

## Aufgaben zur Übung

# Elektrische Maschinen und Stromrichter

## 1 Komplexe Wechselstromrechnung

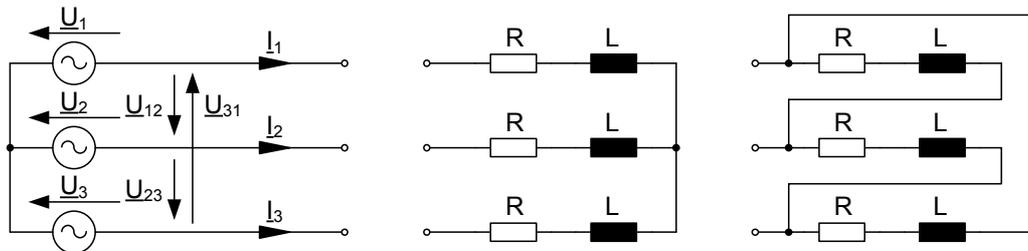
Gegeben sei ein Drehstromnetz mit folgenden Größen:

$$U_0 = 230V$$

$$\underline{U}_1 = U_0$$

$$\underline{U}_2 = U_0 \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{3}}$$

$$\underline{U}_3 = U_0 \cdot e^{-j \cdot \frac{4\pi}{3}}$$



Außerdem sind drei ohmsch-induktive Verbraucher mit der Impedanz  $\underline{Z} = 115\Omega + j \cdot 115\Omega$  vorhanden, die in Stern- oder in Dreieckschaltung an das Netz angeschlossen werden können.

- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm mit den Strangspannungen  $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$  und den Leiterspannungen  $\underline{U}_{12}, \underline{U}_{23}, \underline{U}_{31}$ .
- Berechnen Sie den komplexen Effektivwert der Leiterspannungen  $\underline{U}_{12}$  und  $\underline{U}_{31}$ .
- Berechnen Sie den komplexen Effektivwert des Netzstroms  $I_1$ , wenn die Verbraucher in Sternschaltung angeschlossen sind.
- Berechnen Sie den komplexen Effektivwert des Netzstroms  $I_1$ , wenn die Verbraucher in Dreieckschaltung angeschlossen sind.
- Die drei Verbraucher seien wieder in Sternschaltung angeschlossen. Berechnen Sie den zeitlichen Verlauf und den Mittelwert der Leistung an dem Verbraucher, der an der ersten Phase angeschlossen ist.
- Berechnen Sie die Scheinleistung als Produkt der Effektivwerte und die Blindleistung an dem Verbraucher, der an der ersten Phase angeschlossen ist.
- Berechnen Sie den zeitlichen Verlauf der Summe der Wirkleistungen der drei Verbraucher in Sternschaltung

## 2 Drehstrommotor

Gegeben sei ein Drehstrommotor auf dessen Typenschild folgende Nenndaten stehen:

$$U_N = 400V$$

$$I_N = 6A$$

$$\cos(\varphi) = 0,85$$

$$P_N = 3kW$$

$$n_N = 2890 \frac{1}{min}$$

- Berechnen Sie das Nennmoment  $M_N$ .
- Berechnen Sie den Wirkungsgrad  $\eta_N$  im Nennpunkt.

### 3 Fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine

Ein Stellantrieb soll  $z = 20$  Umdrehungen in möglichst kurzer Zeit vornehmen. Hierzu wird von 0 bis  $\frac{z}{2}$  mit maximal möglichem Drehmoment beschleunigt und von  $\frac{z}{2}$  an mit maximal möglichem Drehmoment verzögert.

#### Vereinfachende Annahmen

- das Lastmoment und die Reibung können vernachlässigt werden
- die Ankerkreisinduktivität hat keinen Einfluss
- die Maschine wird mit Nennerregung betrieben

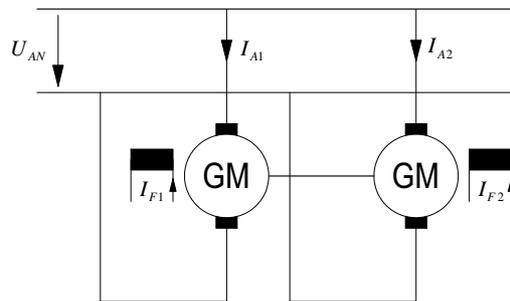
#### Folgende Daten sind gegeben

$z$	=	20	Anzahl der Umdrehungen
$J$	=	$1,0 \text{ kg m}^2$	Läuferträgheitsmoment
$P_{N_{el}}$	=	5 kW	elektrische Nennleistung
$n_{0N}$	=	$1000 \text{ min}^{-1}$	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und Nennerregung
$I_{A_{max}}$	=	$1,5 I_{AN}$	maximal zulässiger Ankerstrom
$c\phi_N$	=	4,2 Vs	Nennhauptfluss
$R_A$	=	$3,87 \Omega$	Ankerkreiswiderstand

- Berechnen Sie die Zeitdauer des Verstellvorgangs.
- Bestimmen Sie den Verlauf der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega(t)$ , des Ankerstroms  $i_A(t)$  und der Ankerspannung  $u_A(t)$ . Tragen Sie diese in ein gemeinsames Diagramm ein.
- Wie verändern sich, bei sonst gleichen Bedingungen, die Zeitverläufe, wenn der Hauptfluss auf  $\phi = \frac{\phi_N}{2}$  reduziert wird?

## 4 Fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine im Parallelbetrieb

Zwei baugleiche Gleichstrommaschinen sind miteinander mechanisch gekuppelt (gemeinsame Welle, Maschinensatz). Die Maschinen laufen im quasistationären Betrieb ohne Last bei Nennspannung. Die Erregerströme sind so eingestellt, dass sich im Einzelbetrieb jeweils unterschiedliche Leerlaufdrehzahlen bei Ankernennspannung einstellen würden.



### Vereinfachende Annahmen

- Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt

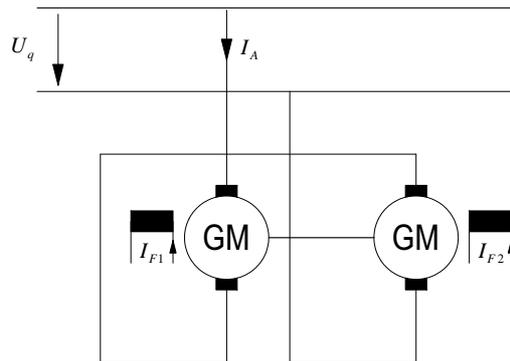
### Folgende Daten sind gegeben

$U_{AN}$	=	220 V	Ankernennspannung
$n_{01}$	=	$1560 \text{ min}^{-1}$	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und dem Erregerstrom $I_{F1}$
$n_{02}$	=	$1680 \text{ min}^{-1}$	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und dem Erregerstrom $I_{F2}$
$R$	=	$0,15 \Omega$	Ankerkreiswiderstand

- Welche Bedingung gilt für das innere Moment der beiden Maschinen?
- Bestimmen Sie die Ströme  $I_{A1}$  und  $I_{A2}$ .
- Berechnen Sie die Drehzahl des Maschinensatzes.
- Für beide Maschinen ist jeweils die Kennlinie  $M(n)$  zu berechnen und in ein gemeinsames Diagramm einzutragen.
- Wieviel Leistung entnehmen die beiden Maschinen zusammen (Maschinensatz) aus dem Gleichspannungsnetz?

## 5 Fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine in Serienschaltung

Die Ankerstromkreise zweier gleicher fremderregter, kompensierter Gleichstrommaschinen sind in Serie geschaltet und an einer Gleichspannungsquelle angeschlossen. Die beiden Maschinen sind mechanisch starr gekuppelt und besitzen die gleiche Drehrichtung. Der Erregerfluss ist bei beiden Maschinen auf einen jeweils unterschiedlichen Wert eingestellt. Der Maschinensatz läuft stationär im jeweiligen Belastungszustand.



### Vereinfachende Annahmen

- Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt

### Folgende Daten sind gegeben

$U_q$	=	500 V	Spannung der Gleichspannungsquelle
$U_{AN}$	=	250 V	Ankernennspannung der beiden Maschinen
$n_{01}$	=	$1820 \text{ min}^{-1}$	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und dem Erregerstrom $I_{F1}$
$n_{02}$	=	$2100 \text{ min}^{-1}$	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und dem Erregerstrom $I_{F2}$
$R$	=	$0,3 \Omega$	Ankerkreiswiderstand

- Welche Drehzahl stellt sich ein, wenn der gekuppelte Maschinensatz unbelastet ist?
- Bestimmen Sie die Ankerspannung der beiden Maschinen.
- In welchem Verhältnis teilt sich die Ankerverlustleistung auf die beiden Maschinen auf? Geben Sie die jeweilige Ankerverlustleistung an.

Der Maschinensatz wird nun mit einem Drehmoment von 100 Nm belastet.

- Wie groß sind dabei die Ankerströme in den beiden Maschinen?
- Wieviel Leistung wird der Gleichspannungsquelle entnommen?
- Wie groß ist nun die Verlustleistung im Maschinensatz?
- Welche Drehzahl des Maschinensatzes stellt sich jetzt ein?
- Bestimmen sie die Ankerspannungen der beiden Maschinen.

## 6 Drehmomentensprung an einer fremderregten, kompensierten Gleichstrommaschine

Eine Gleichstrommaschine wird mit Ankernennspannung und Nennerregung sowie Nennlast betrieben. Die Belastung ändert sich zum Zeitpunkt  $t = 0$  s sprungförmig von  $M_L = M_N$  auf  $M_L = -M_N$ .

### Vereinfachende Annahmen

- Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt
- Die Wirkung der Ankerkreisinduktivität  $L_A$  kann vernachlässigt werden.

### Folgende Daten sind gegeben

$U_{AN}$	=	250 V	Ankernennspannung
$I_{AN}$	=	68 A	Ankernennstrom
$n_{0N}$	=	2178 min <sup>-1</sup>	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und Nennerregung
$J$	=	12 kg m <sup>2</sup>	Trägheitsmoment des gesamten Antriebsstrangs
$R$	=	0,3 Ω	Ankerkreiswiderstand

- Bestimmen Sie  $\lim_{t \rightarrow \infty} I_A(t)$ .
- Berechnen Sie die Nenndrehzahl  $n_N$ .
- Bestimmen Sie den Verlauf der Drehzahl  $n(t)$ .

## 7 Fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine

Die fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine sei nenerregt und wird mit  $M_L$  belastet. Die Drehzahl ist gleich der Nenndrehzahl.

### Vereinfachende Annahmen

- Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt

### Folgende Daten sind gegeben

$U_{AN}$	=	250 V	Ankernennspannung
$I_{AN}$	=	80 A	Ankernennstrom
$n_N$	=	1450 min <sup>-1</sup>	Nenndrehzahl
$n_{0N}$	=	1500 min <sup>-1</sup>	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und Nennerregung
$M_L$	=	$\frac{M_N}{3}$	Lastmoment
$\Omega$	=	$\Omega_N$	Drehzahl der Maschine

- Berechnen Sie die Größe  $c\phi_N$ .
- Berechnen Sie den Ankerwiderstand  $R_A$ .
- Wie groß sind der Wirkungsgrad  $\eta$  und die mechanische Leistung  $P_{mech}$  im Nennpunkt?
- Berechnen Sie den notwendigen Ankerstrom  $I_A$  und die Ankerspannung  $U_A$  für den Betriebspunkt mit dem angegebenen Lastmoment.

Nun soll die Maschine ohne Lastmoment mit  $0,5 I_{AN} \leq I_A \leq 1,5 I_{AN}$  an der Nennankerspannung  $U_{AN}$  angefahren werden.

- Berechnen Sie die notwendigen Ankervorwiderstandswerte aus der DIN/IEC E12 Reihe. Zeichnen Sie den Verlauf  $n(I_A)$ .

## 8 Gleichstromreihenschlussmaschine

Von einer Gleichstromreihenschlussmaschine sind folgende Daten bekannt:

### Daten der Reihenschlussmaschine

$U_{MN}$	=	230 V	Nennspannung an den Motorklemmen
$I_{MN}$	=	8,7 A	Nennstrom des Motors
$P_{mechN}$	=	1800 W	Mechanische Nennleistung des Motors
$R_F$	=	450 m $\Omega$	Widerstand der Feldwicklung

### Vereinfachende Annahmen

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

Durch eine Messung wurden außerdem folgende Daten eines Betriebspunktes ermittelt:  
 $U_{M1} = 115 \text{ V}$ ,  $I_{M1} = 5,92 \text{ A}$  und  $n_1 = 6000 \text{ min}^{-1}$ .

- Berechnen Sie den Widerstand  $R_A$  der Ankerwicklung.
- 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  $M_2 = 0,3 \cdot M_N$  belastet wird?

## 9 Reversieren einer fremderregten, kompensierten Gleichstrommaschine

Ein unbelasteter Gleichstromantrieb wird bei Nennerregung mit konstantem Ankerstrom von  $n = -n_N$  auf  $n = n_N$  in der Zeit  $t_r$  reversiert. Der Nennstrom darf während des Reversiervorgangs überschritten werden.

### Vereinfachende Annahmen

- Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt

### Folgende Daten sind gegeben

$P_N$	=	100 kW	mechanische Nennleistung
$J$	=	15 kg m <sup>2</sup>	Trägheitsmoment des Antriebsstrangs
$I_{AN}$	=	250 A	Ankernennstrom
$n_N$	=	600 min <sup>-1</sup>	Nenndrehzahl
$t_r$	=	0,08 π <sup>2</sup> s	Zeitdauer des Reversierens
$R$	=	0,1 Ω	Ankerkreiswiderstand

- Berechnen Sie den notwendigen Ankerstrom.
- Berechnen Sie die aufzuwendende Energie.

## 10 Synchrongenerator

Ein Synchrongenerator in Turboläuferausführung wird am Netz mit Nennspannung und Nennstrom betrieben.

### Vereinfachende Annahmen

- die Synchronmaschine sei verlustlos

### Folgende Daten sind gegeben

$U_N$	=	400 V	Nennspannung
$f_N$	=	50 Hz	Nennfrequenz
$p$	=	1	Polpaarzahl
$S_N$	=	50 kVA	Nennscheinleistung
$\cos(\varphi_N)$	=	0,9	Leistungsfaktor (übererregt)
$\vartheta_N$	=	$34^\circ$	Nennpolradwinkel

- Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild.
- Berechnen Sie den Nennstrom  $I_N$  und das Nennmoment  $M_N$ .
- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm im Nennbetrieb.
- Bestimmen Sie die Synchroninduktivität  $L_S$  im Nennbetrieb.

## 11 Synchrongenerator als Turboläufer

Eine Synchronmaschine in Turboläuferausführung wirkt als Generator.

### Vereinfachende Annahmen

- der Synchrongenerator sei verlustlos

### Folgende Daten sind gegeben

$U_N$	=	400 V	Nennspannung
$P_{elN}$	=	32 kW	elektrische Nennleistung
$n_N$	=	1200 min <sup>-1</sup>	Nenndrehzahl
$\cos(\varphi_N)$	=	0,85	Leistungsfaktor (übererregt)
$I_f$	=	1,5 $I_{f0}$	Erregerstrom des Polrads

Mit dem Leerläufererregterstrom  $I_{f0}$ : Bei Leerläufererregterstrom, Nenndrehzahl und Nennspannung ist  $I_S = 0$  A.

- Berechnen Sie den Strangstrom  $I_{SN}$ .
- Wie groß ist die Polradspannung  $U_p$ ?
- Berechnen Sie die Synchronreaktanz  $X_S$ .
- Bestimmen Sie den Polradwinkel.
- Wie verändert sich der Polradwinkel, wenn die Last um 30 % verringert wird?

## 12 Synchrongenerator

Eine Synchronmaschine in Turboläuferausführung wird als Generator betrieben. Sie läuft am starren, symmetrischen Netz mit Nennspannung und Nennfrequenz.

### Vereinfachende Annahmen

- der Synchrongenerator sei verlustlos

### Folgende Daten sind gegeben

$U_N$	=	500 V	Nennspannung
$I_N$	=	300 A	Nennstrom
$\cos(\varphi)$	=	0,85	Leistungsfaktor (übererregt)
$X_{SN}$	=	3,67 $\Omega$	Synchronreaktanz im Nennbetrieb

- Berechnen Sie den Nennererregterstrom  $I_{fN}$  bezogen auf den Leerläufererregterstrom  $I_{f0}$ .
- Wie groß ist der Polradwinkel  $\vartheta_N$ ?

Nun soll die Erregung der Synchronmaschine verringert werden auf  $\frac{I_f}{I_{f0}} = 0,2$  und der Leistungsfaktor soll  $\cos(\varphi)=0$  sein.

- Ist die Maschine über- oder untererregt?
- Berechnen Sie die Blindleistung, die an das Netz abgegeben wird.

## 13 Synchronmaschine

Eine Synchronmaschine in Turboläuferausführung kann sowohl als Motor als auch als Generator arbeiten.

### Vereinfachende Annahmen

- die Synchronmaschine sei verlustlos

### Folgende Daten sind gegeben

$U_N$	=	400 V	Nennspannung
$I_N$	=	5 A	Nennstrom
$f_N$	=	50 Hz	Nennfrequenz
$L_{SN}$	=	80 mH	Synchroninduktivität bei Nennbetrieb

Die Maschine wird mit Nennspannung, Nennstrom und Nennfrequenz betrieben. Zeichnen Sie die Zeigerdiagramme folgender Betriebszustände:

- generatorisch  $\cos(\varphi) = 0,9$  übererregt bzw. untererregt.
- motorisch  $\cos(\varphi) = -0,85$  übererregt bzw. untererregt.
- Wie groß ist jeweils der Polradwinkel  $\vartheta$ ?

## 14 Synchrongenerator mit $X_d \neq X_q$

Bei einem Synchrongenerator ist folgendes bekannt:

### Vereinfachende Annahmen

- der Synchrongenerator sei verlustfrei

### Folgende Daten sind gegeben

$U_N$	=	400 V	Nennspannung
$I_N$	=	100 A	Nennstrom
$\cos(\varphi_N)$	=	0,80	Leistungsfaktor im Nennbetrieb (übererregt)
$X_d$	=	4,0 $\Omega$	Synchronreaktanz in d-Richtung
$X_q$	=	2,6 $\Omega$	Synchronreaktanz in q-Richtung
$f_N$	=	50 Hz	Netzfrequenz
$p$	=	6	Polpaarzahl

- Wie groß ist der Polradwinkel  $\vartheta_N$ ?
- Berechnen Sie den Nennerergerstrom  $I_{fN}$  bezogen auf den Leerlauferergerstrom  $I_{f0}$ .
- Wodurch ist die Spannung zwischen zwei Anschlussklemmen bestimmt, die bei völliger Entlastung ( $I_S=0$ ) auftritt?
- Berechnen Sie das Nenndrehmoment.

## 15 Drehstromasynchronmotor

In Abbildung 1 sind die Schlupf-Drehmoment- und die Lastkennlinie dargestellt. Der Motor läuft am starren Drehspannungsnetz.

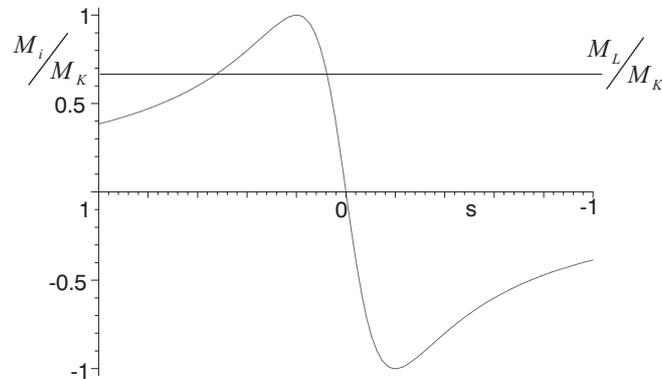


Abbildung 1: Schlupf-Drehmoment-Kennlinie mit Lastkennlinie

- Geben Sie die Kriterien für einen stabilen Betriebspunkt an.
- Geben Sie die Betriebspunkte an. Welche sind stabil und welche instabil?
- Läuft dieser Motor selbständig an? Begründen Sie ihre Antwort.

## 16 Drehstromasynchronmaschine mit Kurzschlussläufer

Ein Drehstromasynchronmotor mit Kurzschlussläufer wird an Nennspannung bei Nennlast betrieben.

**Folgende Daten sind gegeben**

$U_N$	=	400 V	Nennspannung
$I_N$	=	11,5 A	Nennstrom
$f_N$	=	50 Hz	Nennfrequenz des Netzes
$n_N$	=	1440 min <sup>-1</sup>	Nennzahl
$\cos \varphi$	=	0,85	Leistungsfaktor
$P_N$	=	5,5 kW	Nennleistung

- Berechnen Sie die aufgenommene Nennleistung, die Nennverlustleistung und den Nennwirkungsgrad.
- Geben Sie die Polpaarzahl an. ( $s_N < 0,2$ )
- Berechnen Sie den Nennschlupf und die Rotorfrequenz im Nennpunkt.
- Berechnen Sie das Nennmoment des Motors.
- Der Kippschlupf betrage  $s_k=0,15$ . Wie groß sind das Kippmoment und das Anlaufmoment?

## 17 Polumschaltbare Drehstromasynchronmaschine

Eine polumschaltbare Asynchronmaschine wird leerlaufend am Netz betrieben. Durch die Wicklungsumschaltung können zwei Polpaarzahlen  $p_1, p_2$  realisiert werden. Die Maschine wird zunächst mit Polpaarzahl  $p_1$  betrieben und dann auf  $p_2$  umgeschaltet.

### Vereinfachende Annahmen

- Der Ständerwiderstand, die Eisen- und Reibungsverluste sowie Stromverdrängung können vernachlässigt werden.

### Folgende Daten sind gegeben

$p_1$	=	2	Polpaarzahl
$p_2$	=	4	Polpaarzahl
$f_N$	=	50 Hz	Nennfrequenz des Netzes
$J$	=	0,05 kg m <sup>2</sup>	Trägheitsmoment des Antriebs

- Geben Sie die Drehzahl des Antriebs vor der Polumschaltung an.
- Geben Sie die Drehzahl des Antriebs an, die sich nach dem Übergangsvorgang stationär einstellt.
- Skizzieren Sie die Kennlinien  $\frac{M_{p1}}{M_k}(\Omega)$  und  $\frac{M_{p2}}{M_k}(\Omega)$  in ein gemeinsames Diagramm.
- Geben Sie die mit dem Netz ausgetauschte Energie an.
- Wie groß ist die Verlustenergie bei diesem Vorgang?
- Wie groß ist die Änderung der gespeicherten kinetischen Energie?

## 18 Drehstromasynchronmaschine als Lüfterantrieb

Eine Asynchronmaschine treibt einen Lüfter einer Tunnelbelüftung an.

Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Lüfters ist gegeben durch  $M_L = k \cdot \Omega^2 + M_R$ .

### Folgende Daten sind gegeben

$M_k$	=	$2,8 \cdot M_N$	Kippmoment
$P_N$	=	1,5 kW	Nennleistung
$f_N$	=	50 Hz	Nennfrequenz des Netzes
$n_N$	=	$1450 \text{ min}^{-1}$	Nennzahl
$k$	=	$3 \cdot 10^{-4} \text{ Nms}^3$	Faktor in der Lüfterkennlinie
$M_R$	=	0,8 Nm	Lagerreibung des Lüfters

- Zeichnen Sie das einphasige Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine.
- Geben Sie die Polpaarzahl an.
- Berechnen Sie das Nennmoment des Motors.
- Wie groß ist das Kippmoment?
- Bestimmen Sie den Nennschlupf  $s_N$  und den Kippschlupf  $s_K$ .
- Zeichnen Sie die Schlupf-Drehmoment-Kennlinie des Motors und die des Lüfters in ein gemeinsames Diagramm und bestimmen Sie den Arbeitspunkt grafisch.

Ein Metallstück fällt in den Lüfter. Die Lüfterflügel fallen ab ( $k = 0$ ) und das Lager wird beschädigt. Dadurch erhöht sich das Reibmoment auf  $M_R = 2,8 \text{ Nm}$ .

- Berechnen Sie den neuen Arbeitspunkt.

## 19 Drehstromasynchronmaschine mit Schleifringläufer

Mit einem Schleifringläufermotor eines Kranantriebs wird im Gegenstrombremsbetrieb eine Last gesenkt. Die konstante Sinkgeschwindigkeit entspricht der halben negativen synchronen Drehzahl des Motors. Das erforderliche Bremsmoment ist gleich dem Nennmoment des Motors.

### Vereinfachende Annahmen

- Der Verlauf des Moments des Motors wird mit der Kloss'schen Formel beschrieben.
- Die Stromwärmeverluste im Stator sind zu vernachlässigen.
- Reibungsverluste in der Maschine können vernachlässigt werden.

### Folgende Daten sind gegeben

$P_N$	=	50 kW	Nennleistung des Motors
$f_N$	=	50 Hz	Nennfrequenz des Motors
$p$	=	3	Polpaarzahl
$\frac{M_K}{M_N}$	=	2	Verhältnis Kipp- zu Nennmoment
$s_K$	=	0,15	Kippschlupf
$n$	=	$-\frac{1}{2} n_{syn}$	Drehzahl

- Wie groß ist der Vorwiderstand bezogen auf den Rotorwiderstand pro Läuferstrang zu wählen?
- Wie groß sind die Verlustleistungen, die im Rotor- und im Vorwiderstand anfallen?
- Auf welchen Wert müssen die Vorwiderstände bezogen auf den Rotorwiderstand eingestellt werden, um das Senken zu beenden?

## 20 Wechselstromtransformator

### Vereinfachende Annahmen

- Der Magnetisierungsstrom kann vernachlässigt werden.
- $U_{1N} = U_{2N}$

### Folgende Daten sind gegeben

$U_{2N}$	=	400 V	sekundäre Nennstrangspannung
$w_1$	=	$w_2$	Windungsverhältnis
$u_x$	=	10 %	relative Streuspannung
$R_1$	=	0	Widerstand im Transformatorersatzschaltbild
$R'_2$	=	0	Widerstand im Transformatorersatzschaltbild

### Hinweis

$$u_x = \frac{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}}{Z_{1N}}$$

Mit welcher Spannung  $U_1$  auf der Primärseite muss ein Transformator bei Belastung mit Nennstrom  $I_{2N}$  gespeist werden, damit die Sekundärspannung dem Nennwert entspricht?

- bei rein ohmscher Last
- bei rein induktiver Last
- bei rein kapazitiver Last

## 21 Wechselstromtransformator in Parallelschaltung

Zwei Transformatoren A und B haben die gleiche primäre Nennspannung  $U_{1N}$  und die gleiche Kurzschlussimpedanz  $\underline{Z}_k = \underline{Z}_{kA} = \underline{Z}_{kB}$ . Ihr Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  ist geringfügig unterschiedlich. Es ist keine Last angeschlossen.

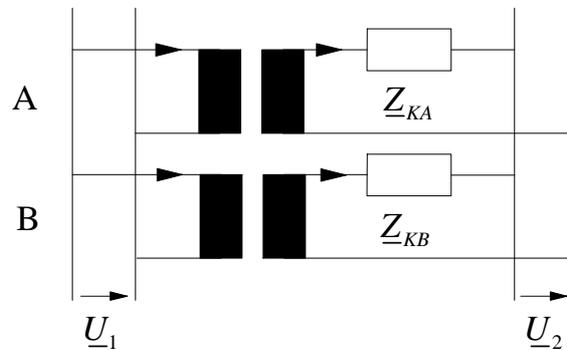


Abbildung 2: Trafo in Parallelschaltung

### Vereinfachende Annahmen

- Der Magnetisierungsstrom kann vernachlässigt werden.
- $U_{1N}/U_{2AN} = \ddot{u}_A$

### Folgende Daten sind gegeben

$\ddot{u}_A = w_{1A}/w_{2A}$	=	2,00	Übersetzungsverhältnis
$\ddot{u}_B = w_{1B}/w_{2B}$	=	2,06	Übersetzungsverhältnis
$u_k$	=	0,06	relative Kurzschlussspannung

- a) Wieviel Prozent des sekundärseitigen Nennstroms des Transformators A ( $I_{2N}$ ) fließt bei primärseitiger Nennspannungsversorgung? Zur Berechnung der Kurzschlussimpedanz  $\underline{Z}_k$  soll das Übersetzungsverhältnis des Transformators A verwendet werden.

## 22 Einphasentransformator

### Vereinfachende Annahmen

- Die Sättigung kann vernachlässigt werden.

### Folgende Daten sind gegeben

#### Transformator

$U_{2N}$	=	460 V	sekundärseitige Nennstrangspannung
$\ddot{u}=w_1/w_2$	=	0,5	Übersetzungsverhältnis
$R_1$	=	4,7 $\Omega$	primärseitiger Widerstand
$L_{1\sigma}$	=	25 mH	primärseitige Streuinduktivität
$R_2$	=	32 $\Omega$	sekundärseitiger Widerstand
$L_{2\sigma}$	=	127 mH	sekundärseitige Streuinduktivität
$R_{Fe}$	=	100 $\Omega$	Widerstand zur Modellierung der Eisenverluste
$X_h$	=	150 $\Omega$	Hauptinduktivität
$f$	=	60 Hz	Frequenz

Der Transformator wird mit sekundärer Nennspannung betrieben.

- Zeichnen Sie das primärseitige Ersatzschaltbild.
- Berechnen Sie  $X_{1\sigma}$ ,  $R'_2$ ,  $X'_{2\sigma}$  sowie  $U'_{2N}$ .
- Der Trafo wird mit einer Impedanz  $Z_L=184 \Omega$ ,  $\cos(\varphi) = 0,8$  induktiv belastet. Wie groß sind die Last  $Z'_L$ , der Laststrom  $I_L$  und der Laststrom  $I'_L$ ?
- Konstruieren Sie das Zeigerdiagramm.

## 23 Wechselstromsteller (Dimmer)

An einen Wechselstromsteller sei eine Last angeschlossen.

### Vereinfachende Annahmen

- Die Halbleiterbauelemente sind ideale Schalter.

### Folgende Daten sind gegeben

$$U_n = 230 \text{ V} \quad \text{Netzspannung}$$

Berechnen Sie die effektive Spannung an der

- rein ohmschen Last
- rein induktiven Last

als Funktion des Steuerwinkels  $\alpha$ .

## 24 Zweipulsige Brückenschaltung

Ein Verbraucher wird aus dem starren 230 V Wechselspannungsnetz über einen Stromrichter (zweipulsige Brückenschaltung) gespeist.

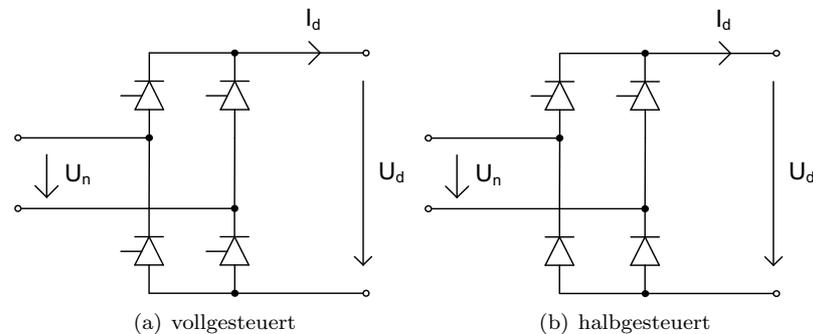


Abbildung 3: Wechselstrombrückenschaltung

### Vereinfachende Annahmen

- Die Halbleiterbauelemente sind ideale Schalter.
- Der Strom  $I_d$  ist vollkommen glatt.
- Sämtliche Kommutierungsvorgänge können vernachlässigt werden.

### Folgende Daten sind gegeben

$U_n$	=	230 V	Netzspannung
$I_d$	=	15 A	Ausgangsstrom der Brückenschaltung

Wie groß sind die aus dem Netz aufgenommene Wirkleistung  $P$ , die Scheinleistung  $S$  und der Leistungsfaktor  $\lambda = \frac{P}{S}$  für

- die vollgesteuerte Brücke bei einem Steuerwinkel von  $\alpha_a = \frac{\pi}{6}$ ,
- die halbgesteuerte Brücke, wenn der Steuerwinkel  $\alpha_b$  so eingestellt wird, dass die gleiche Verbraucherspannung wie in Fall a) auftritt?
- Geben Sie die jeweils am Stromrichtereingang auftretende Grundsicherungsleistung an.
- In welchem Bereich liegen die möglichen Ausgangsspannungen, die mit den beiden Schaltungen eingestellt werden können?

## 25 Netzgeführte Drehstrombrückenschaltung

Gegeben ist eine sechspulsige Brückenschaltung mit RL-Last.

### Vereinfachende Annahmen

- Die Halbleiterbauelemente sind ideale Schalter.
- Kommutierungseffekte können vernachlässigt werden.

### Folgende Daten sind gegeben

$U_N$	=	400 V	Netzleiterspannung
$I_d$	=	100 A	Laststrommittelwert

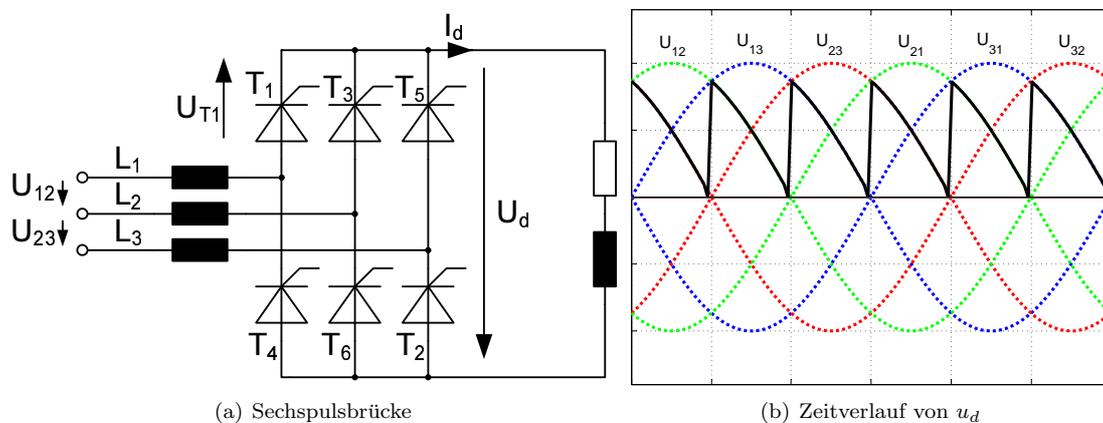


Abbildung 4: zu Aufgabe 25

- Berechnen Sie die ideale Gleichspannung  $U_{di}$ .
- Wie lautet die Steuerkennlinie  $\frac{U_{di\alpha}}{U_{di}}$  im nicht lückenden Betrieb?

In Abbildung 4(b) sind der Verlauf der verketteten Spannungen  $U_{12}, U_{23}, U_{31}$  und der Verlauf der Ausgangsspannung  $u_d$  zu sehen.

- Wie groß ist der Zündwinkel  $\alpha$ ?
- Wie groß ist der Gleichspannungsanteil  $U_{di\alpha}$ ?
- Liegt lückender oder nicht lückender Betrieb vor?
- Markieren Sie in der Zeichnung, wann welche Thyristoren leiten.
- Zeichnen Sie den Verlauf der Thyristorspannung  $u_{T1}$  für eine Netzperiode in die Zeichnung ein.
- Wie groß ist die maximal erforderliche Sperr- bzw. Blockierspannung?

Nun soll der Strom  $i_d$  als ideal glatt angenommen werden.

- Berechnen Sie die vom Netz abgegebene Wirkleistung und den Phasenwinkel zwischen der Grundschwingung des Stroms und der Spannung am Eingang.

## 26 Gleichstromantrieb mit netzgeführter Drehstrombrückenschaltung

Für einen Gleichstromantrieb mit netzgeführtem Stromrichter haben Sie zwei Gleichstrommaschinen gleicher Leistung – aber mit verschiedenen Nenndaten – zur Auswahl. Als Auswahlkriterium ist die Netzbelastung entscheidend.

### Vereinfachende Annahmen

- Die Halbleiterbauelemente sind ideale Schalter.

### Folgende Daten sind gegeben

#### Umrichter

$$U_{di} = 520 \text{ V} \quad \text{ideelle Spannung bei } \alpha=0^\circ$$

#### Gleichstrommotor 1

$$U_{AN1} = 220 \text{ V} \quad \text{Nennspannung}$$

$$I_{AN1} = 100 \text{ A} \quad \text{Nennstrom}$$

#### Gleichstrommotor 2

$$U_{AN2} = 440 \text{ V} \quad \text{Nennspannung}$$

$$I_{AN2} = 50 \text{ A} \quad \text{Nennstrom}$$

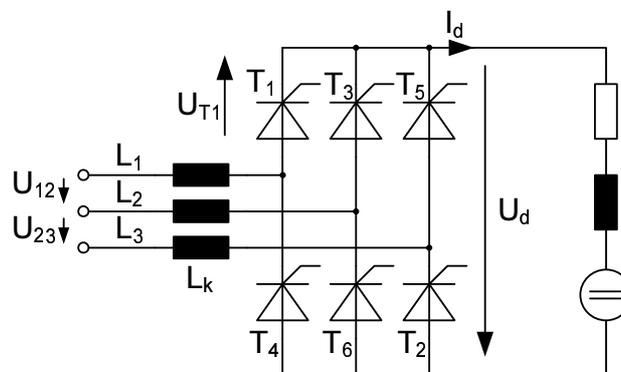


Abbildung 5: Drehstrombrückenschaltung mit Kommutierungsinduktivität

Kommutierungseffekte können vernachlässigt werden. Berechnen Sie:

- den Zündwinkel  $\alpha$ ,
- den Leistungsfaktor  $\cos(\varphi_1)$  der Grundschiwingung,
- die Grundschiwingungsblindleistung  $Q_1$  und
- die Grundschiwingungsscheinleistung  $S_1$ .

Nun ist eine Kommutierungsinduktivität von  $L_K=0,3 \text{ mH}$  und  $f=50 \text{ Hz}$  zu berücksichtigen.

- Berechnen Sie erneut den Zündwinkel  $\alpha$ .
- Für welche Maschine würden Sie sich entscheiden?

## 27 Tiefsetzsteller

Ein als Tiefsetzsteller geschalteter Gleichstromsteller speist eine Gleichstrommaschine, die sich als Reihenschaltung aus einem Widerstand  $R_L$ , einer Induktivität  $L$  und der Gegenspannung  $U_q$  darstellen lässt. Der Steller wird mit der festen Taktfrequenz  $f$  betrieben. Das gewählte Einschaltverhältnis beträgt  $a$ .

### Vereinfachende Annahmen

- Die Halbleiterbauelemente sind ideale Schalter.

### Folgende Daten sind gegeben

$U_d$	=	500 V	Eingangsspannung des Stellers
$R_L$	=	1 $\Omega$	Widerstand der Gleichstrommaschine
$L$	=	2 mH	Induktivität der Gleichstrommaschine
$U_q$	=	300 V	innere Spannung der Gleichstrommaschine
$f$	=	1 kHz	Schaltfrequenz des Stellers
$a$	=	0,8	Einschaltverhältnis des Stellers $a = \frac{T_e}{T}$

- Berechnen und zeichnen Sie maßstäblich den zeitlichen Verlauf von zwei Perioden des Laststroms für quasi stationären Betrieb.
- Wie groß sind der Mittelwert des Laststroms und die vom Steller übertragene Leistung?

Durch Entlastung der Gleichstrommaschine erhöht sich die Gegenspannung auf  $U_q = 430$  V.

- Berechnen und zeichnen Sie den neuen Laststrom.
- Wie groß ist der neue Mittelwert des Laststroms?
- Skizzieren Sie den Verlauf der Spannung  $u_L(t)$  am Ausgang des Stellers.

## 28 Schaltnetzteil

Ein Schaltnetzteil wird nach dem Prinzip des Tiefsetzstellers aufgebaut.

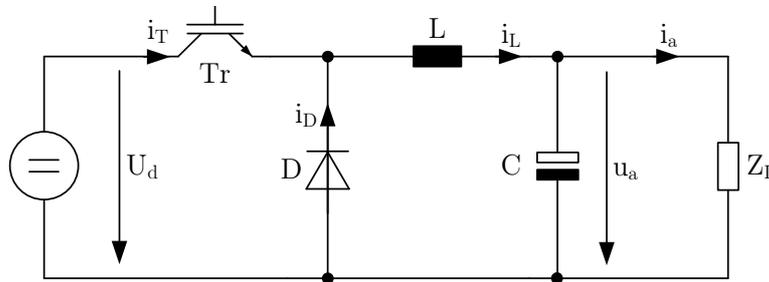


Abbildung 6: Tiefsetzsteller

### Vereinfachende Annahmen

- Die Halbleiterbauelemente sind ideale Schalter.
- Da die Kapazität  $C$  als sehr groß angenommen wird, sind die Ausgangsspannung  $U_a$  und der Ausgangsstrom  $i_a$  konstant.

### Folgende Daten sind gegeben

$U_d$	=	60 V	Eingangsspannung des Stellers
$U_a$	=	5 V	Ausgangsspannung des Stellers
$L$	=	100 $\mu$ H	Induktivität des Stellers
$i_a$	=	30 A	Ausgangsstrom

- Wie groß muss die Taktfrequenz gewählt werden, wenn die Stromwelligkeit in der Speicherinduktivität  $L$  maximal  $\Delta i_L = 2$  A betragen soll?
- Der Zeitverlauf des Transistorstroms und des Stroms in der Speicherinduktivität  $L$  sind maßstäblich zu zeichnen!
- Wie groß sind der Mittelwert  $\bar{i}_T$  und der Effektivwert  $I_{T,eff}$  des Eingangsstroms?

## 29 Vierquadrantensteller

Eine Gleichstromstellerschaltung versorgt eine Gleichstrommaschine.

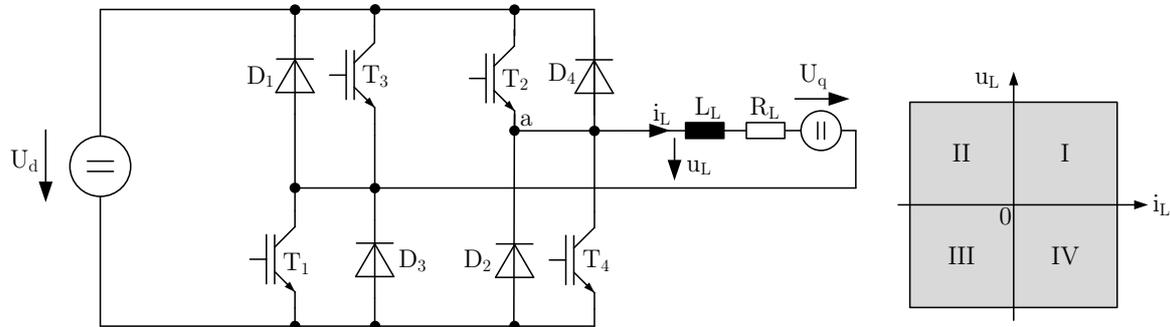


Abbildung 7: Vierquadrantensteller

a) Geben Sie an, in welchen Quadranten Motor- und in welchen Generatorbetrieb vorliegt.

Leiten Sie aus dem gegebenen Vierquadrantensteller folgende Ein- und Zweiquadrantenstellerschaltungen ab:

- Ein-Quadrantenstellerschaltung mit  $U_L > 0$ ,  $I_L > 0$  (Quadrant 1)
- Ein-Quadrantenstellerschaltung mit  $U_L > 0$ ,  $I_L < 0$  (Quadrant 2)
- Zwei-Quadrantenstellerschaltung mit Stromumkehr (Quadrant 1, 2)
- Zwei-Quadrantenstellerschaltung mit Spannungsumkehr (Quadrant 1, 4)

Die Schaltung wird jetzt wieder als Vierquadrantensteller betrieben. Folgende Daten sind gegeben:

$U_d$	= 400 V	Eingangsspannung des Stellers
$U_q$	= 180 V	Innere Spannung der Gleichstrommaschine
$I_L$	= 100 A	Ankerstrom
$R_L$	= 0,2 $\Omega$	Ankerkreiswiderstand
$f_S$	= 1 kHz	Schaltfrequenz

f) Mit welchen Einschalt Dauern werden die einzelnen Transistoren getaktet?

### 30 Pulswechselrichter



Abbildung 8: Umrichtervorlage

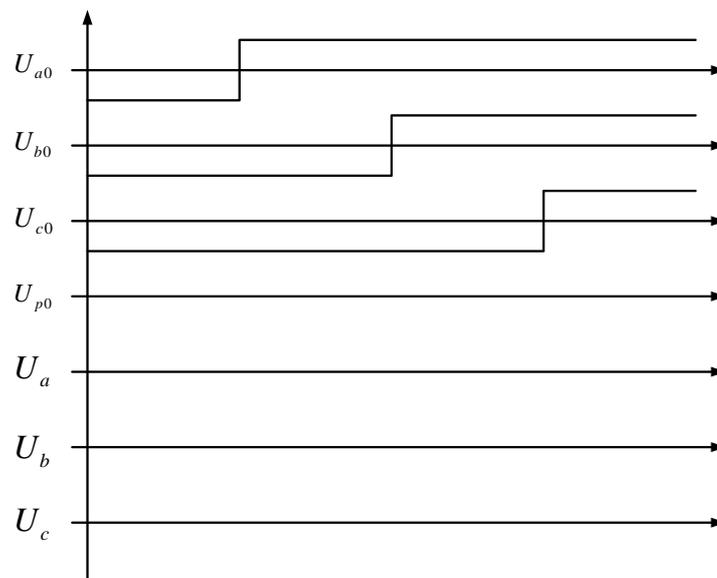


Abbildung 9: Zeitverläufe

- Skizzieren Sie eine Möglichkeit für die Erzeugung der Schaltsignale einer selbstgeführten Drehstrombrücke, bei der die Ausgangsspannungen mit Hilfe der Pulsweitenmodulation/Dreieckmodulation generiert werden. Berücksichtigen Sie dabei auch die Umschaltdauer der Halbleiter.
- Erweitern Sie die Abbildung 8 zu einer dreiphasigen IGBT-Brücke mit angeschlossenem Synchronmotor als Last in Stern-Schaltung (Maschine durch passive Bauteile und Spannungsquelle modellieren).
- Ergänzen Sie die Spannungsverläufe in Abbildung 9 und geben Sie an, welche Halbleiter eingeschaltet sind. (Halbleiter können als ideale Schalter angenommen werden;  $U_a$ ,  $U_b$  und  $U_c$  seien Sternspannungen)

### 31 Pulswechselrichter mit Raumzeigermodulation

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

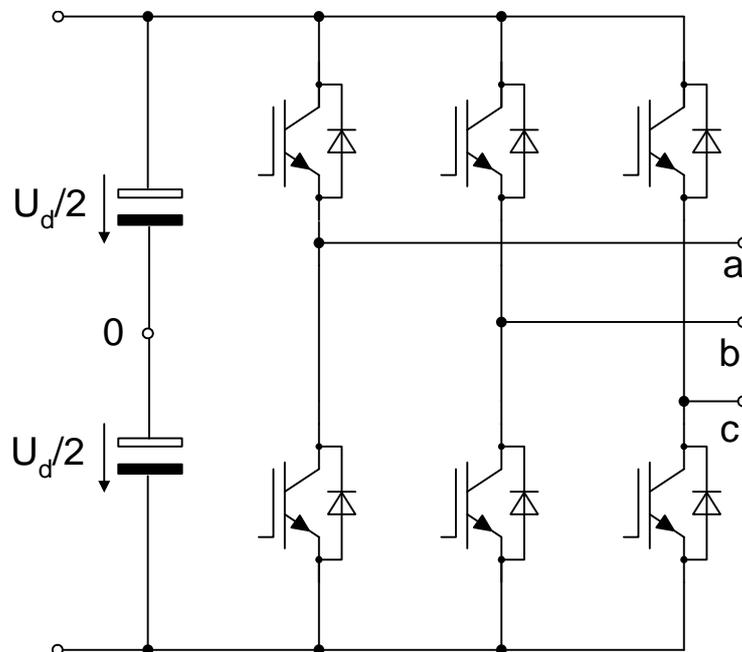


Abbildung 10: Pulswechselrichter

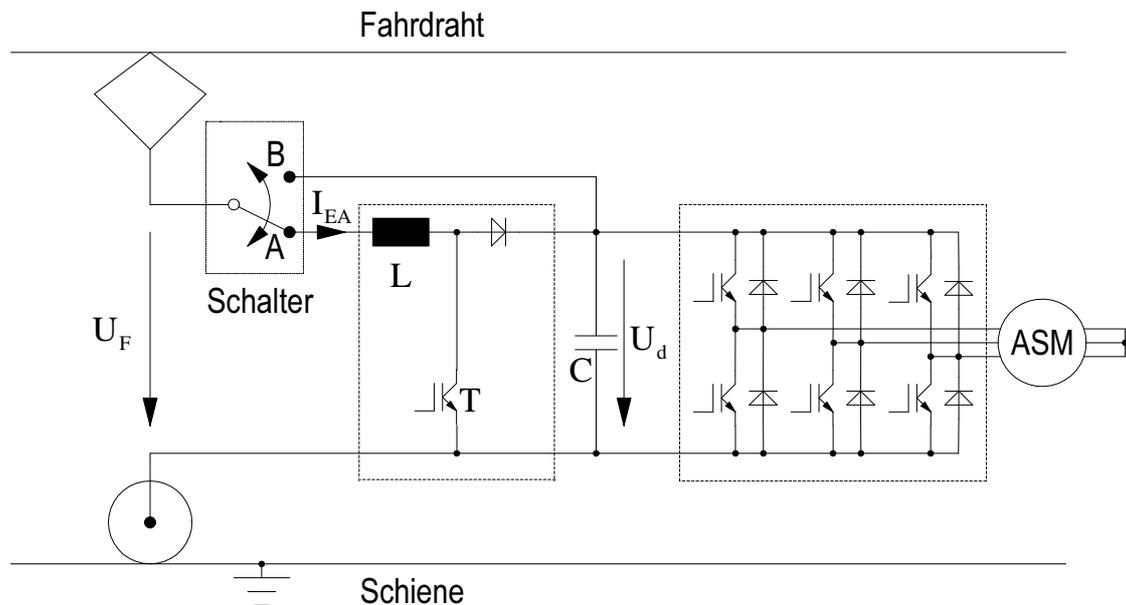
#### Folgende Daten sind gegeben

$u_a(t)$	$= \hat{U} \cos(\omega t)$	Zeitverlauf der Sternspannung $U_a$
$u_b(t)$	$= \hat{U} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$	Zeitverlauf der Sternspannung $U_b$
$u_c(t)$	$= \hat{U} \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3})$	Zeitverlauf der Sternspannung $U_c$
$U_N$	$= 400 \text{ V}$	Nennspannung der ASM
$U_d$	$= 650 \text{ V}$	Zwischenkreisspannung
$f_p$	$= 10 \text{ kHz}$	Modulationsfrequenz des Umrichters

- Zeichnen Sie die möglichen Raumzeiger der selbstgeführten Drehstrombrücke (ohne PWM).
- Schraffieren Sie den durch eine Pulsweitenmodulation erreichbaren Bereich im Bild aus a) für eine sinusförmige Steuerung der Ausgangsspannungen.
- Berechnen Sie den Raumzeiger für das gegebene Spannungssystem, abhängig vom  $\omega t$ .
- 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.
- Bestimmen Sie für  $\omega t = \frac{\pi}{12}$  die notwendigen Schaltzustände und jeweils die Einschaltdauer der diskreten Raumzeiger.
- Zeichnen Sie für zwei Modulationsperioden die Größen  $u_{ab}(t)$ ,  $u_{bc}(t)$  und  $u_{ca}(t)$ .

## 32 Antriebssystem für eine Mehrsystemlokomotive

Ein Lokomotivantrieb mit Drehstromasynchronmaschine als Fahrmotor soll wahlweise an 1,5 kV Gleichspannung oder 3 kV Gleichspannung betrieben werden. Die Fahrdrachtspannung  $U_F$  wird mit einem Schalter entweder direkt oder über einen Gleichstromsteller zur Speisung einer selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung benutzt.



### Vereinfachende Annahmen

- die Leistungshalbleiter seien ideal
- die Gleichspannung  $U_d$  sei ideal glatt ( $C \rightarrow \infty$ )

### Folgende Daten sind gegeben

$U_F$	=	1,5 kV oder 3 kV	Fahrdrachtspannung
$U_{dN}$	=	3 kV	Nennwert der Gleichspannung $U_d$
$P_{elN}$	=	1,5 MW	Nennleistung des Fahrmotors
$L$	=	5 mH	

- Geben Sie die Schalterstellung für  $U_F = 1,5 \text{ kV}$  und  $U_F = 3 \text{ kV}$  an. ( $U_d = U_{dN}$ )
- Berechnen Sie die Einschaltdauer des Transistors  $T$  für  $U_F = 1,5 \text{ kV}$ , Nennbelastung des Fahrmotors und eine Schaltfrequenz von  $f = 500 \text{ Hz}$ .
- Berechnen Sie den Mittelwert des Stroms  $I_{EA}$  für den Betrieb nach b).
- Skizzieren Sie maßstäblich den Zeitverlauf des Stromes  $I_{EA}$  für den Betrieb nach b)  
(200 A/cm, 1 ms/cm)  
Hinweis:  $U_d = U_{dN}$  ist als konstant anzunehmen
- Berechnen Sie den Effektivwert der Grundschiwingung der Außenleiterspannung an der Asynchronmaschine für Blocksteuerung ( $U_d = U_{dN}$ ).
- Berechnen Sie den maximalen Effektivwert der Grundschiwingung der Leiterspannung an der Asynchronmaschine für Raumzeigermodulation ( $U_d = U_{dN}$ ).
- Geben Sie an, welches der Verfahren nach e) und f) für das Anfahren und welches für das Erreichen der Höchstgeschwindigkeit benutzt wird. Begründen Sie Ihre Antwort.

### 33 Synchronmotor am Umrichter

Eine Synchronmaschine in Turboläuferausführung wird als Motor betrieben. Gespeist wird die Maschine von einem Umrichter, der ein dreiphasiges Drehspannungssystem variabler Frequenz erzeugen kann.

#### Vereinfachende Annahmen

- der Synchronmotor sei verlustlos

#### Folgende Daten sind gegeben

$U_{SN}$	=	230 V	Nennstrangspannung
$I_N$	=	170 A	Nennstrom
$\cos(\varphi_N)$	=	0,85	Leistungsfaktor (übererregt)
$p$	=	4	Polpaarzahl
$f_N$	=	60 Hz	Nennfrequenz
$X_{SN}$	=	$5 \Omega$	Synchronreaktanz im Nennbetrieb

- Berechnen Sie die Nenndrehzahl  $n_N$ .
- Wie groß ist die Polradspannung  $U_{PN}$  bei Nennbedingungen?
- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm für den Nennbetriebspunkt.

Nun soll die Maschine mit halber Nenndrehzahl im Betriebspunkt 2 betrieben werden. Das Drehmoment und die Strangspannung sollen den Nennwerten entsprechen.

- Wie groß ist die Speisefrequenz  $f_2$ ?
- Bestimmen Sie den Polradwinkel  $\vartheta_2$ , die Phasenverschiebung  $\varphi_2$  und die Höhe des Statorstroms  $I_{S2}$ .
- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm.