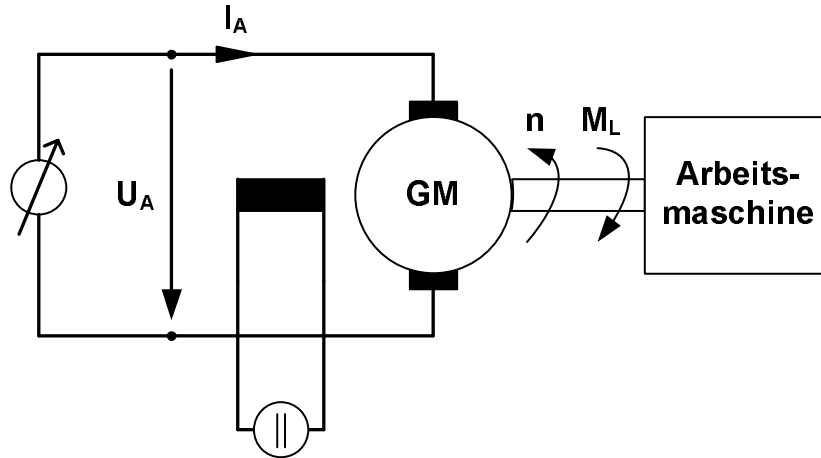


1 Stromrichtergespeiste Gleichstrommaschine

Eine fremderregte Gleichstrommaschine wird von einer steuerbaren Gleichspannungsquelle gespeist.



Folgende Daten der Gleichstrommaschine sind gegeben:

U_{AN}	=	400 V	Ankernennspannung
I_{AN}	=	50 A	Ankernennstrom
n_N	=	1500 min^{-1}	Nenndrehzahl
M_N	=	120 Nm	Nenndrehmoment
J	=	$1,5 \text{ kgm}^2$	Gesamtträgheitsmoment von Gleichstrommaschine und Arbeitsmaschine
M_L	=	40 Nm	Lastmoment für $n \geq 0$

Vereinfachende Annahmen:

- Bis auf die Stromwärmeverluste im Ankerkreis treten keine weiteren Verluste auf.
- Die Wirkung der Ankerkreisinduktivität kann vernachlässigt werden.

Die Gleichstrommaschine wird mit Nennerregung betrieben.

- Die Gleichstrommaschine soll zusammen mit der angekuppelten Arbeitsmaschine mit konstantem Drehmoment vom Stillstand auf Nenndrehzahl beschleunigt werden. Berechnen Sie den Wert des erforderlichen inneren Drehmoments M_{iH} der Gleichstrommaschine, wenn der Hochlauf $T_H = 3 \text{ s}$ dauern soll. Bestimmen Sie die Anzahl der für den Hochlauf erforderlichen Umdrehungen z_H .
- Berechnen Sie die für den Betrieb mit konstanter Nenndrehzahl n_N und Lastmoment M_L einzustellende Ankerspannung U_A .

Während des Betriebs nach b) wird die Speisespannungsquelle zum Zeitpunkt t_0 abgetrennt und das Lastmoment M_L bremst den Antrieb bis zur Drehzahl 0 ab.

- Berechnen Sie die Energie, die bei diesem Bremsvorgang in die Arbeitsmaschine eingespeist wird.
- Geben Sie den Zeitverlauf $u_A(t)$ während dieses Bremsvorgangs formelmäßig an und skizzieren Sie $u_A(t)$ beginnend bei $t = t_0$ bis zum Stillstand (Maßstab 100 V/cm und 0,5 s/cm).

Lösung

a) Das erforderliche Drehmoment kann aus der Bewegungsgleichung ermittelt werden:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_i - M_L) \quad (1)$$

Da das Drehmoment während der Beschleunigung konstant gehalten werden soll, kann die Bewegungsgleichung als Differenzengleichung ausgewertet werden:

$$\frac{\Delta\Omega}{\Delta t} = \frac{1}{J} \cdot (M_i - M_L) \quad (2)$$

$$\Rightarrow M_{iH} = M_L + J \cdot \frac{2\pi \cdot n_N}{T_H} = 118,54 \text{ Nm} \quad (3)$$

Während des Beschleunigungsvorgangs wird der Winkel α überstrichen:

$$\alpha = \int_0^{T_H} \Omega(t) dt \quad (4)$$

Der Verlauf der Drehzahl lautet

$$\Omega(t) = \frac{\Omega_N}{T_H} \cdot t \quad (5)$$

Damit ergibt sich α zu

$$\alpha = \int_0^{T_H} \frac{\Omega_N}{T_H} \cdot t dt = \frac{\Omega_N}{T_H} \cdot \frac{1}{2} \cdot t^2 \Big|_0^{T_H} = \frac{1}{2} \cdot \Omega_N \cdot T_H = 235,62 \text{ rad} \quad (6)$$

Die Anzahl der erforderlichen Umdrehungen ergibt sich dann zu

$$z_H = \frac{\alpha}{2\pi} = 37,5 \quad (7)$$

b) Die Ankerspannung beträgt

$$U_A = R_A \cdot I_A + c\phi_N \cdot \Omega, \quad (8)$$

wobei die Drehzahl der Nenndrehzahl entspricht. Der Ankerwiderstand, die Nennerregung und der Ankerstrom müssen noch ermittelt werden, um die Spannung zu berechnen.

Die Nennerregung lässt sich aus dem Nennmoment bestimmen zu

$$c\phi_N = \frac{M_N}{I_{AN}} = 2,4 \text{ Vs} \quad (9)$$

Der für das Lastmoment benötigte Ankerstrom beträgt damit

$$I_A = \frac{M_L}{c\phi_N} = 16,67 \text{ A} \quad (10)$$

Der Ankerwiderstand lässt sich aus dem Nennbetrieb berechnen:

$$R_A = \frac{U_{AN} - c\phi_N \cdot \Omega_N}{I_{AN}} = 460,2 \text{ m}\Omega \quad (11)$$

Die einzustellende Spannung beträgt damit

$$U_A = R_A \cdot I_A + c\phi_N \cdot \Omega_N = 384,66 \text{ V} \quad (12)$$

- c) Die gesamte rotatorische Bewegungsenergie wird aus der Maschinenanordnung in die Lastmaschine gespeist:

$$W = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega_N^2 = 18,51 \text{ kWs} \quad (13)$$

- d) Für die Spannung gilt

$$u_A(t) = c\phi_N \cdot \Omega(t) \quad (14)$$

mit

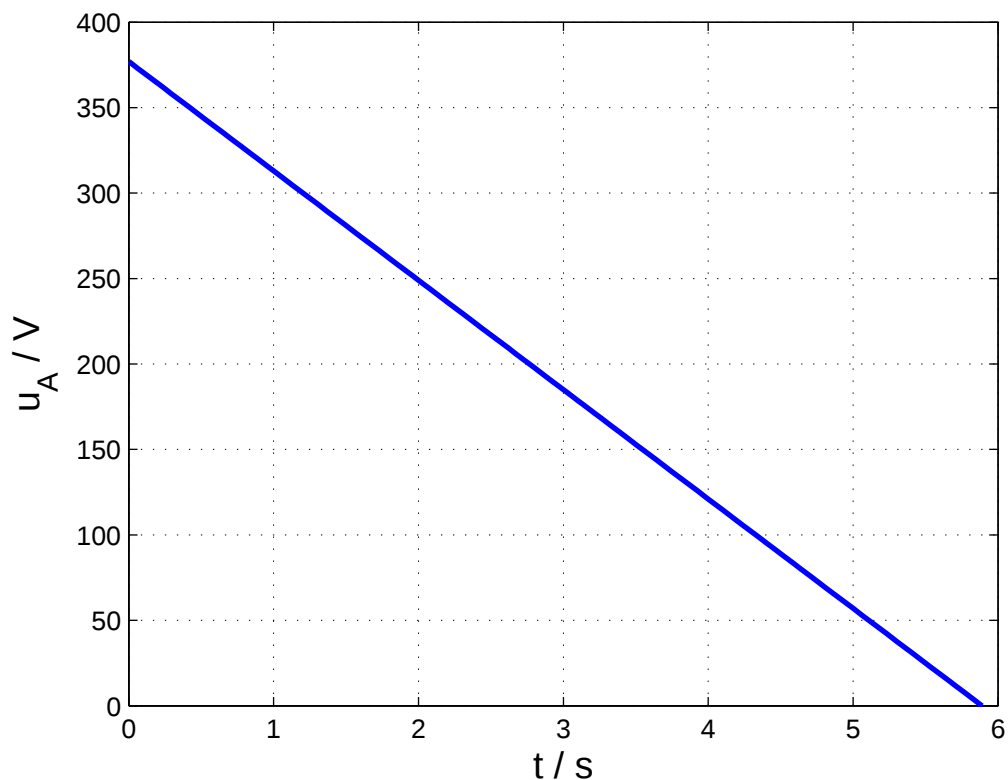
$$\Omega(t) = \Omega_N - \frac{M_L}{J} \cdot t \quad (15)$$

Für die Zeichnung werden zwei Punkte berechnet, z.B. die Spannung zum Zeitpunkt t_0 :

$$\Omega(t_0) = \Omega_N \Rightarrow u_A(t_0) = c\phi_N \cdot \Omega_N = 376,99 \text{ V} \quad (16)$$

sowie der Zeitpunkt, zu dem die Drehzahl und damit auch die Spannung 0 sind:

$$0 \stackrel{!}{=} \Omega_N - \frac{M_L}{J} \cdot t_1 \Rightarrow t_1 = \frac{J \cdot \Omega_N}{M_L} = 5,89 \text{ s} \quad (17)$$



2 Drehstrom-Synchrongenerator mit Turboläufer

Folgende Daten des Synchrongenerators sind gegeben:

f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
U_N	=	27 kV	Nennleiterspannung des Generators (Effektivwert)
P_N	=	950 MW	Nennwirkleistung
p	=	2	Polpaarzahl des Synchrongenerators
$\cos \varphi_N$	=	0,8 übererregt	Nennleistungsfaktor
I_{Sk}	=	32 kA	Dauerkurzschlussstrom bei synchroner Drehzahl und Nennerregung

Vereinfachende Annahmen:

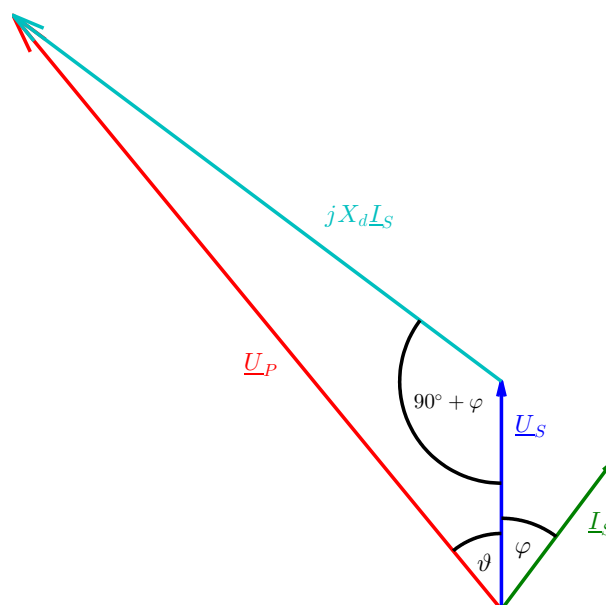
- Der Generator speist ein ideales Drehstromnetz, dessen Frequenz und Anschlussspannung den Nennwerten des Generators entspricht.
- Verluste werden vernachlässigt.

Der Erregerstrom wird für a) bis d) auf seinen Nennwert eingestellt.

- Skizzieren Sie das Zeigerdiagramm im übererregten Generatorbetrieb qualitativ.
- Berechnen Sie den Polradwinkel ϑ_N im Nennbetrieb.
- Berechnen Sie das Drehmoment M_N im Nennbetrieb.
- Berechnen Sie die Blindleistung Q_N im Nennbetrieb.
- Jetzt soll der Arbeitspunkt des Generators bei unveränderter Wirkleistungsabgabe in den untererregten Betriebsbereich verschoben werden. Welcher Stelleingriff ist dafür erforderlich?

Lösung

a)



b) Aus dem Zeigerdiagramm ergibt sich mit dem Sinussatz

$$\frac{\sin \vartheta}{I_S \cdot X_S} = \frac{\sin(90^\circ + \varphi)}{U_P} = \frac{\cos(\varphi)}{U_P} \quad (18)$$

Aufgelöst nach $\sin \vartheta$ und die Nennwerte eingesetzt:

$$\sin \vartheta_N = I_N \cdot \cos \varphi_N \cdot \frac{X_S}{U_{PN}} \quad (19)$$

Im Kurzschlussfall liegt die gesamte Polradspannung über der Synchronreaktanzen an. Der Dauerkurzschlussstrom bei Nennerregung und Nenndrehzahl errechnet sich damit aus

$$I_{SK} = \frac{U_{PN}}{X_S} \implies \frac{X_S}{U_{PN}} = \frac{1}{I_{SK}} \quad (20)$$

Dies eingesetzt ergibt

$$\sin \vartheta_N = \frac{I_N \cdot \cos \varphi_N}{I_{SK}} \quad (21)$$

Für die Auswertung wird noch der Nennstrom bzw. das Produkt $I_N \cdot \cos \varphi$ benötigt. Dies lässt sich aus der Nennleistung ermitteln:

$$P_N = \sqrt{3} \cdot U_N I_N \cos \varphi_N \implies I_N \cos \varphi_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad (22)$$

Der Polradwinkel im Nennbetrieb beträgt damit

$$\vartheta_N = \arcsin \left(\frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{SK}} \right) = 39,4^\circ \quad (23)$$

c) Das Nennmoment lässt sich direkt aus Nennleistung und Nenndrehzahl bestimmen:

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N \cdot p}{2\pi \cdot f_N} = 6,05 \text{ MNm} \quad (24)$$

d) Wirk- und Blindleistung betragen allgemein

$$Q_N = S_N \sin \varphi_N \quad (25)$$

$$P_N = S_N \cos \varphi_N \quad (26)$$

Ineinander eingesetzt ergibt sich für die Blindleistung

$$Q_N = \frac{P_N}{\cos \varphi_N} \cdot \sin \varphi_N = 712,5 \text{ Mvar} \quad (27)$$

e) Die Polradspannung muss verringert werden. Dies ist durch Verkleinern des Erregerstroms möglich.

3 Drehstromasynchronmaschine mit Kurzschlussläufer

Ein Drehstromasynchronmotor mit Kurzschlussläufer wird an Nennspannung und Nennlast betrieben.

Folgende Daten sind gegeben:

U_N	=	460 V	Nennspannung (Effektivwert)
I_N	=	10 A	Nennstrom
f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
n_N	=	1450 min ⁻¹	Nennzahl
$\cos \varphi_N$	=	0,87	Leistungsfaktor im Nennbetrieb
P_N	=	6,0 kW	Mechanische Leistung im Nennpunkt

- Berechnen Sie die aufgenommene elektrische Leistung, die Verlustleistung im Nennbetrieb und den Wirkungsgrad im Nennbetrieb.
- Geben Sie die Polpaarzahl an ($s_N < 0,2$).
- Berechnen Sie den Nennschlupf und das Nennmoment des Motors.

Der Motor soll jetzt durch eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung gespeist werden.

- Welchen Wert muss die Gleichspannung U_d der selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung haben, damit der Motor bei Blocksteuerung im Nennpunkt betrieben werden kann?
- Zeichnen Sie die Raumzeiger der Sternspannungen für die bei der Blocktaktung benutzten Schaltzustände (komplexe Ebene mit 100 V/cm). Für die Bestimmung der Raumzeiger ist der im WS2011/12 verwendete Vorfaktor für die amplitudeninvariante Raumzeigerdarstellung zu benutzen.

Lösung

a)

$$P_{el} = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N = 6,93 \text{ kW} \quad (28)$$

$$P_V = P_{el} - P_N = 932 \text{ W} \quad (29)$$

$$\eta = \frac{P_N}{P_{el}} = 0,866 \quad (30)$$

b) $p = 2$

c)

$$s_N = \frac{n_{syn} - n_N}{n_{syn}} = 0,033 \quad (31)$$

Das Nennmoment kann aus der Nennleistung ermittelt werden:

$$P_N = M_N \cdot \Omega_N = M_N \cdot 2\pi \cdot n_N \quad (32)$$

$$M_N = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N} = 39,5 \text{ Nm} \quad (33)$$

d) Bei der Blocktaktung beträgt der Effektivwert der Grundschiwingung der Außenleiterspannung

$$U_{1ab} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d \quad (34)$$

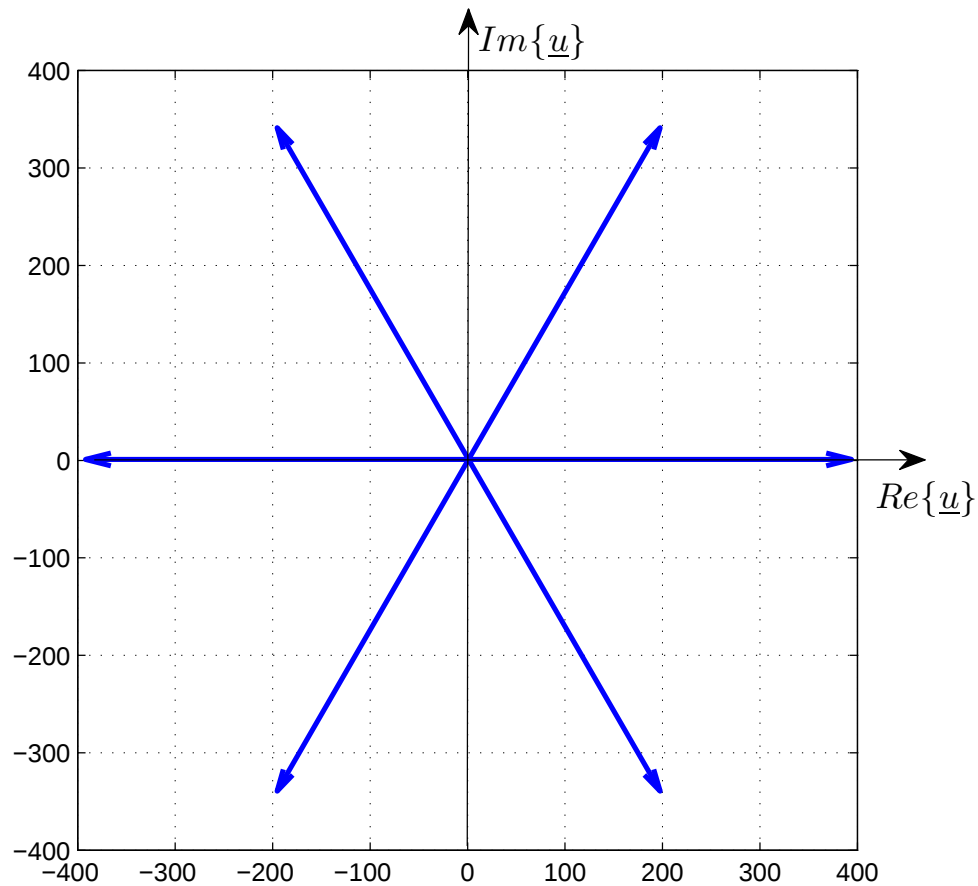
Um die Nennspannung der Asynchronmaschine zu erreichen, muss die Gleichspannung demnach folgenden Wert haben:

$$U_d = U_N \cdot \frac{\pi}{\sqrt{6}} = 589,97 \text{ V} \quad (35)$$

e) Länge der Raumzeiger:

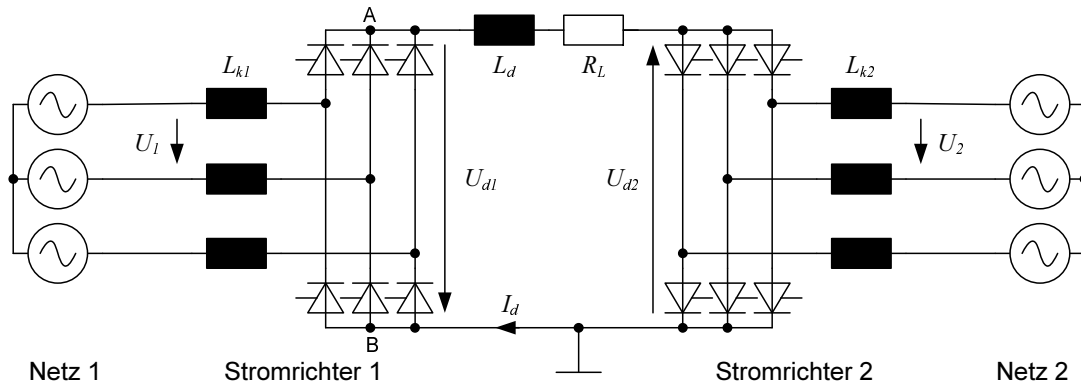
$$|\underline{u}| = \frac{2}{3} \cdot U_d = 393,31 \text{ V} \quad (36)$$

Bei der Blocktaktung werden die sechs Schaltzustände mit von Null verschiedener Ausgangsspannung genutzt. Raumzeigerdarstellung der zugehörigen Ausgangsspannungen:



4 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung für große Entfernungen

Elektrische Energie soll vom Netz 1 zum Netz 2 übertragen werden (vereinfachte Anordnung).



Folgende Daten sind gegeben:

U_{N1}	=	500 kV	Leiterspannung Netz 1
U_{N2}	=	450 kV	Leiterspannung Netz 2
I_{dN}	=	1200 A	Nenngleichstrom
L_{k1}	=	150 mH	Kommutierungsinduktivität Netz 1
L_{k2}	=	100 mH	Kommutierungsinduktivität Netz 2
f_1	=	50 Hz	Netzfrequenz des Netzes 1
f_2	=	50 Hz	Netzfrequenz des Netzes 2

Der Gesamtwiderstand der Übertragungsleitung wird durch R_L modelliert:

$$R_L = 5 \Omega$$

Vereinfachende Annahmen:

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

- Berechnen Sie den maximal zulässigen Steuerwinkel des Stromrichters 2 bei Nenngleichstrom I_{dN} und Nennspannung $U_2 = U_{2N}$.
Berechnen Sie den Wert der Gleichspannung U_{d2} in diesem Betriebsfall.
- Der Stromrichter 2 wird jetzt mit dem Steuerwinkel $\alpha_2 = 130^\circ$ betrieben.
Berechnen Sie die Spannung U_{d1} , die am Stromrichter 1 eingestellt werden muss, um den Nennstrom einzustellen.
- Skizzieren Sie den Zeitverlauf eines Thyristorstroms bei $I_d = I_{dN}$ während zwei Perioden der Netzfrequenz und berechnen Sie dessen Mittelwert.
Zur Beantwortung dieser Frage wird eine vereinfachte Betrachtung mit $L_{k1} = 0$ und ein beliebiger Steuerwinkel akzeptiert.
- Geben Sie an, in welchen wesentlichen Punkten die obige Anordnung gegenüber tatsächlich ausgeführten Anlagen vereinfacht ist (Anregungen: Stromrichterschaltung, zusätzliche Drosselspulen, zusätzliche Kondensatoren).

Lösung

a) Die Summe aus α und u soll maximal sein, also 180° betragen. Damit lässt sich α_{max} bestimmen:

$$\cos(\alpha_{max} + u) = \cos \alpha_{max} - \frac{2\omega L_{k2} I_{dN}}{\sqrt{2} U_{N2}} \stackrel{!}{=} -1 \quad (37)$$

$$\Rightarrow \alpha_{max} = \arccos\left(\frac{2\omega L_{k2} I_{dN}}{\sqrt{2} U_{N2}} - 1\right) = 151,83^\circ \quad (38)$$

Die Gleichspannung U_{d2} beträgt dann

$$U_{d2} = U_{di} \cos \alpha_{max} - \frac{3}{\pi} \cdot \omega L_{k2} I_{dN} \quad (39)$$

$$= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{N2} \cdot \cos \alpha_{max} - \frac{3}{\pi} \cdot \omega L_{k2} I_{dN} = -571,73 \text{ kV} \quad (40)$$

b) Mit dem angegebenen Steuerwinkel von 130° beträgt die Gleichspannung U_{d2}

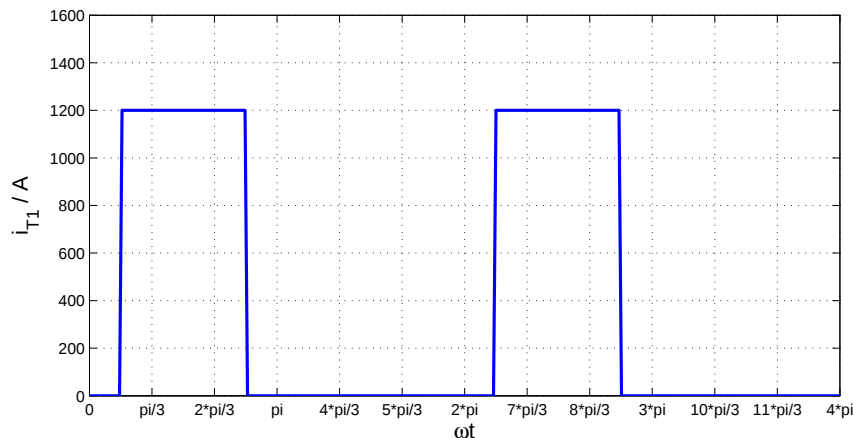
$$U_{d2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{N2} \cdot \cos 130^\circ - \frac{3}{\pi} \cdot \omega L_{k2} I_{dN} = -426,63 \text{ V} \quad (41)$$

Um den Nenngleichstrom einzuprägen, muss die Spannung U_{d1} wie folgt eingestellt werden:

$$I_{dN} = \frac{U_{d1} + U_{d2}}{R_L} \quad (42)$$

$$\Rightarrow U_{d1} = I_{dN} R_L - U_{d2} = 432,63 \text{ kV} \quad (43)$$

c) Verlauf des Stroms an einem Thyristor:



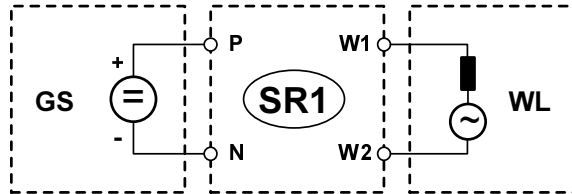
Der Thyristor leitet während $\frac{1}{3}$ der Netzperiode ($T = 20 \text{ ms}$, $\omega \cdot T = 2\pi$). Die Amplitude des rechteckförmigen Stroms entspricht dem Gleichstrom. Der Mittelwert beträgt somit

$$\bar{i}_{T1} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{dN} dt = \frac{1}{3} \cdot I_{dN} = 400 \text{ A} \quad (44)$$

- d)
- Jedes Thyristor-Schaltensymbol steht für viele in Reihe geschaltete Thyristoren
 - es werden 12-pulsige Stromrichterschaltungen genutzt, also zwei Drehstrombrücken in Reihe geschaltet
 - es wird jeweils ein komplettes Teilsystem für die positive und negative Spannung gegen Erde benutzt
 - der Netzanschluss der Drehstrombrücken geschieht über Transformatoren
 - Die Drossel im Gleichstromkreis besteht sowohl im Hin- als auch im Rückleiter
 - auf AC- und DC-Seite werden jeweils Saugkreise und Filter, bestehend aus Kondensatoren und Drosseln, eingebaut.

5 Stromrichterschaltungen für unterschiedliche Anforderungen

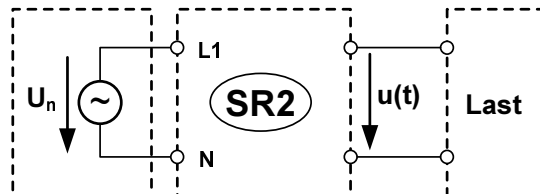
a)



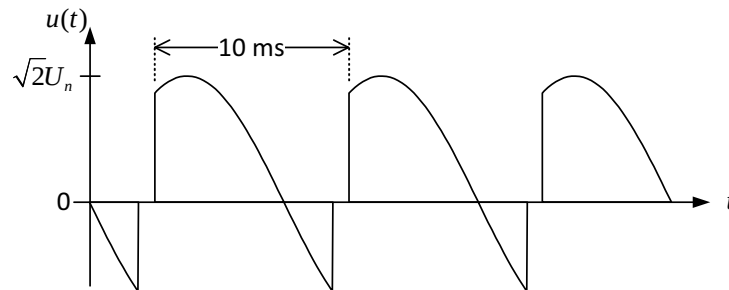
Ein Stromrichter SR1 soll eine einphasige Wechselstromlast WL mit voreilem Blindstrom speisen (Leistungsbereich: ca. 500 kW). Als Energiequelle steht eine Gleichspannungsquelle GS zur Verfügung.

Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR1 zwischen den Anschlussklemmen P , N und W_1 , W_2 und geben Sie die Bezeichnung der Schaltung an.

b)

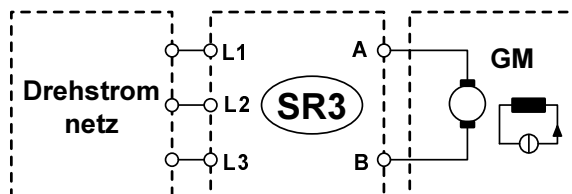


Am Ausgang eines Stromrichters SR2 wird ein Spannungsverlauf $u(t)$ wie folgt gemessen:



Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR2 einschließlich einer typischen Last und geben Sie die Bezeichnung der Schaltung an.

c)

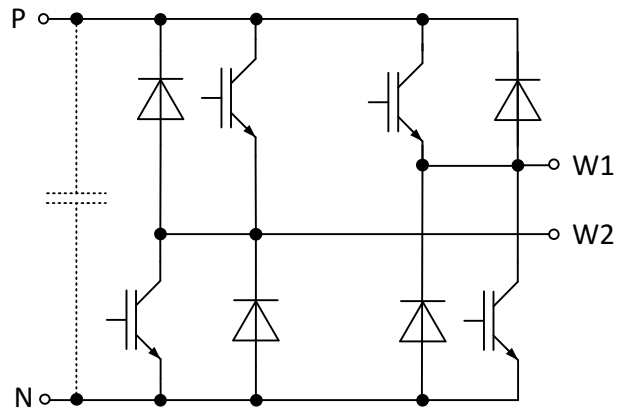


Eine fremderregte Gleichstrommaschine GM soll in allen vier Quadranten der Drehzahl-Drehmomentebene betrieben werden. Als Speisequelle steht ein Drehstromnetz zur Verfügung.

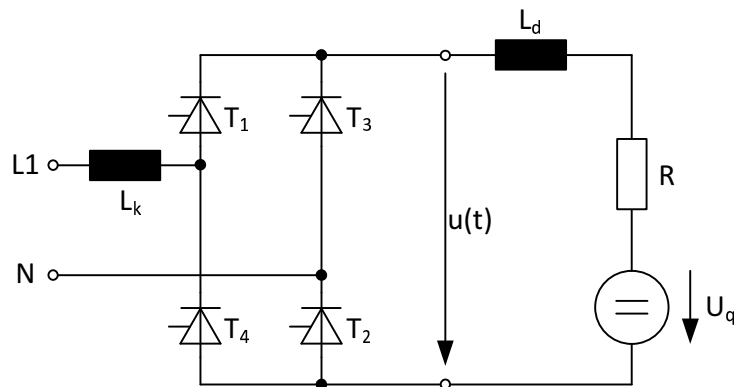
Skizzieren Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR3 zwischen den Anschlussklemmen L_1 , L_2 , L_3 und A , B . Geben Sie die Bezeichnung der Schaltung an.

Lösung

a) Selbstgeführte Wechselstrombrückenschaltung:



b) Netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung:



c) Netzgeführter Vierquadrantenstromrichter:

