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

– Aufgaben zur Prüfung Nr. 133 am 06. Oktober 2016 –

A

Vorname:
Nachname:
Matrikelnummer:

Lösungsblatt

Diagramm für Aufgabe 3:

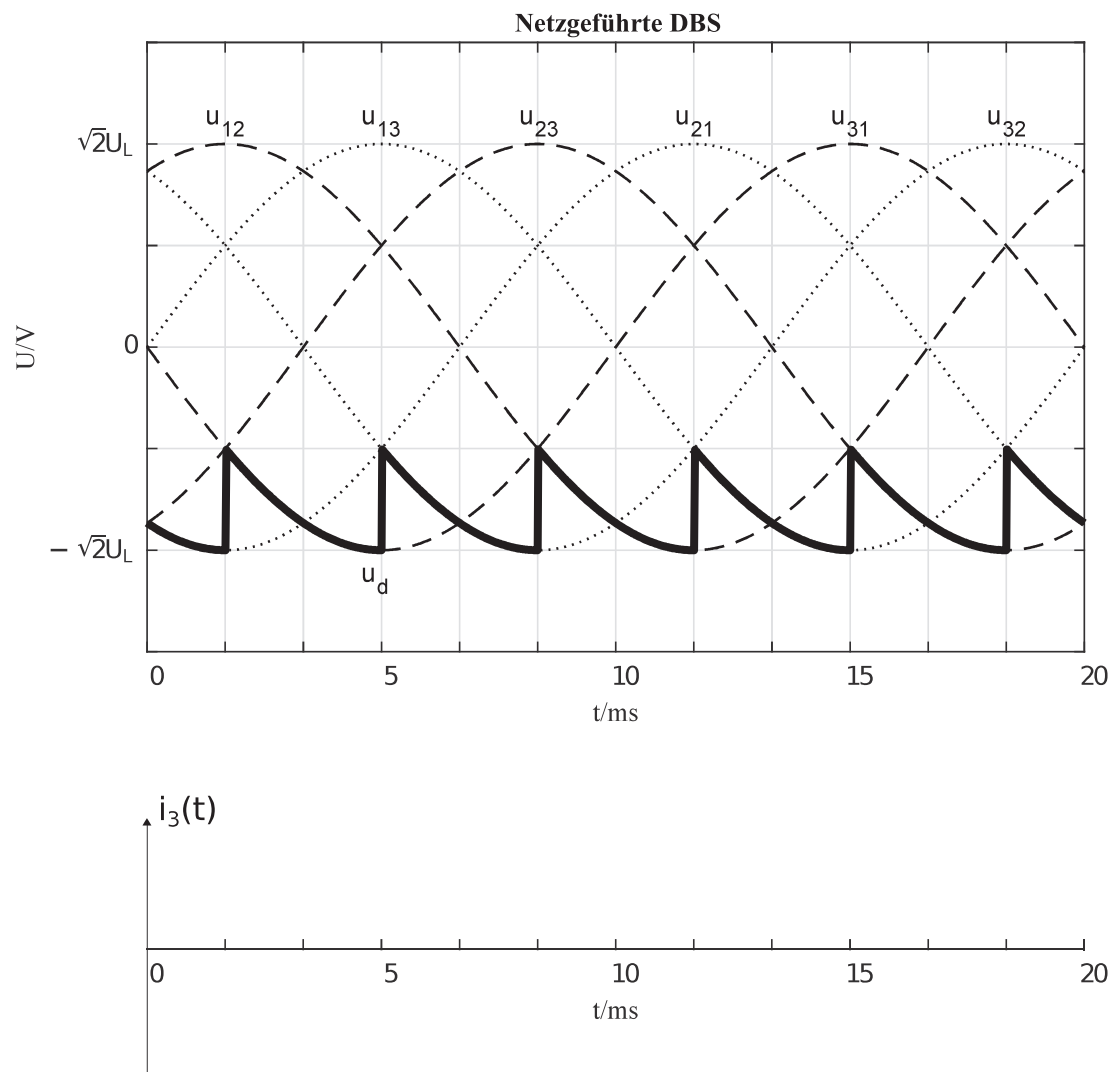
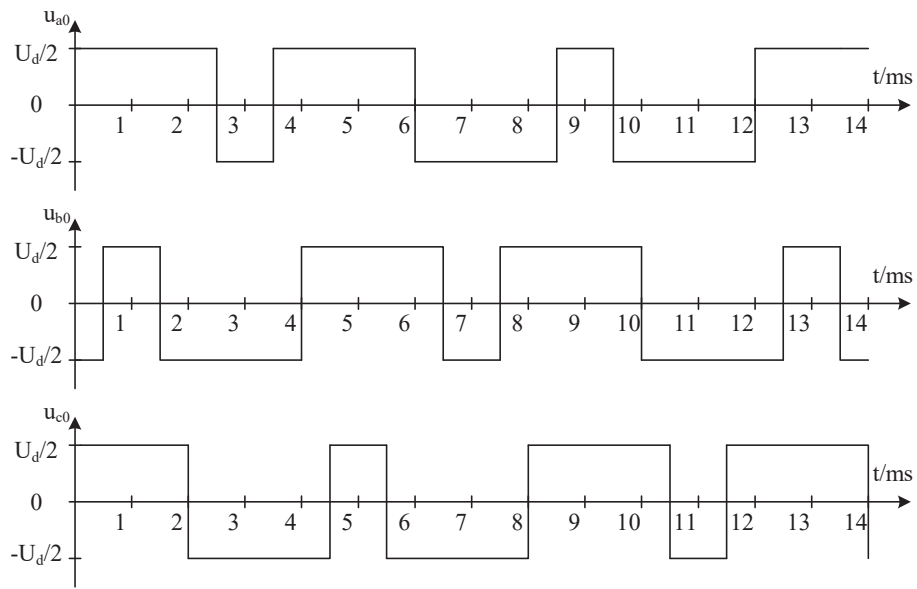
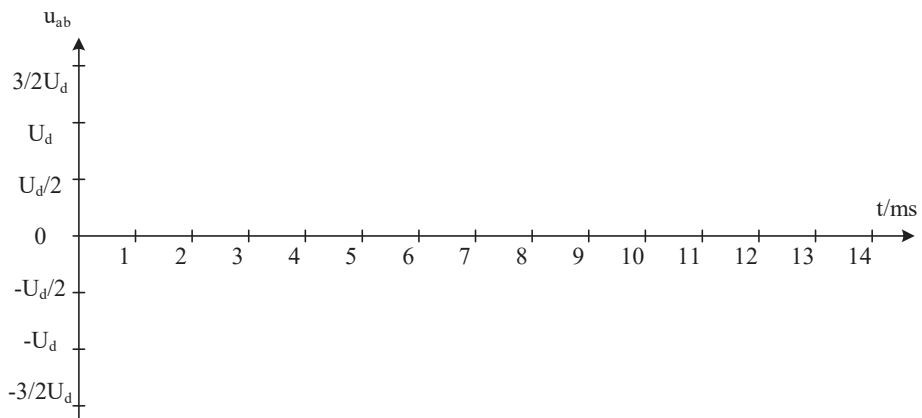


Diagramm für Aufgabe 4:



Zeitverläufe der Phasenspannungen



1 Stromrichtergespeister Pumpenantrieb mit Gleichstrommotor

Eine stromrichtergespeiste Gleichstrommaschine mit konstanter Erregung treibt eine Pumpe an. Die Drehzahl des Antriebssystems wird durch die Steuerung der Ankerspannung eingestellt.

Folgende Angaben wurden auf einem Prüfstand gemessen:

Pumpe

Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie

für $\Omega \geq 0$, Betrieb mit $\Omega < 0$ ist unzulässig $M_P(\Omega) = \Omega^2 \cdot 5 \times 10^{-4} \text{ Nm s}^2$

Gleichstrommaschine

Mechanische Winkelgeschwindigkeit

im Leerlauf bei $U_A = 400 \text{ V}$

Drehzahlabfall bei Belastung

$$\begin{aligned}\Omega_0 &= 160 \text{ s}^{-1} \\ \left| \frac{\Delta\Omega}{\Delta M} \right| &= 1,3 \frac{1}{\text{Nm s}}\end{aligned}$$

Vereinfachende Annahmen

- Mechanische Reibungsverluste und Erregerverluste können vernachlässigt werden.
- Die Gleichstrommaschine sei vollständig kompensiert.

Aufgaben

- a) Skizzieren Sie qualitativ die Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik der Pumpe und der fremderregten Gleichstrommaschine im gleichen Diagramm $M = f(\Omega)$. Markieren Sie den Arbeitspunkt, der sich einstellt, wenn die Pumpe und die Gleichstrommaschine starr gekuppelt sind.
- b) Berechnen Sie die Ankerspannung, die mit dem Stromrichter eingestellt werden muss, um eine mechanische Winkelgeschwindigkeit des starr gekuppelten Antriebssystems von $\Omega_{AP} = 110 \text{ s}^{-1}$ zu erreichen.
- c) Berechnen Sie den Wirkungsgrad η_{AP} der Gleichstrommaschine im Arbeitspunkt gemäß Aufgabenteil b).

Lösungsvorschlag

a) gefordert ist eine Skizze der Kennlinien:

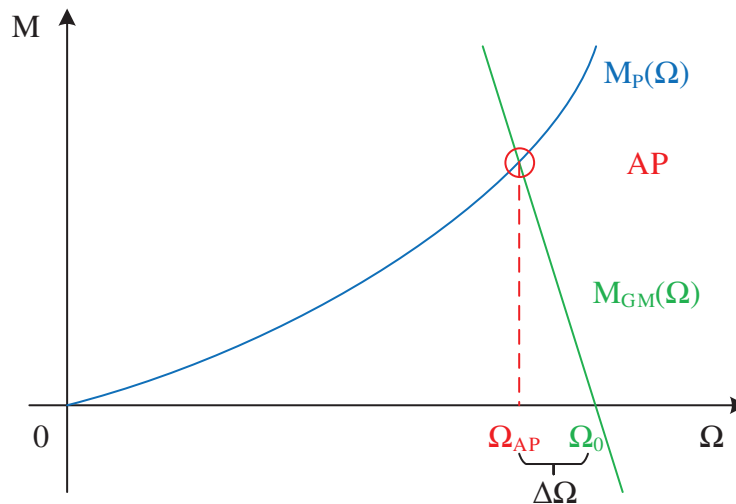


Abbildung 1: qualitativer Verlauf der Drehmoment-Drehzahlcharakteristiken des Systems

b) Aus der Kennlinie der Pumpe lässt sich das Moment im Arbeitspunkt errechnen

$$M_{AP} = M_P = \Omega_{AP}^2 \cdot 5 \times 10^{-4} \text{ Nm s}^2 = 6,05 \text{ Nm} \quad (1)$$

Mit dem Drehzahlabfall $\left| \frac{\Delta\Omega}{\Delta M} \right|$ bei Belastung kann die Drehzahl ermittelt werden, die im Leerlauf eingestellt werden muss

$$\Omega_{AP,0} = \Omega_{AP} + \left| \frac{\Delta\Omega}{\Delta M} \right| \cdot M_{AP} = 117,865 \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

Um die notwendige Ankerspannung zu berechnen, muss $c\Phi$ aus dem Leerlaufversuch ($I_A = 0 \text{ A}$) bestimmt werden.

$$U_{A,0} = c\Phi \Omega_0 \quad (3)$$

$$c\Phi = \frac{U_{A,0}}{\Omega_0} = 2,5 \text{ V s} \quad (4)$$

und damit ist die notwendige Ankerspannung

$$U_A = c\Phi \Omega_{AP,0} = 294,6625 \text{ V} \quad (5)$$

c)

$$P_{\text{mech}} = M_i \cdot \Omega_{AP} = U_i \cdot I_{AP} \quad (6)$$

$$P_{\text{el}} = U_A \cdot I_{AP} \quad (7)$$

Damit folgt für den Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{el}}} = \frac{U_i \cdot I_{AP}}{U_A \cdot I_{AP}} = \frac{c\Phi \Omega_{AP}}{c\Phi \Omega_{AP,0}} = \frac{\Omega_{AP}}{\Omega_{AP,0}} = 93,33 \% \quad (8)$$

2 Asynchronmotor für ein 60 Hz-Netz

Von einem Asynchronmotor sind folgende Nenndaten bekannt:

f_N	=	60 Hz	Nennfrequenz
U_N	=	480 V	Nennspannung (Effektivwert)
I_N	=	110 A	Nennstrom (Effektivwert)
$\cos(\varphi_N)$	=	0,7	Nennleistungsfaktor (induktiv)
n_N	=	1700 min^{-1}	Nennndrehzahl
R_S	=	$0,15 \Omega$	Kupferwiderstand der Statorwicklung

Vereinfachende Annahmen

- Außer Stromwärmeverlusten treten keine weiteren Verlustleistungen auf.

Aufgaben

- a) Ermitteln Sie die Polpaarzahl unter der Annahme, dass der Nennschlupf kleiner als 10% ist.
- b) Berechnen Sie das elektrisch erzeugte Drehmoment im Nennpunkt der Maschine.
- c) Bestimmen Sie den Wirkungsgrad im Nennbetrieb.

Bei Anschluss des Motors an Nennspannung tritt ein Leerlaufstrom mit dem Effektivwert $I_{S0} = 50 \text{ A}$ auf.

- d) Berechnen Sie die Verlustleistung im Leerlauf.
- e) Berechnen Sie den Phasenwinkel φ_0 des Leerlaufstroms und zeichnen Sie das einphasige Zeigerdiagramm der komplexen Effektivwerte der Sternspannung und des Leerlaufstroms in eine komplexe Ebene. (Sternspannung $\underline{U}_S$ in der reellen Achse mit $\underline{U}_S = U_S$; Maßstab 50 V/cm und 10 A/cm)

Lösungsvorschlag

a)

$$p = 2 \quad (9)$$

$$\rightarrow n_0 = 1800 \text{ min}^{-1} \rightarrow s = 0,0556 < 10 \% \quad (10)$$

b)

$$M_{\text{el}} = \frac{P_{\text{D}}}{\Omega_{\text{syn}}} = \frac{P_{\text{el,N}} - P_{\text{VS}}}{\Omega_{\text{syn}}} \quad (11)$$

$$= \frac{\sqrt{3} U_{\text{N}} I_{\text{N}} \cos(\varphi_{\text{N}}) - 3 R_{\text{S}} I_{\text{N}}^2}{2\pi n_{\text{syn}}} = 310,7320 \text{ Nm} \quad (12)$$

c)

$$\eta = \frac{P_{\text{mech,N}}}{P_{\text{el,N}}} = \frac{M_{\text{el}} \cdot \Omega_{\text{N}}}{\sqrt{3} U_{\text{N}} I_{\text{N}} \cos(\varphi_{\text{N}})} = \frac{M_{\text{el}} \cdot 2\pi n_{\text{N}}}{\sqrt{3} U_{\text{N}} I_{\text{N}} \cos(\varphi_{\text{N}})} = 86,41 \% \quad (13)$$

d)

$$P_{\text{V0}} = 3 \cdot R_{\text{S}} I_{\text{S0}}^2 = 1125 \text{ W} \quad (14)$$

e)

$$P_{\text{el,0}} = P_{\text{V0}} = \sqrt{3} U_{\text{N}} I_{\text{S0}} \cos(\varphi_0) \rightarrow \varphi_0 = 88,45^\circ \quad (15)$$

alternativ über den ohmschen Spannungsabfall

$$\cos(\varphi_0) = \frac{U_{\text{R}}}{U_{\text{S}}} \rightarrow \varphi_0 = \arccos\left(\frac{R_{\text{S}} I_{\text{S0}}}{U_{\text{N}}/\sqrt{3}}\right) = 88,45^\circ \quad (16)$$

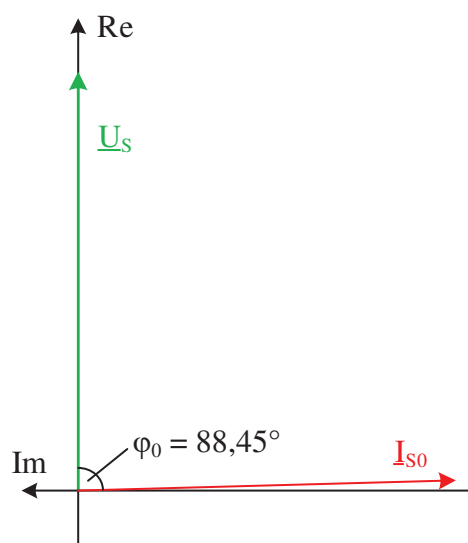


Abbildung 2: Zeigerdiagramm der ASM im Leerlauf

3 Netzgeführte Drehstrombrückenschaltung im Wechselrichterbetrieb

Eine Drehstrombrückenschaltung DBS speist eine induktive Last mit der Gegenspannung E .

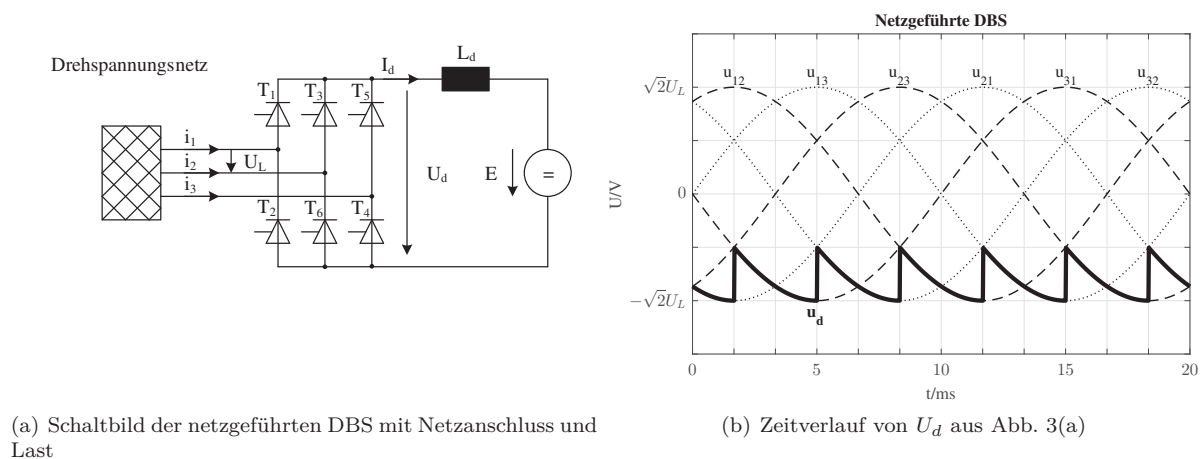


Abbildung 3: Netzgeführte Drehstrombrückenschaltung

Vereinfachende Annahmen

- Der Gleichstrom sei ideal glatt.
- Die Halbleiterbauelemente sind ideale Schalter.
- Das Drehspannungsnetz sei ideal.

Folgende Daten sind gegeben

$$\begin{aligned} U_L &= 500 \text{ V} && \text{Leiterspannung des Drehstromnetzes (Effektivwert)} \\ I_d &= 100 \text{ A} && \text{Stromstärke des Gleichstroms} \end{aligned}$$

Aufgaben

- Ermitteln Sie den Wert des Zündwinkels aus Abb. 3(b).
- Berechnen Sie den Mittelwert der Gleichspannung U_d bei Betrieb nach a).
- Wie groß ist die maximale Blockierspannung U_B , die die Thyristoren im Steuerbereich $0 \leq \alpha < \pi$ sperren müssen? (ohne Berücksichtigung von Reserven und transienten Überspannungen)
- Zeichnen Sie den Zeitverlauf des Netzstroms $i_3(t)$ in das vorbereitete Diagramm auf Seite i des Lösungsblatts.
- Berechnen Sie den Wert der Scheinleistung, die der Stromrichter dem Netz entnimmt.

Lösungsvorschlag

a)

$$\alpha = 150^\circ \quad (17)$$

b)

$$U_{d,150^\circ} = U_{di} \cdot \cos(150^\circ) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_L \cdot \cos(150^\circ) = -584,7726 \text{ V} \quad (18)$$

c)

$$U_B = \sqrt{2} U_L = 707,1068 \text{ V} \quad (19)$$

d) Der Netzstrom ist bei eingeschalteten Thyristoren betragsmäßig genau so groß wie I_d

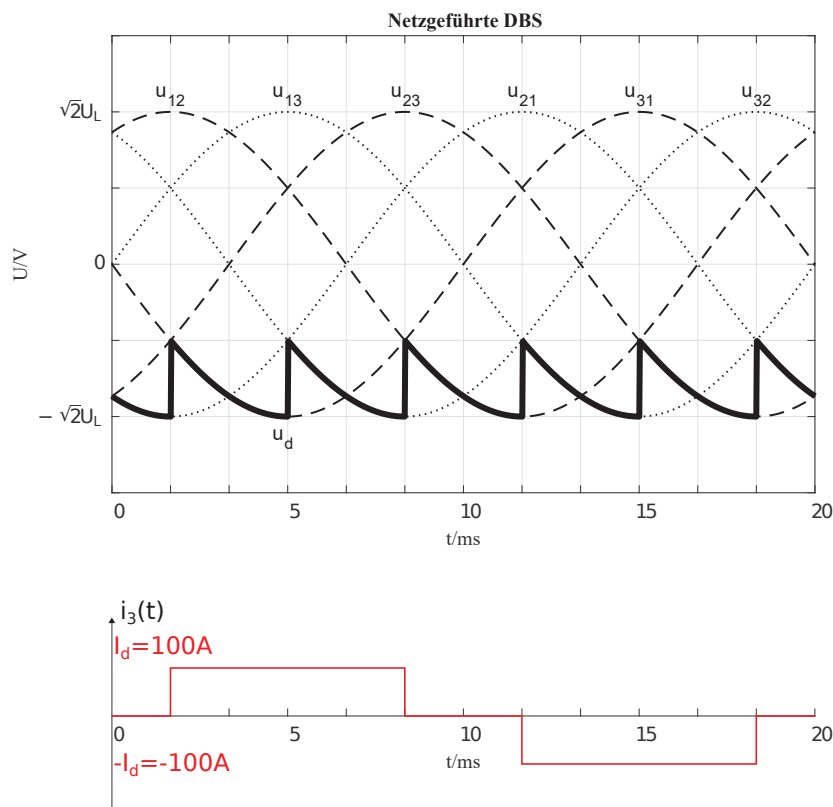


Abbildung 4: Stromverlauf des Netzstroms i_3

e)

$$S = \sqrt{3} U_L I_n = \sqrt{3} U_L \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 70,7107 \text{ kVA} \quad (20)$$

4 Hochleistungsantrieb mit selbstgeführter Drehstrombrückenschaltung

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

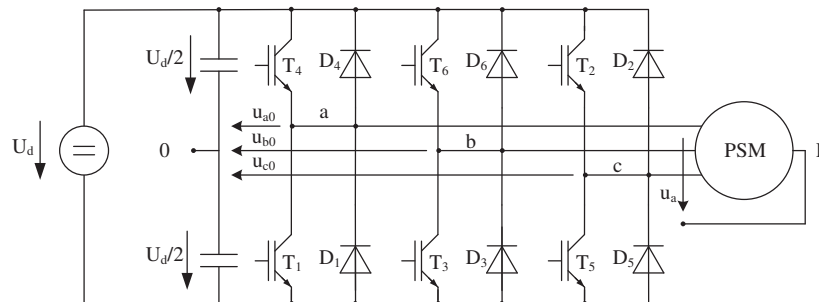


Abbildung 5: Ersatzschaltbild des Hochleistungsantriebs

Folgende Daten sind gegeben:

Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung

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

Permanentmagneterregte Synchronmaschine

$f_{\max} = 240 \text{ Hz}$ Maximale Frequenz der Statorspannung

$M_N = 20 \text{ kNm}$ Nennmoment

$p = 6$ Polpaarzahl

Vereinfachende Annahmen

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

Aufgaben

In einem Betriebspunkt im Grunddrehzahlbereich des Motors werden die Phasenspannungen u_{a0} , u_{b0} und u_{c0} gemäß Zeitverläufen auf Seite ii des Lösungsblatts gesteuert.

- Bestimmen Sie die Periodendauer T der Grundschiwingung der Phasenspannungen sowie die Schaltfrequenz des Leistungstransistors T4.
- Bestimmen Sie den Effektivwert der Grundschiwingung der Phasenspannung u_{a0} .
- Skizzieren Sie maßstabsgetreu den Zeitverlauf der Leiterspannung u_{ab} in die vorgefertigte Lösungsskizze auf Seite ii des Lösungsblatts.

Lösungsvorschlag

- a) Die Periodendauer ist $T = 12 \text{ ms}$. Der Leistungstransistor hat dabei 3 steigende und 3 fallende Schaltflanken und damit ist seine Schaltfrequenz $f_{T4} = \frac{3}{12 \text{ ms}} = 250 \text{ Hz}$.
- b) Der Effektivwert der Grundschiwingung wird über die Fourierzerlegung ermittelt. Dabei kann die Punktsymmetrie zu $90^\circ = \frac{\pi}{2} = 3 \text{ ms}$ ausgenutzt werden. Damit entfallen alle A_ν der Fourierreihe. Für die B_ν gilt für $\nu = 1$

$$\begin{aligned}
 U_{1a0} = B_1 &= \frac{\hat{B}_1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(\omega t) d\omega t = \frac{4}{\sqrt{2}\pi} \int_0^{\pi/2} f(\omega t) \sin(\omega t) d\omega t \\
 &= \frac{4}{\sqrt{2}\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \left[\int_0^{\frac{5\pi}{12}} \sin(\omega t) d\omega t - \int_{\frac{5\pi}{12}}^{\frac{\pi}{2}} \sin(\omega t) d\omega t \right] \\
 &= \frac{4}{\sqrt{2}\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \left[[-\cos(\omega t)]_0^{\frac{5\pi}{12}} - [-\cos(\omega t)]_{\frac{5\pi}{12}}^{\frac{\pi}{2}} \right] \\
 &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_d \left[1 - 2 \cos\left(\frac{5\pi}{12}\right) \right] \\
 &= 0,2171 U_d \\
 U_{1a0} &= 260,5670 \text{ V}
 \end{aligned} \tag{21}$$

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

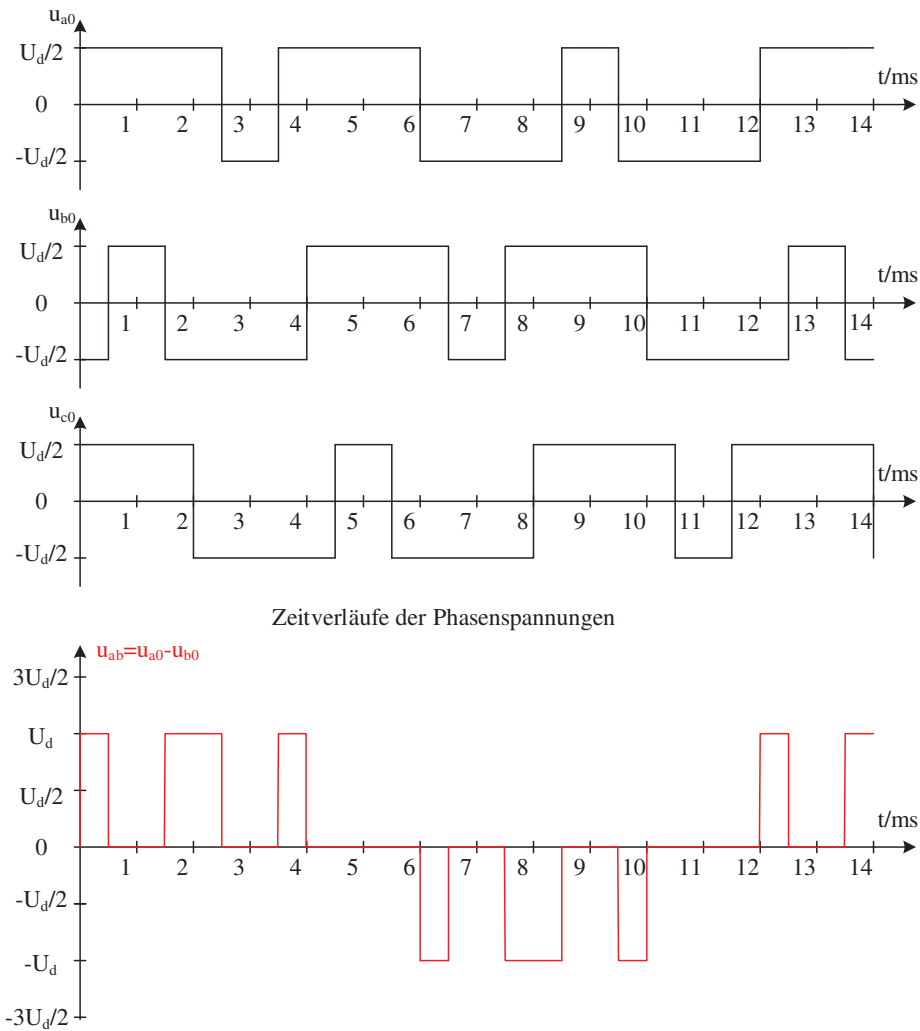


Abbildung 6: Verlauf der Leiterspannung u_{ab}

5 Stromrichterschaltungen und elektrische Maschinen für verschiedene Anwendungen

- a) Der Stromrichter einer Lokomotive soll die Zwischenkreisgleichspannung U_{ZK} aus der einphasigen 16,7 Hz Fahrdrachtspannung U_F erzeugen. Der einspeisende Stromrichter „E“ soll wegen der hohen Zuleitungsimpedanz Z einen möglichst sinusförmigen Netzstrom i_e haben, sowie Rückspeisung der Energie im Bremsbetrieb und Steuerung des Blindstroms ermöglichen. Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters „E“ mit den Eingangsklemmen E1, E2 und den Ausgangsklemmen Z1, Z2.

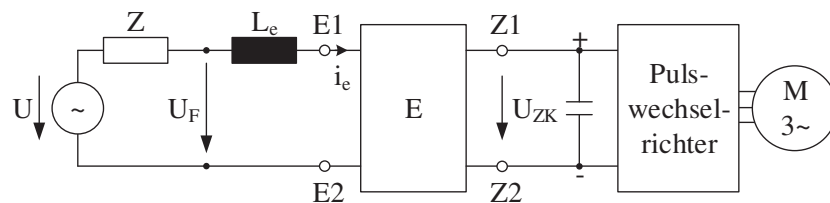


Abbildung 7: Stromrichterschaltung zu Aufgabe 5a)

- b) Die Gleichstrommaschine eines Sessellifts soll mit einem netzgeführten Stromrichter aus dem Drehstromnetz gespeist werden. Vormittags arbeitet die Gleichstrommaschine vorwiegend im Motorbetrieb, nachmittags vorwiegend im Generatorbetrieb. Die Drehrichtung ist in beiden Betriebsarten gleich. Der Wechsel zwischen Motor und Generatorbetrieb erfolgt ohne mechanischen Schalter. Zeichnen Sie das Schaltbild des Stromrichters NSR mit den Eingangsklemmen L1, L2 und L3 und den Ausgangsklemmen A und B.

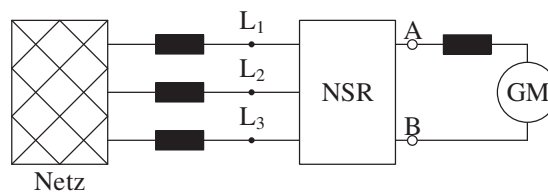


Abbildung 8: Stromrichterschaltung zu Aufgabe 5b)

- c) Die pulswechselrichtergespeiste Synchronmaschine PSM eines Elektrofahrzeugs soll aus einer Batterie gespeist werden, deren Spannung U_B höher oder niedriger sein kann als die Zwischenkreisspannung U_{ZK} ($U_B > 0\text{ V}$ und $U_{ZK} > 0\text{ V}$). Neben dem motorischen Betrieb der permanentmagnetregten Synchronmaschine soll auch generatorisches Bremsen mit Rückspeisung der Bremsenergie in die Batterie möglich sein. Zeichnen Sie das Schaltbild der beiden Gleichstromsteller GS1 und GS2.

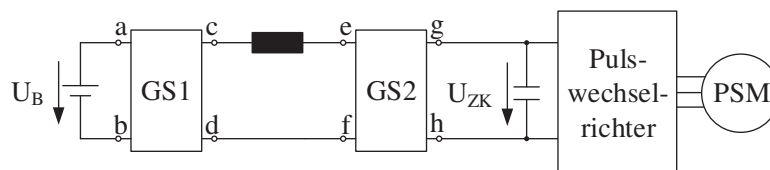


Abbildung 9: Stromrichterschaltung zu Aufgabe 5c)

Lösungsvorschlag

- a) Die Eingangsspannung ist eine Wechselspannung. Es soll Bremsenergie zurückgespeist werden, was einer Umkehr der Stromrichtung entspricht. Damit ist 4-Quadranten-Betrieb des Stromrichters erforderlich. Alternativ sind IGBT als Leistungshalbleiter möglich.

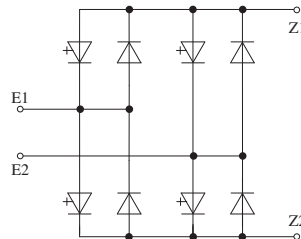


Abbildung 10: Wechselstrombrückenschaltung

- b) Um eine Drehmomenten- und Drehzahlumkehr ohne mechanischen Schalter zu ermöglichen, wird 4-Quadranten-Betrieb gefordert. Aus zwei netzgeführten Drehstrombrücken kann die „kreisstromfreie Gegenparallelschaltung“ aufgebaut werden.

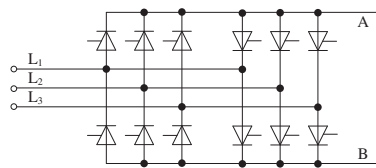


Abbildung 11: kreisstromfreie Gegenparallelschaltung

- c) Die Spannung sowohl im Zwischenkreis, als auch in der Batterie ist immer größer 0. Der Strom muss in beide Richtungen fließen können.

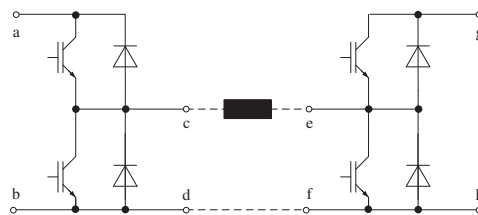


Abbildung 12: Hoch-Tiefsetzsteller für beide Stromrichtungen