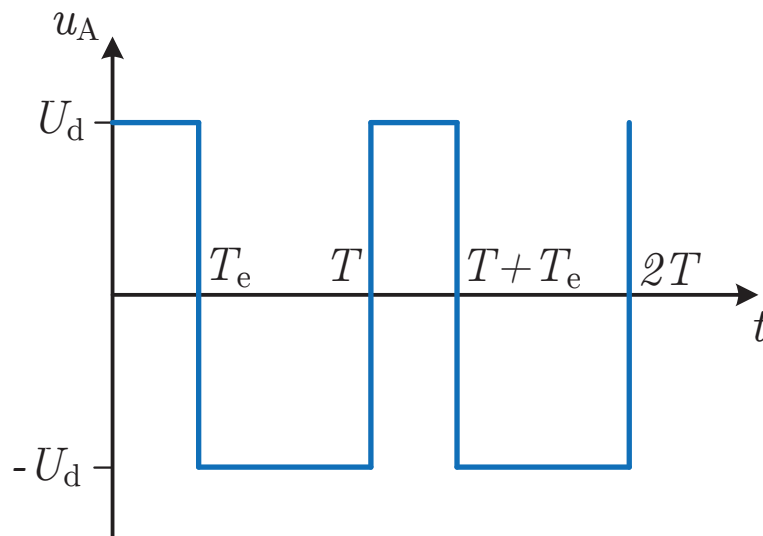


Abbildung 8: Zeitverlauf der Ausgangsspannung für $d = \frac{1}{3}$ (zwei Taktperioden)

4 e)

5 Elektrische Maschinen und Stromrichter in der Anwendung

5 a) Ein eingangsseitig an einer Gleichspannungsquelle angeschlossener Stromrichter SR_m speist einen zweiphasigen Kleinmotor M_m .

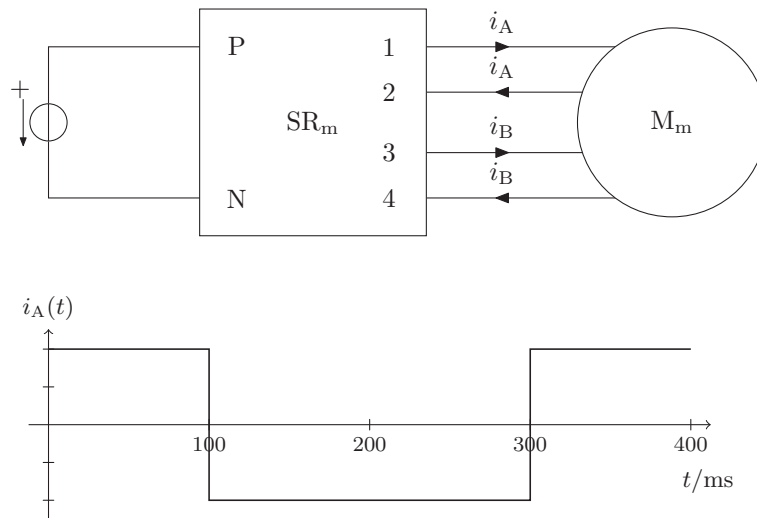


Abbildung 9: Stromrichterschaltung und Zeitverlauf zu 5a)

Geben Sie die Bezeichnung des Motors an. Zeichnen Sie einen zum Zeitverlauf von $i_A(t)$ passenden Zeitverlauf von $i_B(t)$ in das Diagramm auf der Rückseite Ihres Deckblatts ein. In welcher Betriebsart wird der Motor betrieben?

5 b) Die Darstellungen in Abbildung 10 (1), (2) und (3) sind Prinzipskizzen des Rotorblechschnitts von drei Rotoren elektrischer Drehfeldmaschinen. Geben Sie jeweils die Bezeichnung der Rotorbauform an. In welcher Art elektrischer Maschinen kommen diese Bauformen typischerweise zur Anwendung? Nennen Sie jeweils ein Beispiel für welche Antriebsaufgaben diese Maschinen eingesetzt werden.

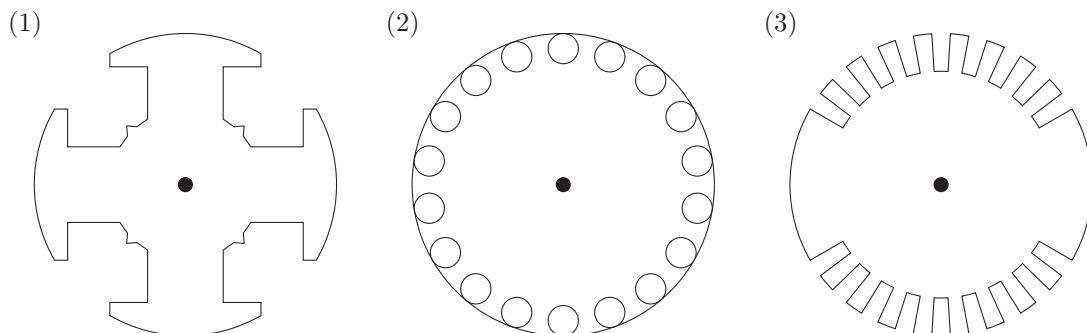


Abbildung 10: Unterschiedliche Rotorbauformen zu Teilaufgabe 5 b)

5 c) Zur Integration eines Batteriespeichersystems in das elektrische Energienetz wird als netzseitiger Stromrichter eine dreiphasige Drehstrombrücke SRa eingesetzt, die auf der Gleichspannungsseite eine ideal geglättete Gleichspannung U_1 erzeugt. Ein Stromrichter SRb übernimmt die Anpassung der Gleichspannung U_1 an die ebenfalls ideal geglättete Gleichspannung U_2 eines Batteriespeichers. Der Zeitverlauf des Stroms I_1 ist in Abb. 11 für zwei verschiedene Betriebspunkte dargestellt.

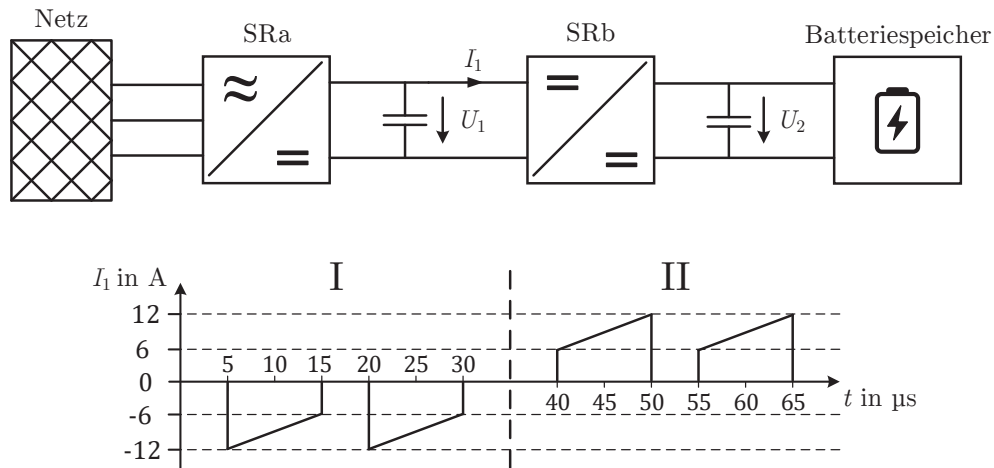


Abbildung 11: Netzintegration eines Batteriespeichersystems

Skizzieren Sie das Schaltbild des Stromrichters SRb und ordnen Sie den Intervallen I und II die zugehörige Energieflussrichtung zwischen Netz und Batteriespeicher zu. Wie heißt diese Schaltung?

Lösungsvorschlag Aufgabe 5

5 a) Es handelt sich um einen Schrittmotor im Vollschrittbetrieb. Der Zeitverlauf von $i_B(t)$ ist um 90° phasenverschoben zu $i_A(t)$.

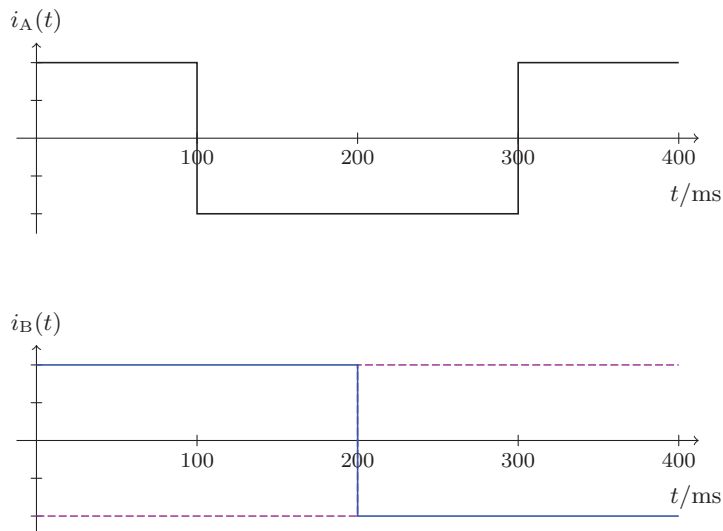


Abbildung 12: Zeitverlauf zu Teilaufgabe 5 a)

Beide Zeitverläufe aus Abb. 12 sind möglich, da hier keine Aussage über die Drehrichtung gemacht werden kann.

5 b)

- (1) Schenkelpolläufer einer Synchronmaschine; Anwendung: langsamlaufende, hochpolige Antriebe, z.B. Wind- / Wasserkraftwerk
- (2) Käfigläufer einer Asynchronmaschine; Anwendung: z.B. Pumpe oder Lüfter
- (3) Turboläufer einer Synchronmaschine; Anwendung: Kraftwerksgenerator

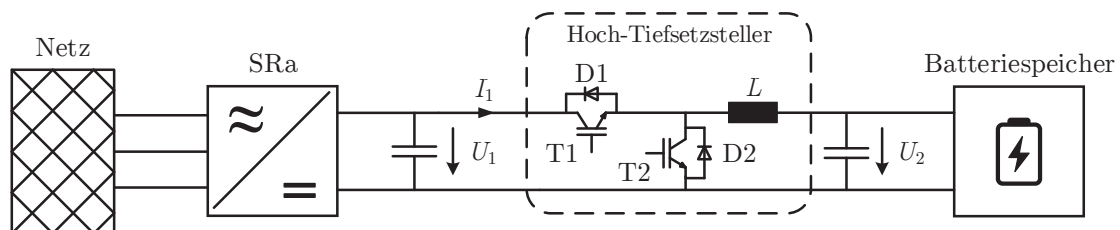


Abbildung 13: Netzintegration eines Batteriespeichersystems

5 c)

- Intervall I: Mit $\bar{p}_1 = U_1 \bar{I}_1 < 0$ wird Energie aus der Batterie ins Netz gespeist.
- Intervall II: Mit $\bar{p}_1 = U_1 \bar{I}_1 > 0$ wird Energie aus dem Netz in der Batterie gespeichert.
- Bei der Schaltung handelt es sich um einen Hoch-Tiefsetzsteller