
Schriftliche Prüfung
Elektrische Maschinen und Stromrichter
Prof. Dr.-Ing. Michael Braun
Dennis Bräcke

– Aufgaben zur Prüfung Nr. 134 am 14. Februar 2017 –

A

Vorname:
Nachname:
Matrikelnummer:

Lösungsblatt

Diagramm für Aufgabe 4:

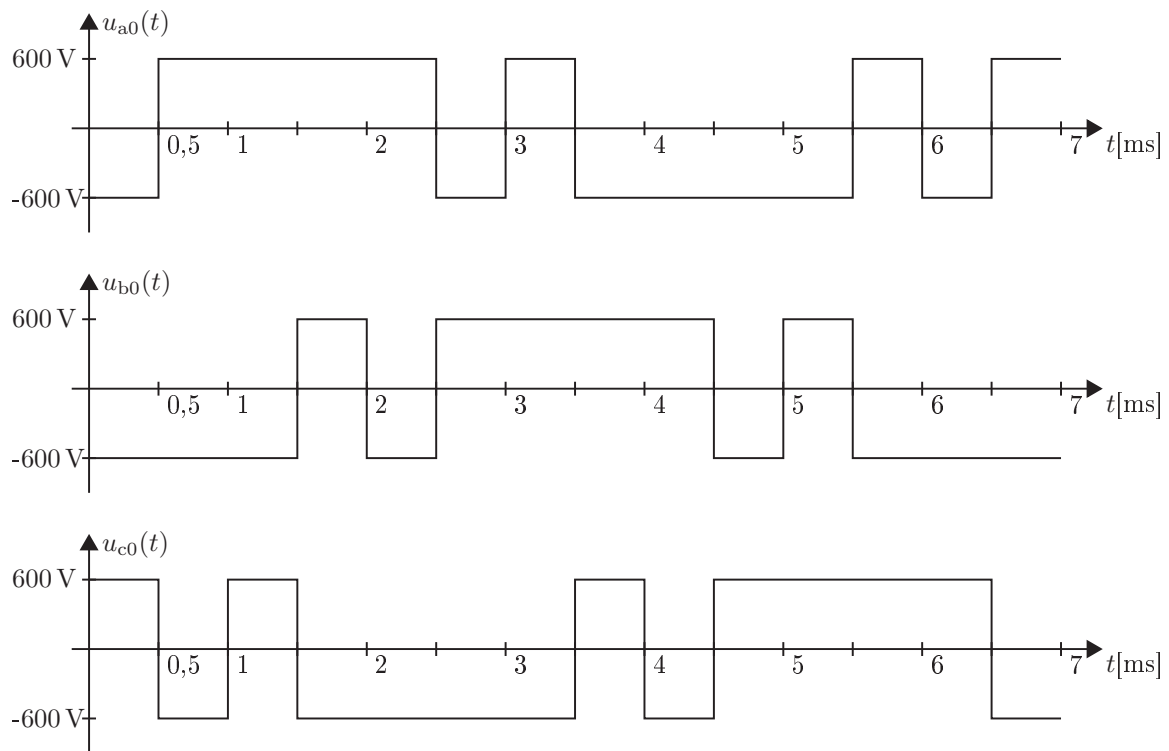


Abbildung A: Zeitverläufe der Phasenspannungen

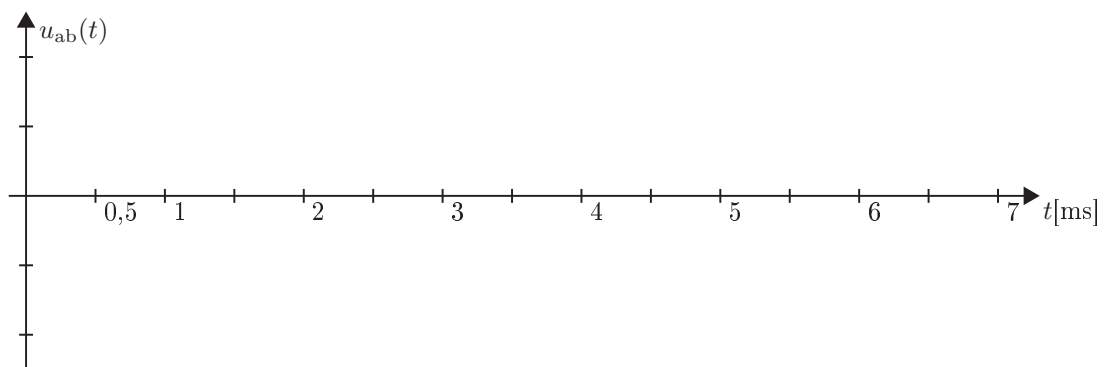


Abbildung B: Zeitverlauf der Leiterspannung u_{ab}

1 Anfahren einer fremderregten, kompensierten Gleichstrommaschine

Die aus einer Spannungsquelle U_d gespeiste Gleichstrommaschine GM sei nennerregt und wird mit dem Lastmoment M_L belastet. Während des Anfahrvorgangs soll ein separater Ankervorwiderstand R_V benutzt werden, um den Ankerstrom I_A zu begrenzen.

Vereinfachende Annahmen

- Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt

Folgende Daten sind gegeben

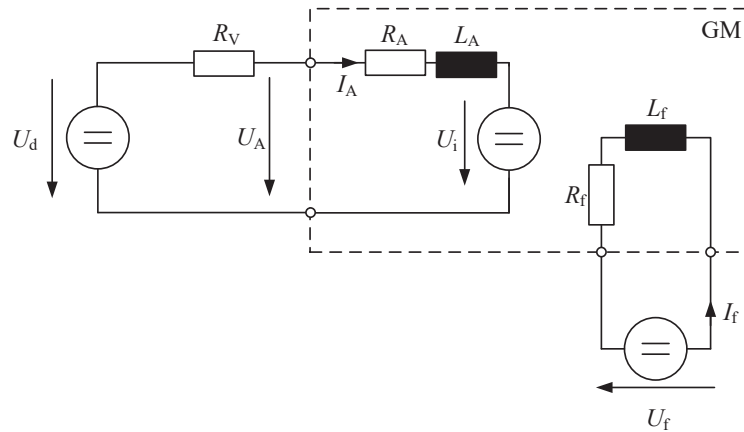
U_{AN}	=	400 V	Ankernennspannung
I_{AN}	=	100 A	Ankernennstrom
n_N	=	1740 min^{-1}	Nenndrehzahl
n_{0N}	=	1800 min^{-1}	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und Nennerregung
M_L	=	$0,5 \cdot M_N$	Lastmoment

Aufgaben

- Zeichnen Sie das Schaltbild des Systems mit der Spannungsquelle U_d , dem Ankervorwiderstand R_V und der Gleichstrommaschine einschließlich Erregerkreis und Erregerspannungsquelle U_f .
- 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 der Spannungsquelle U_d mit dem Wert der Nennankerspannung U_{AN} angefahren werden. Berechnen Sie den Wert des Ankervorwiderstands.

Lösungsvorschlag

a)



b) $c\phi_N$ aus Leerlaufdrehzahl:

$$\Omega_{0N} = \frac{2\pi}{60 \frac{s}{min}} \cdot n_{0N} = 188,50 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

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

$$c\phi_N = \frac{U_{AN}}{\Omega_{0N}} = 2,1221 \text{ V s} \quad (3)$$

c) Ankerwiderstand aus Nennbetrieb:

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

$$\Omega_N = \frac{2\pi}{60 \frac{s}{min}} \cdot n_N = 182,21 \text{ s}^{-1} \quad (5)$$

$$R_A = \frac{U_{AN} - c\phi_N \Omega_N}{I_{AN}} = 0,1333 \Omega \quad (6)$$

d)

$$P_{el,N} = U_{AN} \cdot I_{AN} = 40 \text{ kW} \quad (7)$$

$$P_V = R_A \cdot I_{AN}^2 = 1,333 \text{ kW} \quad (8)$$

$$P_{mech,N} = P_{el,N} - P_V = 38,6667 \text{ kW} \quad (9)$$

$$\eta_N = \frac{P_{mech,N}}{P_{el,N}} = 96,67 \% \quad (10)$$

e)

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

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

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

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

$$U_A = 393,3333 \text{ V} \quad (15)$$

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 $I_A \leq 2 \cdot I_{AN}$

$$R_V \geq \frac{U_{AN} - c\phi_N \Omega}{2 \cdot I_{AN}} - R_A = \frac{U_{AN}}{2 \cdot I_{AN}} - R_A = 1,87 \, \Omega \quad (18)$$

2 Synchrongenerator am starren Netz

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

Vereinfachende Annahmen

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

Folgende Daten sind gegeben

U_N	=	30 kV	Nennspannung (Leiterspannung)
I_N	=	10 kA	Nennstrom
f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
$\cos(\varphi_N)$	=	0,8 übererregt	Nennleistungsfaktor
X_S	=	3Ω	Synchronreaktanz
U_{fN}	=	750 V	Nennerregerspannung
I_{fN}	=	3 kA	Nennerergerstrom
p	=	2	Polpaarzahl

Aufgaben

- Berechnen Sie den Polradwinkel im Nennbetrieb.
- Berechnen Sie die Verlustleistung in der Erregerwicklung.
- Berechnen Sie das Nennmoment M_N und das Kippmoment M_K .
- Zeichnen Sie das maßstäbliche Spannungszeigerdiagramm mit $\underline{U}_S$, $\underline{U}_P$ und $X_S \cdot \underline{I}_S$ an der Kippgrenze bei Nennerregung. (5 kV/cm)
- Berechnen Sie den Effektivwert des Netzstroms an der Kippgrenze und zeichnen Sie den Zeiger des Netzstroms in das Diagramm aus Aufgabenteil d) ein. (2,5 kA/cm)
- Wie kann der Arbeitspunkt bei Betrieb an der Kippgrenze der Maschine in den stabilen Arbeitsbereich überführt werden, wenn die Wirkleistungsabgabe konstant bleiben soll?

Lösungsvorschlag

a) Zeigerdiagramm im Nennbetrieb (Zeichnung nicht gefordert):

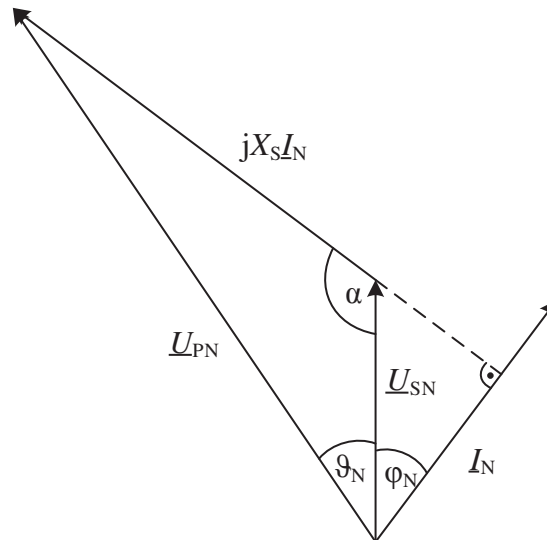


Abbildung 1: Zeigerdiagramm des Synchrongenerators im Nennbetrieb

Durch die geometrischen Beziehungen im Zeigerdiagramm aus Abbildung 1 lässt sich der Hilfswinkel

$$\alpha = 90^\circ + \varphi_N = 126,8699^\circ \quad (19)$$

bestimmen. Über den Cosinussatz lässt sich der Betrag der Polradspannung $\underline{U}_{PN}$ bestimmen

$$U_{PN}^2 = U_{SN}^2 + (X_S I_N)^2 - 2U_{SN}X_S I_N \cdot \cos(\alpha) \quad (20)$$

$$U_{PN} = \sqrt{\left(\frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2 + (X_S I_N)^2 - 2U_{SN}X_S I_N \cdot \cos(90^\circ + \varphi_N)} = 42,7029 \text{ kV} \quad (21)$$

Mit Hilfe des Sinussatz lässt sich der Polradwinkel ϑ_N bestimmen

$$\frac{\sin \vartheta_N}{X_S I_N} = \frac{\sin \alpha}{U_{PN}} \quad (22)$$

$$\vartheta_N = \arcsin\left(\frac{X_S I_N}{U_{PN}} \cdot \sin(\alpha)\right) = 0,5968 = 34,1958^\circ \quad (23)$$

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

$$P_V = U_{fN} \cdot I_{fN} = 2,25 \text{ MW} \quad (24)$$

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

$$P_{\text{mech},N} = P_{\text{el}N} = \sqrt{3}U_N I_N \cdot \cos(\varphi_N) = M_N \cdot \Omega_N = M_N \cdot \frac{2\pi f_N}{p} \quad (25)$$

$$M_N = \sqrt{3}U_N \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_N) \cdot \frac{p}{2\pi f_N} = 2,6464 \text{ MN m} \quad (26)$$

Das Kippmoment wird genau dann erreicht, wenn für den Polradwinkel gilt $\vartheta_K = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$. 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):

$$M_K = 3p \cdot \frac{U_S \cdot U_{PN} \cdot \sin(\vartheta_K)}{\omega_N \cdot X_S} \quad (27)$$

$$M_K = 3p \cdot \frac{U_N \cdot U_{PN} \cdot \sin(\frac{\pi}{2})}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot X_S} = 4,7087 \text{ MNm} \quad (28)$$

- d) Mit den Bedingungen $\underline{U}_{SK} = \underline{U}_{SN}$, $\underline{U}_{PK} = \underline{U}_{PN}$ und $\vartheta_K = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$ lässt sich unter Verwendung des Satz des Pythagoras der Spannungsabfall $I_K X_S$ über der Reaktanz berechnen:

$$I_K X_S = \sqrt{U_S^2 + U_{PN}^2} = \sqrt{\left(\frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2 + U_{PN}^2} = 46,0819 \text{ kV} \quad (29)$$

Das resultierende Zeigerdiagramm:

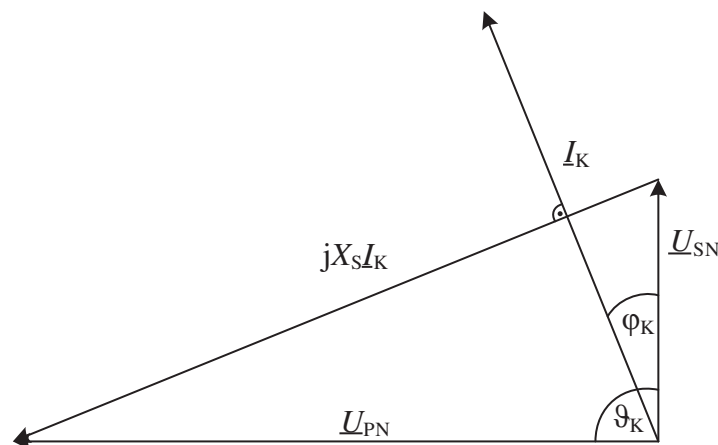


Abbildung 2: Zeigerdiagramm des Synchrongenerators bei Nennerregung und Belastung mit Kippmoment

- e) Mit Gleichung 29 lässt sich der Maschinenschstrom I_{SK} bei Belastung mit Kippmoment berechnen und in Abbildung 2 einzeichnen.

$$I_K = 15,3606 \text{ kA} \quad (30)$$

- f) Vom Kippunkt aus gesehen, muss der Erregerstrom vergrößert werden, um den Arbeitspunkt des Synchrongenerators in den stabilen Bereich zu verschieben (vgl. Gleichung 27). Bei konstanter Klemmenspannung $\underline{U}_S$ gilt $M_{el,K} \propto |\underline{U}_P|$. Um das Kippmoment zu vergrößern, muss $|\underline{U}_P|$ und damit der Erregerstrom vergrößert werden. Bei konstantem Lastmoment - also Wirkleistungsabgabe - wird der Arbeitspunkt in den stabilen Bereich überführt.

3 Drehstromasynchronmaschine mit Drehstromsteller

Ein Drehstromasynchronmotor mit kurzgeschlossener Läuferwicklung wird von einem Drehstromsteller gespeist.

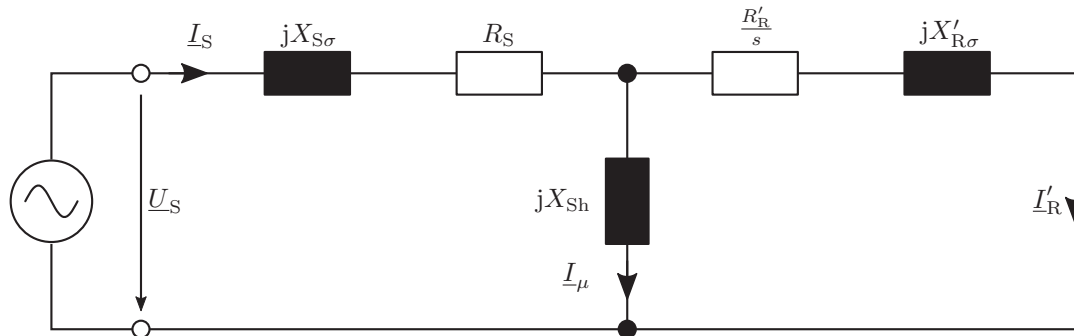


Abbildung 3: Einphasiges Ersatzschaltbild des Drehstromasynchronmotors im quasistationären Zustand

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

Nenndaten des Drehstromasynchronmotors

U_N	=	460 V	Nennwert der Leiterspannung (Effektivwert)
I_N	=	70 A	Nennwert des Statorstroms (Effektivwert)
f_N	=	60 Hz	Nennfrequenz
p	=	4	Polpaarzahl
$\cos(\varphi_N)$	=	0,85	Leistungsfaktor im Nennbetrieb

Einphasiges Ersatzschaltbild des Drehstromasynchronmotors

$X_{S\sigma}$	=	$0,2 \Omega$	Statorstreureaktanz
R_S	=	$0,06 \Omega$	Wicklungswiderstand des Stators
X_{Sh}	=	10Ω	Hauptreaktanz
R'_R	=	$0,1 \Omega$	Auf den Stator umgerechneter Wicklungswiderstand des Rotors
$X'_{R\sigma}$	=	$0,4 \Omega$	Auf den Stator umgerechnete Streureaktanz des Rotors

Aufgaben

- Zum Anfahren des Antriebs wird die Amplitude der Spannung so eingestellt, dass der Asynchronmotor im Stillstand ein Drehmoment von $M_i = 250 \text{ Nm}$ aufbringt. Berechnen Sie die im Rotor auftretende Verlustleistung.
- Auf welchen Wert der Drehzahl n_0 beschleunigt der unbelastete Motor, 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 im Nennpunkt der Maschine.

Lösungsvorschlag

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

$$\Omega_{\text{syn}} = \frac{\omega_S}{p} = \frac{2\pi \cdot f_N}{p} = 94,25 \frac{1}{s} \quad (31)$$

$$P_D = M_i \cdot \Omega_{\text{syn}} = 23,5619 \text{ kW} \quad (32)$$

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

$$P_{VR} = s \cdot P_D = 23,5619 \text{ kW} \quad (33)$$

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

$$n_0 = n_{\text{syn}} = \frac{f_N}{p} = 900 \text{ min}^{-1} \quad (34)$$

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

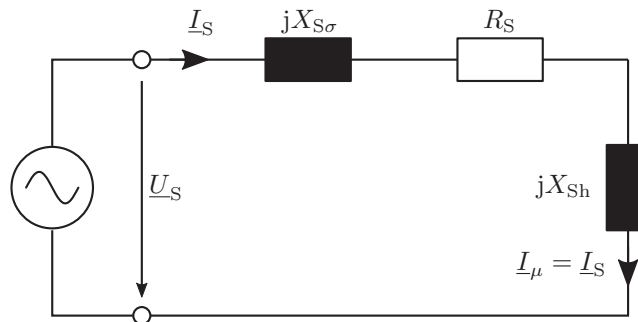


Abbildung 4: Einphasiges Ersatzschaltbild des Drehstromasynchronmotors im Leerlauf

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

$$\underline{U}_S = U_S = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 265,5811 \text{ V} \quad (35)$$

Berechnen des Effektivwertes des Strangstroms:

$$I_{S0} = |\underline{I}_{S0}| = \frac{U_S}{\sqrt{R_S^2 + (X_{S\sigma} + X_{Sh})^2}} \quad (36)$$

$$I_{S0} = 26,0369 \text{ A} \quad (37)$$

d) Berechnen der Drehfeldleistung aus den Nenndaten:

$$P_D = P_{el} - P_{VS} = S_N \cdot \cos(\varphi_N) - P_{VS} = \sqrt{3} \cdot U_N I_N \cdot \cos(\varphi_N) - 3 \cdot R_S \cdot I_N^2 \quad (38)$$

$$= 46,5242 \text{ kW} \quad (39)$$

Berechnen des Drehmoments bei Nennbetrieb:

$$M_{iN} = \frac{P_D}{\Omega_{\text{syn}}} = 493,6374 \text{ Nm} \quad (40)$$

4 Bahnantrieb mit selbstgeführter Drehstrombrückenschaltung

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

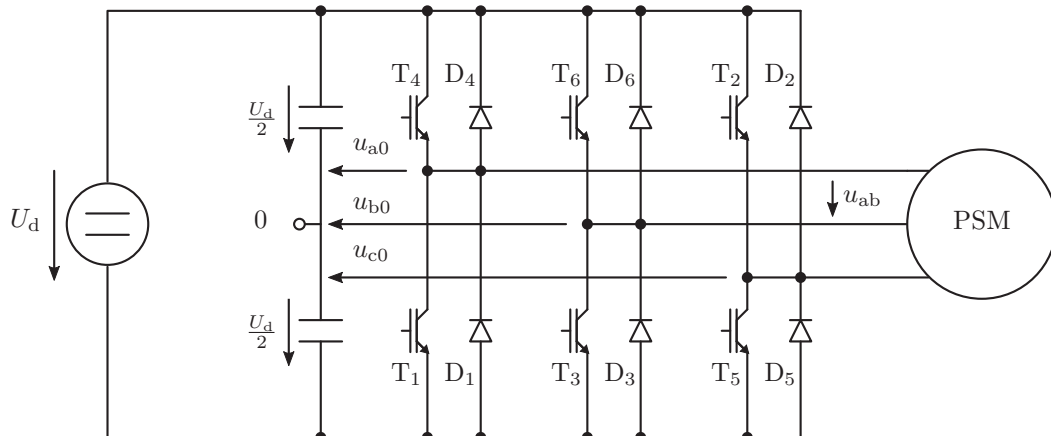


Abbildung 5: Schaltbild des Leistungsteils

Vereinfachende Annahmen

- Die Leistungshalbleiter seien ideal.
- Die permanentmagneterregte Synchronmaschine sei verlustfrei.

Folgende Daten sind gegeben:

$$U_d = 1,2 \text{ kV} \quad \text{Zwischenkreisspannung des Antriebssystems}$$

Aufgaben

In einem Betriebspunkt im Grunddrehzahlbereich des Motors werden die Phasenspannungen u_{a0} , u_{b0} und u_{c0} gemäß den Zeitverläufen auf der Rückseite Ihres Deckblatts gesteuert.

- Bestimmen Sie die Periodendauer T der Grundschiwingung der Phasenspannungen sowie die Schaltfrequenz des Leistungstransistors T_4 .
- Bestimmen Sie den Effektivwert der Grundschiwingung der Phasenspannung u_{a0} .
- Skizzieren Sie maßstabsgetreu den Zeitverlauf der Leiterspannung u_{ab} in die vorgefertigte Lösungsskizze auf der Rückseite Ihres Deckblatts.

Lösungsvorschlag

- a) Die Periodendauer ist $T = 6 \text{ ms}$. Der Leistungstransistor hat dabei 3 steigende und 3 fallende Schaltflanken und damit ist seine Schaltfrequenz $f_{T4} = \frac{3}{6 \text{ ms}} = 500 \text{ Hz}$.
- b) Der Effektivwert der Grundschiwingung wird über die Fourierzerlegung ermittelt. Durch Ausnutzen der Symmetrie zu $90^\circ = \frac{\pi}{2} = 1,5 \text{ ms}$ und Festlegen des Nullpunkts entfallen alle A_ν . Die Spannung ist Mittelwert frei und damit gilt $A_0 = 0$. Für die B_ν gilt für $\nu = 1$

$$\begin{aligned}
 U_{1a0} = B_1 &= \frac{\hat{B}_1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(\omega t) d\omega t = \frac{4}{\sqrt{2}\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\omega t) \sin(\omega t) d\omega t \\
 &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_d}{2} \left[-\int_0^{\frac{\pi}{6}} \sin(\omega t) d\omega t + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sin(\omega t) d\omega t \right] \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d \left[[\cos(\omega t)]_0^{\frac{\pi}{6}} - [\cos(\omega t)]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \right] \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d \left[\frac{\sqrt{3}}{2} - 1 - \left[0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \right] \\
 &= \frac{\sqrt{6} - \sqrt{2}}{\pi} U_d \\
 U_{1a0} &= 0,3295 U_d \tag{41} \\
 U_{1a0} &= 395,4464 \text{ V} \tag{42}
 \end{aligned}$$

- c) Für die Leiterspannung gilt $u_{ab} = u_{a0} - u_{b0}$

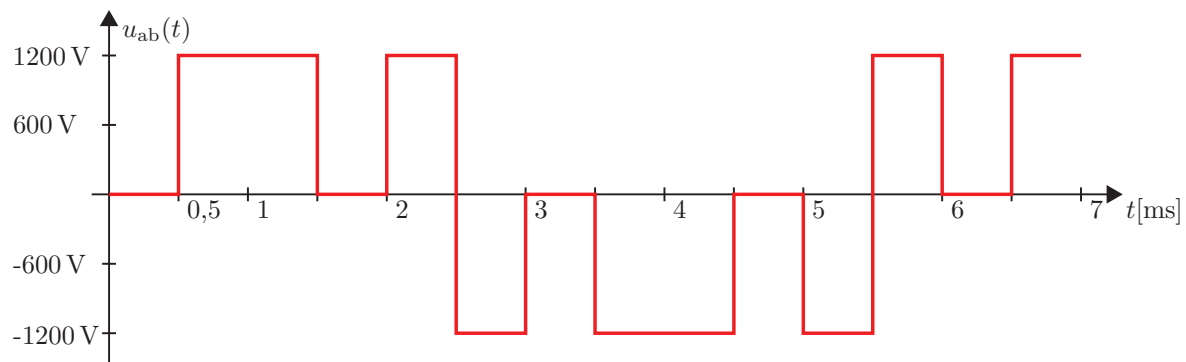


Abbildung 6: Zeitverlauf der Leiterspannung u_{ab}

5 Stromrichterschaltungen und elektrische Maschinen für verschiedene Anwendungen

a)

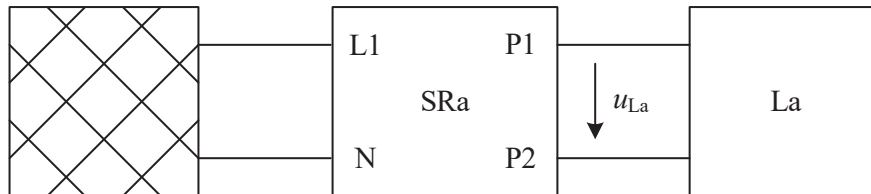


Abbildung 7: Stromrichterschaltung zu Aufgabe 5a)

Abbildung 7 zeigt einen am Wechselspannungsnetz angeschlossenen Stromrichter SRa. Der Stromrichter speist eine Last La . Die Spannung an der Last hat den Verlauf in Abbildung 8

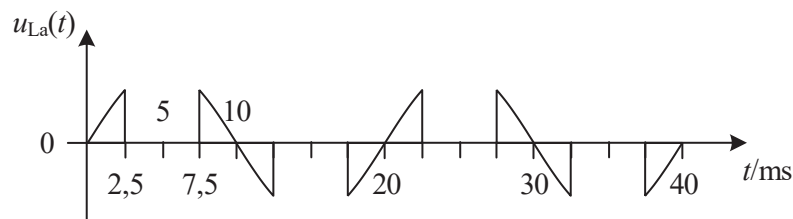


Abbildung 8: Spannungsverlauf von u_{La} zu Aufgabe 5a)

Geben Sie die Bezeichnung des Stromrichters SRa an und zeichnen Sie das Schaltbild. Welches Steuerverfahren wird hier verwendet? Geben Sie den Steuerwinkel α an.

- b) Ein Stromrichter SRb steuert das Drehmoment und die Drehzahl eines Gleichstrommotors. Beide Drehmomentrichtungen und beide Drehrichtungen sind möglich („Vierquadrantenbetrieb“). Die Ankerkreissspannung u_A hat den rechts in Abbildung 9 dargestellten Verlauf.

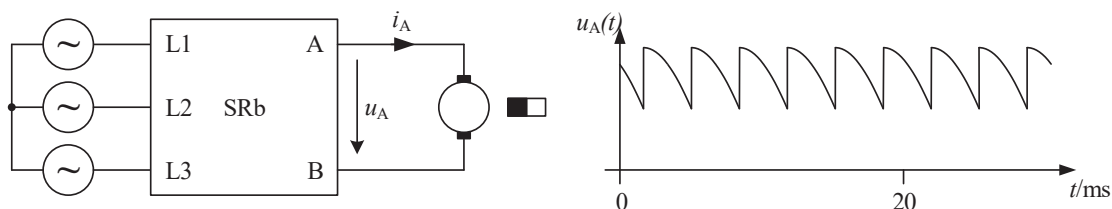


Abbildung 9: Stromrichterschaltung und Spannungsverlauf zu Aufgabe 5b)

Zeichnen Sie das Schaltbild des Stromrichters SRb zwischen den Klemmen des Drehspannungsnetzes L1, L2, L3 und den Anschlussklemmen A, B des Gleichstrommotors. Geben Sie an, ob der Laststrom i_A größer oder kleiner als Null ist, wenn die Spannung u_A den rechts in Abbildung 9 dargestellten Verlauf hat.

c)

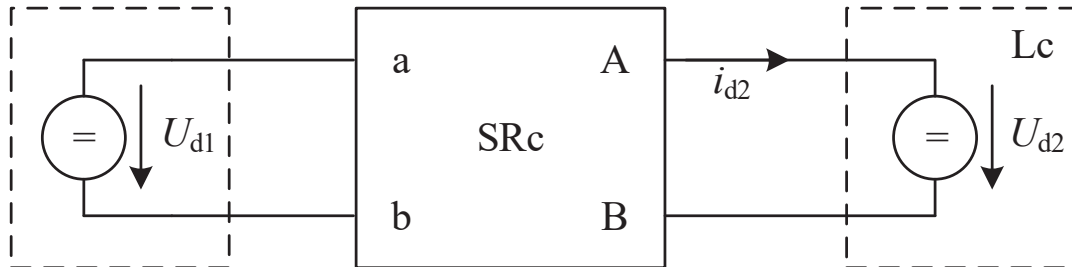


Abbildung 10: Stromrichterschaltung Aufgabe 5c)

Abbildung 10 zeigt einen Stromrichter SRc, der an einer Gleichspannungsquelle U_{d1} angeschlossen ist. Der Stromrichter speist eine Gleichstromlast L_c modelliert mit der Gleichspannungssinke U_{d2} . Der Ausgangsstrom i_{d2} hat den in Abbildung 11 dargestellten Verlauf.

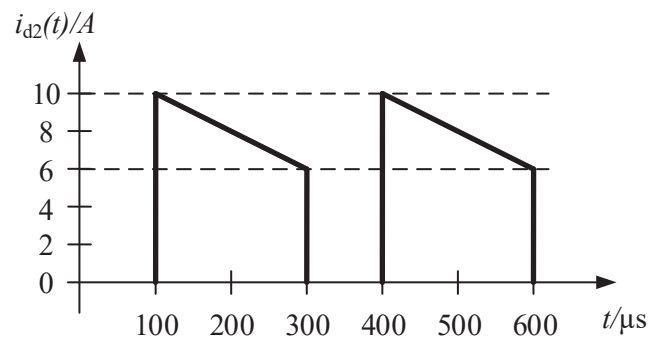


Abbildung 11: Stromverlauf von i_{d2} zu Aufgabe 5c)

Zeichnen Sie das Schaltbild des Stromrichters SRc zwischen den Anschlussklemmen a,b und A,B. Geben Sie den Wert des Verhältnisses $\frac{U_{d2}}{U_{d1}}$ an.

Lösungsvorschlag

- a) SRa ist ein Wechselstromsteller (Dimmer), der eine induktive Last speist. Das Steuerverfahren ist die Phasenanschnittsteuerung. Die Periodendauer der speisenden Spannung beträgt $T = 20 \text{ ms}$. Der Dimmer wird $T_{\text{ein}} = 7,5 \text{ ms}$ nach dem Nulldurchgang der Speisespannung eingeschaltet. Damit beträgt der Zündwinkel $\alpha = \frac{7,5 \text{ ms}}{20 \text{ ms}} 360^\circ = 135^\circ$.

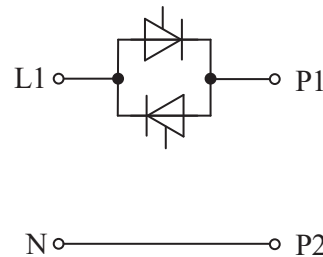


Abbildung 12: Dimmer

- b) SRb besteht aus zwei Thyristorbrücken in kreisstromfreier Gegenparallelschaltung. Bei gegebenem Spannungsverlauf ist die Thyristorbrücke aktiv, die den positiven Gleichstrom führen kann. Damit ist der Ausgangsstrom positiv.

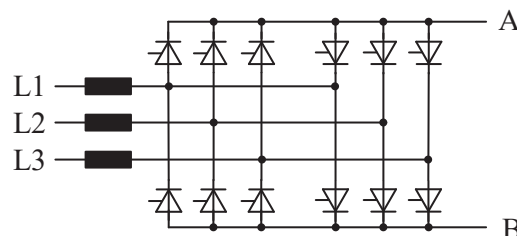


Abbildung 13: Thyristorbrücken in kreisstromfreier Gegenparallelschaltung

- c) SRc ist ein Hochsetzsteller. Für das Verhältnis $\frac{U_{d2}}{U_{d1}}$ gilt $\frac{U_{d2}}{U_{d1}} = \frac{1}{1-a} = \frac{1}{1-\frac{T_{\text{ein}}}{T}} = \frac{1}{1-\frac{100 \mu\text{s}}{300 \mu\text{s}}} = \frac{3}{2}$

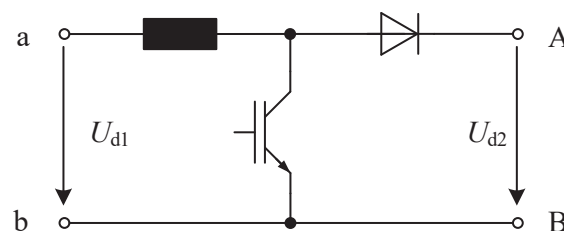


Abbildung 14: Hochsetzsteller