

1 Gleichstromantrieb

Ein Antrieb mit einer fremderregten kompensierten Gleichstrommaschine soll in möglichst kurzer Zeit auf Nenndrehzahl beschleunigt werden.

Folgende Daten der Gleichstrommaschine sind gegeben:

J	$= 2 \text{ kgm}^2$	Läuferträgheitsmoment
$P_{N,el}$	$= 6 \text{ kW}$	elektrische Nennleistung
n_{0N}	$= 1200 \text{ min}^{-1}$	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und Nennerregung
$I_{A,max}$	$= 2 \cdot I_{AN}$	maximal zulässiger Ankerstrom
U_{AN}	$= 240 \text{ V}$	Ankernennspannung
n_N	$= 1100 \text{ min}^{-1}$	Nenndrehzahl
M_L	$= 30 \text{ Nm}$	konstantes Lastmoment

Vereinfachende Annahmen:

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

Die Maschine wird mit Nennerregung betrieben.

- Berechnen Sie die Zeitdauer und die Anzahl der Umdrehungen, wenn der Antrieb mit Maximalstrom $I_{A,max}$ vom Stillstand auf Nenndrehzahl beschleunigt wird.
- 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.
- Tragen Sie die Zeitverläufe des Ankerstroms, der Drehzahl und der Ankerspannung aus a) und b) maßstäblich in ein gemeinsames Diagramm ein (Maßstab 10 A/cm , $200 \text{ min}^{-1}/\text{cm}$, 40 V/cm und 1 s/cm).

Lösung

- Das maximale Drehmoment bei maximalem Ankerstrom beträgt:

$$M_{max} = c\Phi_N \cdot I_{A,max} = 2 \cdot c\Phi_N \cdot I_{AN} \quad (1)$$

$c\Phi_N$ lässt sich aus der Leerlaufdrehzahl bestimmen:

$$U_{AN} = c\Phi_N \cdot n_{0N} \cdot 2\pi \quad (2)$$

$$c\Phi_N = \frac{U_{AN}}{2\pi \cdot n_{0N}} = 1,91 \text{ Vs} \quad (3)$$

I_{AN} ergibt sich aus der elektrischen Nennleistung:

$$I_{AN} = \frac{P_{N,el}}{U_{AN}} = 25 \text{ A} \quad (4)$$

Das maximale Drehmoment beträgt somit

$$M_{max} = 2 \cdot c\Phi_N \cdot I_{AN} = 95,5 \text{ Nm} \quad (5)$$

Für die Beschleunigung gilt die Bewegungsgleichung:

$$M_b = J \cdot \dot{\Omega} \quad (6)$$

Bei konstanter Beschleunigung und konstantem Lastmoment kann diese in eine Differenzengleichung umgewandelt werden:

$$\frac{\Delta\Omega}{\Delta t} = \frac{M_{max} - M_L}{J} \quad (7)$$

Aufgelöst nach Δt und die Startwerte $t_0 = 0$, $\Omega_0 = 0$ sowie den Endwert $\Omega_e = \Omega_N$ eingesetzt, ergibt sich

$$t_e = \frac{\Omega_N \cdot J}{M_{max} - M_L} = \frac{2\pi \cdot n_N \cdot J}{M_{max} - M_L} = 3,517 \text{ s} \quad (8)$$

Während des Beschleunigungsvorgangs wird der Winkel α überstrichen:

$$\alpha = \int_0^{t_e} \Omega(t) dt \quad (9)$$

Der Verlauf der Drehzahl lautet

$$\Omega(t) = \frac{M_{max} - M_L}{J} \cdot t \quad (10)$$

Damit ergibt sich α zu

$$\alpha = \int_0^{t_e} \frac{M_{max} - M_L}{J} \cdot t dt = \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{max} - M_L}{J} \cdot t_e^2 = 202,58 \text{ rad} \quad (11)$$

Die Anzahl der Umdrehungen ergibt sich dann zu

$$z_H = \frac{\alpha}{2\pi} = 32,2 \quad (12)$$

b) Da die Drehzahl konstant gehalten werden soll, muss gelten:

$$M = M_L \quad (13)$$

Der Ankerstrom beträgt dann

$$I_A = \frac{M_L}{c\Phi_N} = 15,71 \text{ A} \quad (14)$$

c) Die Zeitverläufe der Drehzahl und des Stromes sind bereits bekannt. Der Zeitverlauf der Spannung muss hingegen noch berechnet werden. Aufgrund des linearen Verlaufs genügt es, die Spannung zu drei Zeitpunkten auszurechnen.

Allgemein gilt:

$$u_A(t) = R_A \cdot i_A(t) + c\phi_N \cdot \Omega(t) \quad (15)$$

Der Wert des Widerstands ist noch unbekannt und muss aus der Ankerspannungsgleichung im Nennbetrieb bestimmt werden:

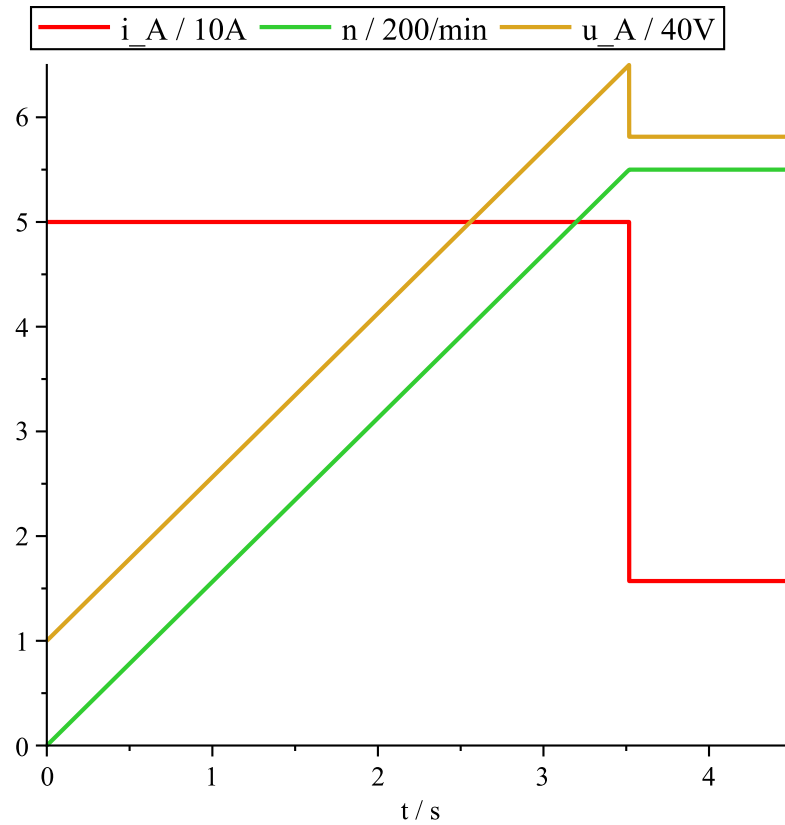
$$R_A = \frac{U_{AN} - c\Phi_N \cdot 2\pi \cdot n_N}{I_{AN}} = 800 \text{ m}\Omega \quad (16)$$

Die Ankerspannung zu den Zeitpunkten $t = 0$, $t \rightarrow t_e - 0$ und $t \rightarrow t_e + 0$ beträgt dann

$$u_A(t = 0) = 2 \cdot I_{AN} \cdot R_A = 40 \text{ V} \quad (17)$$

$$u_A(t \rightarrow t_e - 0) = 2 \cdot I_{AN} \cdot R_A + c\Phi_N \cdot 2\pi \cdot n_N = 260 \text{ V} \quad (18)$$

$$u_A(t \rightarrow t_e + 0) = \frac{M_L}{c\Phi_N} \cdot R_A + c\Phi_N \cdot 2\pi \cdot n_N = 232,57 \text{ V} \quad (19)$$



2 Drehstromasynchronmaschine mit Kurzschlussläufer

Eine Drehstromasynchronmaschine mit Kurzschlussläufer treibt eine Pumpe an. Der Motor ist direkt an das Netz angeschlossen.

Folgende Daten sind gegeben:

U_N	=	400 V	Nennspannung
I_N	=	34,5 A	Nennstrom
f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
$\cos \varphi_N$	=	0,86	Nennleistungsfaktor
P_N	=	18,5 kW	mechanische Nennleistung
n_N	=	2930 min ⁻¹	Nenndrehzahl
$\frac{I_A}{I_N}$	=	7,9	Anlauf- zu Nennstrom
$\frac{M_A}{M_N}$	=	2,8	Anlauf- zu Nennmoment

Vereinfachende Annahmen:

- Die Asynchronmaschine sei sättigungs- und stromverdrängungsfrei.
 - Reibungsverluste können vernachlässigt werden.
 - Das Netz ist eine ideale Drehspannungsquelle.
- Berechnen Sie das Nennmoment.
 - Berechnen Sie die Rotorverluste im Nennpunkt.
 - Berechnen Sie die gesamten Verluste, die im Nennbetrieb anfallen.
 - Berechnen Sie die beim Anlauf ($n = 0 \text{ min}^{-1}$) auftretende Rotorverlustleistung.
 - Berechnen Sie die beim Anlauf ($n = 0 \text{ min}^{-1}$) aufgenommene Scheinleistung.
 - Mit Hilfe dreier Kondensatoren in Sternschaltung soll der Blindstrom der Asynchronmaschine im Nennbetrieb kompensiert werden. Berechnen Sie den erforderlichen Kapazitätswert.
 - Durch welche Maßnahme wird der Motor aus dem Nennbetrieb in den Gegenstrombremsbetrieb gebracht? (Bitte kurze Antwort mit kleinem Schaltbild.)

Lösung

a)

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N} = 60,29 \text{ Nm} \quad (20)$$

b) Zunächst muss der Nennschlupf ausgerechnet werden:

$$s_N = \frac{n_{syn} - n_N}{n_{syn}} = \frac{f_N \cdot p - n_N}{f_N \cdot p} = 0,023 \quad (21)$$

Die Polpaarzahl wurde anhand der Nenndrehzahl zu $p = 1$ abgelesen.

Die Rotorverlustleistung im Nennbetrieb lässt sich bestimmen zu

$$P_{VR,N} = s_N \cdot P_{D,N} \quad (22)$$

$$P_N = (1 - s_N) \cdot P_{D,N} \quad (23)$$

$$\Rightarrow P_{VR,N} = \frac{s_N \cdot P_N}{1 - s_N} = 441,98 \text{ W} \quad (24)$$

c) Differenz aus aufgenommener elektrischer Nennleistung und mechanischer Nennleistung:

$$P_{V,N} = P_{el,N} - P_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N - P_N = 2,056 \text{ kW} \quad (25)$$

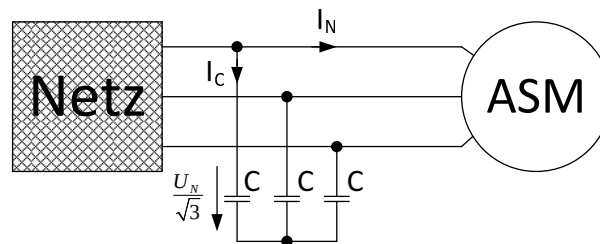
d) Im Anlauf beträgt der Schlupf $s = 1$, die Drehfeldleistung entspricht dem Anlaufmoment multipliziert mit der synchronen Frequenz. Damit gilt

$$P_{VR} = s \cdot P_D = 1 \cdot M_A \cdot 2\pi \cdot f_N = 1 \cdot 2,8 \cdot M_N \cdot 2\pi \cdot f_N = 53,03 \text{ kW} \quad (26)$$

e) Mit der Angabe zum Anfahrstrom lässt sich die Scheinleistung berechnen zu

$$S = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_A = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot 7,9 \cdot I_N = 188,83 \text{ kVA} \quad (27)$$

f) Die Kondensatoren sollen in Stern geschaltet werden:



Der Blindstrom der Asynchronmaschine beträgt

$$I_{Q,N} = I_N \cdot \sin(\varphi_N) = 17,61 \text{ A} \quad (28)$$

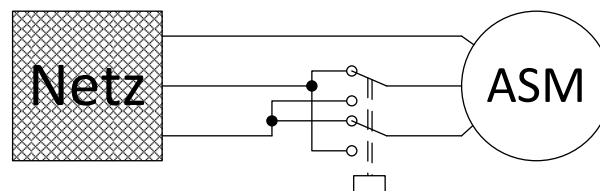
Über jedem Kondensator liegt die Spannung $\frac{U_N}{\sqrt{3}}$ an. Um genau den Blindstrom zu kompensieren, muss die Kapazität der einzelnen Kondensatoren dann folgenden Wert betragen:

$$I_C = I_{Q,N} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{X_C} \quad (29)$$

$$\Rightarrow X_C = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{I_{Q,N}} = 13,11 \Omega \quad (30)$$

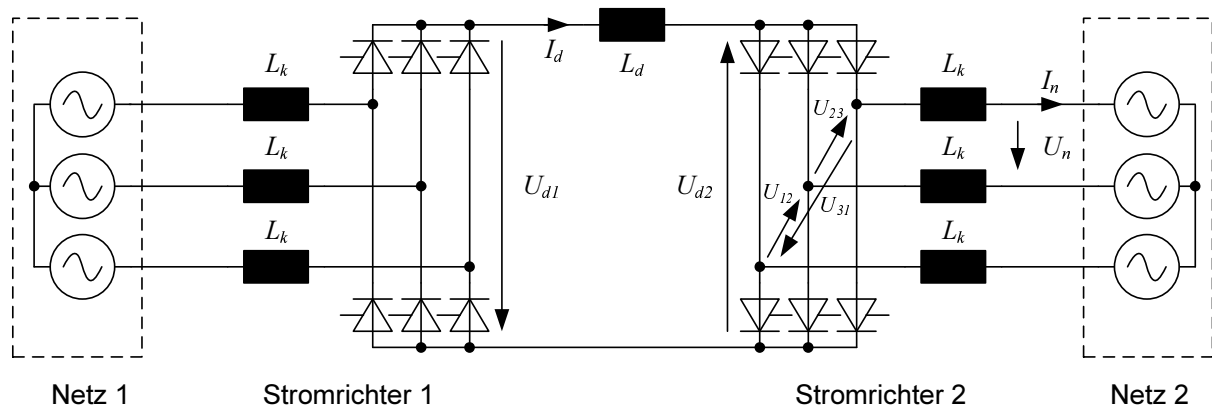
$$\Rightarrow C = \frac{1}{2\pi \cdot f_N \cdot X_C} = 242,72 \mu\text{F} \quad (31)$$

g) Durch vertauschen zweier Phasen:



3 Netzkurzkupplung

Über eine Kurzkupplung, bestehend aus den Stromrichtern $SR1$ und $SR2$, soll elektrische Leistung von *Netz 1* nach *Netz 2* übertragen werden.



Folgende Daten sind gegeben:

Daten des Netzes und der Drehstrombrückenschaltungen

$U_{n,N}$	=	220 kV	Nennleiterspannungen der Drehstromnetze (Effektivwert)
$I_{n,N}$	=	1200 A	Nennstrom der Drehstrombrücken (Effektivwert)
L_k	=	50 mH	Induktivität der Kommutierungsdrosseln der Drehstrombrückenschaltungen
f_1	=	50 Hz	Nennfrequenz des Drehstromnetzes 1
f_2	=	60 Hz	Nennfrequenz des Drehstromnetzes 2
t_S	=	400 μ s	Schonzeit der Thyristoren

Vereinfachende Annahmen:

- Die Kommutierungsdrosseln und die Thyristoren seien verlustfrei.
- Die Drehstromnetze seien ideal.

- a) Berechnen Sie den an der Wechselrichtertrittgrenze maximal zulässigen Steuerwinkel α_{max} des Stromrichters $SR2$ bei $I_d = 1465$ A.

In den Aufgabenpunkten b) und c) darf die Auswirkung der Kommutierungsdrosseln vernachlässigt werden.

- b) Tragen Sie qualitativ den Zeitverlauf der Spannung $u_{d2}(t)$ bei einem Steuerwinkel von $\alpha = 135^\circ$ für den Stromrichter $SR2$ in das vorgefertigte Diagramm der Leiterspannungen auf der Rückseite des Deckblattes ein.
- c) Um eine Wechselrichterkippung zu vermeiden, wird U_{d2} auf $U_{d2,min} = -260$ kV beschränkt. Berechnen Sie die maximale Leistung, die unter dieser Beschränkung bei Nennstrom $I_n = I_{n,N}$ in das *Netz 2* eingespeist werden kann.
- d) Durch welche Maßnahme kann der Leistungsfluss ohne Änderung der Schaltung umgekehrt werden, so dass Leistung von *Netz 2* nach *Netz 1* übertragen wird?

Lösung

a) Mittels der angegebenen Schonzeit t_S lässt sich der Löschwinkel der Thyristoren berechnen zu

$$\gamma = 2\pi \cdot f_2 \cdot t_S = 0,151 \text{ rad} \quad (32)$$

Für Betrieb an der Wechselrichtertrittgrenze gilt

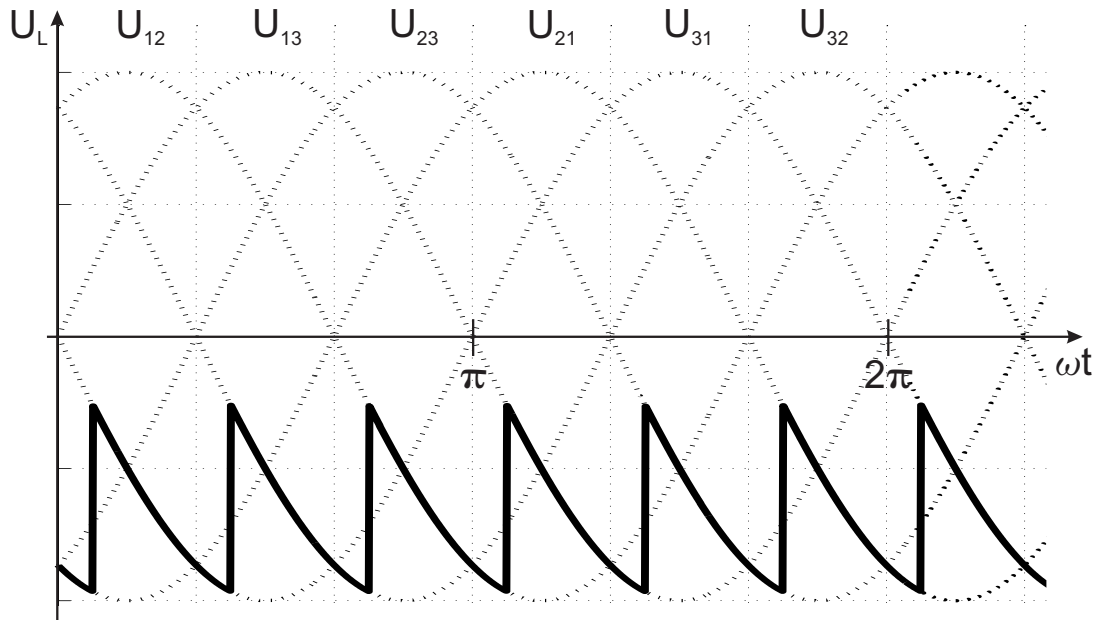
$$\alpha_{max} + u|_{\alpha=\alpha_{max}} \leq \pi - \gamma \quad (33)$$

Davon wird der Kosinus genommen und die Formel wie in der Formelsammlung aufgelöst:

$$\cos(\alpha_{max} + u|_{\alpha=\alpha_{max}}) = \cos \alpha_{max} - \frac{2 \cdot 2\pi \cdot f_2 \cdot L_k \cdot I_d}{\sqrt{2} U_{n2}} \leq \cos(\pi - \gamma) \quad (34)$$

$$\Rightarrow \alpha_{max} = \arccos \left[\cos(\pi - \gamma) + \frac{2 \cdot 2\pi \cdot f_2 \cdot L_k \cdot I_d}{\sqrt{2} U_{n2}} \right] = 144,21^\circ \quad (35)$$

b)



c) Bei Nennstrom auf der Wechselstromseite gilt für den Gleichstrom

$$I_d = I_{n,N} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} = 1,47 \text{ kA} \quad (36)$$

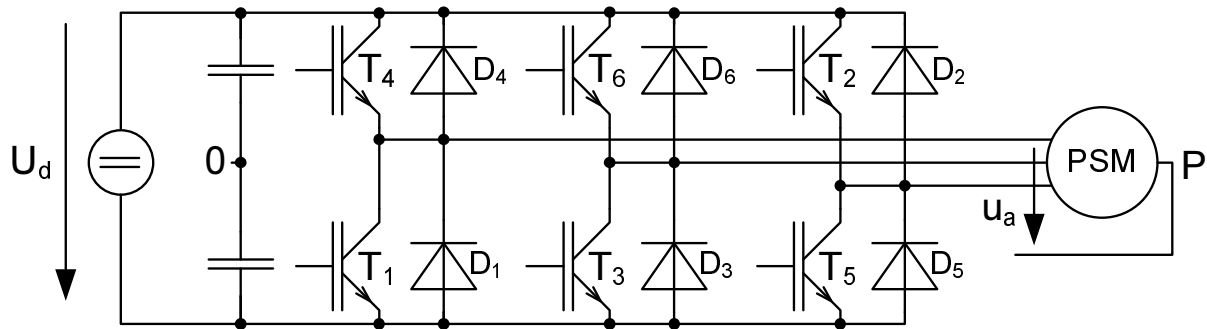
Die maximale übertragbare Leistung beträgt dann

$$P_{max} = |U_{d,min} \cdot I_d| = 382,12 \text{ MW} \quad (37)$$

d) Der Leistungsfluss wird umgekehrt, indem Stromrichter *SR1* mit einem Steuerwinkel $90^\circ < \alpha_1 \leq \alpha_{1,max}$ im Wechselrichterbetrieb, Stromrichter *SR2* mit einem Steuerwinkel $0^\circ \leq \alpha_2 < 90^\circ$ im Gleichrichterbetrieb gefahren wird.

4 Hochleistungsantrieb mit selbstgeführter Drehstrombrückenschaltung

Eine Achse einer Drehstromlokomotive wird durch eine permanentmagneterregte Synchronmaschine direkt angetrieben. Die Synchronmaschine wird von einer selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung gespeist.



Folgende Daten sind gegeben:

Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

$U_d = 1,2 \text{ kV}$ Gleichspannung

permanentmagneterregte Synchronmaschine

$f_{max} = 200 \text{ Hz}$ Maximale Frequenz der Statorspannung

$M_N = 50 \text{ kNm}$ Nennmoment

$p = 6$ Polpaarzahl

Lokomotivachse

$d = 800 \text{ mm}$ Raddurchmesser

Vereinfachende Annahmen:

- Die Leistungshalbleiter seien ideal.

- Berechnen Sie die Fahrgeschwindigkeit v_{max} der Lokomotive bei Maximalfrequenz f_{max} . Der Schlupf zwischen Rad und Schiene kann vernachlässigt werden.
- Berechnen Sie die Zugkraft einer Lokomotivachse F_{max} bei Nennmoment M_N des Motors.

Bei maximaler Frequenz der Statorspannung wird der Stromrichter in Blocktaktung betrieben.

- Skizzieren Sie maßstabsgetreu den Zeitverlauf der Sternspannung u_a für zwei Grundswingungsperioden in die vorgefertigte Lösungsskizze auf der Rückseite des Deckblatts.
- Bestimmen Sie den Effektivwert der Grundswingung der Sternspannung U_a .
- Skizzieren Sie maßstabsgetreu die Raumzeiger der Sternspannungen aller Schaltzustände, die bei der Blocktaktung genutzt werden (komplexe Ebene mit 200 V/cm für Realteil und Imaginärteil).

Lösung

a) Die maximale Drehzahl der Synchronmaschine beträgt

$$n_{max} = \frac{f_{max}}{p} = 33,333 \text{ s}^{-1} \quad (38)$$

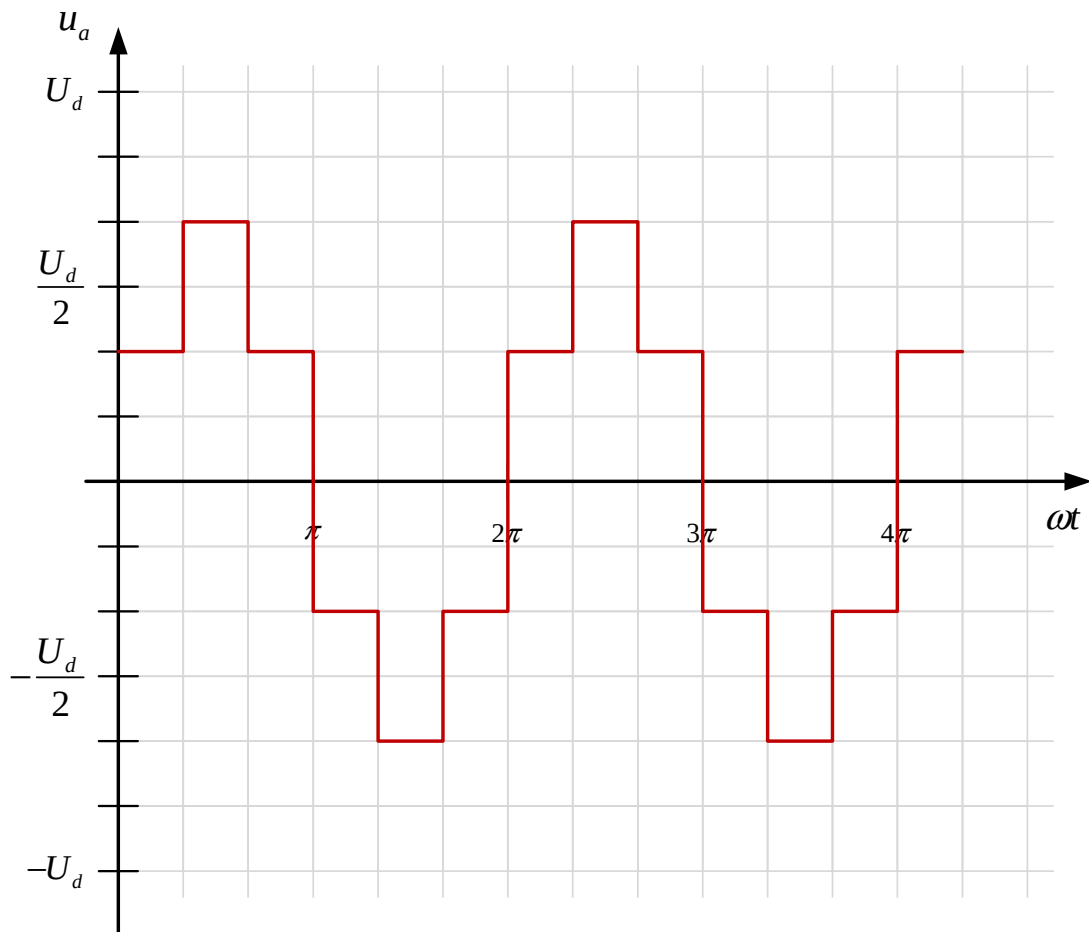
Mittels des Raddurchmessers lässt sich dann die Geschwindigkeit der Lokomotive bestimmen:

$$v_{max} = n_{max} \cdot d \cdot \pi = 83,77 \text{ m/s} = 301,56 \text{ km/h} \quad (39)$$

b)

$$F_{max} = \frac{M_N}{r} = 125 \text{ kN} \quad (40)$$

c) Die Spannungsniveaus der Strangspannung betragen bei Blocktaktung $\pm \frac{1}{3}U_d$ und $\pm \frac{2}{3}U_d$, jeweils für $\frac{\pi}{3}$. Es ergibt sich folgender Verlauf:



d) Der Effektivwert der Grundschiwingung der Außenleiterspannung bei Blocktaktung beträgt

$$U_{1ab} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d \quad (41)$$

Für den Effektivwert der Grundschiwingung der Strangspannung gilt dann

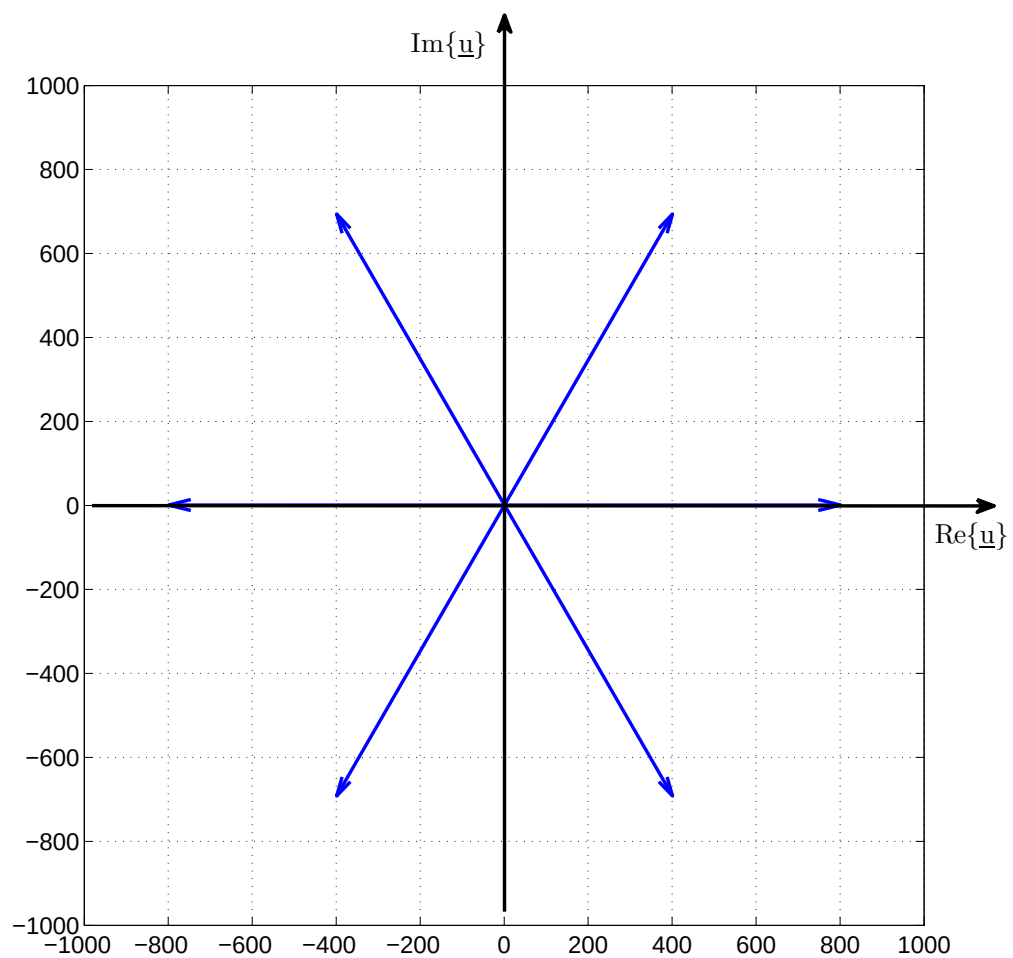
$$U_{1aP} = \frac{U_{1ab}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_d = 540,19 \text{ V} \quad (42)$$

e) Die Länge der Raumzeiger kann z.B. im Schaltzustand 1 ermittelt werden:

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{2}{3} U_d + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left(-\frac{1}{3} U_d \right) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left(-\frac{1}{3} U_d \right) \right] \quad (43)$$

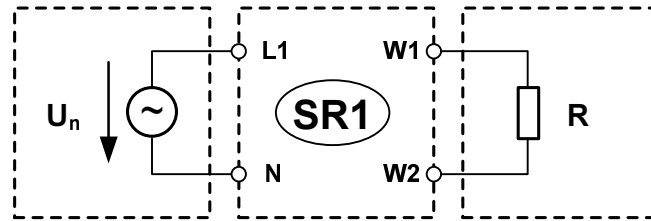
$$= \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot U_d + \frac{1}{6} \cdot U_d + \frac{1}{6} \cdot U_d \right) = \frac{2}{3} \cdot U_d = 800 \text{ V} \quad (44)$$

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



5 Stromrichterschaltungen für unterschiedliche Anforderungen

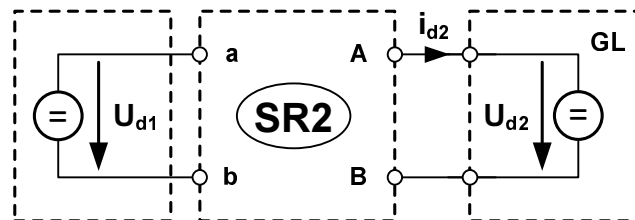
a)



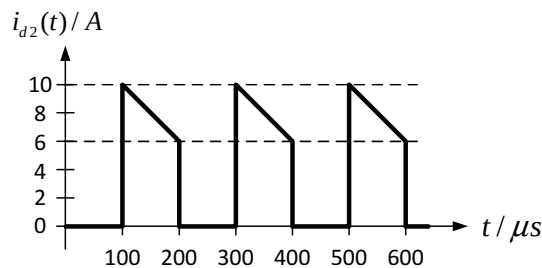
Ein Stromrichter $SR1$ soll die von der Widerstandslast R abgegebene Wärmeleistung steuern. Als Energiequelle steht ein einphasiges Wechselspannungsnetz zur Verfügung.

Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters $SR1$ zwischen den Anschlussklemmen $L1$, N und $W1$, $W2$. Der Stromrichter soll möglichst einfach und kostengünstig sein.

b)

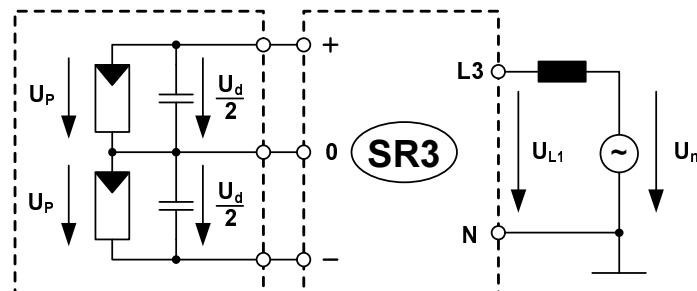


Ein Stromrichter $SR2$ ist an einer Gleichspannungsquelle U_{d1} angeschlossen und speist eine Gleichstromlast GL . Der Ausgangsstrom i_{d2} hat folgenden Zeitverlauf:



Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters $SR2$ zwischen den Anschlussklemmen a , b und A , B .

c)

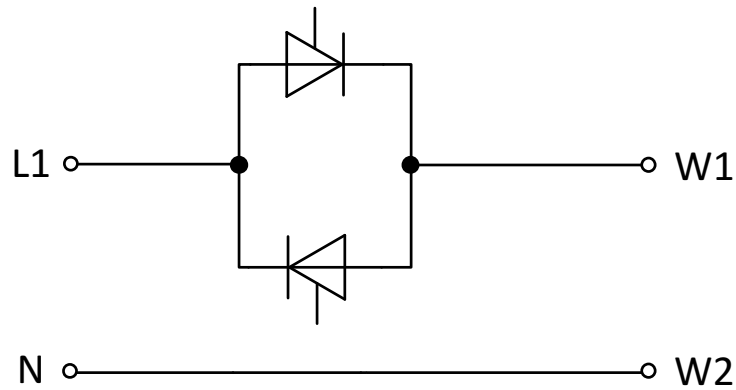


Ein Stromrichter $SR3$ soll die von einem Solargenerator erzeugte Leistung in ein Wechselspannungsnetz einspeisen. Der Solargenerator ist in zwei Gruppen aufgeteilt, sodass die Stromrichterspannung auf der Wechselstromseite aus den drei Werten $+\frac{U_d}{2}$, 0 und $-\frac{U_d}{2}$ gebildet werden kann.

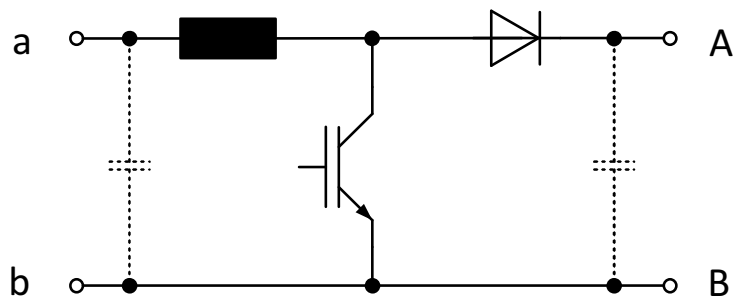
Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters $SR3$ zwischen den Anschlussklemmen $+$, 0 , $-$ und $L3$, N .

Lösung

a) Dimmer:



b) Hochsetzsteller:



c) Dreipunktwechselrichter:

