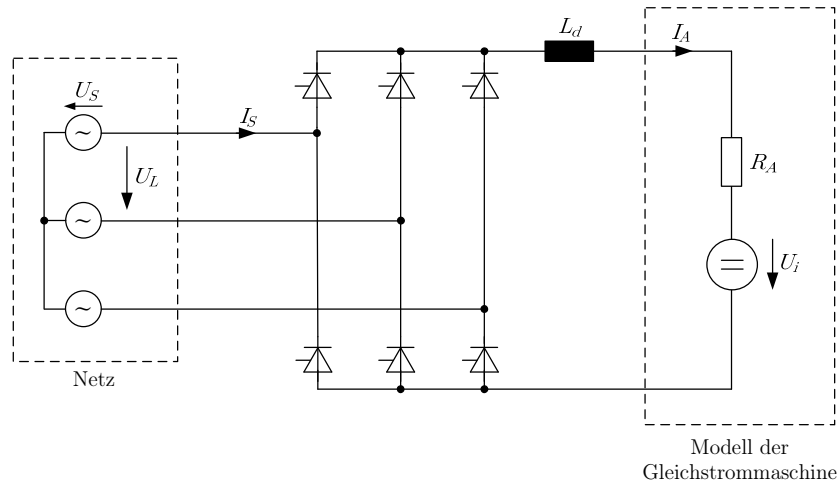


1 Gleichstromantrieb mit netzgeführtem Stromrichter

Eine netzgeführte Drehstrombrückenschaltung speist eine kompensierte, fremderregte Gleichstrommaschine, die mit einer Arbeitsmaschine gekoppelt ist.



Vereinfachende Annahmen:

- Das Drehstromnetz sei ideal.
- Die Ankerinduktivität wird vernachlässigt.
- Das Durchlass- und Schaltverhalten der Thyristoren sei ideal.
- Der Gleichstrom sei ideal glatt.

Folgende Daten sind gegeben:

Daten der Gleichstrommaschine bei Nennerregung:

U_{AN}	=	500 V	Ankernennspannung
I_{AN}	=	100 A	Ankernennstrom
n_N	=	2000 min ⁻¹	Nenndrehzahl
M_N	=	215 Nm	Nennmoment

Daten des Drehstromnetzes:

U_L	=	400 V	Effektivwert der Leiterspannung
-------	---	-------	---------------------------------

- Berechnen Sie den Steuerwinkel α so, dass beim Anfahren ($\Omega = 0$) Nennstrom fließt.
- Berechnen Sie beim Betrieb nach a) die vom Netz bezogene Scheinleistung S , die Wirkleistung P , die Grundsicherungsblindleistung Q_1 und die Verzerrungsblindleistung D .
- Welche Maximaldrehzahl kann bei Nennerregung und Nennstrom mit Hilfe eines geeigneten Steuerwinkels eingestellt werden?

Lösung

a) Parameter der Gleichstrommaschine berechnen:

$$c\Phi_N = \frac{M_N}{I_{AN}} = \frac{215 \text{ Nm}}{100 \text{ A}} = 2,15 \text{ Vs} \quad (1)$$

$$\Omega_N = \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot 2000 \frac{1}{\text{min}} \approx 209,44 \frac{1}{\text{s}} \quad (2)$$

$$R_A = \frac{U_{AN} - c\Phi_N \cdot \Omega_N}{I_{AN}} \approx 0,497 \Omega \quad (3)$$

Spannung an der Gleichstrommaschine bei $\Omega = 0$ und Nennstrom berechnen:

$$U_{A0} = c\Phi_N \cdot \Omega + R_A \cdot I_A = R_A \cdot I_{AN} \approx 49,71 \text{ V} \quad (4)$$

Steuerwinkel berechnen:

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_L \approx 540,2 \text{ V} \quad (5)$$

$$U_{A0} = U_{di\alpha} = U_{di} \cdot \cos(\alpha) \quad (6)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{U_{A0}}{U_{di}} \quad (7)$$

$$\alpha \approx 84,72^\circ \quad (8)$$

b) Scheinleistung:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_n \quad (9)$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_L \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d \quad (10)$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_L \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{AN} \quad (11)$$

$$\approx 56,57 \text{ kVA} \quad (12)$$

Wirkleistung:

$$P = U_d \cdot I_d \quad (13)$$

$$= U_{A0} \cdot I_{AN} \quad (14)$$

$$\approx 4,97 \text{ kW} \quad (15)$$

Grundschiwungsblindleistung:

$$Q_1 = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_{n1} \cdot \sin(\alpha) \quad (16)$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_L \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot I_d \cdot \sin(\alpha) \quad (17)$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_L \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot I_{AN} \cdot \sin(\alpha) \quad (18)$$

$$\approx 53,79 \text{ kvar} \quad (19)$$

Verzerrungsblindleistung:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q_1^2 \quad (20)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2} \quad (21)$$

$$\approx 16,79 \text{ kvar} \quad (22)$$

c) Die maximale Ankerspannung ergibt sich beim Steuerwinkel $\alpha = 0$:

$$U_{A,max} = U_{di} \approx 540,2 \text{ V} \quad (23)$$

Berechnen der maximalen Drehzahl bei $U_A = U_{A,max}$ und Nennstrom:

$$U_A = c\Phi \cdot \Omega + R_A \cdot I_A \quad (24)$$

$$\Omega = \frac{U_A - R_A \cdot I_A}{c\Phi} \quad (25)$$

$$\Omega_{max} = \frac{U_{A,max} - R_A \cdot I_{AN}}{c\Phi_N} \approx 228,13 \frac{1}{\text{s}} \quad (26)$$

$$n_{max} = \frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \cdot \Omega_{max} \approx 2178,5 \frac{1}{\text{min}} \quad (27)$$

2 Synchrongenerator

Eine Synchronmaschine mit Turboläufer wird als Generator betrieben. Sie läuft am starren, symmetrischen Drehstromnetz mit Nennspannung und Nennfrequenz.

Vereinfachende Annahmen:

- Der Synchrongenerator sei verlustlos.

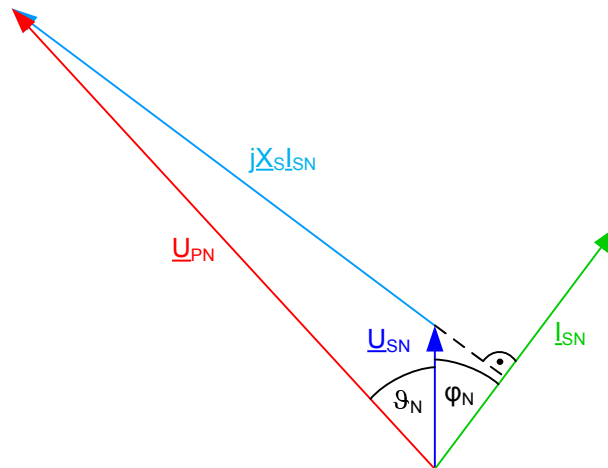
Folgende Daten sind gegeben:

U_N	=	660 V	Nennspannung (Effektivwert der Leiterspannung)
I_N	=	400 A	Nennstrom
$\cos(\varphi_N)$	=	0,8	Nennleistungsfaktor (übererregt)
X_S	=	3,5 Ω	Synchronreaktanzen

- Berechnen Sie den Effektivwert der Polradspannung U_{PN} und den Polradwinkel ϑ_N bei Betrieb mit Nenndaten.
- Der Generator wird jetzt entlastet und im Leerlauf betrieben. Er soll einen Blindstrom in Höhe des halben Nennstroms in das Netz einspeisen (Phasenschieberbetrieb übererregt). Berechnen Sie den Wert der Polradspannung.
- Geben Sie an, mit welchem Stelleingriff am Generator die Polradspannung beeinflusst wird.

Lösung

- Zeigerdiagramm:



$$U_{SN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \approx 381,1 \text{ V} \quad (28)$$

$$\cos(\varphi_N) = 0,8 \Rightarrow \varphi_N \approx 36,87^\circ \quad (29)$$

$$I_{SN} = I_N \quad (30)$$

$$X_S \cdot I_{SN} = 1400 \text{ V} \quad (31)$$

Polradspannung mit Hilfe des Cosinussatzes berechnen:

$$U_{PN}^2 = U_{SN}^2 + (X_S \cdot I_{SN})^2 - 2 \cdot U_{SN} \cdot X_S \cdot I_{SN} \cdot \cos(90^\circ + \varphi_N) \quad (32)$$

$$U_{PN} = \sqrt{U_{SN}^2 + (X_S \cdot I_{SN})^2 - 2 \cdot U_{SN} \cdot X_S \cdot I_{SN} \cdot \cos(90^\circ + \varphi_N)} \quad (33)$$

$$\approx 1656,9 \text{ V} \quad (34)$$

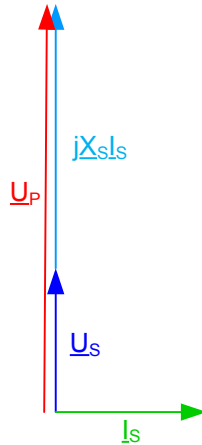
Polradwinkel mit Hilfe des Sinussatzes berechnen:

$$\frac{\sin(\vartheta_N)}{X_S \cdot I_{SN}} = \frac{\sin(90^\circ + \varphi_N)}{U_{PN}} \quad (35)$$

$$\sin(\vartheta_N) = \sin(90^\circ + \varphi_N) \cdot \frac{X_S \cdot I_{SN}}{U_{PN}} \quad (36)$$

$$\vartheta_N \approx 42,53^\circ \quad (37)$$

b) Zeigerdiagramm:



$$I_S = \frac{1}{2} \cdot I_N = 200 \text{ A} \quad (38)$$

$$U_S = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \approx 381,1 \text{ V} \quad (39)$$

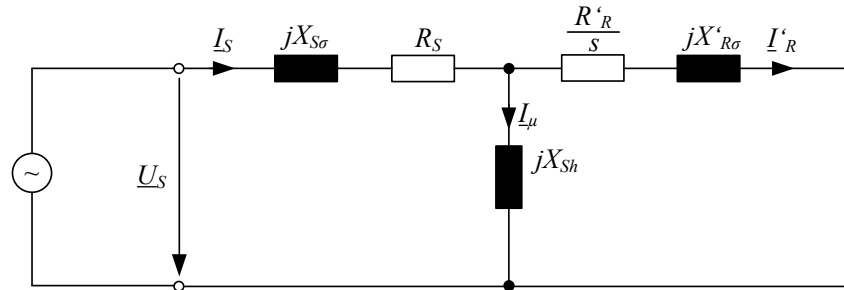
$$X_S \cdot I_S = 700 \text{ V} \quad (40)$$

$$U_P = U_S + X_S \cdot I_S \approx 1081,1 \text{ V} \quad (41)$$

c) Die Polradspannung ist proportional zum Erregerstrom (Sättigung vernachlässigt): $U_P \sim I_f$. Daher wird die Polradspannung mit Hilfe des Erregerstroms eingestellt.

3 Drehstromasynchronmotor mit Sanftanlauf

Ein Drehstromasynchronmotor mit kurzgeschlossener Läuferwicklung wird von einem Drehstromsteller gespeist.



Vereinfachende Annahmen:

- Der Drehstromsteller soll als ideal sinusförmige, dreiphasige Spannungsquelle modelliert werden, bei der die Amplitude der Spannung frei eingestellt werden kann. Die Frequenz ist gleich der Nennspeisefrequenz f_N .
- Eisen- und Reibungsverluste des Asynchronmotors werden vernachlässigt.

Folgende Daten sind gegeben:

Einphasiges Ersatzschaltbild des Drehstromasynchronmotors

$X_{S\sigma}$	=	0,1 Ω	Statorstreureaktanz
R_S	=	0,03 Ω	Wicklungswiderstand des Stators
X_{Sh}	=	5 Ω	Hauptreaktanz
R'_R	=	0,05 Ω	Auf den Stator umgerechneter Wicklungswiderstand des Rotors
$X'_{R\sigma}$	=	0,2 Ω	Auf den Stator umgerechnete Rotorstreureaktanz

Nenn Daten des Drehstromasynchronmotors

U_N	=	500 V	Nennwert der Leiterspannung
I_N	=	140 A	Nennstrom
f_N	=	60 Hz	Nennspeisefrequenz
p	=	4	Polpaarzahl
$\cos \varphi_N$	=	0,83	Leistungsfaktor im Nennbetrieb

- Zum Anfahren des Antriebs wird die Amplitude der Spannung so eingestellt, dass der Asynchronmotor im Stillstand ein Drehmoment von $M_i = 500 \text{ Nm}$ aufbringt. Berechnen Sie die im Rotor auftretende Verlustleistung.
- Auf welchen Wert der Drehzahl n_0 läuft der unbelastete Motor hoch, wenn die Amplitude der Spannung nach a) beibehalten wird?
- Jetzt wird die Leiterspannung auf den Nennwert U_N eingestellt. Berechnen Sie den Effektivwert des Strangstroms I_{S0} im Leerlauf.
- Berechnen Sie das innere Drehmoment M_{iN} bei Betrieb mit den Nenndaten.

Lösung

a) Die Drehfeldleistung wird aus der Synchrondrehzahl und dem Drehmoment berechnet:

$$\Omega_{syn} = \frac{\omega_S}{p} \quad (42)$$

$$= \frac{2\pi \cdot f_N}{p} \quad (43)$$

$$\approx 94,25 \frac{1}{s} \quad (44)$$

$$P_D = M_i \cdot \Omega_{syn} \quad (45)$$

$$\approx 47,124 \text{ kW} \quad (46)$$

Im Stillstand ist der Schlupf $s = 1$. Damit kann die Rotorverlustleistung berechnet werden:

$$P_{VR} = s \cdot P_D \quad (47)$$

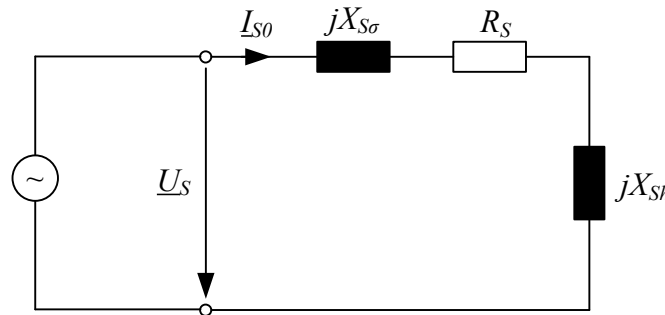
$$\approx 47,124 \text{ kW} \quad (48)$$

b) Die Drehzahl eines Asynchronmotors entspricht im unbelasteten Fall (Leerlauf) immer der Synchrondrehzahl:

$$n_0 = n_{syn} = \frac{f_s}{p} \quad (49)$$

$$= 900 \frac{1}{\text{min}} \quad (50)$$

c) Im Leerlauf gilt: $s = 0 \Rightarrow \frac{R'_R}{s} \rightarrow \infty$. Damit kann das Ersatzschaltbild vereinfacht werden:



Der komplexe Effektivwert der Strangspannung wird auf die reelle Achse gelegt:

$$\underline{U}_S = U_S = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \approx 288,68 \text{ V} \quad (51)$$

Berechnen des Effektivwertes des Strangstroms:

$$\underline{I}_{S0} = \frac{\underline{U}_S}{j \cdot X_{S\sigma} + R_S + j \cdot X_{Sh}} \quad (52)$$

$$\approx 0,333 \text{ A} - j \cdot 56,60 \text{ A} \quad (53)$$

$$I_{S0} = |\underline{I}_{S0}| \quad (54)$$

$$\approx 56,60 \text{ A} \quad (55)$$

d) Berechnen der Drehfeldleistung aus den Nenndaten:

$$P_D = P_{el} - P_{VS} \quad (56)$$

$$= S_N \cdot \cos(\varphi_N) - P_{VS} \quad (57)$$

$$= \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_N) - 3 \cdot R_S \cdot I_N^2 \quad (58)$$

$$\approx 98,87 \text{ kW} \quad (59)$$

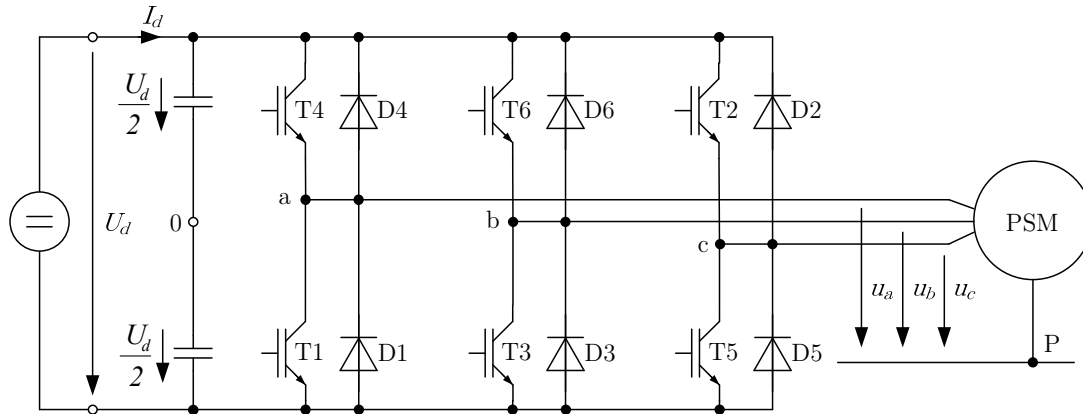
Berechnen des Drehmoments bei Nennbetrieb:

$$M_{iN} = \frac{P_D}{\Omega_{syn}} \quad (60)$$

$$\approx 1049 \text{ Nm} \quad (61)$$

4 Pulswechselrichtersteuerung

Eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung speist eine permanenterrgte Synchronmaschine.



Die Transistoren sollen so gesteuert werden, dass die Grundswingungen der Spannungen u_a , u_b und u_c den Zeitverläufen

$$\begin{aligned} u_{a,1}(t) &= \hat{U}_1^* \cdot \cos(\omega t) \\ u_{b,1}(t) &= \hat{U}_1^* \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_{c,1}(t) &= \hat{U}_1^* \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

entsprechen.

Vereinfachende Annahmen:

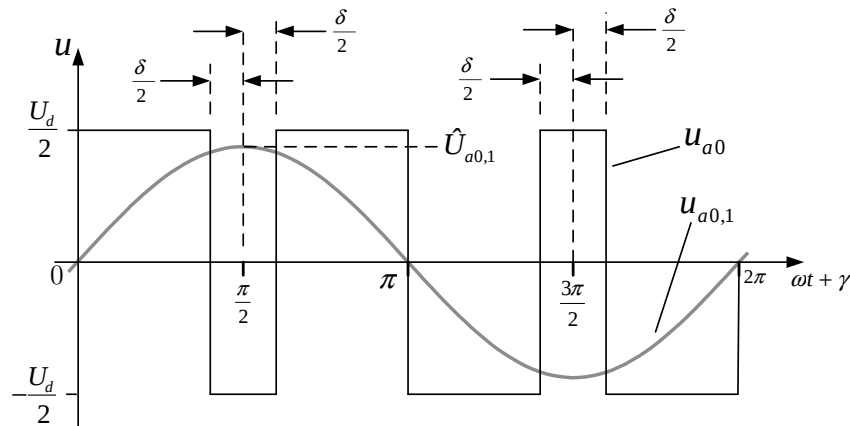
- Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei

Folgende Daten sind gegeben:

$$U_d = 500 \text{ V} \quad \text{Speisespannung}$$

- Berechnen Sie die maximalen Amplituden der Grundswingung für die Raumzeigermodulation $\hat{U}_{1,RZM}^*$ und die Blocktaktung $\hat{U}_{1,BT}^*$.
- Zeichnen Sie maßstäblich alle Raumzeiger der bei der Raumzeigermodulation benutzten Schaltzustände in eine komplexe Ebene (50 V/cm). Tragen Sie den Raumzeiger $\underline{u}_1^*$ der Grundswingung für $\omega t = \frac{3\pi}{4}$ und $\hat{U}_1^* = 200 \text{ V}$ ein.
- Geben Sie an, welche Raumzeiger für $\omega t = \frac{3\pi}{4}$ und $\hat{U}_1^* = 200 \text{ V}$ benutzt werden und berechnen Sie die zeitlichen Anteile an der Taktperiode T .
- Siehe nächste Seite
- Siehe nächste Seite

Im Bereich hoher Drehzahlen der permanenterregten Synchronmaschine soll ein Steuerverfahren gemäß folgender Abbildung benutzt werden:



- d) Geben Sie die mittlere Schaltfrequenz eines Transistors bei diesem Steuerverfahren an.
e) Berechnen Sie die Amplitude der Grundschwingung $\hat{U}_{a0,1}$ für den Schaltwinkel $\delta = 10^\circ$.

Lösung

- a) Bei Raumzeigermodulation gilt:

$$\hat{U}_{1,RZM}^* = \sqrt{2} \cdot U_{1max,RZM} \quad (62)$$

$$= \sqrt{2} \cdot \frac{U_d}{\sqrt{6}} \quad (63)$$

$$\approx 288,67 \text{ V} \quad (64)$$

Bei Blocktaktung gilt:

$$\hat{U}_{1,BT}^* = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{1ab,BT}}{\sqrt{3}} \quad (65)$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d \quad (66)$$

$$\approx 318,31 \text{ V} \quad (67)$$

- b) Länge der Raumzeiger berechnen:

$$|\underline{U}_x| = \frac{2}{3} \cdot U_d \quad (68)$$

$$\approx 333,3 \text{ V} \quad (69)$$

$$l_{RZ1..6} = \frac{|\underline{U}_x|}{50 \text{ V/cm}} = \frac{333,3 \text{ V}}{50 \text{ V/cm}} \quad (70)$$

$$\approx 6,67 \text{ cm} \quad (71)$$

Raumzeiger der Grundschwingung für $\omega t = \frac{3\pi}{4}$ und $\hat{U}_1^* = 200 \text{ V}$:

$$\underline{u}_1^* = \hat{U}_1^* \cdot e^{j \cdot \frac{3\pi}{4}} \quad (72)$$

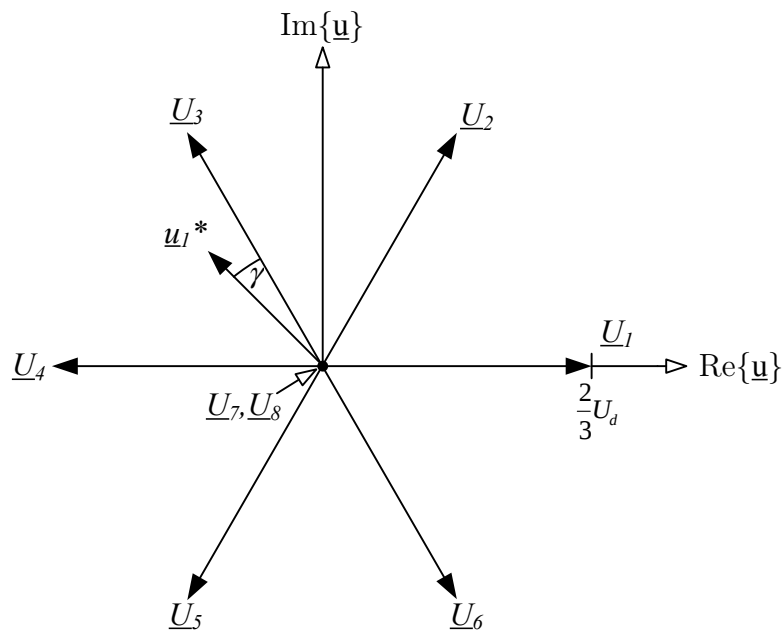
$$|\underline{u}_1^*| = \hat{U}_1^* \quad (73)$$

$$= 200 \text{ V} \quad (74)$$

$$l_{RZ} = \frac{|\underline{u}_1^*|}{50 \text{ V/cm}} = \frac{200 \text{ V}}{50 \text{ V/cm}} \quad (75)$$

$$= 4 \text{ cm} \quad (76)$$

$$\angle \{\underline{u}_1^*\} = 135^\circ \quad (77)$$



- c) Es werden die Raumzeiger 3, 4, 7 und 8 verwendet.
Berechnung des Winkels γ :

$$\gamma = \angle \{u_1^*\} - \angle \{U_3\} \quad (78)$$

$$= \frac{3\pi}{4} - \frac{2\pi}{3} \quad (79)$$

$$= \frac{\pi}{12} \quad (80)$$

Berechnung der zeitlichen Anteile der Schaltzustände an der Taktperiode T :

$$\frac{t_3}{T} = \frac{\hat{U}_1^*}{U_d} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) \quad (81)$$

$$\approx 0,490 \quad (82)$$

$$\frac{t_4}{T} = \frac{\hat{U}_1^*}{U_d} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\gamma) \quad (83)$$

$$\approx 0,179 \quad (84)$$

$$\frac{t_7 + t_8}{T} = 1 - \frac{t_3}{T} - \frac{t_4}{T} \quad (85)$$

$$\approx 0,331 \quad (86)$$

- d) Während einer Taktperiode treten drei positive und drei negative Schaltflanken auf. Die Frequenz der Grundschwingung beträgt:

$$f_1 = \frac{\omega}{2\pi} \quad (87)$$

Damit beträgt die Schaltfrequenz:

$$f_S = 3 \cdot \frac{\omega}{2\pi} \quad (88)$$

Beziehungsweise:

$$f_S = 3 \cdot f_1 \quad (89)$$

e) Die Spannung u_{a0} lässt sich mit Hilfe einer Fourierreihe als $s(\omega t)$ darstellen:

$$s(\omega t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} A_{\nu} \cdot \cos(\nu \omega t) + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\nu} \cdot \sin(\nu \omega t) \quad (90)$$

$$(91)$$

Aus Symmetriegründen ist $A_0 = 0$ und $A_{\nu} = 0$. Die Grundschwingung lässt sich wie folgt darstellen:

$$u_{a0,1} = \hat{U}_{a0,1} \cdot \sin(\omega t) \quad (92)$$

$$= B_1 \cdot \sin(\omega t) \quad (93)$$

Die Amplitude $\hat{U}_{a0,1}$ kann wie folgt berechnet werden:

$$\hat{U}_{a0,1} = B_1 \quad (94)$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{a0}(\omega t) \cdot \sin(1 \cdot \omega t) \cdot d\omega t \quad (95)$$

$$= \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u_{a0}(\omega t) \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t \quad (96)$$

$$= \frac{4}{\pi} \cdot \left(\int_0^{\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2}} \frac{U_d}{2} \sin(\omega t) \cdot d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2}}^{\frac{\pi}{2}} -\frac{U_d}{2} \sin(\omega t) \cdot d\omega t \right) \quad (97)$$

$$= \frac{4}{\pi} \cdot \left(\left[-\frac{U_d}{2} \cdot \cos(\omega t) \right]_0^{\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2}} + \left[\frac{U_d}{2} \cdot \cos(\omega t) \right]_{\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \right) \quad (98)$$

$$= \frac{4}{\pi} \cdot \left(-\frac{U_d}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2}\right) + \frac{U_d}{2} \cdot \cos(0) + \frac{U_d}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \frac{U_d}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2}\right) \right) \quad (99)$$

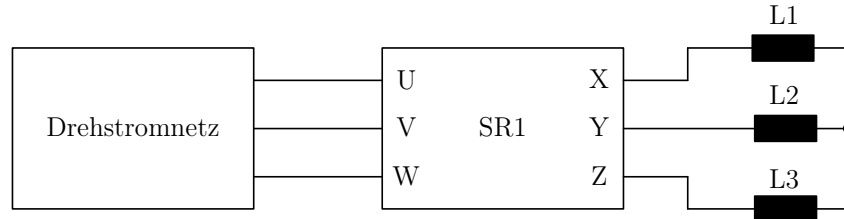
$$= U_d \cdot \left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\delta}{2}\right) \right) \quad (100)$$

Mit $\delta = 10^\circ$ ergibt sich:

$$\hat{U}_{a0,1} = 262,82 \text{ V} \quad (101)$$

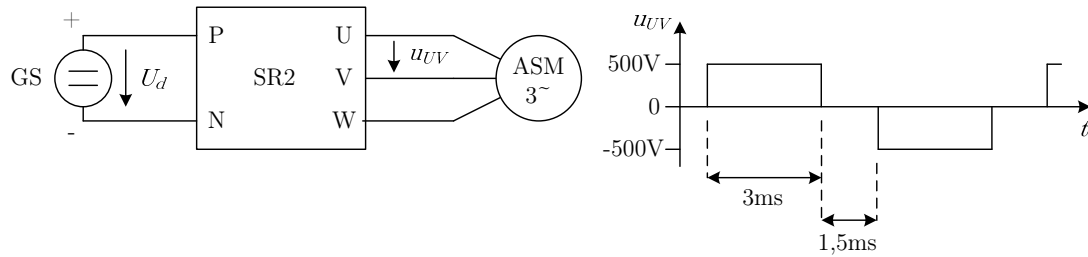
5 Stromrichterschaltungen für unterschiedliche Anforderungen

a)



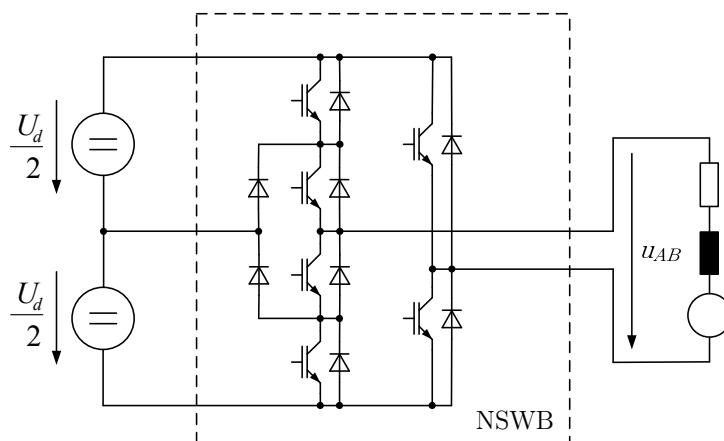
Ein Stromrichter *SR1* soll zur Belastung eines Drehstromnetzes mit induktivem Blindstrom benutzt werden. Im Leistungsteil des Stromrichters werden Thyristoren eingesetzt, mit denen der Blindstrom gesteuert werden kann. Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters *SR1*. Wie heißt diese Schaltung?

b)



Ein Stromrichter *SR2* versorgt einen Drehstromasynchronmotor aus einer Gleichspannungsquelle *GS*. Der Leistungsbereich beträgt 50 kW. Am Ausgang wird zwischen *U* und *V* die Spannung u_{UV} gemessen. Geben Sie den Namen der Schaltung an, die in *SR2* eingesetzt wird. Welchen Wert hat die Gleichspannung U_d (die Halbleiter seien ideal)? Welche Halbleiter werden in *SR2* eingesetzt?

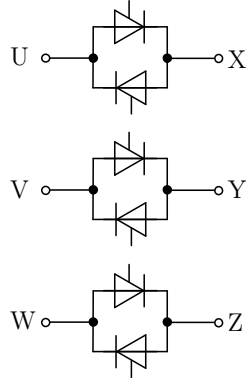
c)



Es wird vorgeschlagen, eine Hälfte einer neuen selbstgeführten Wechselstrombrückenschaltung „NSWB“ mit der NPC-Schaltung 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 500 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 .