
Schriftliche Prüfung

Elektrische Maschinen und Stromrichter

Prof. Dr.-Ing. Michael Braun

Dipl.-Ing. Mario Gommeringer

M.Sc. Dennis Bräcke

– Aufgaben zur Prüfung Nr. 132 am 16. Februar 2016 –

Vorname:

Nachname:

Matrikelnummer:

1 Gleichstromreihenschlussmotor

Von einem Gleichstromreihenschlussmotor sind folgende Daten bekannt:

Daten der Reihenschlussmaschine bei Speisung mit Gleichspannung

U_{MN}	=	240 V	Nenngleichspannung an den Motorklemmen
I_{MN}	=	8 A	Nennstrom des Motors
P_{mechN}	=	1760 W	Mechanische Nennleistung des Motors
R_{Σ}	=	2,5 Ω	Summe der Widerstandswerte von Anker- und Feldwicklung

Vereinfachende Annahmen

- Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt.
- Es treten keine Sättigungseffekte im Eisen auf.

Durch eine Messung wurden außerdem folgende Daten eines Betriebspunktes 1 ermittelt:

U_{M1}	=	119,53 V
I_{M1}	=	5,4 A
n_{M1}	=	6000 min ⁻¹

- Berechnen Sie den Wirkungsgrad η_N des Motors im Nennpunkt.
- Berechnen Sie das Nennmoment M_N des Motors.
- Berechnen Sie die Nenndrehzahl n_N des Motors.
- Welche Drehzahl n_2 stellt sich ein, wenn der Motor an Nennspannung betrieben und mit dem Moment $M_{M2} = 0,5 \cdot M_N$ belastet wird?
- Für welche Antriebsaufgaben wird der Gleichstromreihenschlussmotor eingesetzt? Nennen Sie zwei konkrete Beispiele.

Lösung

- a) Der Wirkungsgrad η_N der Maschine wird über die elektrische bzw. mechanische Nennleistung berechnet:

$$\eta_N = \frac{P_{\text{mechN}}}{P_{\text{elN}}} = \frac{P_{\text{mechN}}}{U_{MN} \cdot I_{MN}} = \frac{1760 \text{ W}}{8 \text{ A} \cdot 240 \text{ V}} = 91,67\% \quad (1)$$

- b) Berechnung des Nennmoments der Maschine mit Hilfe der Messdaten von Betriebspunkt 1:

$$U_{M1} = R_{\Sigma} I_{M1} + c\Phi_{M1} \Omega_{M1} \quad (2)$$

$$c\Phi_{M1} = \frac{U_{M1} - R_{\Sigma} I_{M1}}{\Omega_{M1}} = \frac{U_{M1} - R_{\Sigma} I_{M1}}{2\pi n_{M1} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 0,1688 \text{ Vs} \quad (3)$$

$$M_N = c\Phi_N \cdot I_{MN} = \frac{I_{MN}^2}{I_{M1}} \cdot c\Phi_{M1} = 2,0 \text{ Nm} \quad (4)$$

- c) Die Nenndrehzahl wird mit Hilfe des Nennmoments bestimmt

$$P_{\text{mechN}} = M_N \cdot \Omega_N \quad (5)$$

$$\Omega_N = \frac{P_{\text{mechN}}}{M_N} = 880,0 \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

$$n_N = \frac{P_{\text{mechN}}}{M_N} \cdot \frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \approx 8400 \text{ min}^{-1} \quad (7)$$

- d) Um die Drehzahl n_2 zu bestimmen, muss zunächst der Ankerstrom berechnet werden, der im Arbeitspunkt 2 fließt:
mit

$$M_2 = c\Phi_{M2} \cdot I_{M2} \quad (8)$$

$$\frac{c\Phi_{M2}}{I_{M2}} = \frac{c\Phi_N}{I_{MN}} \quad (9)$$

gilt

$$I_{M2} = \frac{M_2}{c\Phi_{M2}} = \frac{M_2 \cdot I_{MN}}{c\Phi_N \cdot I_{M2}} \quad (10)$$

$$I_{M2} = \sqrt{\frac{M_2 \cdot I_{MN}}{c\Phi_N}} = 5,6569 \text{ A} \quad (11)$$

Die negative Lösung aus Gleichung (11) entfällt, da die Maschine mit einem Lastmoment beaufschlagt wird. Die resultierende Durchflutung ergibt sich zu

$$c\Phi_{M2} = \frac{M_2}{I_{M2}} = 0,1768 \text{ Vs} \quad (12)$$

Setzt man Gleichung (12) in die Ankerspannungsgleichung der Gleichstrommaschine ein, so erhält man die Drehzahl im Arbeitspunkt 2

$$U_{M2} = U_N = R_{\Sigma} \cdot I_{M2} + c\Phi_{M2} \cdot \Omega_2 \quad (13)$$

$$\Omega_2 = \frac{U_N - R_{\Sigma} I_{M2}}{c\Phi_{M2}} \approx 1278 \text{ s}^{-1} \quad (14)$$

$$n_2 = \Omega_2 \cdot \frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \approx 12200 \text{ min}^{-1} \quad (15)$$

Als Alternative, kann die gesuchte Drehzahl n_2 direkt mit der Formel für die Reihenschlussmaschine aus der Formelsammlung bestimmt werden. Es gilt

$$\Omega_2 = \frac{U_N}{\sqrt{M_2 \cdot \frac{c\Phi_N}{I_{MN}}}} - \frac{R_\Sigma}{\frac{c\Phi_N}{I_{MN}}} \quad (16)$$

$$\Omega_2 = \frac{U_N}{\sqrt{0,5 \cdot M_N \cdot \frac{c\Phi_N}{I_{MN}}}} - \frac{R_\Sigma}{\frac{c\Phi_N}{I_{MN}}} \approx 1278 \text{ s}^{-1} \quad (17)$$

$$n_2 = \Omega_2 \cdot \frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \approx 12200 \text{ min}^{-1} \quad (18)$$

- e) Die Gleichstromreihenschlussmaschine wird dort eingesetzt, wo eine hohe Leerlaufdrehzahl und ein hohes Anlauf-/Blockiermoment benötigt wird. Sie findet zum Beispiel Einsatz in Staubsaugern oder Bohrmaschinen (auch weitere Lösungsvorschläge möglich).

2 Synchrongenerator am starren Netz

Ein Synchrongenerator mit Turboläufer wird von einer Dampfturbine angetrieben und speist elektrische Leistung in ein starres Netz.

Daten des Synchrongenerator

U_N	=	30 kV	Nennspannung (Leiterspannung)
I_N	=	20 kA	Nennstrom
f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
$\cos(\varphi_N)$	=	0,8 übererregt	Nennleistungsfaktor
X_S	=	1,5 Ω	Synchronreaktanz
U_{fN}	=	750 V	Nennerregerspannung
I_{fN}	=	6 kA	Nennerregerstrom
p	=	1	Polpaarzahl

Vereinfachende Annahmen

- Der Generator sei, bis auf die Verluste der Erregerwicklung, verlustfrei.

- a) Berechnen Sie den Polradwinkel im Nennbetrieb.
- b) Berechnen Sie die Verlustleistung in der Erregerwicklung.
- c) Berechnen Sie das Nennmoment M_N und das Kippmoment M_K .
- d) Zeichnen Sie das maßstäbliche Spannungszeigerdiagramm mit $\underline{U}_S$, $\underline{U}_P$ und $X_S \underline{I}_S$ an der Kippgrenze bei Nennerregung. (5 kV/cm)
- e) Berechnen Sie den Effektivwert des Netzstroms an der Kippgrenze und tragen Sie ihn in das Diagramm aus Aufgabenteil d) ein. (5 kA/cm)
- f) Muss der Erregerstrom bei gleichbleibender Wirkleistung erhöht oder erniedrigt werden, um den Betriebspunkt in den stabilen Bereich zu bringen?

Lösung

a) Zeigerdiagramm im Nennbetrieb (Zeichnung nicht gefordert):

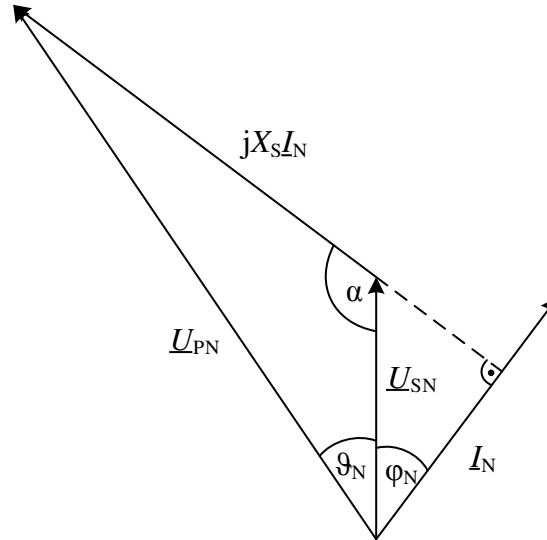


Abbildung 1: Zeigerdiagramm des Synchrongenerators im Nennbetrieb

Durch die geometrischen Beziehungen im Zeigerdiagramm aus Abbildung 1 lässt sich der Hilfswinkel $\alpha = 90^\circ + \varphi_N = 126,8699^\circ$ bestimmen. Über den Cosinussatz lässt sich der Betrag der Polradspannung $\underline{U}_{PN}$ bestimmen

$$U_{PN}^2 = U_{SN}^2 + (X_S I_N)^2 - 2U_{SN} X_S I_N \cdot \cos(\alpha) \quad (19)$$

$$U_{PN} = \sqrt{\left(\frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2 + (X_S I_N)^2 - 2U_{SN} X_S I_N \cdot \cos(90^\circ + \varphi_N)} = 42,7029 \text{ kV} \quad (20)$$

Mit Hilfe des Sinussatz lässt sich der Polradwinkel ϑ_N bestimmen

$$\frac{\sin \vartheta_N}{X_S I_N} = \frac{\sin \alpha}{U_{PN}} \quad (21)$$

$$\vartheta_N = \arcsin\left(\frac{X_S I_N}{U_{PN}} \cdot \sin(\alpha)\right) = 0,5968 \text{ rad} = 34,1958^\circ \quad (22)$$

b) Die Verluste der Erregerwicklung werden über die elektrische Leistung errechnet

$$P_V = U_{fN} \cdot I_{fN} = 4,5 \text{ MW} \quad (23)$$

c) Da der Synchrongenerator als verlustfrei angenommen wird, gilt $P_{\text{mech}N} = P_{\text{el}N}$

$$P_{\text{mech}N} = P_{\text{el}N} = \sqrt{3} U_N I_N \cdot \cos(\varphi_N) = M_N \cdot \Omega_N = M_N \cdot \frac{2\pi f_N}{p} \quad (24)$$

$$M_N = \sqrt{3} U_N \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_N) \cdot \frac{p}{2\pi f_N} = 2,6464 \text{ MNm} \quad (25)$$

Das Kippmoment wird genau dann erreicht, wenn für den Polradwinkel gilt $\vartheta_K = 90^\circ = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$. Die Maschine wird am starren Netz betrieben. Der Generator ist fremderregt. Es gilt $\underline{U}_{SK} = \underline{U}_{SN}$ und $\underline{U}_{PK} = \underline{U}_{PN}$. Für das resultierende Moment M_K gilt (Formel aus Formelsammlung):

$$M_K = 3p \cdot \frac{U_S \cdot U_{PN} \cdot \sin(\vartheta_K)}{\omega_N \cdot X_S} \quad (26)$$

$$M_K = 3p \cdot \frac{U_N \cdot U_{PN} \cdot \sin(\frac{\pi}{2})}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot X_S} = 4,7087 \text{ MNm} \quad (27)$$

- d) Mit den Bedingungen $\underline{U}_{SK} = \underline{U}_{SN}$ und $\underline{U}_{PK} = \underline{U}_{PN}$ lässt sich unter Verwendung des Satz des Pythagoras der Spannungsabfall $I_K X_S$ über der Reaktanz berechnen:

$$I_K X_S = \sqrt{U_S^2 + U_{PN}^2} = \sqrt{\left(\frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2 + U_{PN}^2} = 46,0819 \text{ kV} \quad (28)$$

Das resultierende Zeigerdiagramm:

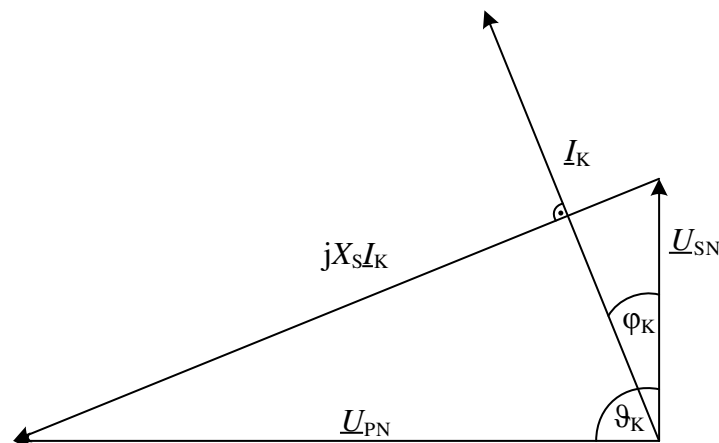


Abbildung 2: Zeigerdiagramm des Synchrongenerators bei Nennerregung und Belastung mit Kippmoment

- e) Mit Gleichung (28) lässt sich der Maschinenschstrom I_{SK} bei Belastung mit Kippmoment berechnen und in Abbildung 2 einzeichnen.

$$I_K = 30,7212 \text{ kA} \quad (29)$$

- f) Vom Kippunkt aus gesehen, muss der Erregerstrom vergrößert werden, um den Arbeitspunkt des Synchrongenerator in den stabilen Bereich zu verschieben (vgl. Gleichung (26)).

3 Netzgeführte Drehstrombrückenschaltung

Eine netzgeführte Drehstrombrücke mit Thyristoren ist über einen Dy-Transformator am Mittelspannungsnetz angeschlossen und speist eine Elektrolyseanlage.

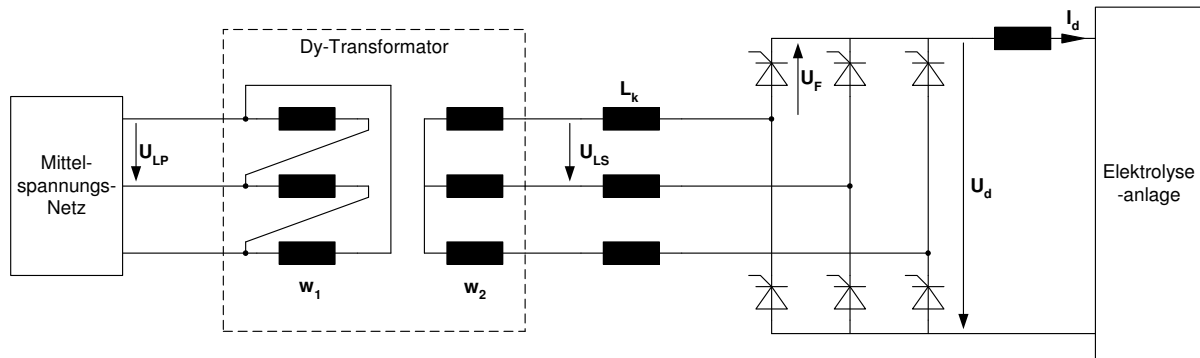


Abbildung 3: Netzgeführte Drehstrombrückenschaltung

Folgende Daten sind gegeben:

U_{LP}	=	3,3 kV	Leiterspannung auf der Primärseite des Transformators
U_{LS}	=	130 V	Leiterspannung auf der Sekundärseite des Transformators
I_{dN}	=	2 kA	Nennwert des Gleichstroms
L_k	=	15 μ H	Kommutierungsinduktivität
f_N	=	50 Hz	Netzfrequenz

Vereinfachende Annahmen

- Das Mittelspannungsnetz sei ein ideales Drehstromnetz.
- Der Transformator wird als ideal und verlustfrei angenommen.
- Die Thyristoren seien ideal und verlustfrei.
- Der Zwischenkreisstrom sei ein ideal glatter Gleichstrom.

- Berechnen Sie das Übersetzungsverhältnis der Windungszahlen $\frac{w_2}{w_1}$ des Dy-Transformators.
- Berechnen Sie die maximale Gleichspannung U_{dN} bei Nengleichstrom $I_d = I_{dN}$.
- Berechnen Sie die vom Mittelspannungsnetz abgegebenen Wirkleistung bei $\alpha = 0^\circ$ und Nengleichstrom.

Lösung

- a) Der eingesetzte Transformator ist netzseitig im Dreieck verschaltet. Deshalb muss der Faktor $\sqrt{3}$ bei der Berechnung des Windungszahlverhältnisses berücksichtigt werden

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{U_{LS}}{\sqrt{3}U_{LP}} = 0,0227 \quad (30)$$

- b) Die maximale Gleichspannung U_{dN} bei Nenngleichstrom $I_d = I_{dN}$ wird für einen Steuerwinkel von $\alpha = 0^\circ$ erreicht.

$$U_{d\alpha} = U_{di} \cdot \cos(\alpha) - \frac{3}{\pi} \omega_N L_k \cdot I_d \quad (31)$$

$$U_{dN} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{LS} - \frac{3}{\pi} \cdot 2\pi f_N \cdot L_k \cdot I_{dN} = 166,5617 \text{ V} \quad (32)$$

- c) Alle Betriebsmittel der Drehstrombrückenschaltung werden als ideal verlustfrei angenommen. Die Wirkleistung, die dem Mittelspannungsnetz entnommen wird ist gleich der Leistung auf Gleichspannungsseite.

$$P_{AC,P} = P_{AC,S} = P_{DC} = U_{dN} \cdot I_{dN} = 333,1234 \text{ kW} \quad (33)$$

4 Pulswechselrichter mit Raumzeigermodulation

Ein Pulswechselrichter mit an den Klemmen a,b, und c angeschlossener Asynchronmaschine soll mit Raumzeigermodulation betrieben werden.

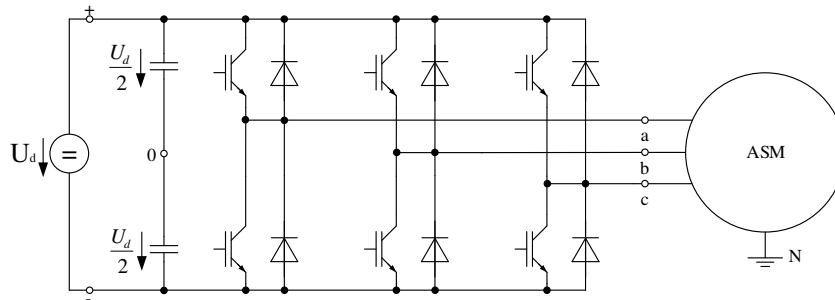


Abbildung 4: Pulswechselrichter

Zustand Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{a0}/(U_d/2)$	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
$U_{b0}/(U_d/2)$	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1
$U_{c0}/(U_d/2)$	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1

Tabelle 1: Tabelle der Schaltzustände

Folgende Daten sind gegeben

U_N	=	400 V	Nennspannung der Asynchronmaschine
U_d	=	650 V	Zwischenkreisspannung
f_p	=	10 kHz	Modulationsfrequenz des Umrichters

- Zeichnen Sie maßstäblich die aus den Ausgangsspannungen U_{a0} , U_{b0} , U_{c0} resultierenden Raumzeiger der selbstgeführten Drehstrombrücke für die Schaltzustände 1 bis 8.
- Schraffieren Sie den durch eine Pulsweitenmodulation erreichbaren Bereich im Bild aus a) für eine sinusförmige, symmetrische Steuerung der Ausgangsspannungen.
- Wie hoch muss die Gleichspannung U_d mindestens sein, damit die ASM mit Nennspannung betrieben werden kann? Geben Sie den Wert für Blocktaktung und Raumzeigermodulation an.

Die Asynchronmaschine soll mit Nennspannung betrieben werden, so dass die Mittelwerte der Sternspannungen folgenden Funktionen entsprechen

- $u_{aN} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_N \cdot \cos(\omega t)$
- $u_{bN} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_N \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$
- $u_{cN} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_N \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3})$

- Bestimmen Sie für eine Modulationsperiode bei $\omega t_1 = 75^\circ$ die bei der symmetrischen Raumzeigermodulation mit beiden Nullraumzeigern benutzten Schaltzustände und geben Sie die zugehörigen Zeitdauern an.
- Geben Sie die Reihenfolge der Schaltzustände aus Aufgabenteil d) an.

Lösung

- a) und
b)

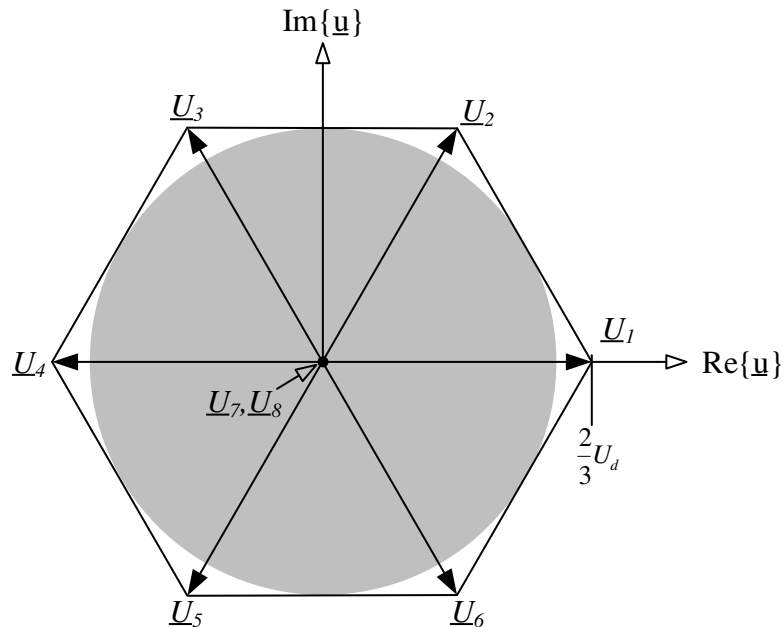


Abbildung 5: Raumzeiger der Ausgangsspannungen und der durch PWM erreichbare Bereich

- c) Blocktaktung:
Die Effektivwerte U_{1ab} , U_{1bc} und U_{1ca} der Grundschnungen der Leiterspannungen berechnen sich zu

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

Die Formel wird nach U_d aufgelöst und die Grundschnung der Leiterspannungen mit der Nennleiterspannung U_N der Asynchronmaschine gleichgesetzt:

$$U_{d,BT} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot U_{1ab} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot U_N \quad (35)$$

$$\approx 513,02 \text{ V} \quad (36)$$

Raumzeigermodulation:

Die maximalen Effektivwerte der Grundschnung der Strangspannungen berechnen sich zu:

$$U_{1max} = \frac{U_d}{\sqrt{6}} \quad (37)$$

Die Formel wird nach U_d aufgelöst und die Grundschnung der Strangspannungen mit der Nennstrangspannung U_{SN} der Asynchronmaschine gleichgesetzt:

$$U_d = \sqrt{6} \cdot U_{1max} = \sqrt{6} \cdot U_{SN} \quad (38)$$

$$U_{SN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (39)$$

$$U_{d,RZM} = \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{3}} \cdot U_N \quad (40)$$

$$\approx 565,69 \text{ V} \quad (41)$$

d) Um die Einschalt Dauern berechnen zu können, muss zuerst der Raumzeiger der Maschinenspannung zum Zeitpunkt $\omega t_1 = 75^\circ$ bestimmt werden.

$$|\underline{u}| = \hat{U}_{SN} = \hat{u}_{aN} = \hat{u}_{bN} = \hat{u}_{cN} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_N = 326,5986 \text{ V} \quad (42)$$

$$\arg(\underline{u}) = \omega t_1 = 75^\circ = \frac{5\pi}{12} \text{ rad} \quad (43)$$

$$\underline{u} = 326,5986 \text{ V} e^{j\frac{5\pi}{12}} \quad (44)$$

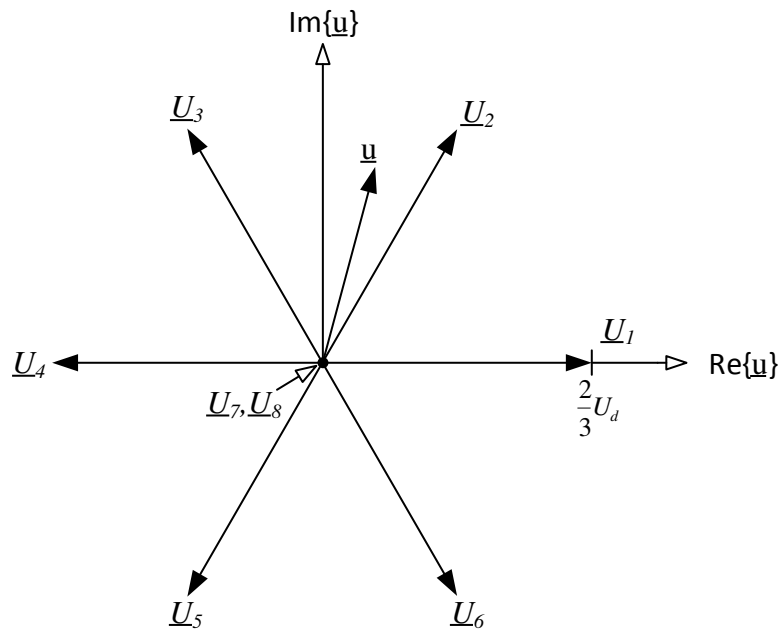


Abbildung 6: Raumzeiger der Maschinenspannung für $\omega t_1 = 75^\circ$

Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, sind die benachbarten Zustände Z2 und Z3. Da die geforderte Maschinenspannung $\hat{U}_{SN}$ kleiner ist, als der maximale Amplitudenwert $\sqrt{2}U_{1max}$ der Grundschiwingung bei Raumzeigermodulation (vgl. Gleichung (37)), müssen zusätzlich die Freilaufzustände Z7 und Z8 verwendet werden. Aus Tabelle 1 lassen sich die Schaltzustände des Pulswechselrichters ablesen.

Die Zeitdauern berechnen sich zu:

$$\gamma = \angle \{u\} - \angle \{U_2\} \quad (45)$$

$$= \frac{5\pi}{12} - \frac{\pi}{3} \quad (46)$$

$$= \frac{\pi}{12} \quad (47)$$

$$\frac{t_2}{T} = \frac{\hat{U}_{SN}}{U_d} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) \quad (48)$$

$$\frac{t_3}{T} = \frac{\hat{U}_{SN}}{U_d} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\gamma) \quad (49)$$

$$T = \frac{1}{f_p} = 100 \mu s \quad (50)$$

$$t_2 \approx 61,54 \mu s \quad (51)$$

$$t_3 \approx 22,54 \mu s \quad (52)$$

$$t_7 + t_8 = T - t_2 - t_3 \approx 15,94 \mu s \quad (53)$$

$$t_7 = t_8 = \frac{t_7 + t_8}{2} \approx 7,97 \mu s \quad (54)$$

e) Die Reihenfolge der Schaltzustände ist
7 → 2 → 3 → 8 → 3 → 2 → 7 bzw.

5 Stromrichterschaltungen und elektrische Maschinen für verschiedene Anwendungen

- a) Ein Stromrichter SR1 soll zur Steuerung der Heizleistung eines Widerstands R benutzt werden (Abbildung 7). Am Ausgang wird der Stromverlauf i_R gemessen. Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR1. Wie heißt diese Schaltung? Wie heißt das hier benutzte Steuerverfahren?

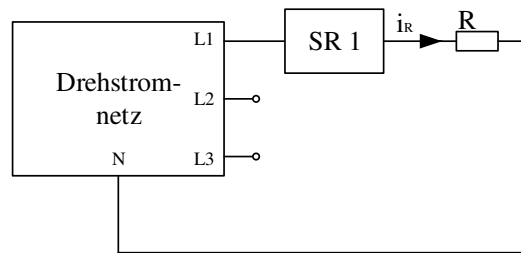


Abbildung 7: Stromrichterschaltung 1

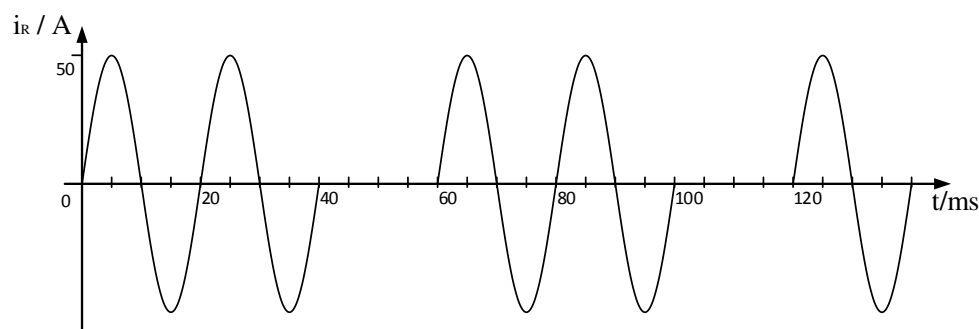


Abbildung 8: Zeitverlauf des Stroms i_r

- b) Ein Stromrichter SR2 versorgt eine Drehstromasynchronmaschine (ASM) aus einer Gleichspannungsquelle GS (Abbildung 9). Die Nennleistung des Motors beträgt $P_N = 1,2 \text{ MW}$. An einer Ausgangsphase des Stromrichters wird die Spannung u_{a0} zum Mittelpunkt 0 der Speisespannung gemessen (Abbildung 10). Zeichnen Sie das Schaltbild des Stromrichters SR2. Wie heißt die Schaltung?

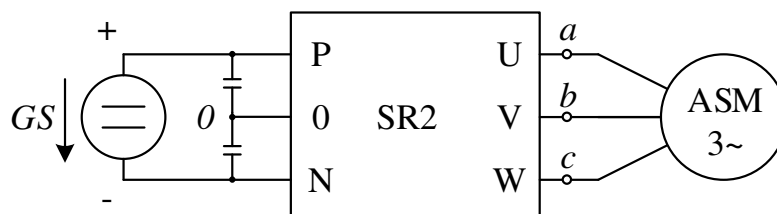


Abbildung 9: Stromrichterschaltung 2

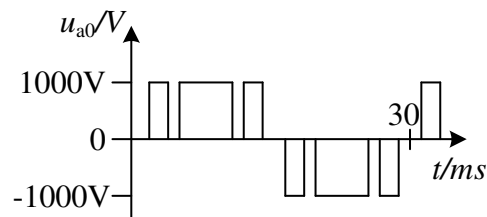


Abbildung 10: Zeitverlauf der Spannung u_{a0}

- c) Eine einphasige Last soll mit einer möglichst gut sinusförmigen Spannung gespeist werden. Dazu wird eine Schaltung, zusammengesetzt aus den Teilen A und B vorgeschlagen (Abbildung 11).
- c.1) Welche Spannungswerte kann die Spannung u_B am Ausgang des Teilstromrichters B annehmen?
- c.2) Welche Spannungswerte kann die Gesamtspannung u_{AB} annehmen?
- c.3) Geben Sie den Namen der für Teil A und Teil B benutzten Stromrichterschaltung an.

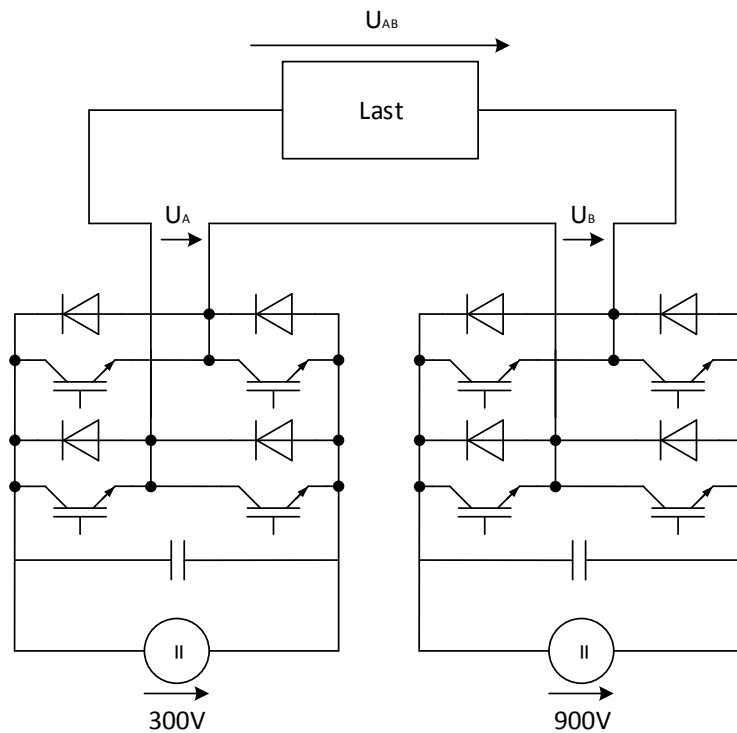
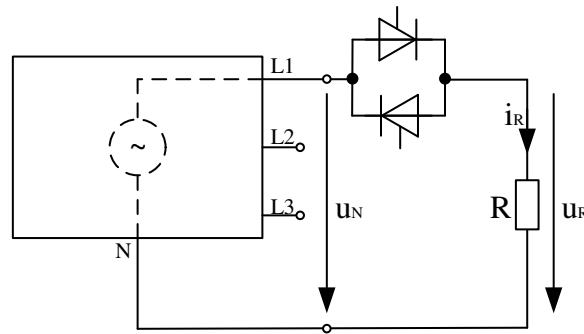


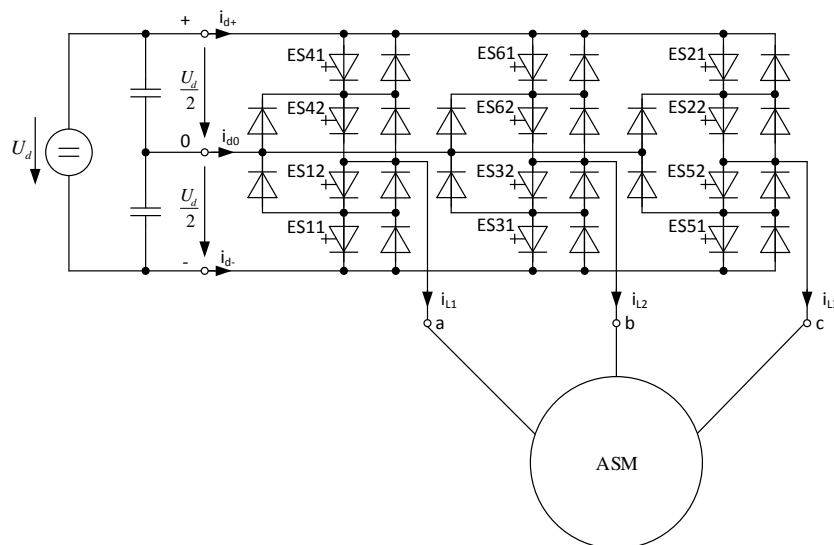
Abbildung 11: Stromrichterschaltung 3

Lösung

- a) Stromrichter SR1 ist ein Wechselstromsteller. Das verwendete Steuerverfahren ist die Schwingungspaketsteuerung. Prinzipschaltbild:



- b) Stromrichter SR2 ist ein Neutral-Point-Clamped-Stromrichter mit abschaltbaren Bauelementen (z.B. GTO oder IGCT) und Leistungsdioden.



- c) c.1) Die Spannung u_B am Ausgang des Teilstromrichters B kann die Werte $+900\text{ V}$, 0 V und -900 V annehmen.
c.2) Die Gesamtspannung u_{AB} kann die Werte $\pm 1200\text{ V}$, $\pm 900\text{ V}$, $\pm 600\text{ V}$, $\pm 300\text{ V}$ und 0 V annehmen.
c.3) Zum Einsatz kommen zwei Wechselstrombrückenschaltungen (4 Quadranten-Steller).