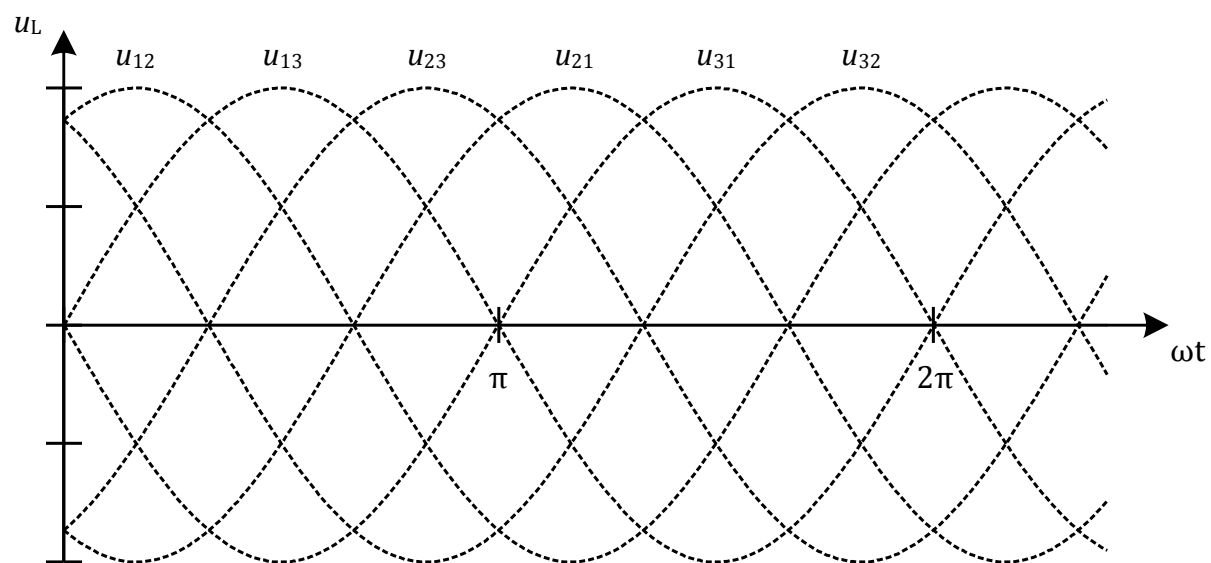

Schriftliche Prüfung
Elektrische Maschinen und Stromrichter
Prof. Dr.-Ing. Michael Braun
Dipl.-Ing. Mario Gommeringer

– Aufgaben zur Prüfung Nr. 131 am 09. Oktober 2015 –

Vorname:
Nachname:
Matrikelnummer:

Diagramm für Aufgabe 3:



1 Fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine

Die fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine GM sei nenerregt und wird mit M_L belastet. Während des Anfahrvorgangs soll ein separater Ankervorwiderstand R_V benutzt werden, um den Ankerstrom zu begrenzen.

Vereinfachende Annahmen

- Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt

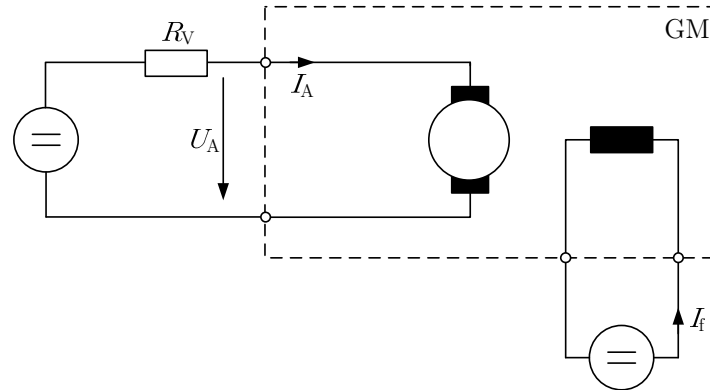
Folgende Daten sind gegeben

U_{AN}	=	300 V	Ankernennspannung
I_{AN}	=	100 A	Ankernennstrom
n_N	=	1440 min ⁻¹	Nenndrehzahl
n_{0N}	=	1500 min ⁻¹	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und Nennerregung
M_L	=	0,5 · M_N	Lastmoment

- Zeichnen Sie das Schaltbild des Systems aus Spannungsquelle, Ankervorwiderstand R_V und Gleichstrommaschine einschließlich Erregerkreis.
- Berechnen Sie die Größe $c\phi_N$.
- Berechnen Sie den Ankerwiderstand R_A .
- Wie groß sind der Wirkungsgrad η und die mechanische Leistung P_{mech} im Nennpunkt?
- Berechnen Sie den notwendigen Ankerstrom I_A und die Ankerspannung U_A für den Betriebspunkt mit Nenndrehzahl n_N und dem angegebenen Lastmoment M_L .
- Nun soll die unbelastete Maschine vom Stillstand aus mit $I_A \leq 2 \cdot I_{AN}$ an einer Spannungsquelle mit dem Wert der Nennankerspannung U_{AN} angefahren werden. Berechnen Sie den Wert des Ankervorwiderstands.
- Berechnen Sie die Drehzahl, bei der der Ankervorwiderstand kurzgeschlossen werden kann, so dass die Maschine mit $I_A \leq 2 \cdot I_{AN}$ weiter bis zur Nenndrehzahl hochlaufen kann.

Lösung

a)



b) $c\phi_N$ aus Leerlaufdrehzahl:

$$\Omega_{0N} = \frac{2\pi}{60 \frac{s}{min}} \cdot n_{0N} = 157,1 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

$$U_{AN} = R \cdot \underbrace{I_A}_{=0} + c\phi_N \cdot \Omega_{0N} \quad (2)$$

$$c\phi_N = \frac{U_{AN}}{\Omega_{0N}} = 1,91 \text{ Vs} \quad (3)$$

c) Ankerwiderstand aus Nennbetrieb:

$$U_{AN} = R \cdot I_A + c\phi_N \cdot \Omega_N \quad (4)$$

$$\Omega_N = \frac{2\pi}{60 \frac{s}{min}} \cdot n_N = 150,8 \text{ s}^{-1} \quad (5)$$

$$R = \frac{U_{AN} - c\phi_N \Omega_N}{I_{AN}} = 0,12 \Omega \quad (6)$$

d)

$$P_{el,N} = U_{AN} \cdot I_{AN} = 30 \text{ kW} \quad (7)$$

$$P_V = R \cdot I_{AN}^2 = 1,2 \text{ kW} \quad (8)$$

$$P_{mech,N} = P_{el,N} - P_V = 28,8 \text{ kW} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P_{mech,N}}{P_{el,N}} = 96 \% \quad (10)$$

e)

$$M_i = c\phi \cdot I_A \quad (11)$$

$$\frac{I_A}{I_{AN}} = \frac{M_L}{M_N} \quad (12)$$

$$I_A = 0,5 \cdot I_{AN} = 50 \text{ A} \quad (13)$$

$$U_A = R_A \cdot I_A + c\phi_N \Omega_N \quad (14)$$

$$U_A = 294 \text{ V} \quad (15)$$

f) Anfahren an Nennspannung mit Vorwiderstand

$$U_{AN} = (R_A + R_V) I_A + c\phi_N \Omega \quad (16)$$

$$\Omega = 0 \quad (17)$$

Einschalten mit einem Widerstand unter der Bedingung $I_A \leq 2 \cdot I_{AN}$

$$R_V \geq \frac{U_{AN} - c\phi_N \Omega}{2 \cdot I_{AN}} - R_A = \frac{U_{AN}}{2 \cdot I_{AN}} - R_A = 1,38 \Omega \quad (18)$$

g) Widerstand überbrücken, wenn $I_A = 2 \cdot I_{AN}$

$$\Omega = \frac{U_{AN} - R_A \cdot I_A}{c\phi_N} = \frac{U_{AN} - 2 \cdot R_A \cdot I_{AN}}{c\phi_N} = 144,5 \text{ s}^{-1} \quad (19)$$

$$n = \Omega \cdot \frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} = 1380 \text{ min}^{-1} \quad (20)$$

2 Drehstrom-Synchrongenerator

Ein vierpoliger Drehstrom-Synchrongenerator mit Vollpolläufer speist Leistung in das Netz ein.

Vereinfachende Annahmen

- Verluste werden vernachlässigt

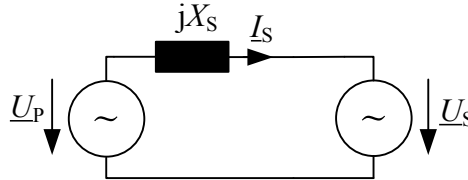
Folgende Daten sind für den Synchrongenerator gegeben

U_N	=	27 kV	Nennspannung (Leiterspannung)
I_N	=	30 kA	Nennstrom
f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
$\cos(\varphi_N)$	=	0,85	Nennleistungsfaktor
X_S	=	$0,7 \Omega$	Synchronreaktanz
p	=	2	Polpaarzahl

- Geben Sie das einphasige Ersatzschaltbild der Maschine an und zeichnen Sie das vollständige Zeigerdiagramm für den Betrieb mit Nennstrom, Nennspannung und $\cos(\varphi) = 0,85$ übererregt im Maßstab 5kV/cm und 5kA/cm.
- Berechnen Sie das Drehmoment an der Generatorwelle für diesen Betriebspunkt.
- Durch welchen Stelleingriff kann bei gleicher Wirkleistung $\cos(\varphi) = 1$ eingestellt werden?
- Berechnen Sie die Polradspannung U_P und den Polradwinkel ϑ für den Betriebspunkt aus Aufgabenteil c) mit $\cos(\varphi) = 1$.

Lösung

a) Einphasiges Ersatzschaltbild:

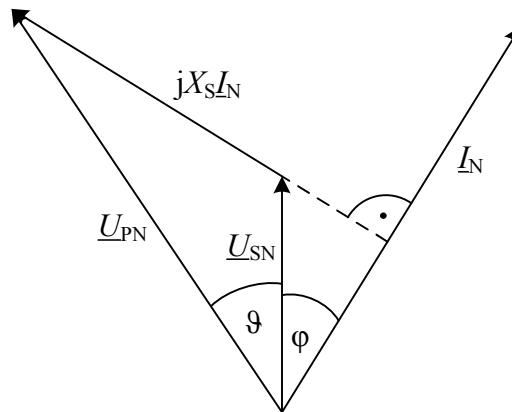


$$U_S = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 15,59 \text{ kV} \quad (21)$$

$$\cos(\varphi_N) = 0,85 \Rightarrow \varphi_N = 31,79^\circ \quad (22)$$

$$X_S \cdot I_N = 21 \text{ kV} \quad (23)$$

Zeigerdiagramm:



b) Annahme: verlustfreier Generator.

$$P = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_N) = 1,193 \text{ GW} \quad (24)$$

$$n = \frac{f_N}{p} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (25)$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 157,1 \text{ s}^{-1} \quad (26)$$

$$M = \frac{P}{\Omega} = 7,59 \text{ MNm} \quad (27)$$

c) Um die Abgabe induktiver Blindleistung ins Netz zu verringern, muss der Erregerstrom des Synchrongenerators verringert werden.

d) Die Wirkleistung P bleibt unverändert.

$$P = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_S \cdot \underbrace{\cos(\varphi)}_{=1} \quad (28)$$

$$I_S = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_N} = 25,5 \text{ kA} \quad (29)$$

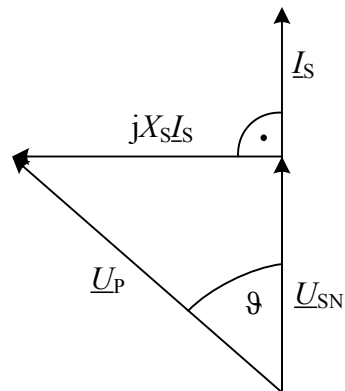
$$X_S \cdot I_S = 17,85 \text{ kV} \quad (30)$$

$$U_P = \sqrt{(X_S \cdot I_S)^2 + U_S^2} = 23,70 \text{ kV} \quad (31)$$

$$\sin \vartheta = \frac{X_S \cdot I_S}{U_P} \quad (32)$$

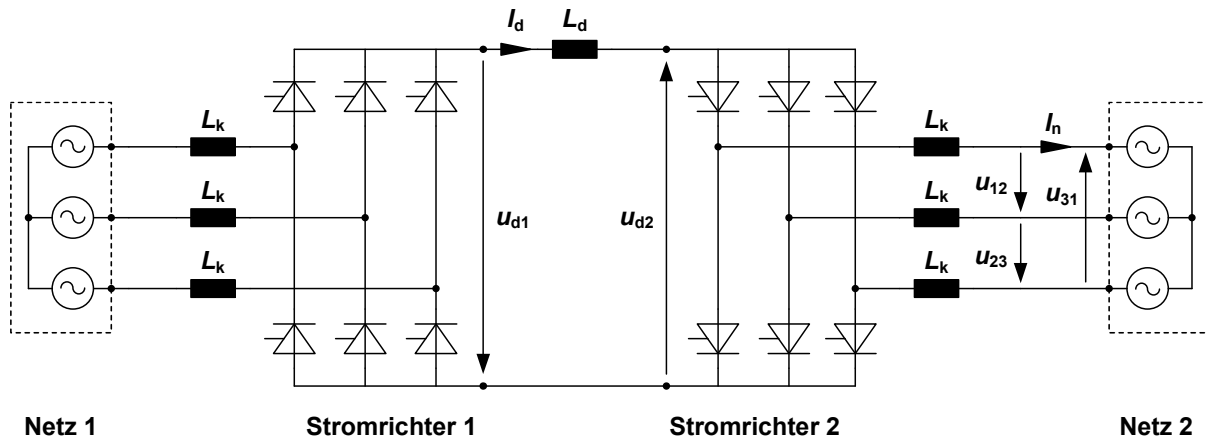
$$\vartheta = 48,87^\circ \quad (33)$$

Zeigerdiagramm:



3 Netzkurzkupplung zwischen Netzen unterschiedlicher Frequenz

Über eine Kurzkupplung, bestehend aus Stromrichter 1 und Stromrichter 2, soll elektrische Leistung von Netz 1 nach Netz 2 übertragen werden.



Folgende Daten sind gegeben:

Daten des Netzes und der Drehstrombrückenschaltungen

U_n	=	110 kV	Leiterspannungen der Drehstromnetze (Effektivwert)
$I_{n,N}$	=	1200 A	Nennstrom der Drehstrombrücken (Effektivwert einschließlich Oberschwingungen)
L_k	=	10 mH	Induktivität der Kommutierungsdrosseln der Drehstrombrückenschaltungen
f_1	=	60 Hz	Nennfrequenz des Drehstromnetzes 1
f_2	=	50 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 maximal zulässigen Steuerwinkel $\alpha_{2,max}$ des Stromrichters 2 bei $I_d = 1000$ A (Wechselrichtertrittgrenze).

In den folgenden Aufgabenpunkten darf die Auswirkung der Kommutierungsdrosseln vernachlässigt werden.

- b) Tragen Sie qualitativ den Zeitverlauf der Spannung $u_{d2}(t)$ bei einem Steuerwinkel von $\alpha_2 = 150^\circ$ für den Stromrichter 2 in das vorgefertigte Diagramm der Leiterspannungen auf der Rückseite des Deckblattes ein.
- c) Um eine Wechselrichterkippung zu vermeiden, wird U_{d2} auf $U_{d2,min} = -130$ kV beschränkt. Berechnen Sie die maximale Leistung, die unter dieser Beschränkung beim 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

$$\gamma = 2\pi \cdot f_2 \cdot t_S = 0,126 \text{ rad} \quad (34)$$

Für Betrieb an der Wechselrichtertrittgrenze gilt

$$\alpha_{2,max} + u|_{\alpha_2=\alpha_{2,max}} = \pi - \gamma \quad (35)$$

$$(36)$$

Aus der EMS-Formelsammlung:

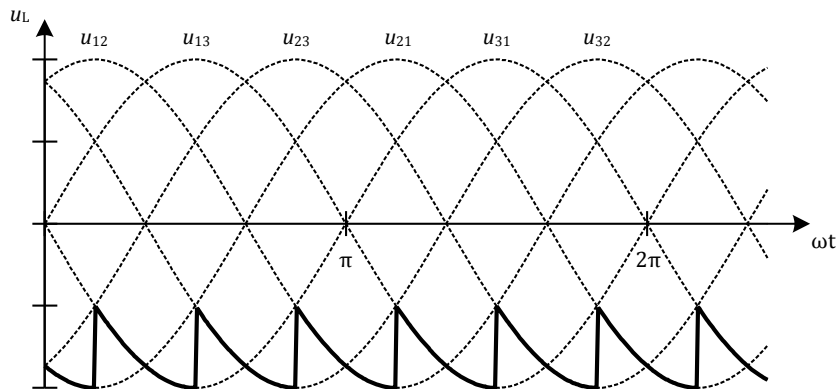
$$\cos(\alpha_{2,max} + u|_{\alpha_2=\alpha_{2,max}}) = \cos(\alpha_{2,max}) - \frac{2\omega_2 \cdot L_k \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot U_n} \quad (37)$$

$$\cos(\alpha_{2,max} + u|_{\alpha_2=\alpha_{2,max}}) = \cos(\pi - \gamma) \quad (38)$$

$$\cos(\pi - \gamma) = \cos(\alpha_{2,max}) - \frac{2 \cdot 2\pi \cdot f_2 \cdot L_k \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot U_n} \quad (39)$$

$$\Rightarrow \alpha_{2,max} = \arccos\left[\cos(\pi - \gamma) + \frac{2 \cdot 2\pi \cdot f_2 \cdot L_k \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot U_n}\right] = 162,12^\circ \quad (40)$$

b)



c) Bei Nennstrom auf der Drehstromseite gilt für den Gleichstrom

$$I_d = I_{n,N} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} = 1,47 \text{ kA} \quad (41)$$

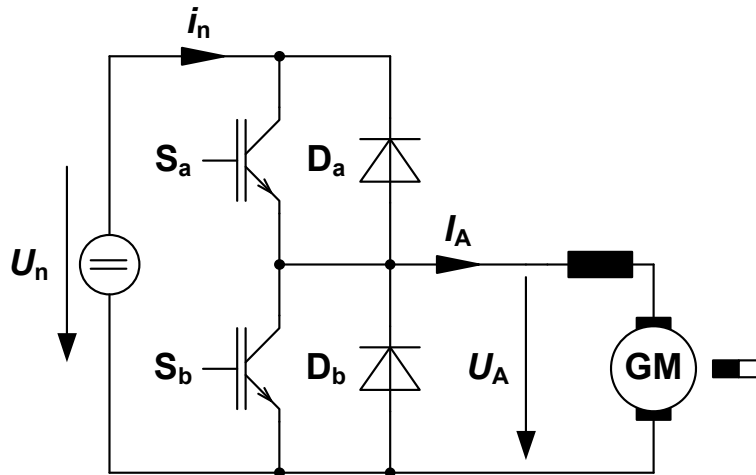
Die maximale übertragbare Leistung beträgt dann

$$P_{max} = |U_{d2,min} \cdot I_d| = 191,1 \text{ MW} \quad (42)$$

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 Antriebssystem mit Zweiquadrantengleichstromsteller

Ein Gleichstromsteller mit den zwei Halbleiterschaltern S_a und S_b sowie den Dioden D_a und D_b speist eine mit Permanentmagneten erregte Gleichstrommaschine GM .



Folgende Daten des Gleichstromstellers sind gegeben:

f	=	5 kHz	Schaltfrequenz der Halbleiterschalter
$I_{RMS,max}$	=	20 A	Maximaler Effektivwert des Durchlassstroms der Halbleiter
U_n	=	400 V	Speisespannung

Vereinfachende Annahmen:

- Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei.
- Der Gleichstrom I_A sei im stationären Zustand ideal glatt.

Zunächst wird die Gleichstrommaschine als Motor mit $I_A = 15$ A betrieben (Aufgabenteile a) - f)).

- Welche Halbleiterbauelemente führen abwechselnd Strom?
- Berechnen Sie die periodisch wiederholte Einschaltdauer des Halbleiterschalters S_a für den Mittelwert der Spannung $U_A = 150$ V.
- Zeichnen Sie maßstäblich den Zeitverlauf des Stromes $i_n(t)$ für den Betrieb nach b) mit $I_A = 15$ A = konstant für zwei Schaltperioden. Zeichenmaßstab: 5 A/cm und 50 μ s/cm.
- Berechnen Sie den Effektivwert $i_{n,eff}$ des Stromes i_n für den Betrieb nach b).
- Berechnen Sie den Mittelwert $i_{n,Mi}$ des Stromes i_n für den Betrieb nach b)
- Zeichnen Sie den Mittelwert $i_{n,Mi}$ in die Zeichnung aus c) ein.

Jetzt soll die Gleichstrommaschine im Generatorbetrieb mit $I_A < 0$ abgebremst werden (Aufgabenteile g) - h)).

- Welche Halbleiter führen abwechselnd Strom?
- Geben Sie den maximal zulässigen Betrag des Stromes I_A bei einem Mittelwert der Gleichspannung von $U_A = 0$ an. Welcher Halbleiter ist das beschränkende Element?

Lösung

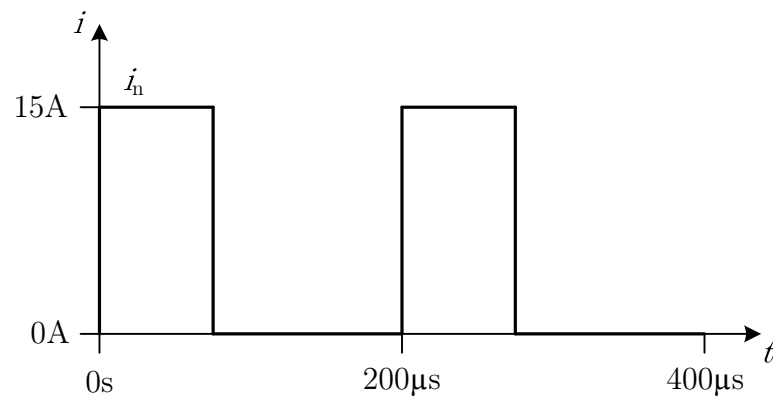
a) Die Leistungshalbleiter Sa und Db führen abwechselnd den Ausgangsstrom.

b)

$$T = \frac{1}{f} = 200 \mu s \quad (43)$$

$$T_{Sa} = \frac{U_A}{U_n} \cdot T = 75 \mu s \quad (44)$$

c)



d)

$$I_{n,eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^{T_{Sa}} I_A^2 dt} \quad (45)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot T_{Sa} \cdot I_A^2} \quad (46)$$

$$= 9,19 \text{ A} \quad (47)$$

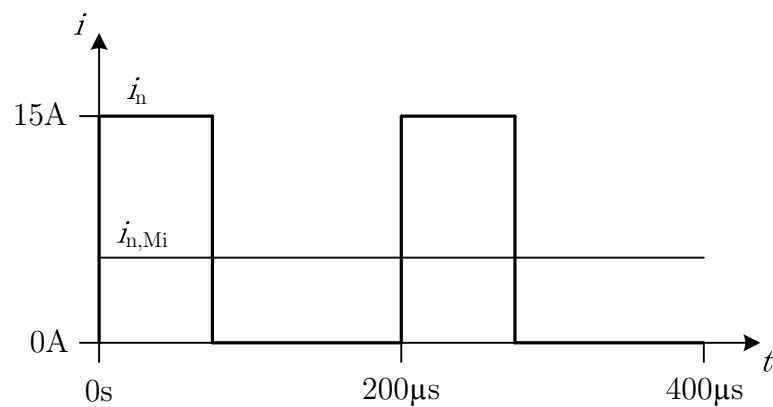
e)

$$I_{n,Mi} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T_{Sa}} I_A dt \quad (48)$$

$$= \frac{1}{T} \cdot T_{Sa} \cdot I_A \quad (49)$$

$$= 5,63 \text{ A} \quad (50)$$

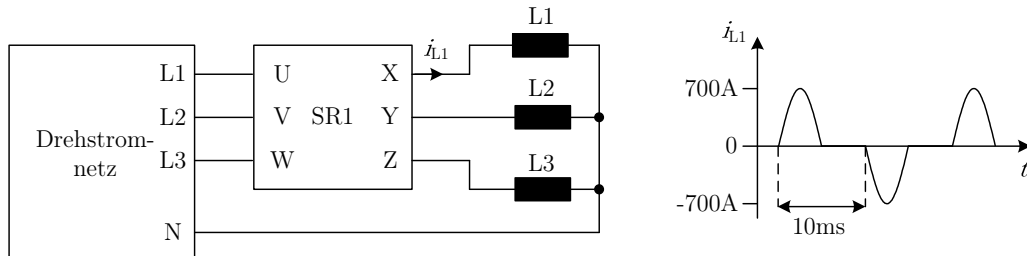
f)



- g) Die Leistungshalbleiter Sb und Da führen abwechselnd den Ausgangsstrom.
- h) Bei $U_A = 0$ ist der Transistor Sb dauernd eingeschaltet. Im Generatorbetrieb führt er dauernd den Strom I_A und ist damit das begrenzende Bauteil. Der maximale Ausgangsstrom beträgt $|I_{A,max}| = I_{RMS,max} = 20A$.

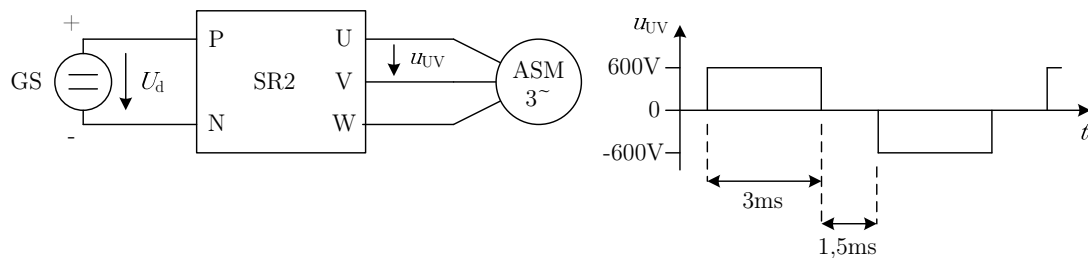
5 Stromrichterschaltungen und elektrische Maschinen für verschiedene Anwendungen

a)



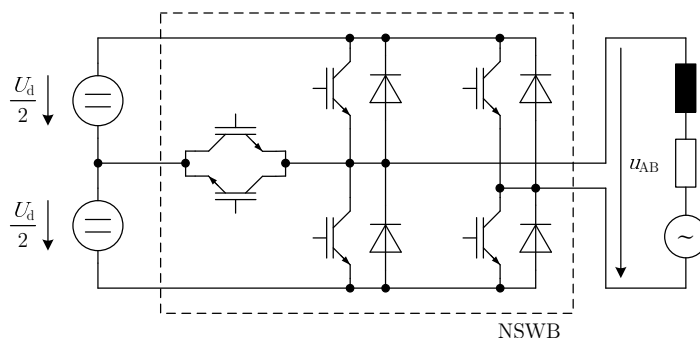
Ein Stromrichter SR1 soll zur Belastung eines Drehstromnetzes mit induktivem Blindstrom benutzt werden. Am Ausgang wird der Stromverlauf i_{L1} gemessen. Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR1. Wie heißt diese Schaltung?

b)



Ein Stromrichter SR2 versorgt einen Drehstromasynchronmotor aus einer Gleichspannungsquelle GS. Die Nennleistung des Motors beträgt 50kW. Am Ausgang wird zwischen U und V die Spannung u_{UV} gemessen. Zeichnen Sie das Schaltbild des Stromrichters SR2 und geben Sie den Namen der Schaltung an. Welchen Wert hat die Gleichspannung U_d (die Halbleiter seien ideal)? Welche Halbleiter werden in SR2 eingesetzt?

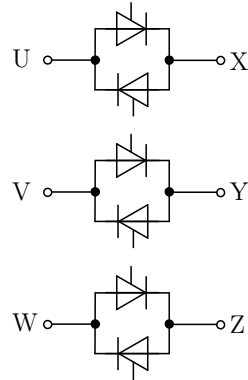
c)



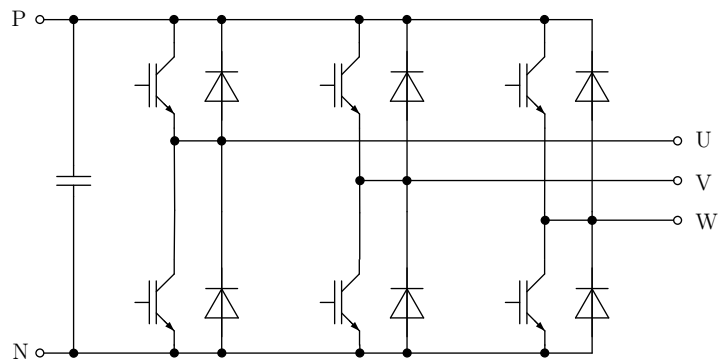
Es wird vorgeschlagen, eine Hälfte einer neuen, selbstgeführten Wechselstrombrückenschaltung „NSWB“ mit einem „Advanced NPC-Modul“ wie im Schaltbild dargestellt auszuführen. Geben Sie an, welche Werte die Ausgangsspannung u_{AB} annehmen kann. Die Halbleiter seien ideal.

Lösung

- a) SR1 ist ein Drehstromsteller.
Prinzipschaltbild:



- b) SR2 ist eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung



Die Spannung U_d beträgt 600 V. Als Halbleiter werden IGBTs mit Freilaufdioden eingesetzt.

- c) Die Spannung u_{AB} kann folgende Werte annehmen: $-U_d$, $-U_d/2$, 0, $U_d/2$ und U_d .