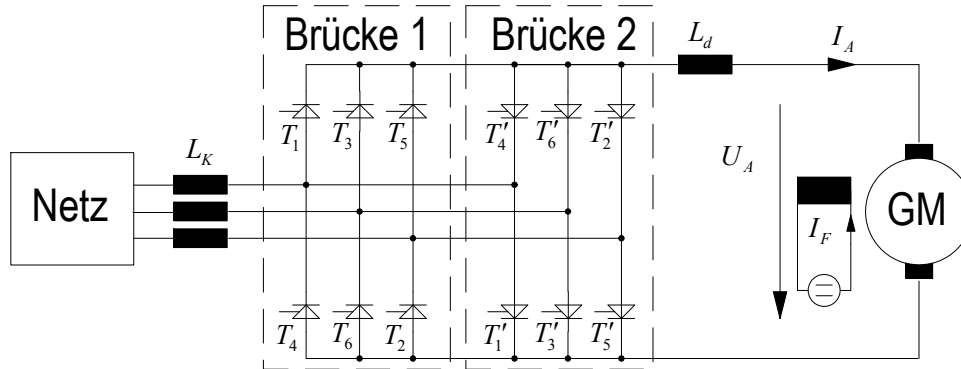


1 Vierquadranten-Gleichstromantrieb

Ein netzgeführter Vierquadrantenstromrichter bestehend aus zwei Drehstrombrückenschaltungen speist eine fremderregte Gleichstrommaschine über eine Glättungsdrossel L_d .



Vereinfachende Annahmen

- Die Gleichstrommaschine ist bis auf die Stromwärmeverluste verlustfrei.
- Die Induktivität der Glättungsdrossel L_d sei so groß, dass der Gleichstrom als ideal glatt angenommen werden kann.
- Die Stromrichterventile sind ideal. Das Netz sei ein ideales Drehstromnetz und die Drosseln L_d und L_k seien verlustfrei.

Folgende Daten sind gegeben

Gleichstrommotor

U_{AN}	=	440 V	Nennwert der Ankerspannung
I_{AN}	=	100 A	Nennwert des Ankerstroms
R_A	=	220 mΩ	Ankerkreiswiderstand
n_N	=	1500 min ⁻¹	Nenndrehzahl

Drehstromnetz

U_N	=	400 V	Nennwert der Netzspannung (Leiterspannung)
f_N	=	50 Hz	Nennwert der Netzfrequenz
L_k	=	0,44 mH	Kommutierungsinduktivität

Der Vierquadrantenstromrichter wird zunächst so gesteuert, dass motorischer Nennbetrieb bei $U_A > 0$ V vorliegt.

- Welche der beiden Brücken wird benutzt?
- Welcher Steuerwinkel muss eingestellt werden?
- Berechnen Sie die innere mechanische Leistung der Gleichstrommaschine.
- Geben Sie den Mittelwert eines Thyristorstroms der stromführenden Brücke an.

Die Gleichstrommaschine soll jetzt aus Nenndrehzahl bis zum Stillstand abgebremst werden.

- Welche der beiden Brücken wird benutzt?
- Berechnen Sie die Ankerspannung, die für das Bremsen mit Nennmoment bei Nenndrehzahl erforderlich ist.

Nachdem die Gleichstrommaschine zum Stillstand gekommen ist, soll sie in die gegenüber a)-f) umgekehrte Drehrichtung beschleunigt werden.

- Welche der beiden Brücken wird benutzt?

Lösung

a) Bei motorischem Betrieb ist die Leistung der Gleichstrommaschine positiv. Da U_A positiv ist, ist auch der Strom I_A positiv. Somit wird die Brücke 1 benutzt.

b)

$$U_d = U_{di} \cdot \cos \alpha - \frac{3}{\pi} \cdot \omega \cdot L_k \cdot I_d \quad (1)$$

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_N = 540,2 \text{ V} \quad (2)$$

$$\cos \alpha = \frac{U_{AN} + \frac{3}{\pi} \cdot \omega \cdot L_k \cdot I_{AN}}{\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_N} \quad (3)$$

$$\alpha = \boxed{32,969^\circ} \quad (4)$$

c)

$$U_i = U_{AN} - R_A \cdot I_{AN} = 418 \text{ V} \quad (5)$$

$$P_{mech} = U_i \cdot I_A \quad (6)$$

$$= \boxed{41,80 \text{ kW}} \quad (7)$$

d)

$$I_T = \frac{I_d}{3} \quad (8)$$

$$= \boxed{33,33 \text{ A}} \quad (9)$$

e) Zum Bremsen wird ein negatives Drehmoment benutzt. Damit ist I_A ebenfalls negativ und es wird die Brücke 2 benutzt.

f)

$$I_A = -I_{AN} = -100 \text{ A} \quad (10)$$

$$U_{iN} = U_{AN} - R_A \cdot I_{AN} = 418 \text{ V} \quad (11)$$

$$U_A = U_{iN} + R_A \cdot I_A \quad (12)$$

$$= \boxed{396 \text{ V}} \quad (13)$$

g) Beim Beschleunigen in Gegenrichtung wird ein negatives Drehmoment benötigt. Damit ist I_A negativ und es wird die Brücke 2 benutzt.

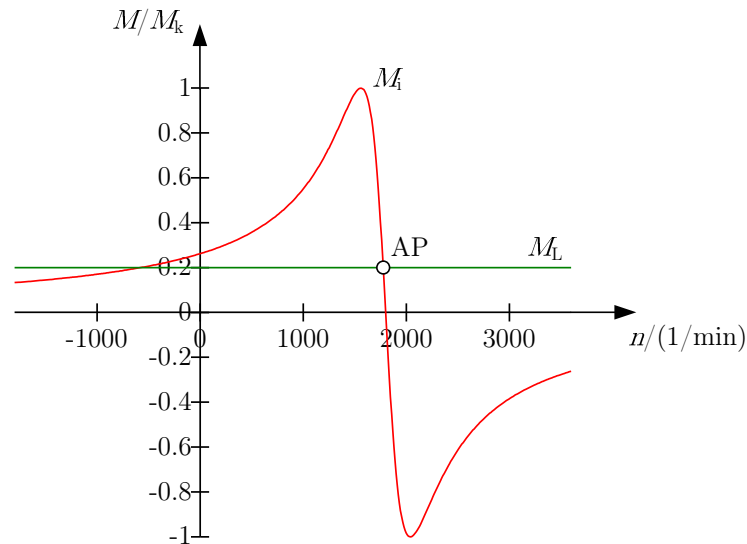
2 Drehstromasynchronmaschine

Eine von einem starren Drehspannungssystem gespeiste Drehstromasynchronmaschine mit 2 Polpaaren wird stationär als Motor betrieben. Das konstante Lastmoment beträgt 20% des Kippmoments. Die Statorfrequenz beträgt 60 Hz. Der Kippunkt des Motors liegt bei der Drehzahl $n_k = 1560 \text{ min}^{-1}$. Es gilt die Kloss'sche Formel.

- a) Skizzieren Sie qualitativ die Drehzahl-Drehmomentkennlinie und die Lastkennlinie gemeinsam in einem Diagramm und markieren Sie den stationären Arbeitspunkt AP.
- b) Berechnen Sie die Drehzahl des Motors im stationären Arbeitspunkt.

Lösung

a)



b)

$$n_{syn} = \frac{f}{p} = \frac{60 \text{ Hz}}{2} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 1800 \text{ min}^{-1} \quad (14)$$

$$s_k = \frac{n_{syn} - n_k}{n_{syn}} \quad (15)$$

$$= 0,133 \quad (16)$$

$$\frac{M_i}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (17)$$

$$s^2 - 2 \cdot \frac{M_k}{M_i} \cdot s \cdot s_k + s_k^2 = 0 \quad (18)$$

$$M_i = M_L = 0,2 \cdot M_k \quad (19)$$

$$s_1 = 0,0135 \quad (20)$$

$$s_2 = 1,320 \quad (21)$$

Stabiler Arbeitspunkt: $s_1 = 0,0135$

$$n = n_{syn} \cdot (1 - s_1) \quad (22)$$

$$= \boxed{1776 \text{ min}^{-1}} \quad (23)$$

3 Umrichtergespeister permanentmagneterregter Synchronmotor mit rotororientierter Steuerung („Drehmomentsteuerung“)

Eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung speist einen permanentmagneterregten Drehstromsynchronmotor mit Oberflächenmagneten ($L_d = L_q = L_S$). Die Statorströme des Motors werden durch eine Stromregelung eingestellt. Der Motor wird mit der rotororientierten Steuerung („Drehmomentsteuerung“) betrieben. Dabei liegt der Zeiger des Statorstroms $\underline{I}_S$ stets in Phase oder Gegenphase mit der Polradspannung ($I_S = I_{Sq}$) und die Reaktanzen sowie die Polradspannung sind proportional zur Speisefrequenz ($X_S = \omega_S \cdot L_S$ und $U_P/U_{PN} = \omega_S/\omega_{SN}$).

Vereinfachende Annahmen:

- Der Motor sei verlustfrei.
- Der Umrichter sei ideal.

Folgende Daten sind gegeben:

p	=	3	Polpaarzahl
U_{PN}	=	180 V	Nennwert der Polradspannung
I_{SN}	=	70 A	Nennstrom
ω_{SN}	=	$2\pi \cdot 100$ Hz	Nennkreisfrequenz (elektrisch)
L_S	=	3 mH	Synchroninduktivität

- Berechnen Sie die vom Motor abgegebene Leistung und das Drehmoment im Nennpunkt.
- Berechnen Sie die Statorspannung U_{SN} im Nennpunkt und zeichnen Sie das Zeigerdiagramm mit $\underline{I}_{SN}$, $\underline{U}_{SN}$ und dem Spannungsabfall an der Synchronreaktanz X_{SN} in das vorbereitete Diagramm auf der Rückseite Ihres Deckblattes.
- Jetzt wird die Drehzahl auf den zweifachen Wert der Nenndrehzahl erhöht und das Drehmoment auf den halben Wert des Nenndrehmoments verringert. Berechnen Sie die Statorstromkomponente I_{Sq2} , die Polradspannung U_{P2} , den Spannungsabfall an X_{S2} und die Strangspannung U_{S2} . Zeichnen Sie die entsprechenden Zeiger ins Diagramm ein.
- Um den Betrieb nach c) an unveränderter Zwischenkreisspannung zu ermöglichen, wird ein zusätzlicher Strom $I_{Sd2} \neq 0$ mit einer Phasenverschiebung von 90° zur Polradspannung U_{P2} eingeprägt. Berechnen Sie den Wert von I_{Sd2} so, dass der Motor mit dem Nennwert der Statorspannung gemäß c) betrieben werden kann. Zeichnen Sie den zusätzlichen Strom I_{Sd2} in das Zeigerdiagramm ein. Hinweis: Der Zeiger des Statorstroms $\underline{I}_{S2}$ liegt jetzt nicht mehr in Phase oder Gegenphase zur Polradspannung.
- Geben Sie an, ob beim Betrieb nach d) der Nennstrom I_{SN} des Motors überschritten wird.

Lösung

- a) Der Zeiger $\underline{U}_{PN}$ liegt genau in Gegenphase zum Zeiger $\underline{I}_{SN}$. Damit kann die Leistung wie folgt berechnet werden:

$$P_N = 3 \cdot U_{PN} \cdot I_{SN} = \boxed{37,8 \text{ kW}} \quad (24)$$

Berechnung des Drehmoments:

$$\Omega_N = \frac{\omega_{SN}}{p} \quad (25)$$

$$= 209,4 \frac{1}{\text{s}} \quad (26)$$

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \boxed{180,48 \text{ Nm}} \quad (27)$$

- b) Berechnung des Spannungsabfalls über der Synchronreaktanz:

$$X_{SN} \cdot I_{SN} = \omega_{SN} \cdot L_S \cdot I_{SN} \quad (28)$$

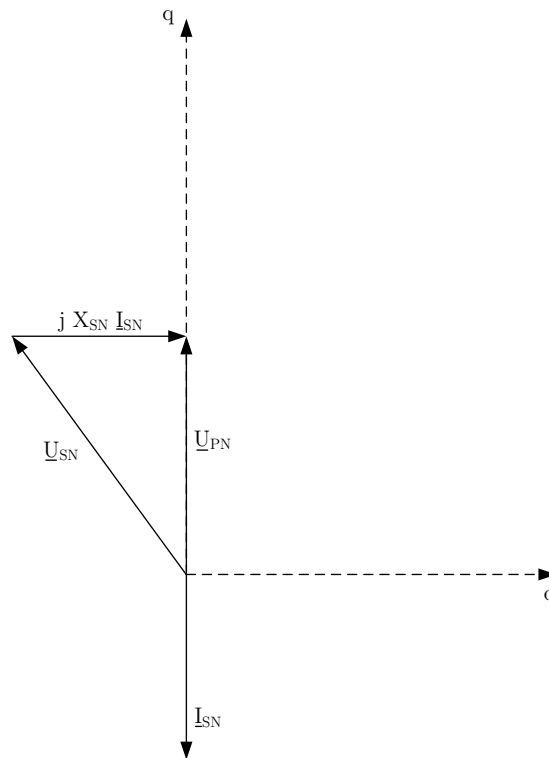
$$= 131,95 \text{ V} \quad (29)$$

$$(30)$$

Berechnung von U_{SN} mit dem Satz des Pythagoras:

$$U_{SN} = \sqrt{U_{PN}^2 + (X_{SN} \cdot I_{SN})^2} = \boxed{223,18 \text{ V}} \quad (31)$$

Zeigerdiagramm:



c) Eine Verdoppelung der Drehzahl führt zu folgenden Größen:

$$\omega_{S2} = 2 \cdot \omega_{SN} \quad (32)$$

$$X_{S2} = \omega_{S2} \cdot L_S \quad (33)$$

$$= 3,77 \, \Omega \quad (34)$$

$$U_{P2} = 2 \cdot U_{PN} = \boxed{360 \, \text{V}} \quad (35)$$

Da gleichzeitig das Drehmoment halbiert wird, bleibt die Leistung unverändert.

$$P_2 = P_N \quad (36)$$

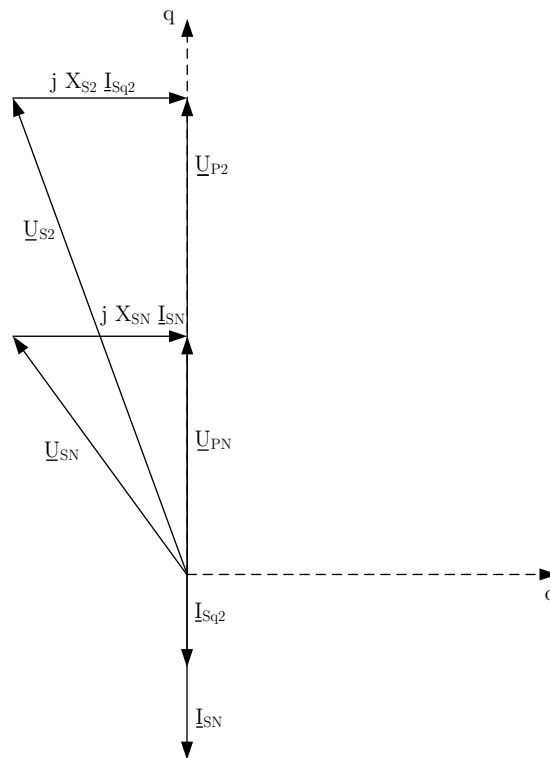
Berechnen von I_{Sq2} , $X_{S2} \cdot I_{Sq2}$ und U_{S2} :

$$I_{Sq2} = \frac{P_2}{3 \cdot U_{P2}} = \boxed{35 \, \text{A}} \quad (37)$$

$$X_{S2} \cdot I_{Sq2} = \boxed{131,95 \, \text{V}} \quad (38)$$

$$U_{S2} = \sqrt{U_{P2}^2 + (X_{S2} \cdot I_{Sq2})^2} = \boxed{383,42 \, \text{V}} \quad (39)$$

Zeigerdiagramm:



d) Hilfsspannung U_{Hilf} als Abbildung von $\underline{U}_{SN}$ auf die q-Achse ausrechnen:

$$U_{Hilf} = \sqrt{U_{SN}^2 - (X_{S2} \cdot I_{Sq2})^2} \quad (40)$$

$$= 180 \text{ V} \quad (41)$$

$$(42)$$

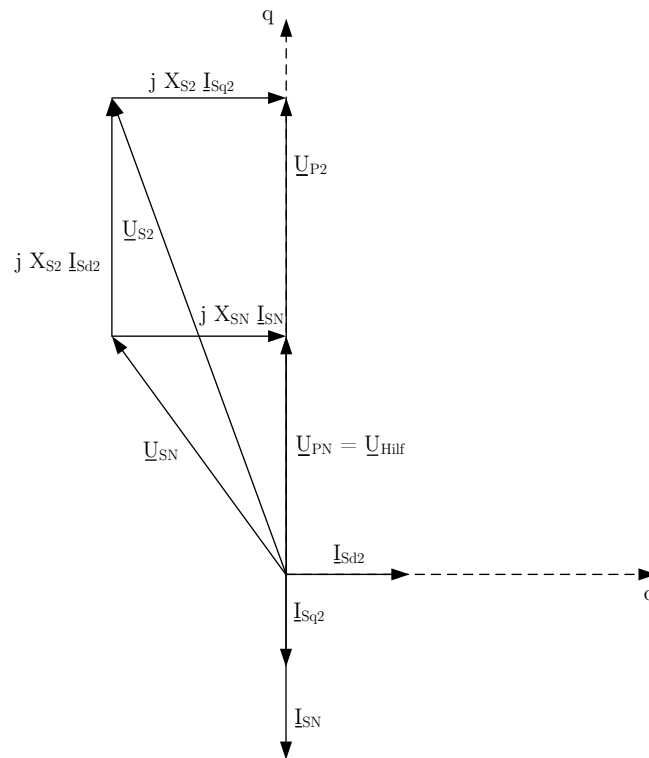
$X_{S2} \cdot I_{Sd2}$ ist dann die Differenz zwischen U_{P2} und U_{Hilf} :

$$X_{S2} \cdot I_{Sd2} = U_{P2} - U_{Hilf} \quad (43)$$

$$= 180 \text{ V} \quad (44)$$

$$I_{Sd2} = \boxed{47,75 \text{ A}} \quad (45)$$

Zeigerdiagramm:



e)

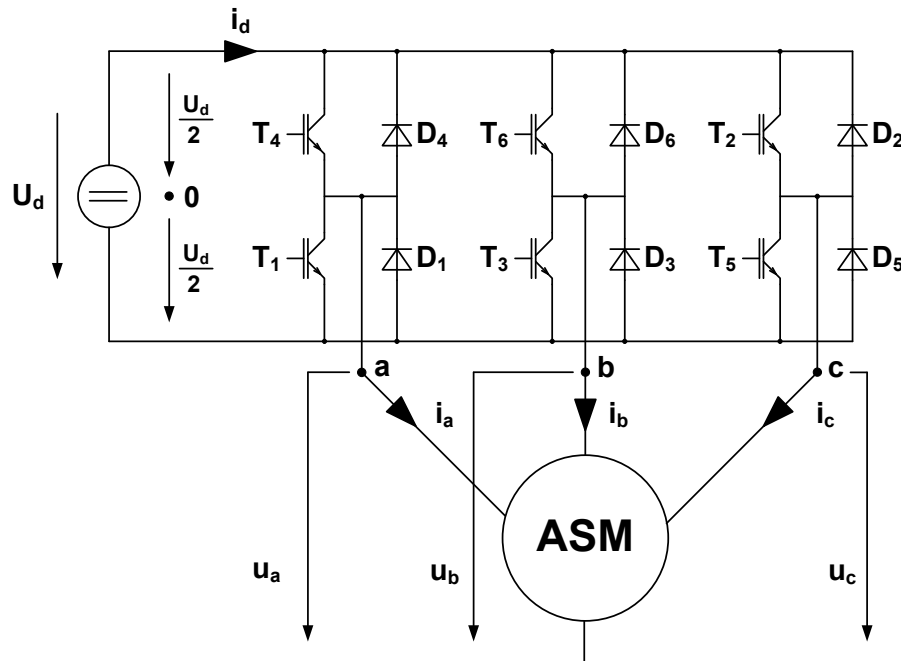
$$I_{S2} = \sqrt{I_{Sq2}^2 + I_{Sd2}^2} \quad (46)$$

$$= 59,2 \text{ A} \quad (47)$$

Der Strom I_{S2} ist kleiner als der Nennstrom I_{SN} .

4 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

Eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung wird mit Blocksteuerung betrieben und speist eine Asynchronmaschine.



Folgende Daten sind gegeben:

$U_d = 450 \text{ V}$ Speisespannung der selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung

Vereinfachende Annahmen:

- Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei.

- Geben Sie den Effektivwert der Grundschnung der Sternspannungen U_a , U_b und U_c an.
- Zum Zeitpunkt t_0 seien die Transistoren T_1 , T_6 und T_2 eingeschaltet. Zeichnen Sie den Raumzeiger $\underline{u}$, der aus den Spannungen u_{a0} , u_{b0} und u_{c0} gebildet wird, maßstäblich in eine komplexe Ebene ein (Maßstab: 100 V/cm).
- Während des Schaltzustands gemäß b) sei $i_a = +5 \text{ A}$, $i_b = +90 \text{ A}$ und $i_c = -95 \text{ A}$. Geben Sie an, welche Leistungshalbleiter Strom führen und berechnen Sie den Strom i_d . Gibt die Spannungsquelle U_d dabei Leistung ab oder nimmt sie Leistung auf?
- Geben Sie die Sternspannungen u_a , u_b und u_c während des Schaltzustands nach b) an.

Lösung

a)

$$U_a = U_b = U_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_{1ab} \quad (48)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d \quad (49)$$

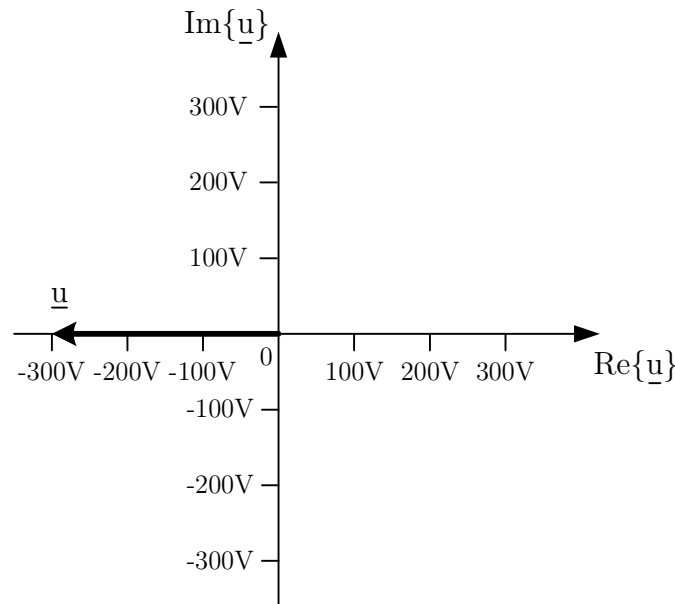
$$= \boxed{202,57 \text{ V}} \quad (50)$$

b)

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \cdot (u_{a0} + \underline{a} \cdot u_{b0} + \underline{a}^2 \cdot u_{c0}) \quad (51)$$

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \cdot \left(-\frac{U_d}{2} + \left(-\frac{1}{2} + j \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3} \right) \cdot \frac{U_d}{2} + \left(-\frac{1}{2} - j \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3} \right) \cdot \frac{U_d}{2} \right) \quad (52)$$

$$= -300 \text{ V} \quad (53)$$



c) Die Leistungshalbleiter D1, T6 und D2 führen Strom.

$$i_d = i_b - i_c \quad (54)$$

$$= -5 \text{ A} \quad (55)$$

Die Spannungsquelle nimmt Leistung auf, da i_d negativ ist.

d)

$$u_{P0} = \frac{1}{3} \cdot (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}) \quad (56)$$

$$= 75 \text{ V} \quad (57)$$

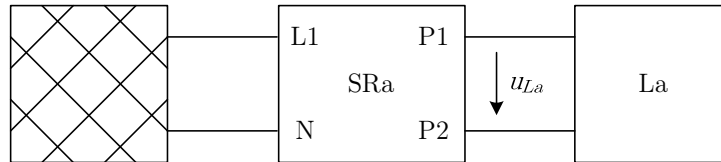
$$u_a = u_{a0} - u_{P0} = \boxed{-300 \text{ V}} \quad (58)$$

$$u_b = u_{b0} - u_{P0} = \boxed{150 \text{ V}} \quad (59)$$

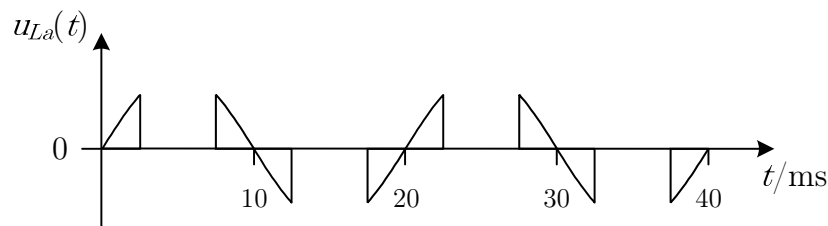
$$u_c = u_{c0} - u_{P0} = \boxed{150 \text{ V}} \quad (60)$$

$$(61)$$

5 Stromrichterschaltungen und elektrische Maschinen für verschiedene Anwendungen

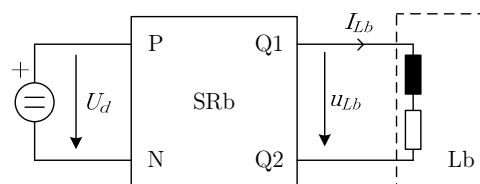


- a) Ein am Wechselstromnetz angeschlossener Stromrichter SRa speist eine Last L_a . Die Spannung an der Last hat den folgenden Verlauf $u_{La}(t)$:

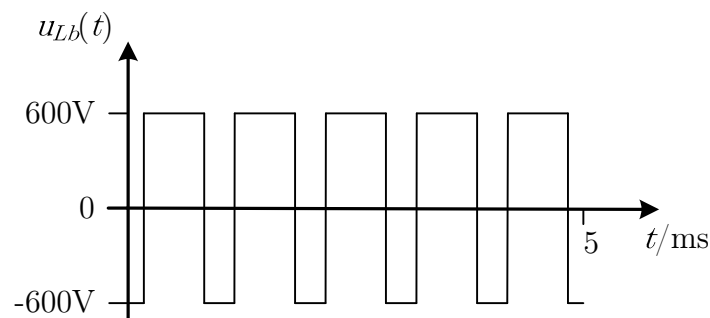


Geben Sie die Bezeichnung des Stromrichters an und zeichnen Sie das Schaltbild. Welches Steuerungsverfahren wird hier benutzt? Geben Sie die Bezeichnung der eingesetzten Halbleiter an.

- b)



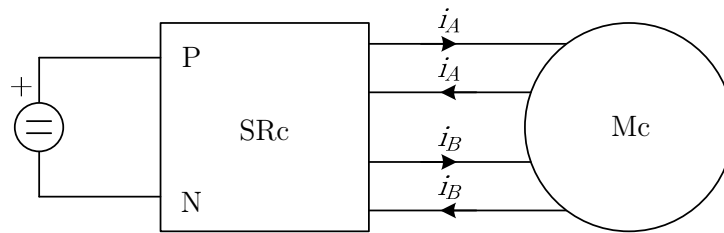
Ein an einer Gleichstromquelle angeschlossener Stromrichter SRb speist eine Gleichstromlast L_b mit $I_{Lb} > 0$. Die Spannung $u_{Lb}(t)$ hat den folgenden Zeitverlauf:



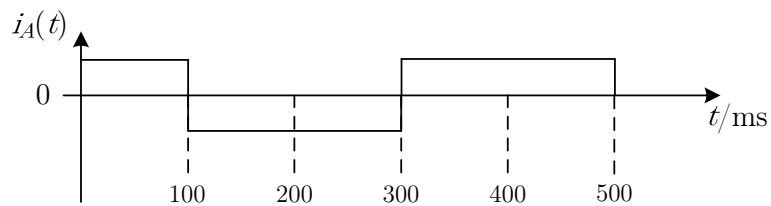
Geben Sie die Bezeichnung des Stromrichters an und zeichnen Sie das Schaltbild. Wie groß ist die Gleichspannung U_d , wenn die Halbleiter ideal sind? Geben Sie die Bezeichnung der eingesetzten Halbleiter an.

- c) Siehe nächste Seite

- c) Ein eingangsseitig an einer Gleichspannungsquelle angeschlossener Stromrichter SRc speist einen zweiphasigen Kleinmotor Mc.



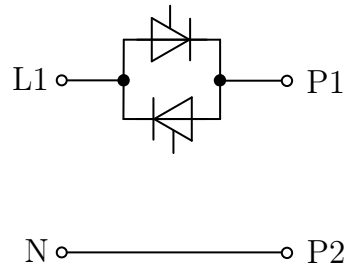
Der Strom $i_A(t)$ hat folgenden Verlauf:



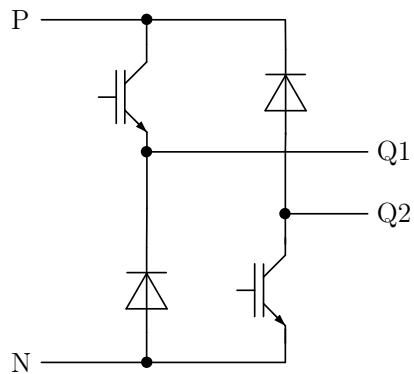
Geben Sie die Bezeichnung des Motors an. Zeichnen Sie einen zum Zeitverlauf von $i_A(t)$ passenden Zeitverlauf von $i_B(t)$ in das Diagramm auf der Rückseite Ihres Deckblatts ein. In welcher Betriebsart wird der Motor hier betrieben?

Lösung

- a) SRa ist ein Wechselstromsteller. Es wird die Phasenanschnittsteuerung angewendet. Als Halbleiter werden Thyristoren eingesetzt.
Schaltbild:



- b) SRb ist Zweiquadrantensteller. Die Spannung U_d beträgt 600V. Als Halbleiter können IGBTs, GTOs oder MOSFETs sowie Dioden eingesetzt werden.



- c) Mc ist ein Schrittmotor. Er wird im Vollschrittbetrieb angesteuert.
Zeitverläufe:

