
Schriftliche Prüfung

Elektrische Maschinen und Stromrichter

Prof. Dr.-Ing. Michael Braun
Prof. Dr.-Ing. Marc Hiller

Dennis Bräcke
Daniel Bernet

– Aufgaben zur Prüfung Nr. 135 am 03. August 2017 –

A

Vorname:
Nachname:
Matrikelnummer:

1 Gleichstromantrieb mit Tiefsetzsteller

Ein Tiefsetzsteller speist eine kompensierte, fremderregte Gleichstrommaschine GM, die mit einer Seilwinde als Arbeitsmaschine gekoppelt ist.

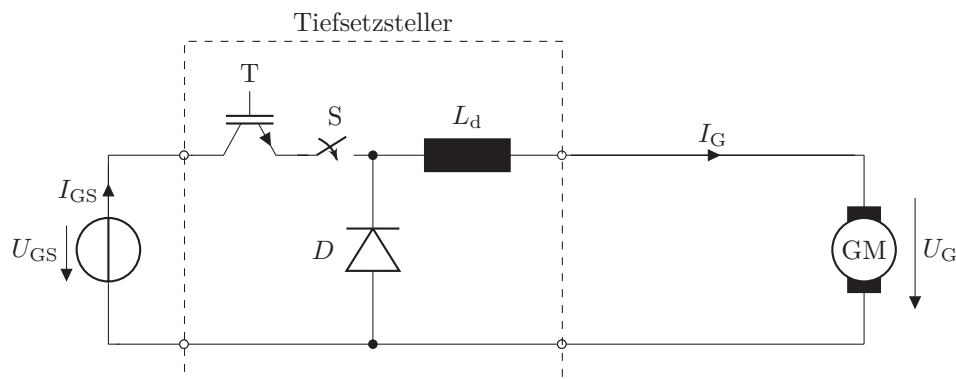


Abbildung 1: Schaltbild des Gleichstromantriebs mit Tiefsetzsteller

Vereinfachende Annahmen

- Die Gleichspannungsquelle und die Halbleiter seien ideal.
- Die Ankerinduktivität und die Glättungsdrossel L_d können für die Berechnung der Aufgaben a), b) und d) vernachlässigt werden.
- Die Induktivitäten sind so groß, dass der Strom I_G als Gleichstrom ohne Wechselanteile behandelt werden kann.
- Die Gleichstrommaschine wird mit Nennerregung betrieben.

Folgende Daten sind gegeben

Daten der Gleichstrommaschine bei Motorbetrieb mit Nennerregung

U_{AN}	=	400 V	Ankernennspannung
I_{AN}	=	120 A	Ankernennstrom
n_N	=	1800 min ⁻¹	Nenndrehzahl
M_N	=	230 Nm	Nennmoment

M-n-Kennlinie der Arbeitsmaschine

M_L	=	$M_N = \text{const.}$	Lastmoment
-------	---	-----------------------	------------

Daten der Gleichspannungsquelle

U_{GS}	=	500 V	Speisespannung
----------	---	-------	----------------

Aufgaben

- Berechnen Sie die Spannung U_G so, dass nach dem Schließen des Schalters S beim Anfahren ($\Omega = 0 \text{ min}^{-1}$) Nennstrom fließt. Berechnen Sie den Aussteuergrad $a = f \cdot T_e$ des Transistors T für diesen Betriebsfall (T_e = periodische Einschaltdauer, f = Schaltfrequenz mit der der Transistor T betrieben wird).
- Berechnen Sie den Aussteuergrad a und den Mittelwert $\bar{I}_{GS}$ des Stroms des Transistors T für den Nennbetrieb der Gleichstrommaschine.
- Jetzt wird der Schalter S geöffnet, das Lastmoment bleibt unverändert. Geben Sie an, ob der Gleichstrom I_G unmittelbar nach dem Öffnen des Schalters zunimmt oder abnimmt (bitte kurze Begründung).

- d) Als spätere Folge des Schaltvorgangs ändert die Gleichstrommaschine ihre Drehrichtung und es stellt sich ein neuer Arbeitspunkt ein. Berechnen Sie den Strom I_G und die Drehzahl n im neuen Arbeitspunkt.

Lösungsvorschlag

- a) Im Stillstand wird keine Gegenspannung induziert. Der Anlaufstrom ist nur durch den Ankerwiderstand der Gleichstrommaschine begrenzt. Aus den Nenndaten der Maschine kann der Wert des Ankerwiderstands berechnet werden.

$$M_N = c\Phi_N I_{AN} \rightarrow c\Phi_N = \frac{M_N}{I_{AN}} = 1,9167 \text{ V s} \quad (1)$$

$$U_{AN} = R_{AN} I_{AN} + c\Phi_N \Omega_N \rightarrow R_{AN} = \frac{U_{AN} - c\Phi_N \Omega_N}{I_{AN}} \quad (2)$$

$$= 0,3226 \, \Omega \quad (3)$$

Damit kann die maximale Ankerspannung beim Anfahren ($\Omega = 0 \text{ min}^{-1}$) mit Nennstrom mit der Ankerspannungsgleichung berechnet werden

$$U_{G,0} = R_A I_{AN} = 38,7168 \text{ V} \quad (4)$$

$$a = f T_e = \frac{U_G}{U_{GS}} = 0,0774 \quad (5)$$

- b) Nennbetriebspunkt

$$U_G = U_{AN} \quad (6)$$

$$a = f T_e = \frac{U_G}{U_{GS}} = 0,8 \quad (7)$$

Am verlustlosen Tiefsetzsteller muss die Eingangsleistung gleich der Ausgangsleistung sein

$$P_e = P_a \rightarrow U_{GS} \bar{I}_{GS} = U_G \bar{I}_G \rightarrow \bar{I}_{GS} = \frac{U_G}{U_{GS}} I_G \quad (8)$$

$$\bar{I}_{GS} = a I_G = 96 \text{ A} \quad (9)$$

- c) Die Maschine befindet sich im Nennarbeitspunkt, wenn der Schalter geöffnet wird. Aus der Maschinenregel folgt für die Spannung über der Drossel $L = L_d + L_A$ (Summe der Glättungsdrossel L_d und Ankerkreisinduktivität L_A)

$$U_L = U_{\text{Diode}} - \underbrace{(U_R + U_i)}_{U_G} = U_{\text{Diode}} - (U_R + c\Phi_N \Omega) \quad (10)$$

Da die Diode als ideal angenommen wird, gilt nach dem Öffnen $U_{\text{Diode}} = 0 \text{ V}$. Wegen $\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} U_L$ nimmt der Strom ab und die Maschine wird bis zum Stillstand abgebremst. Anschließend beschleunigt die Last die Maschine in entgegengesetzter Richtung.

- d) Durch die Drehrichtungsumkehr der Maschine, ändert sich das Vorzeichen der induzierten Spannung und der Strom baut sich wieder auf, bis die Maschine Nennmoment erreicht hat

$$M_N = c\Phi_N I_{AN} \quad (11)$$

$$I_G = I_{AN} = 120 \text{ A} \quad (12)$$

Der Strom wird jetzt im stationären Fall nur vom Ankerwiderstand begrenzt, an dem die induzierte Spannung abfällt. Aus der Ankerspannungsgleichung folgt dann

$$U_{\text{Diode}} = R_A I_G + c\Phi_N \Omega = R_A I_{AN} + c\Phi_N \Omega = 0 \text{ V} \quad (13)$$

$$n = -\frac{60 \text{ s/min}}{2\pi} \frac{R_A I_{AN}}{c\Phi_N} = -193 \text{ min}^{-1} \quad (14)$$

2 Drehstromasynchronmaschine mit Schleifringläufer

Eine Drehstromasynchronmaschine mit Schleifringläufer treibt ein Förderband an. Die Asynchronmaschine wird durch das einphasige Ersatzschaltbild für den quasistationären Fall bei Nennfrequenz beschrieben.

Vereinfachende Annahmen

- Der Wert der Hauptinduktivität L_h sei unendlich.
- Die Asynchronmaschine sei sättigungs- und stromverdrängungsfrei.

Folgende Daten sind gegeben

Daten der Asynchronmaschine

U_N	=	500 V	Nennspannung (Leiterspannung)
f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
p	=	3	Polpaarzahl
R_S	=	$0,05 \Omega$	Statorwiderstand im einphasigen Ersatzschaltbild
$X_{S\sigma}$	=	$0,12 \Omega$	Statorstreureaktanz im einphasigen Ersatzschaltbild
R'_R	=	$0,065 \Omega$	Rotorwiderstand im einphasigen Ersatzschaltbild
$X'_{R\sigma}$	=	$0,14 \Omega$	Rotorstreureaktanz im einphasigen Ersatzschaltbild
s_k	=	0,25	Kippschlupf

Die Schleifringe sind zunächst kurzgeschlossen.

Aufgaben

- Berechnen Sie den Effektivwert des Anlaufstroms ($n = 0 \text{ min}^{-1}$) bei Betrieb an Nennspannung und Nennfrequenz.
- Berechnen Sie den Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ und das Anlaufdrehmoment beim Betrieb nach a).

Zwischen den Schleifringen des in Stern geschalteten Läufers misst man bei abgeschalteter, stillstehender Asynchronmaschine einen Widerstandswert von $R = 0,4 \Omega$.

- Jetzt soll das Anlaufdrehmoment durch einen dreisträngigen Vorwiderstand im Läuferkreis erhöht werden. Berechnen Sie den Wert des Vorwiderstands so, dass das Anlaufdrehmoment gleich dem Kippmoment wird.
- Bei welcher Drehzahl tritt mit dem Vorwiderstand aus c) der negative Wert des Kippmoments auf?

Lösungsvorschlag

- a) Im Anlauf ist $s = 1$. Da die Hauptinduktivität unendlich groß ist, kann sie als Leerlauf betrachtet werden. Für den Effektivwert des Stroms gilt dann

$$I_S = \frac{U_N / \sqrt{3}}{\sqrt{(R_S + R'_R)^2 + (X_{S\sigma} + X'_{R\sigma})^2}} \quad (15)$$

$$= 1015,3985 \text{ A} \quad (16)$$

- b) Beim Anlauf der Maschine fließt der Strom aus a). Der Leistungsfaktor ist das Verhältnis aus Wirkleistung und Scheinleistung. Für die Spannung gilt $\Im m(U_N) = 0$.

$$\cos(\varphi) = \frac{P_{el}}{S} = \frac{\sqrt{3} \Re(U_N I_S)}{\sqrt{3} |U_N| |I_S|} = \frac{R_S + R'_R}{\sqrt{(R_S + R'_R)^2 + (X_{S\sigma} + X'_{R\sigma})^2}} \quad (17)$$

$$= 0,4045 \quad (18)$$

Damit gilt

$$P_D = M_i \Omega_{syn} \quad (19)$$

$$P_D = P_{el} - P_{VS} = \sqrt{3} U_N I_S \cos(\varphi) - 3 R_S I_S^2 = 201,0517 \text{ kW} \quad (20)$$

$$M_i = \frac{P_D}{\Omega_{syn}} = \frac{P_D}{\frac{2\pi f_s}{p}} = 1919,9019 \text{ Nm} \quad (21)$$

- c) Der Rotorwiderstand wird zwischen zwei Klemmen gemessen. Bei einer Sternschaltung ist der gemessene Widerstand die Summe zweier Strangwiderstände. Für die einphasige Betrachtung gilt also $R_R = 0,2 \Omega$. Beim Anfahren (also $s = 1$) soll die Maschine Kippmoment aufbauen. Damit gilt

$$\frac{s^*}{s} = \frac{1}{s_k} = \frac{R_R + R_V}{R_R} \quad (22)$$

$$R_V = R_R \left(\frac{1}{s_k} - 1 \right) = 0,6 \Omega \quad (23)$$

- d) Die Kennlinie der Asynchronmaschine ist punktsymmetrisch. Durch die Vorwiderstände wird die M-n-Kennlinie in x-Richtung gestreckt. Da bei $s = 1$ Kippmoment auftritt (siehe c)), tritt das negative Kippmoment bei $s = -1$ auf. Damit ist die gesuchte Drehzahl $n = 2 n_{syn} = 2000 \text{ min}^{-1}$

3 Netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung

Zur Aufladung einer Batterie wird eine netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung als Batterieladegerät eingesetzt. Das elektrische Verhalten der Batterie wird durch die Reihenschaltung einer idealen Spannungsquelle U_B und dem Innenwiderstand R_i beschrieben.

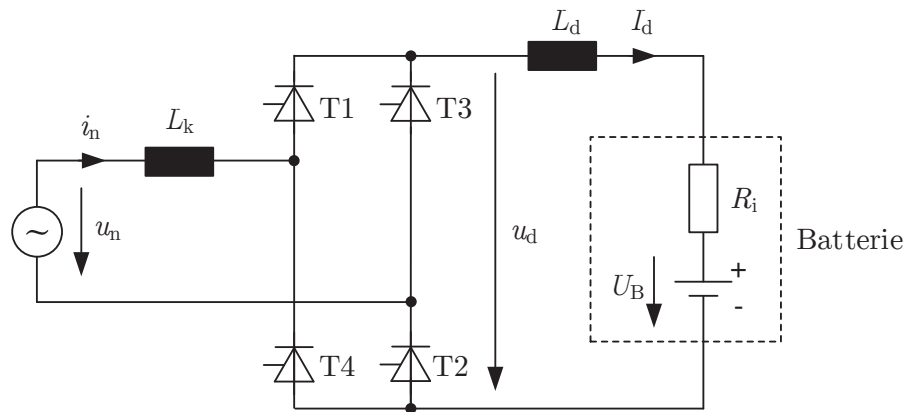


Abbildung 2: Netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung als Batterieladegerät

Vereinfachende Annahmen

- Die Leistungshalbleiter seien ideale Schalter.
- Die Netzspannung u_n sei ideal sinusförmig.
- Der Ladestrom I_d sei wegen $L_d \rightarrow \infty$ ideal geglättet.

Folgende Daten sind gegeben

Daten des Batterieladegeräts

U_n	=	230 V	Effektivwert der Netzspannung
f_n	=	50 Hz	Frequenz der Netzspannung
U_B	=	24 V	Batteriespannung
R_i	=	0,1 Ω	Innenwiderstand der Batterie

Die Batterie soll mit einem Ladestrom $I_d = 15$ A geladen werden. Zunächst wird $L_k = 0$ angenommen.

Aufgaben

- Berechnen Sie den erforderlichen Zündwinkel α_1 .
- Berechnen Sie die dem Netz entnommene Wirkleistung P_n . Bestimmen Sie den Grundswingungseffektivwert des Netzstroms I_{n1} und geben Sie I_{n1} allgemein als Funktion von U_n , P_n und α an.

Im Folgenden gilt $L_k = 8$ mH.

- Berechnen Sie den neuen Zündwinkel α_2 . Ist die Änderung des Zündwinkels gegenüber a) erwartungsgemäß? Begründen Sie.
- Berechnen Sie den Überlappungswinkel u .
- Ist es möglich, elektrische Energie aus der Batterie zurück in das Netz zu speisen? Begründen Sie.
- Zeichnen Sie für einen Zündwinkel $\alpha_f = 75^\circ$ und einen Überlappungswinkel $u_f = 15^\circ$ die Zeitverläufe der Gleichspannung u_d , der Thyristorenströme i_{T1} und i_{T3} , des Netzstroms i_n sowie der Schaltzustände der Thyristoren in das Diagramm auf der nächsten Seite (Abbildung 3) ein.

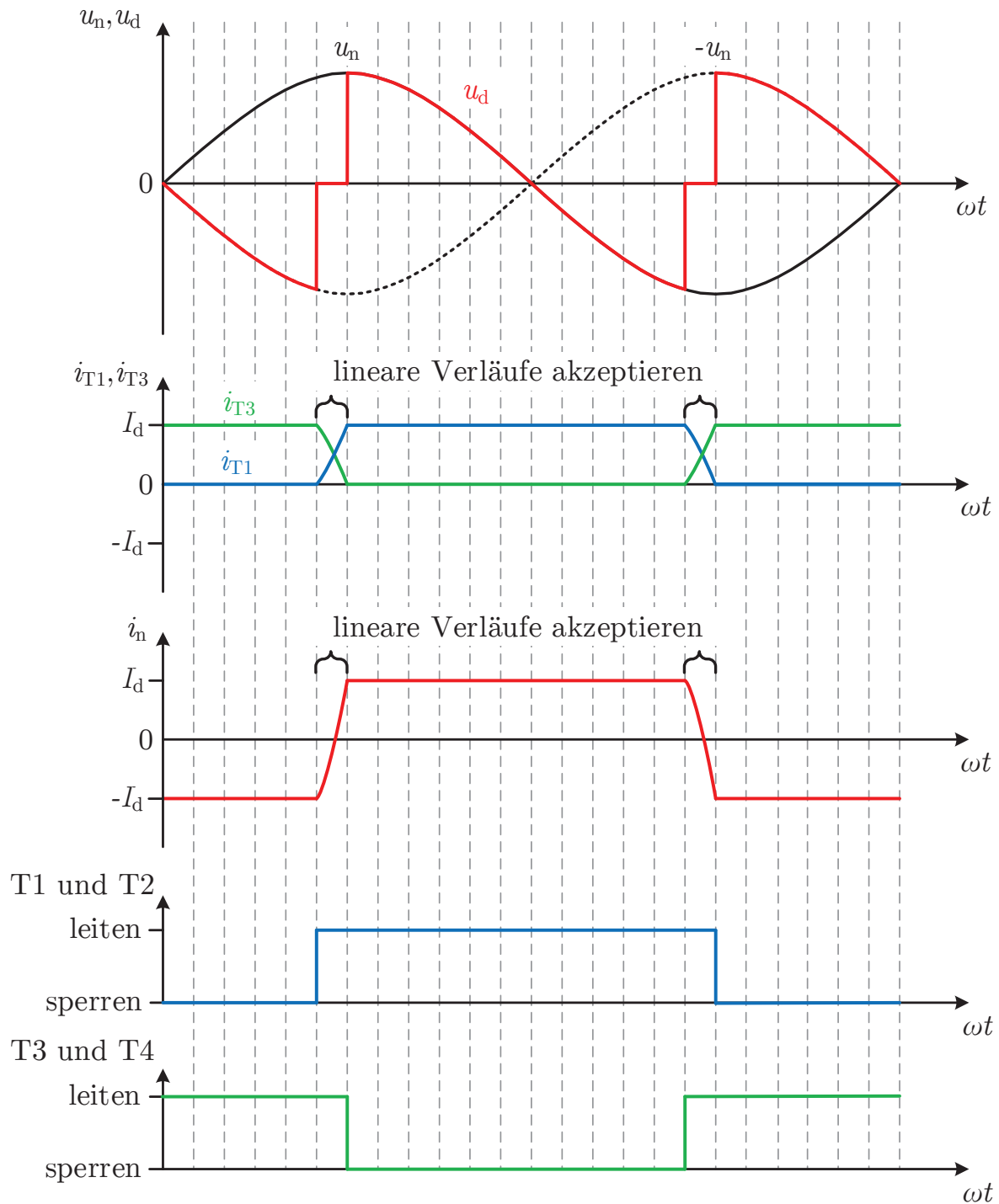


Abbildung 3: Zeitverläufe der Netzspannung u_n , der Gleichspannung u_d , der Thyristorenströme i_{T1} und i_{T3} , des Netzstroms i_n und der Schaltzustände der Thyristoren T1-T4

Lösungsvorschlag

a) Für $I_d = \text{const.}$ folgt für die Gleichspannung:

$$u_d = U_B + R_i I_d \quad (24)$$

$$= 25,5 \text{ V} \quad (25)$$

Mit der ideellen Gleichspannung $U_{di} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_n$ ergibt sich der Zündwinkel zu

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \left(\frac{u_d}{U_{di}} \right) \quad (26)$$

$$= 82,93^\circ \quad (27)$$

b) Wegen der Annahme idealer Schalter gilt

$$P_n = P_d = u_d I_d = 382,5 \text{ W} \quad (28)$$

Am Wirkleistungsaustausch ist nur der Grundswingungsstrom I_{n1} beteiligt:

$$P_n = U_n I_{n1} \cos(\alpha_1) \quad (29)$$

$$I_{n1} = \frac{P_n}{U_n \cos(\alpha_1)} \quad (30)$$

$$= 13,5 \text{ A} \quad (31)$$

c) Bei der Berechnung des Zündwinkels ist jetzt die Kommutierungsinduktivität zu berücksichtigen:

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{u_d + \frac{2}{\pi} \omega L_k I_d}{U_{di}} \right) \quad (32)$$

$$= 76,17^\circ \quad (33)$$

Die Verringerung des Zündwinkels ist erwartungsgemäß, da für $L_k > 0$ während der Kommutierung keine Spannung auf der Gleichspannungsseite anliegt und diese fehlenden Spannungs-Zeit-Flächen durch einen kleineren Zündwinkel zu kompensieren sind.

d) Der Überlappungswinkel berechnet sich gemäß

$$\mu = \cos^{-1} \left(\cos(\alpha_2) - \frac{2\omega L_k I_d}{\sqrt{2} U_n} \right) - \alpha_2 \quad (34)$$

$$= 13,42^\circ \quad (35)$$

e) Eine Rückspeisung aus der Batterie ins Netz ist nicht möglich, da die Wechselstrombrücke keinen negativen Strom $I_d < 0$ führen kann.

f) Siehe Zeichenblatt

4 Gleichstromantrieb mit Vierquadrantensteller

Als Antrieb für eine Straßenbahn kommt ein Vierquadrantensteller mit Gleichstrommaschine zum Einsatz. Der Vierquadrantensteller wird durch einen netzseitigen Stromrichter SR gespeist, der durch den Stromabnehmer der Straßenbahn mit der Oberleitung verbunden ist und sowohl Energie aus dem Netz entnehmen als auch ins Netz zurückspeisen kann.

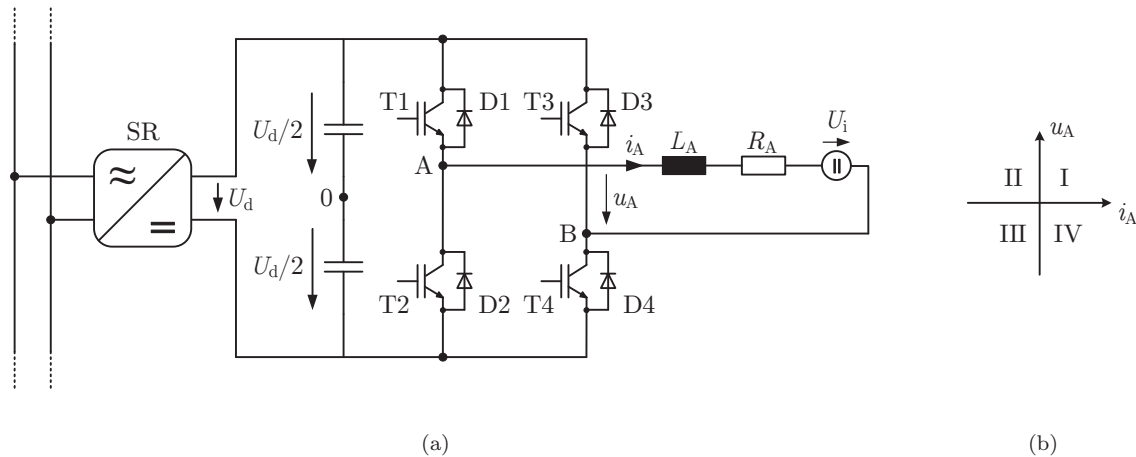


Abbildung 4: (a) Vierquadrantensteller mit angeschlossener Gleichstrommaschine
(b) Quadranten des Vierquadrantenstellers

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 bekannt

- Eingangsgleichspannung U_d
- Ankerinduktivität L_A
- Ankerwiderstand R_A

Aufgaben

- a) Nennen Sie für einen negativen Ausgangsstrom $i_A < 0$ alle möglichen Ausgangsspannungen u_A und geben Sie alle Möglichkeiten der dabei stromführenden Leistungshalbleiter an.

Die Ausgangsspannung des Vierquadrantenstellers wird mit dem Modulationsgrad $m \in [-1, 1]$ linear im Bereich $u_{A,\min}(m = -1) \leq u_A(m) \leq u_{A,\max}(m = 1)$ eingestellt. Im Betrieb schalten die IGBTs T1 und T4 sowie T2 und T3 gleichzeitig (gleichzeitiges Takten).

- b) Berechnen Sie den arithmetischen Mittelwert $\bar{u}_A$ der Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsgleichspannung U_d und des Tastverhältnisses $d = \frac{T_s}{T}$ der IGBTs T1 und T4.
- c) Geben Sie das Tastverhältnisses $d = \frac{T_s}{T}$ der IGBTs T1 und T4 in Abhängigkeit des Modulationsgrads m an.

- d) Skizzieren Sie für den Modulationsgrad $m = 0,5$ zwei Taktperioden den Verlauf der Ausgangsspannung u_A .
- e) Zeigen Sie, dass anhand der bekannten Daten sowie der dem Netz entnommenen Leistung P_n , der gemessenen Drehzahl Ω und dem vorgegebenen Modulationsgrad m eine Bestimmung der Maschinenkonstante $c\Phi$ möglich ist. Nennen Sie für im Betrieb auftretende Abweichungen zwei mögliche Ursachen.
- f) Auf einer eingleisigen Linie fährt die Straßenbahn vor bzw. nach der Endhaltestelle mit konstanter Geschwindigkeit v durch eine Straßenunterführung (Abbildung 5). Die Zwischenkreisspannung beträgt $U_d = 300\text{ V}$. Ordnen Sie die von der Steuerelektronik ausgegebenen Wertepaare 1-4 von Modulationsgrad m und Gegenspannung U_i in Tabelle 1 den Streckenabschnitten A-D zu und geben Sie gemäß Abbildung 4(b) den zugehörigen Quadranten des Vierquadrantenstellers an.

Tabelle 1: Modulationsgrad m und Gegenspannung U_i

	1	2	3	4
Modulationsgrad m	-0,8	0,8	0,2	-0,2
Gegenspannung U_i	-150 V	150 V	150 V	-150 V

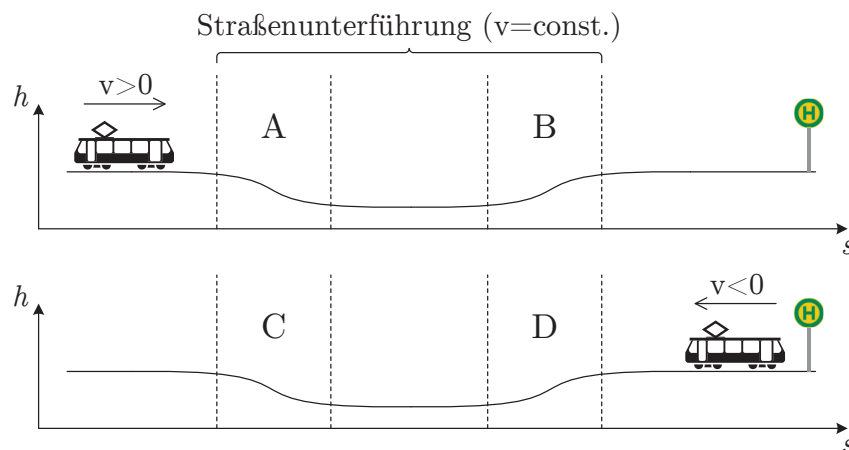


Abbildung 5: Streckenverlauf der Straßenbahn

Lösungsvorschlag

a) Für einen negativen Ausgangsstrom $i_A < 0$ ergeben sich folgende Möglichkeiten:

$$u_A = U_d \quad \text{für } D_1 \text{ \& } D_4 \text{ leitend} \quad (36)$$

$$u_A = 0 \quad \text{für } \begin{cases} D_1 \text{ \& } T_3 \text{ leitend} \\ T_2 \text{ \& } D_4 \text{ leitend} \end{cases} \quad (37)$$

$$u_A = -U_d \quad \text{für } T_2 \text{ \& } T_3 \text{ leitend} \quad (38)$$

b) In Phase A ergibt sich der arithmetische Mittelwert der Mittelpunktspannung zu

$$\bar{u}_{A0} = \frac{1}{T} \left(\frac{U_d}{2} T_e - \frac{U_d}{2} (T - T_e) \right) \quad (39)$$

$$= U_d \frac{T_e}{T} - \frac{U_d}{2} \quad (40)$$

$$= U_d \left(d - \frac{1}{2} \right) \quad (41)$$

und unter Berücksichtigung der Vorzeichenumkehr in Phase B zu

$$\bar{u}_{B0} = \frac{1}{T} \left(\frac{U_d}{2} (T - T_e) - \frac{U_d}{2} T_e \right) \quad (42)$$

$$= -U_d \frac{T_e}{T} + \frac{U_d}{2} \quad (43)$$

$$= U_d \left(\frac{1}{2} + d \right) \quad (44)$$

Daraus berechnet sich der arithmetische Mittelwert der Ausgangsspannung $\bar{u}_A$ gemäß

$$\bar{u}_A = \bar{u}_{A0} - \bar{u}_{B0} \quad (45)$$

$$= U_d (2d - 1) \quad (46)$$

c) Für das Tastverhältnis aus b) gilt $0 \leq d = \frac{T_e}{T} \leq 1$. Durch Einsetzen der Intervallgrenzen in die Steuervorschrift

$$(2d - 1) \begin{cases} 1 \text{ für } d = 1 \\ -1 \text{ für } d = 0 \end{cases} \quad (47)$$

ergeben sich die Intervallgrenzen des geforderten Modulationsgrads m . Aus

$$m = (2d - 1) \quad (48)$$

folgt das Steuergesetz

$$\bar{u}_A = m U_d \quad (49)$$

und

$$d = \frac{m + 1}{2} \quad (50)$$

d) Zeichnung:

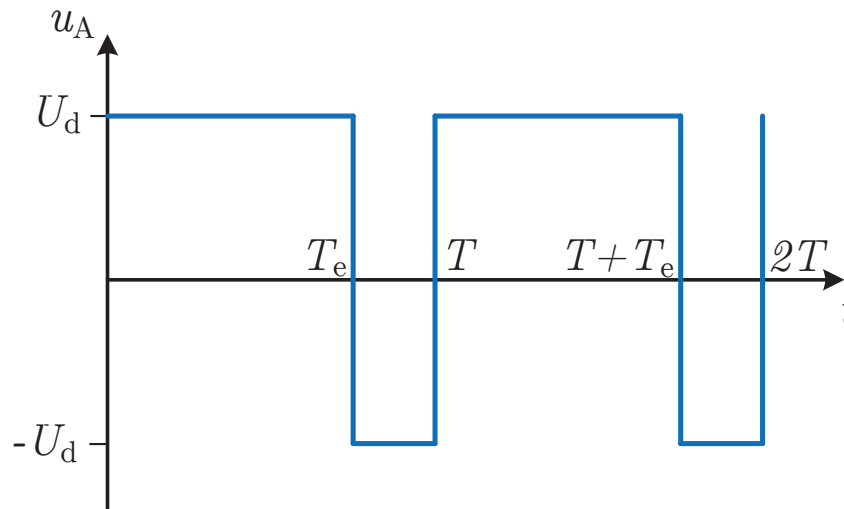


Abbildung 6: Zeitverlauf der Ausgangsspannung für $m = 0,5$ (zwei Taktperioden)

e) Wegen der Annahme idealer Schalter und eines idealen Stromrichters SR gilt

$$P_n = \bar{u}_A i_A \quad . \quad (51)$$

Mit $\bar{u}_A = mU_d$ folgt

$$P_n = mU_d i_A \quad (52)$$

bzw.

$$i_A = \frac{P_n}{mU_d} \quad . \quad (53)$$

Einssetzung der Induktionsspannung $U_i = c\Phi\Omega$ in die Ankerspannungsgleichung

$$U_i = \bar{u}_A - R_A i_A \quad (54)$$

liefert mit Gl. 53 nach Umstellung die Maschinenkonstante

$$c\Phi = \frac{mU_d - R_A \frac{P_n}{mU_d}}{\Omega} \quad . \quad (55)$$

Mögliche Ursachen für im Betrieb auftretende Abweichungen sind:

- Verluste der eingesetzten Leistungshalbleiter
- Nicht-ideales Schaltverhalten der eingesetzten Leistungshalbleiter
- Streuinduktivitäten
- Spannungsrippel von U_d
- Stromrippel von i_A

Dagegen sind Maschinenverluste wie z.B. ohmsche Verluste oder Reibungsverluste bereits in der Rechnung berücksichtigt und stellen keine Abweichungsursache dar.

f) A3 , QII
B2 , QI
C1 , QIII
D4 , QIV

5 Elektrische Maschinen und Stromrichter in der Anwendung

- a) Die Anlaufströme eines Käfigläufermotors sollen mit einem netzgeführten Stromrichter SRa begrenzt werden. Skizzieren Sie das Schaltbild des Stromrichters mit den Anschlüssen A,B,C und a,b,c.

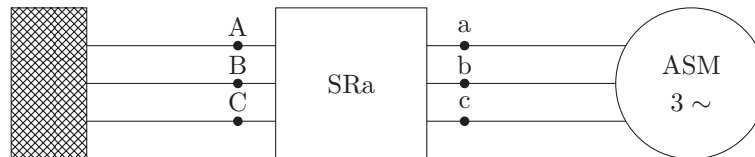


Abbildung 7: Stromrichterschaltung zu 5a)

Geben Sie an, ob dieser Stromrichter auch für die dauerhafte Regelung der Drehzahl der Asynchronmaschine zu empfehlen ist (bitte kurze Begründung).

- b) Ein Stromrichter SRb mit einer Nennspannung von 400 V soll an einem Mittelspannungsnetz mit einer Nennleiterspannung von 3,3 kV betrieben werden.

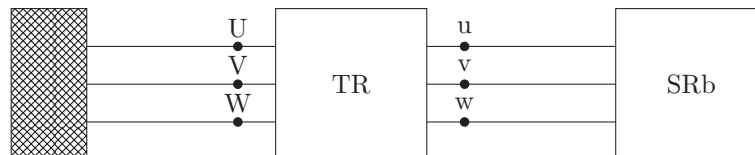


Abbildung 8: Schaltung zu 5b)

Zur Spannungsanpassung wird ein Transformator TR in Dreieck-Stern-(Dy-)Schaltung verwendet. Skizzieren Sie das Schaltbild der Wicklungen (Eine Darstellung der Eisenwege ist nicht erforderlich). Geben Sie zusätzlich an, welche Windungszahl n_1 jede Spule der Primärwicklung hat, wenn die Windungszahl jeder Sekundärspule $n_2 = 100$ ist (bei nicht ganzzahligem Ergebnis bitte aufrunden).

- c) Zur Einspeisung der Energie einer Solarzelle wird der Stromrichter SRc eingesetzt. Die Eingangsspannung u_{AB} des Stromrichters entspricht der Spannung der Solarzelle, die im Laufe eines Tages wegen wechselnder Sonneneinstrahlung im Bereich $400 \text{ V} \leq u_{AB} \leq 600 \text{ V}$ liegt.

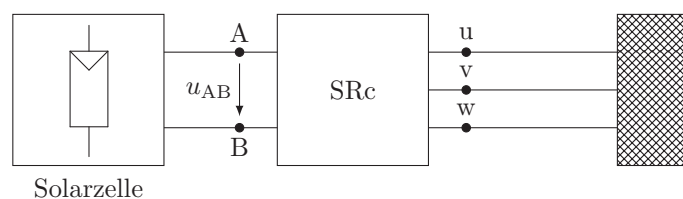


Abbildung 9: Schaltung zu 5c)

Skizzieren Sie das Schaltbild des Stromrichters SRc und geben Sie die maximale Amplitude und Effektivwert der Leiter-Erde Spannung des starren Netzes an, die mit dieser Einspeiseschaltung mit Raumzeigermodulation erreicht werden kann.

- d) Um die Energie der Solarzelle aus c) in das 230/400 V-Netz einzuspeisen wird der Stromrichter SRc auf der Gleichspannungsseite durch eine weitere Schaltung ergänzt. Wie heißt diese Schaltung? Skizzieren Sie das Schaltbild und schließen Sie daran die Blöcke Solarzelle, SRc und Netz an.

Lösungsvorschlag

- a) Als Stromrichter kommt eine Dimmerschaltung in jedem Strang zum Einsatz. Dadurch wird die Spannung an den Klemmen der Maschine eingestellt und der Anlaufstrom begrenzt (Soft-Starter).

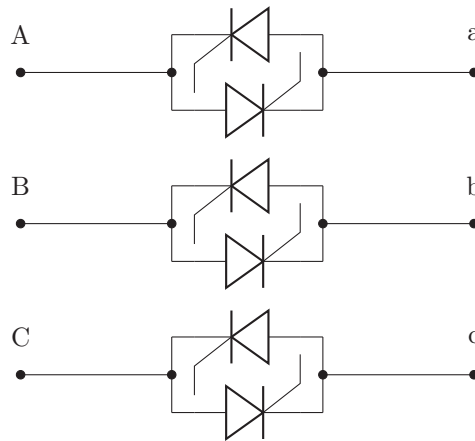


Abbildung 10: Soft-Starter für die ASM

Da die Frequenz nicht mit einem Dimmer beeinflusst werden kann, eignet sich diese Schaltung nur sehr bedingt zur Drehzahlregelung. Der Schlupf und damit die Verluste sind für eine dauerhafte Regelung der Drehzahl zu groß.

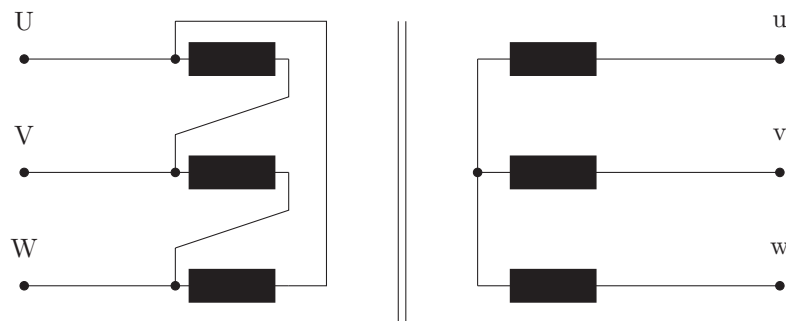


Abbildung 11: Transformatorwicklungen

- b) Abbildung 11 zeigt die Wicklungen des Transformators. Für das Spannungsübersetzungsverhältnis gilt

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{3} \frac{U_1}{U_2} \quad (56)$$

$$n_1 = n_2 \frac{\sqrt{3} U_1}{U_2} = 1429 \quad (57)$$

c) Zur Netzeinspeisung wird ein Pulswechselrichter verwendet.

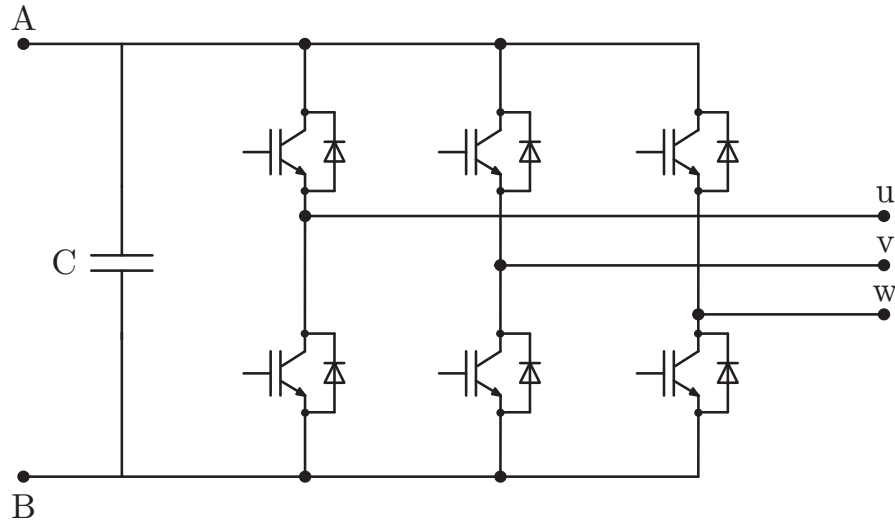


Abbildung 12: Pulswechselrichter

Da auch bei der minimalen Solarzellenspannung eine Einspeisung möglich sein muss erfolgt die Berechnung der Netzspannung mit $u_{AB,min} = 400 \text{ V}$. Bei Raumzeigermodulation ergibt sich

$$\hat{U}_{LN} = \frac{u_{AB,min}}{\sqrt{3}} = 230,9 \text{ V} \quad (58)$$

$$U_{LN} = \frac{u_{AB,min}}{\sqrt{6}} = 163,3 \text{ V} \quad (59)$$

d) Um dennoch in das 230/400 V-Netz einspeisen zu können, muss ein Hochsetzsteller zur Vergrößerung der Zwischenkreisspannung eingesetzt werden:

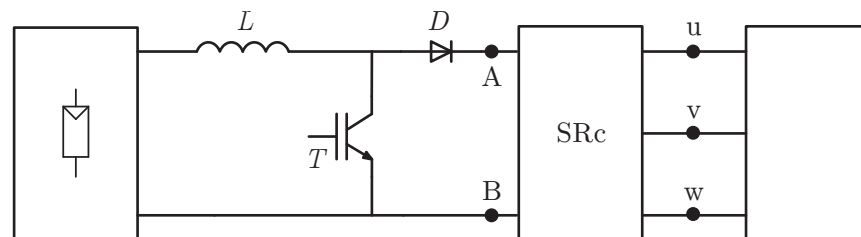


Abbildung 13: Zweistufiger Solarwechselrichter mit Hochsetzsteller