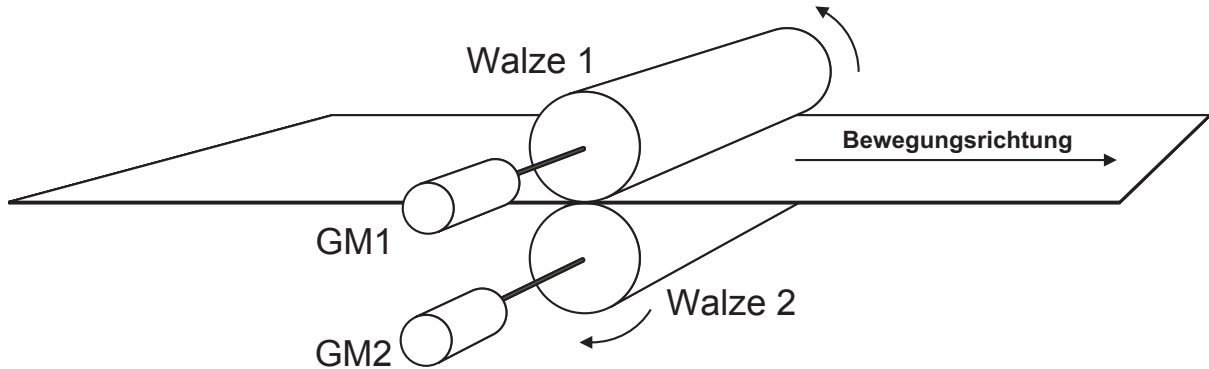


1 Walzantrieb mit zwei Gleichstrommaschinen

Zwei gleiche, fremderregte Gleichstrommotoren GM1 und GM2 treiben ein Walzgerüst mit zwei gleichen Walzen an.



Vereinfachende Annahmen:

- Reibungsverluste und die Ankerinduktivität seien vernachlässigbar.
- Es tritt keine Sättigung auf.

Folgende Daten sind gegeben:

Gleichstrommotoren - Daten je Motor

U_{AN}	= 1200 V	Ankernennspannung
I_{AN}	= 900 A	Ankernennstrom
P_N	= 1 MW	Nennleistung
n_N	= 240 min ⁻¹	Nennzahl
$c\Phi$	= $c\Phi_N$	Die Maschinen werden mit Nennerregung betrieben

Walzgerüst

r	= 0,4 m	Radius einer Walze
n	= 240 min ⁻¹	Drehzahl einer Walze
J_1	= 14000 kgm ²	Trägheitsmoment der oberen Walzenanordnung
J_2	= 14000 kgm ²	Trägheitsmoment der unteren Walzenanordnung

- Wie groß ist die Kraft, die die Motoren im Nennbetrieb gemeinsam auf das Walzgut in Bewegungsrichtung ausüben?
- Für das schnelle Abbremsen des Antriebs soll jeder der Motoren ein konstantes Bremsmoment in Höhe seines 1,5-fachen Nennmoments erzeugen. Wie hoch ist die dazu erforderliche Ankerspannung unmittelbar zu Beginn der Bremsung bei $n = 240 \text{ min}^{-1}$ und unmittelbar vor Ende des Bremsvorgangs bei $n = 0 \text{ min}^{-1}$? Die Erregung sei dabei die gleiche wie in a).
- Wie lange dauert der Bremsvorgang nach b) vom Beginn der Bremsung bis zum Stillstand? Dabei wird angenommen, dass das an jeder der beiden Walzen angreifende Lastmoment während des Bremsvorgangs konstant $M_{Last1} = M_{Last2} = 40 \text{ kNm}$ beträgt.

Lösung

a) Berechnen des Nenndrehmoments

$$\Omega_N = 2\pi \cdot \frac{n_N}{60 \text{ s/min}} \quad (1)$$

$$= 25,13 \frac{1}{\text{s}} \quad (2)$$

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} \quad (3)$$

$$= \frac{P_N}{2\pi \cdot \Omega_N} \quad (4)$$

$$= 39,79 \text{ kNm} \quad (5)$$

$$(6)$$

Berechnen der Kraft. Es muss die Summe beider Walzen betrachtet werden:

$$M = F \cdot r \quad (7)$$

$$F_{N,ges} = 2 \cdot \frac{M_N}{r} = \boxed{198,9 \text{ kN}} \quad (8)$$

b) Bei konstanter Erregung ist der Ankerstrom proportional zum Drehmoment:

$$M_{Brems} = 1,5 \cdot M_N \longrightarrow I_A = -1,5 \cdot I_{AN} \quad (9)$$

Berechnen des Ankerkreiswiderstands:

$$c\Phi_N = \frac{M_N}{I_{AN}} = 44,21 \text{ Vs} \quad (10)$$

$$U_A = R_A \cdot I_A + c\Phi \cdot \Omega \quad (11)$$

$$R_A = \frac{U_{AN} - c\Phi_N \cdot \Omega_N}{I_{AN}} \quad (12)$$

$$= 98,8 \text{ m}\Omega \quad (13)$$

Die Ankerspannung zu Beginn der Bremsung bei $n = n_N$ ergibt sich dann zu

$$U_A|_{n=n_N} = -1,5 \cdot R_A \cdot I_{AN} + c\Phi_N \cdot n_N \cdot \Omega_N = \boxed{977,8 \text{ V}} \quad (14)$$

Unmittelbar vor Ende des Bremsvorgangs beträgt die Ankerspannung

$$U_A|_{n=0} = -1,5 \cdot R_A \cdot I_{AN} = \boxed{-133,3 \text{ V}} \quad (15)$$

c)

$$M_{ges} = -2 \cdot 1,5 \cdot M_N - M_{Last1} - M_{Last2} \quad (16)$$

$$= -199,4 \text{ kNm} \quad (17)$$

$$\dot{\Omega} = \frac{M_{ges}}{J_1 + J_2} \quad (18)$$

$$= -7,12 \frac{1}{\text{s}^2} \quad (19)$$

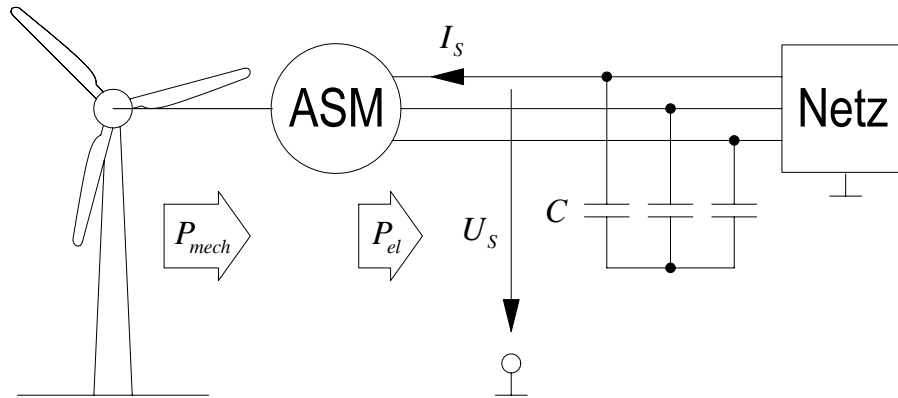
$$t = \frac{\Omega_{Ende} - \Omega_{Start}}{\dot{\Omega}} \quad (20)$$

$$= \frac{0 \frac{1}{\text{s}} - \Omega_N}{\dot{\Omega}} \quad (21)$$

$$t = \boxed{3,53 \text{ s}} \quad (22)$$

2 Windkraftanlage mit Asynchrongenerator

Der Rotor eines Windrads ist über ein Getriebe mit einer Asynchronmaschine gekoppelt. Die über das Getriebe in die Asynchronmaschine eingebrachte mechanische Leistung P_{mech} wird größtenteils in elektrische Leistung umgewandelt und in das Netz eingespeist.



Vereinfachende Annahmen

- das Netz sei ein ideales Drehspannungsnetz
- der Asynchrongenerator sei außer den Stromwärmeverlusten in Ständer und Läufer verlustfrei

Netz

U_N	=	660 V	Nennspannung (Effektivwert)
f	=	50 Hz	Netzfrequenz

Asynchrongenerator

U_N	=	660 V	Nennspannung (Effektivwert)
$P_{el,N}$	=	100 kW	Elektrische Nennleistung
n_N	=	1550 min ⁻¹	Nenndrehzahl
η	=	95 %	Wirkungsgrad
$\cos(\varphi_N)$	=	0,85	Leistungsfaktor bei Nennbetrieb

- Berechnen Sie den Nennschlupf s_N und das Nennmoment M_N .
- Berechnen Sie die Rotorverlustleistung P_{VR} und die Statorverlustleistung P_{VS} im Nennbetrieb.
- Berechnen Sie den Effektivwert des Strangstroms I_S im Nennbetrieb.
- Berechnen Sie die Kapazität C der Kompensationskondensatoren, so dass der Blindstrom des Generators im Nennbetrieb kompensiert wird.
- Skizzieren Sie die Drehzahl-Drehmomentkennlinie einer Asynchronmaschine und markieren Sie den für die gegebene Anwendung nutzbaren Bereich.

Lösung

a)

$$n_{syn} = \frac{f}{p} \quad (23)$$

$$= 1500 \text{ min}^{-1} \quad (24)$$

$$s_N = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \quad (25)$$

$$= \frac{1500 \text{ min}^{-1} - 1550 \text{ min}^{-1}}{1500 \text{ min}^{-1}} \quad (26)$$

$$s_N = \boxed{-0,033} \quad (27)$$

$$\Omega_N = 2\pi \cdot \frac{n_N}{60 \frac{s}{min}} \quad (28)$$

$$= 162,3 \frac{1}{s} \quad (29)$$

Die mechanische Leistung und das Drehmoment sind negativ, da die Asynchronmaschine als Generator arbeitet:

$$P_{mech} = \frac{-P_{el,N}}{\eta} \quad (30)$$

$$= -105,3 \text{ kW} \quad (31)$$

$$M_N = \frac{P_{mech}}{\Omega_N} = \boxed{-648,5 \text{ Nm}} \quad (32)$$

b)

$$\Omega_{syn} = 2\pi \cdot \frac{n_{syn}}{60 \frac{s}{min}} \quad (33)$$

$$= 157,1 \frac{1}{s} \quad (34)$$

$$P_D = M_N \cdot \Omega_{syn} \quad (35)$$

$$= -101,97 \text{ kW} \quad (36)$$

$$P_{VR} = s_N \cdot P_D = \boxed{3,40 \text{ kW}} \quad (37)$$

Die Maschine arbeitet als Generator, die elektrische Leistung ist aber als positiver Wert gegeben. Damit ergeben sich die Statorverluste zu:

$$P_{VS} = -P_{el,N} - P_D = \boxed{1,87 \text{ kW}} \quad (38)$$

c)

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_S \cdot \cos(\varphi) \quad (39)$$

$$I_S = \frac{P_{el,N}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos(\varphi_N)} = \boxed{102,9 \text{ A}} \quad (40)$$

d)

$$\cos(\varphi) = 0,85 \quad (41)$$

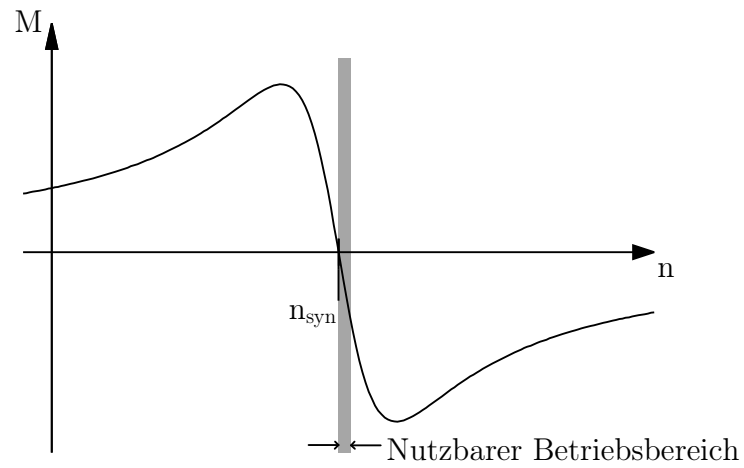
$$\varphi = 31,8^\circ \quad (42)$$

$$\frac{U_S}{I_C} = \frac{1}{\omega C} \quad (43)$$

$$U_S = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (44)$$

$$C = \frac{I_S \cdot \sin(\varphi) \cdot \sqrt{3}}{2\pi \cdot f \cdot U_N} = \boxed{452,9 \mu\text{F}} \quad (45)$$

e)



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}	=	200 V	Nennwert der Polradspannung
I_{SN}	=	70 A	Nennstrom
ω_{SN}	=	$2\pi \cdot 100$ Hz	Nennkreisfrequenz (elektrisch)
L_S	=	3,41 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:

$$P_N = 3 \cdot U_{PN} \cdot I_{SN} = \boxed{42 \text{ kW}} \quad (46)$$

Berechnung des Drehmoments:

$$\Omega_N = \frac{\omega_{SN}}{p} \quad (47)$$

$$= 209,4 \frac{1}{\text{s}} \quad (48)$$

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \boxed{200,5 \text{ Nm}} \quad (49)$$

- b) Berechnung des Spannungsabfalls über der Synchronreaktanz:

$$X_{SN} \cdot I_{SN} = \omega_{SN} \cdot L_S \cdot I_{SN} \quad (50)$$

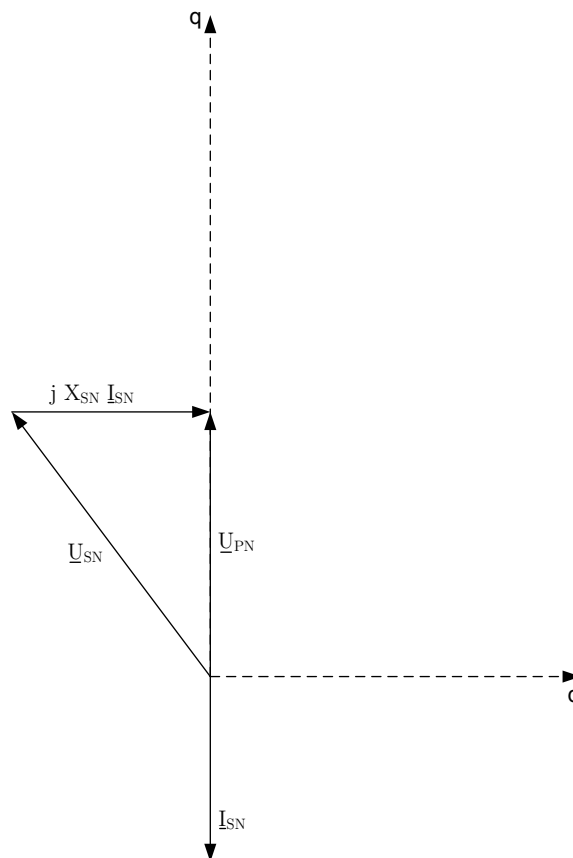
$$= 150,0 \text{ V} \quad (51)$$

$$(52)$$

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

$$U_{SN} = \sqrt{U_{PN}^2 + (X_{SN} \cdot I_{SN})^2} = \boxed{250 \text{ V}} \quad (53)$$

Zeigerdiagramm:



c) Eine Verdoppelung der Drehzahl führt zu folgenden Größen:

$$\omega_{S2} = 2 \cdot \omega_{SN} \quad (54)$$

$$X_{S2} = \omega_{S2} \cdot L_S \quad (55)$$

$$= 4,29 \, \Omega \quad (56)$$

$$U_{P2} = 2 \cdot U_{PN} = \boxed{400 \, \text{V}} \quad (57)$$

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

$$P_2 = P_N \quad (58)$$

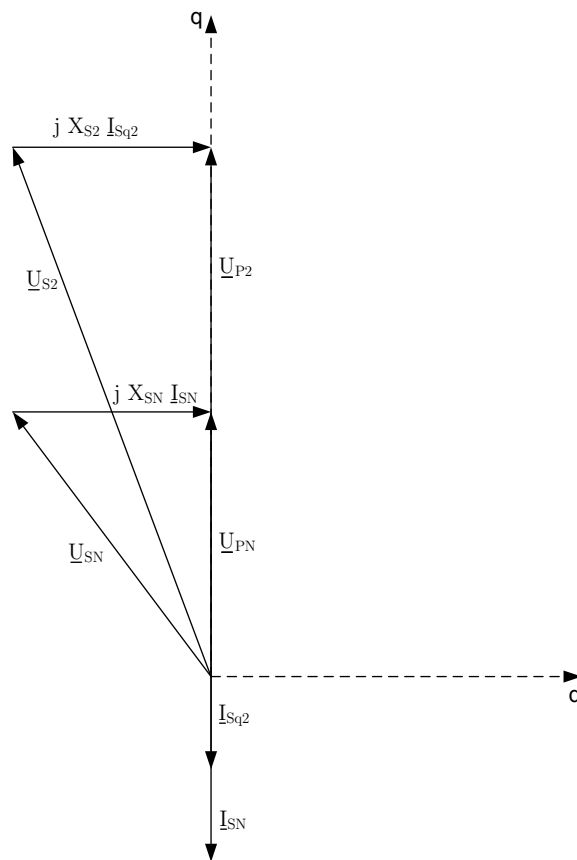
Berechnen von I_{Sq2} , $X_{S2} \cdot I_{Sq2}$ und U_{S2} :

$$I_{Sq2} = \frac{P_2}{3 \cdot U_{P2}} = \boxed{35 \, \text{A}} \quad (59)$$

$$X_{S2} \cdot I_{Sq2} = \boxed{150 \, \text{V}} \quad (60)$$

$$U_{S2} = \sqrt{U_{P2}^2 + (X_{S2} \cdot I_{Sq2})^2} = \boxed{427,2 \, \text{V}} \quad (61)$$

Zeigerdiagramm:



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

$$U_{Hilf} = \sqrt{U_{SN}^2 - (X_{S2} \cdot I_{Sq2})^2} \quad (62)$$

$$= 200 \text{ V} \quad (63)$$

$$(64)$$

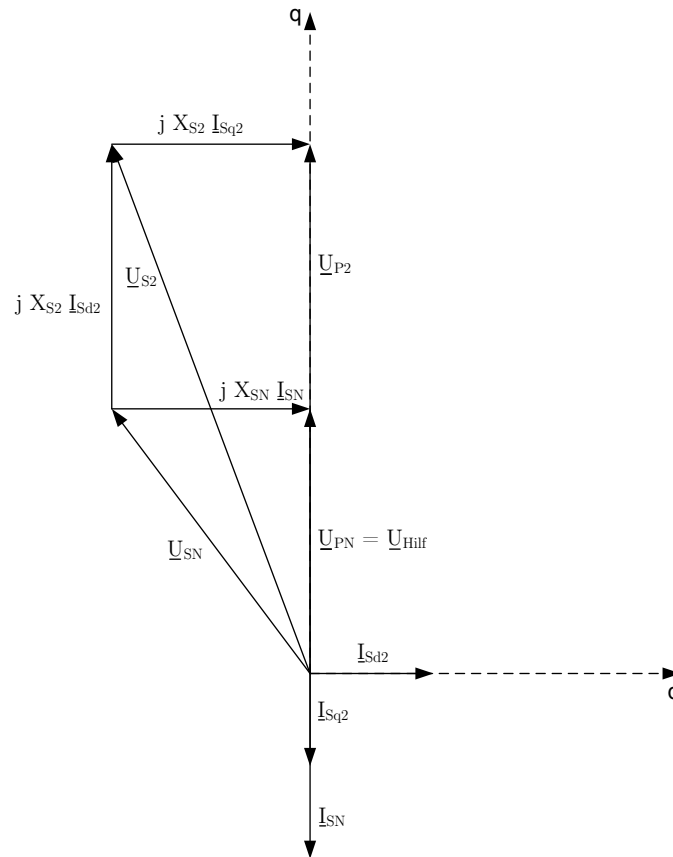
$X_{S2} \cdot I_{Sd2}$ ist dann die Differenz zwischen U_{P2} und U_{Hilf} :

$$X_{S2} \cdot I_{Sd2} = U_{P2} - U_{Hilf} \quad (65)$$

$$= 200 \text{ V} \quad (66)$$

$$I_{Sd2} = \boxed{46,67 \text{ A}} \quad (67)$$

Zeigerdiagramm:



e)

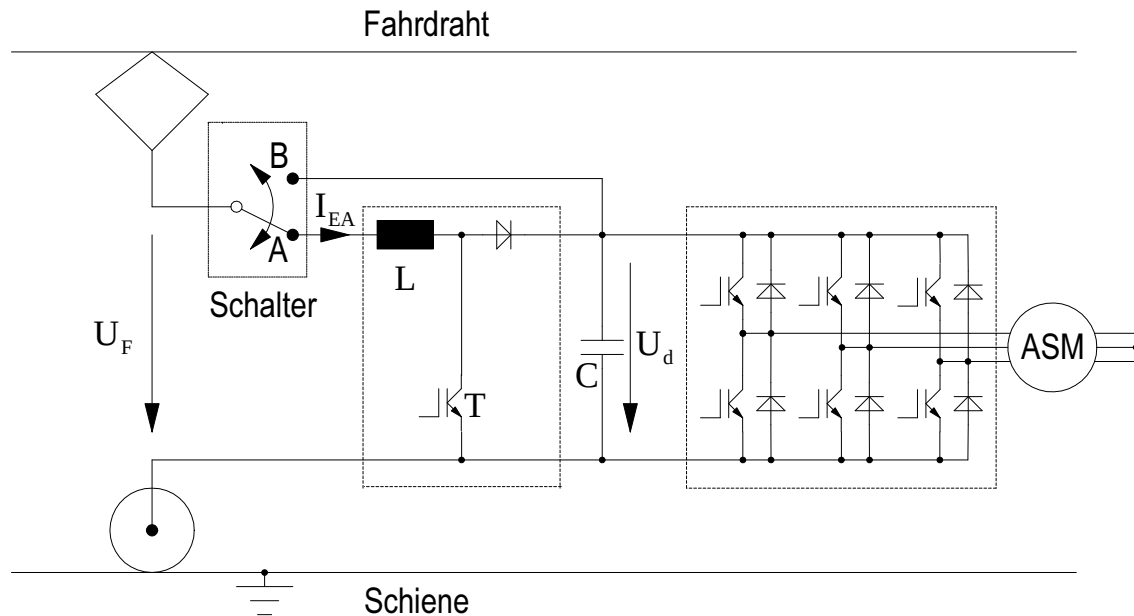
$$I_{S2} = \sqrt{I_{Sq2}^2 + I_{Sd2}^2} \quad (68)$$

$$= 58,34 \text{ A} \quad (69)$$

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

4 Antriebssystem für eine Mehrsystemlokomotive

Ein Lokomotivantrieb mit Drehstromasynchronmaschine als Fahrmotor soll wahlweise an 750 V Gleichspannung oder 1500 V Gleichspannung betrieben werden. Die Fahrdrachtspannung U_F wird mit einem Schalter entweder direkt oder über einen Gleichstromsteller zur Speisung einer selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung benutzt.



Vereinfachende Annahmen

- die Leistungshalbleiter seien ideal
- die Gleichspannung U_d sei ideal glatt ($C \rightarrow \infty$)

Folgende Daten sind gegeben

U_F	=	750 V oder 1500 V	Fahrdrachtspannung
U_{dN}	=	1500 V	Nennwert der Gleichspannung U_d
P_{elN}	=	500 kW	Nennleistung des Fahrmotors
L	=	3 mH	Induktivität

- Geben Sie die Schalterstellung für $U_F = 750$ V und $U_F = 1500$ V an. ($U_d = U_{dN}$)
- Berechnen Sie die Einschaltdauer des Transistors T für $U_F = 750$ V, Nennbelastung des Fahrmotors und eine Schaltfrequenz von $f = 500$ Hz.
- Berechnen Sie den Mittelwert des Stroms I_{EA} für den Betrieb nach b).
- Skizzieren Sie maßstäblich den Zeitverlauf des Stromes I_{EA} für den Betrieb nach b)
(100 A/cm, 0,5 ms/cm)
Hinweis: $U_d = U_{dN}$ ist als konstant anzunehmen
- Berechnen Sie den Effektivwert der Grundschiwingung der Leiterspannung an der Asynchronmaschine für Blocksteuerung ($U_d = U_{dN}$).
- Berechnen Sie den maximalen Effektivwert der Grundschiwingung der Leiterspannung an der Asynchronmaschine für Raumzeigermodulation ($U_d = U_{dN}$).
- Geben Sie an, welches der Verfahren nach e) und f) für das Anfahren und welches für das Erreichen der Höchstgeschwindigkeit benutzt wird. Begründen Sie Ihre Antwort.

Lösung

a) Es handelt sich um einen Hochstetzssteller. Daraus folgt, Schalterstellung

A ist für den Betrieb an 750 V und

B für den Betrieb an 1500 V.

b)

$$\frac{U_d}{U_F} = \frac{1}{1-a} = 2 \quad (70)$$

$$a = \frac{1}{2} \quad (71)$$

$$T_e = \frac{a}{f} = \boxed{1 \text{ ms}} \quad (72)$$

c) Der Mittelwert lässt sich über die aufgenommene Wirkleistung des Fahrmotors berechnen.

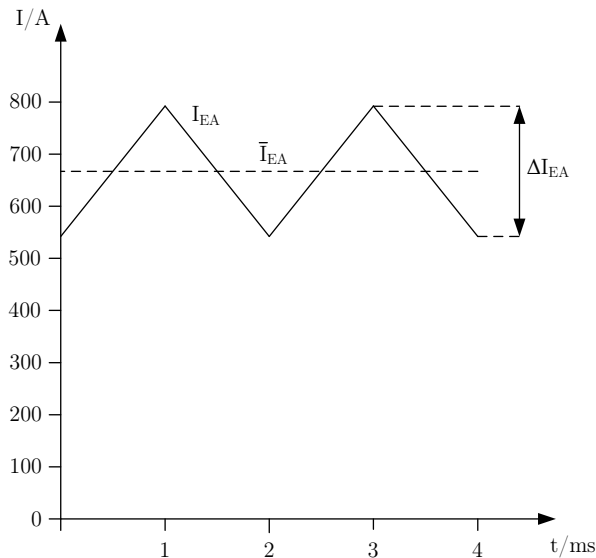
$$U_F \cdot \bar{I}_{EA} = P_F = P_{elN} \quad (73)$$

$$\bar{I}_{EA} = \frac{P_{elN}}{U_F} = \boxed{666,7 \text{ A}} \quad (74)$$

d)

$$\Delta I_{EA} = U_F \frac{T_e}{L} = 250 \text{ A} \quad (75)$$

Da der Betrieb stationär ist, ist der Strom an Anfang der Periode gleich dem am Ende der Periode.



e)

$$U_{1ab} = U_{1bc} = U_{1ca} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_{dN} = \boxed{1170 \text{ V}} \quad (76)$$

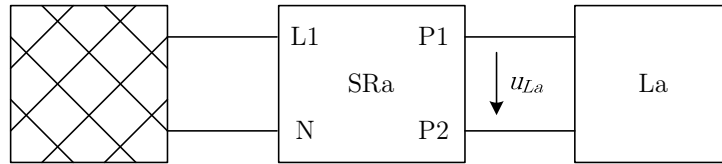
f)

$$U_{1ab} = U_{1bc} = U_{1ca} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{dN} = \boxed{1061 \text{ V}} \quad (77)$$

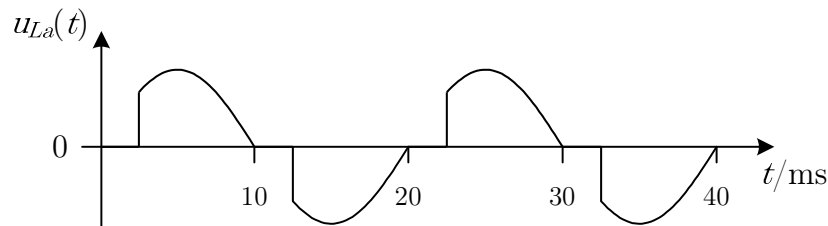
g) **Anfahren** Wegen $U \sim f$ muss die Spannung am Fahrmotor klein sein. Darum Raumzeigermodulation da die Spannung bis auf Null reduziert werden kann.

Höchstgeschwindigkeit Wegen $U \sim f$ muß die Spannung bei Höchstgeschwindigkeit maximal sein. Darum Blocktaktung.

5 Stromrichterschaltungen und elektrische Maschinen für verschiedene Anwendungen

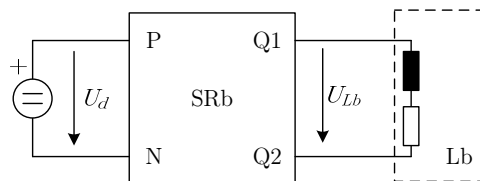


- a) Ein am Wechselstromnetz angeschlossener Stromrichter SRa speist eine Last L_a . Die Spannung an der Last hat den folgenden Verlauf $u_{La}(t)$:

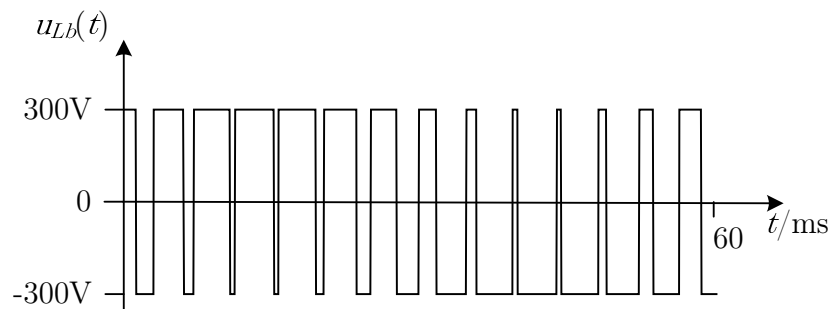


Geben Sie die Bezeichnung des Stromrichters an und zeichnen Sie das Schaltbild. Welches Steuerungsverfahren wird hier benutzt? Geben Sie die Bezeichnung der eingesetzten Halbleiter an.

- b)



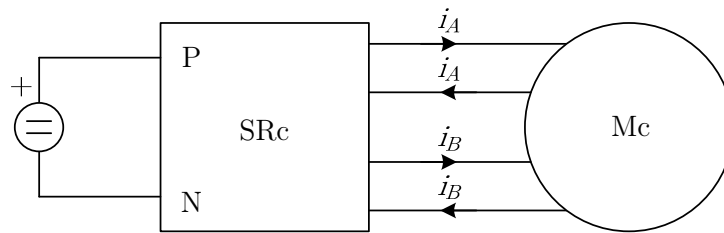
Ein an einer Gleichstromquelle angeschlossener Stromrichter SRb speist eine Last L_b . Die Spannung $u_{Lb}(t)$ hat den folgenden Zeitverlauf:



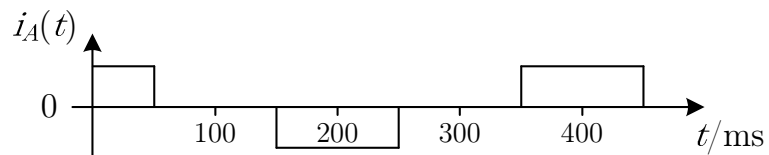
Geben Sie die Bezeichnung des Stromrichters an und zeichnen Sie das Schaltbild. Wie groß ist die Gleichspannung U_d , wenn die Halbleiter ideal sind? Geben Sie die Bezeichnung der eingesetzten Halbleiter an.

- c) Siehe nächste Seite

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



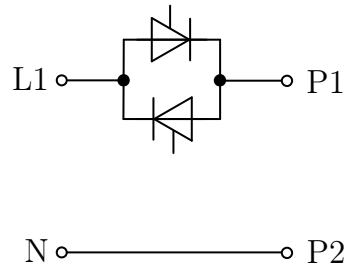
Der Strom $i_A(t)$ hat folgenden Verlauf:



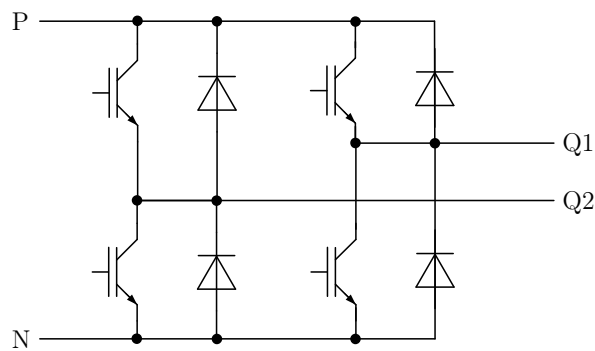
Geben Sie die Bezeichnung des Motors an. Zeichnen Sie einen zum Zeitverlauf von $i_A(t)$ passenden Zeitverlauf von $i_B(t)$ in das Diagramm auf der Rückseite Ihres Deckblatts ein. In welcher Betriebsart wird der Motor hier betrieben?

Lösung

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



- b) SRb ist eine selbstgeführte Wechselstrombrückenschaltung. Die Spannung U_d beträgt 300V. Als Halbleiter können IGBTs, GTOs oder MOSFETs eingesetzt werden. Bei IGBTs und GTOs sind Paralleldioden notwendig. Bei MOSFETs können diese vorhanden sein.



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

