

ÜBUNGSAUFGABEN ZUR VORLESUNG

**Elektrische Maschinen und
Stromrichter**

von

Daniel Bernet, Felix Hoffmann

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Eine Verwendung dieses Dokuments außerhalb der entsprechenden Vorlesung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Genehmigung durch das KIT und den Urheber.

Inhaltsverzeichnis

0	Einführung	3
0.1	Komplexe Wechselstromrechnung	3
0.2	Drehstrommotor	4
1	Gleichstrommaschine	5
1.1	Fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine	5
1.2	Stellantrieb mit einer fremderregten Gleichstrommaschine	6
1.3	Fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine im Parallelbetrieb	7
1.4	Fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine in Serienschaltung	8
1.5	Drehmomentensprung an einer fremderregten, kompensierten Gleichstrommaschine	9
1.6	Gleichstromreihenschlussmaschine	10
2	Synchronmaschine	11
2.1	Synchrongenerator	11
2.2	Synchrongenerator als Turboläufer	12
2.3	Synchrongenerator am starren Netz	13
2.4	Synchronmaschine	14
2.5	Synchrongenerator mit X_d ungleich X_q	15
2.6	Synchronmotor in Schenkelpolbauweise	16
2.7	Synchrongenerator am starren Netz	17
3	Asynchronmaschine	18
3.1	Drehstromasynchronmotor	18
3.2	Drehstromasynchronmaschine mit Kurzschlussläufer	19
3.3	Polumschaltbare Drehstromasynchronmaschine	20
3.4	Drehstromasynchronmaschine als Lüfterantrieb	21
3.5	Drehstromasynchronmaschine mit Schleifringläufer	22
3.6	Frequenzgesteuerte Drehstromasynchronmaschine	23
4	Transformator	24
4.1	Wechselstromtransformator	24
4.2	Einphasentransformator	25
4.3	Drehstromtransformator	26
5	Netzgeführte Stromrichter	27
5.1	Dimmer	28
5.2	Netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung	29
5.3	Netzgeführte Drehstrombrückenschaltung	30
5.4	Gleichstromantrieb mit netzgeführter DBS	31
5.5	Blindleistung der WBS	33
5.6	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	34

6	Selbstgeführte Stromrichter	36
6.1	Tiefsetzsteller	36
6.2	Schaltnetzteil	37
6.3	Vierquadrantensteller	38
6.4	Pulswechselrichter	39
6.5	Pulswechselrichter mit Raumzeigermodulation	41
6.6	Synchronmotor am Umrichter	43
6.7	Umrichtergespeister permanentmagneterregter Synchronmotor mit rotor-orientierter Steuerung	44

0 Einführung

0.1 Komplexe Wechselstromrechnung

Gegeben sei ein Drehstromnetz mit folgenden Größen:

- $U_0 = 230 \text{ V}$
- $\underline{U}_1 = U_0$
- $\underline{U}_2 = U_0 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}$
- $\underline{U}_3 = U_0 \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}}$

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.

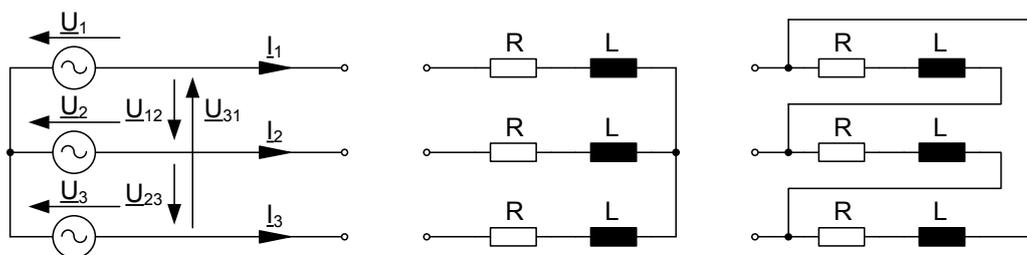


Abbildung 1: Drehstromnetz mit angeschlossenem Verbraucher

- a) 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} .
- b) Berechnen Sie den komplexen Effektivwert der Leiterspannungen \underline{U}_{12} und \underline{U}_{31} .
- c) Berechnen Sie den komplexen Effektivwert des Netzstroms I_1 , wenn die Verbraucher in Sternschaltung angeschlossen sind.
- d) Berechnen Sie den komplexen Effektivwert des Netzstroms I_1 , wenn die Verbraucher in Dreieckschaltung angeschlossen sind.
- e) 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.
- f) Berechnen Sie die Scheinleistung als Produkt der Effektivwerte und die Blindleistung an dem Verbraucher, der an der ersten Phase angeschlossen ist.
- g) Berechnen Sie den zeitlichen Verlauf der Summe der Wirkleistungen der drei Verbraucher in Sternschaltung

0.2 Drehstrommotor

Gegeben sei ein Drehstrommotor auf dessen Typenschild folgende Nenndaten stehen:

- $U_N = 400V$
- $I_N = 6A$
- $\cos(\varphi) = 0,85$
- $P_N = 3kW$
- $n_N = 2890 \frac{1}{min}$

a) Berechnen Sie das Nennmoment M_N .

b) Berechnen Sie den Wirkungsgrad η_N im Nennpunkt.

1 Gleichstrommaschine

1.1 Fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine

Die fremderregte, kompensierte Gleichstrommaschine sei nennernregt 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 ⁻¹	Nenndrehzahl
n_{0N}	=	1500 min ⁻¹	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und Nennerregung
M_L	=	$\frac{M_N}{3}$	Lastmoment
Ω	=	Ω_N	Drehzahl der Maschine

- 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 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} bis zur Leerlaufdrehzahl beschleunigt werden.

- Berechnen Sie die notwendigen Ankervorwiderstandswerte. Zeichnen Sie den Verlauf $n(I_A)$.

1.2 Stellantrieb mit einer fremderregten 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

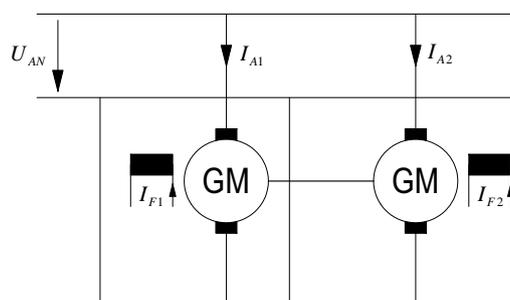
Folgende Daten sind gegeben

z	$= 20$	Anzahl der Umdrehungen
J	$= 1,0 \text{ kg m}^2$	Läuferträgheitsmoment
$P_{N_{el}}$	$= 5 \text{ kW}$	elektrische Nennleistung
n_{0N}	$= 1000 \text{ min}^{-1}$	Leerlaufdrehzahl bei $U_{A,N}$ und $c\varphi_N$
$I_{A_{max}}$	$= 1,5 I_{AN}$	maximal zulässiger Ankerstrom
$c\phi_N$	$= 4,2 \text{ Vs}$	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?

1.3 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

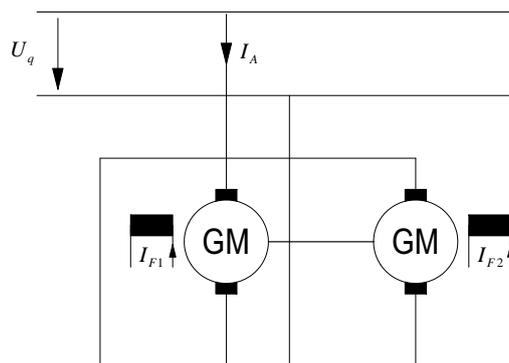
Folgende Daten sind gegeben

U_{AN}	=	220 V	Ankernennspannung
n_{01}	=	1560 min^{-1}	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und I_{F1}
n_{02}	=	1680 min^{-1}	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und 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?

1.4 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 min^{-1}	Leerlaufdrehzahl GM1
n_{02}	=	2100 min^{-1}	Leerlaufdrehzahl GM2
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.

1.5 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 ⁻¹	Leerlaufdrehzahl bei Ankernennspannung und Nennerregung
J	=	12 kg m ²	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 $n(t)$.

1.6 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 Ω	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:

$$U_{M1} = 115 \text{ V}, \quad I_{M1} = 5,92 \text{ A} \quad \text{und} \quad n_1 = 6000 \text{ min}^{-1}.$$

- a) Berechnen Sie den Widerstand R_A der Ankerwicklung.
- b) Berechnen Sie das Nennmoment M_N des Motors.
- c) Berechnen Sie die Nenndrehzahl n_N des Motors.
- d) 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?

2 Synchronmaschine

2.1 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)
ϑ_N	=	34°	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.

2.2 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 ⁻¹	Nenndrehzahl
$\cos(\varphi_N)$	=	0,85	Leistungsfaktor (übererregt)
I_f	=	1,5 I_{f0}	Erregerstrom des Polrads

Mit dem Leerläufererregstrom I_{f0} : Bei Leerläufererregstrom, 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?

2.3 Synchrongenerator am starren Netz

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 Ω	Synchronreaktanz im Nennbetrieb

- Berechnen Sie den Nennerergerstrom I_{fN} bezogen auf den Leerläuferergerstrom I_{f0} .
- Wie groß ist der Polradwinkel ϑ_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.

2.4 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:

- a) generatorisch mit einem Leistungsfaktor von $\cos(\varphi) = 0,9$ übererregt bzw. untererregt.
- b) motorisch mit einem Leistungsfaktor von $\cos(\varphi) = 0,85$ übererregt bzw. untererregt.
- c) Wie groß ist jeweils der Polradwinkel ϑ ?

2.5 Synchrongenerator mit X_d ungleich 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 Ω	Synchronreaktanz in d-Richtung
X_q	=	2,6 Ω	Synchronreaktanz in q-Richtung
f_N	=	50 Hz	Netzfrequenz
p	=	6	Polpaarzahl

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

2.6 Synchronmotor in Schenkelpolbauweise

Vereinfachende Annahmen

- der Synchronmotor sei verlustlos
- Sättigungseffekte können vernachlässigt werden

Folgende Daten sind gegeben

U_N	=	5,2 kV	Nennspannung
I_N	=	120 A	Nennstrom
p	=	4	Polpaarzahl
$\cos(\varphi_N)$	=	0,70 übererregt	Leistungsfaktor im Nennbetrieb
f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
X_d	=	16 Ω	Längskomponente der Synchronreaktanz
X_q	=	14 Ω	Querkomponente der Synchronreaktanz

- Berechnen Sie die Nenndrehzahl n_N .
- Berechnen Sie den Polradwinkel ϑ_N .
- Die Größen I_d und I_q sind zu berechnen.
- Berechnen Sie die Polradspannung U_{pN} .

Die Maschine soll nun so betrieben werden, dass beim Betrieb mit Nennspannung nur Wirkleistung aufgenommen wird. Der Statorstrom soll dem Nennwert entsprechen.

- Berechnen Sie U_p .
- Welches Drehmoment gibt die Maschine dabei ab?

Der Erregerstrom der Maschine soll konstant auf den halben Leerlaufnennwert eingestellt werden, so dass die Polradspannung der halben Nennstrangspannung entspricht. Zwischen der Maschine und dem Netz befindet sich die Leistungselektronik, die so angesteuert wird, dass der Ständerstrom immer in Phase mit der Polradspannung ist. Der Strom und die Drehzahl entsprechen den Nennwerten.

- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm.
- Berechnen Sie den Polradwinkel ϑ .
- Der Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ ist zu berechnen.
- Geben Sie die notwendige Strangspannung U_S an. (rechnerisch)
- Wie groß ist das Drehmoment M der Maschine?

2.7 Synchrongenerator am starren Netz (F2016, A2)

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	Nennerergerstrom
p	=	1	Polpaarzahl

Vereinfachende Annahmen

- Der Generator sei, bis auf die Verluste der Erregerwicklung, verlustfrei.
- 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 $X_S \underline{I}_S$ an der Kippgrenze bei Nennerregung. (5 kV/cm)
 - Berechnen Sie den Effektivwert des Netzstroms an der Kippgrenze und tragen Sie ihn in das Diagramm aus Aufgabenteil d) ein. (5 kA/cm)
 - Muss der Erregerstrom bei gleichbleibender Wirkleistung erhöht oder erniedrigt werden, um den Betriebspunkt in den stabilen Bereich zu bringen?

3 Asynchronmaschine

3.1 Drehstromasynchronmotor

In Abbildung 2 sind die Schlupf-Drehmoment- und die Lastkennlinie dargestellt. Der Motor läuft am starren Drehspannungsnetz.

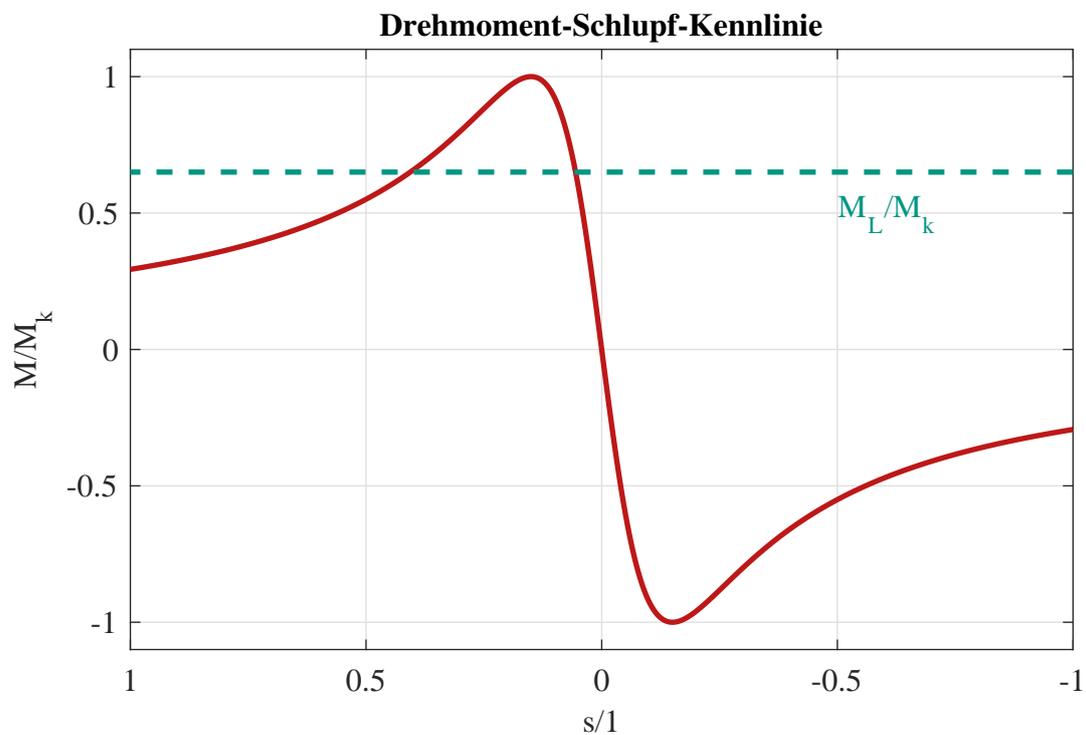


Abbildung 2: Schlupf-Drehmoment-Kennlinie mit Lastkennlinie

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

3.2 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 ⁻¹	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?

3.3 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 ²	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?

3.4 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 min ⁻¹	Nenndrehzahl
k	=	$3 \cdot 10^{-4}$ Nms ²	Faktor in der Lüfterkennlinie
M_R	=	0,8 Nm	Lagerreibung des Lüfters

- 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 $M_R = 2,8$ Nm.

- Berechnen Sie den neuen Arbeitspunkt.

3.5 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

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

3.6 Frequenzgesteuerte Drehstromasynchronmaschine

Ein mit konstantem Drehmoment M_L belasteter Motor, wird von einer Wechselspannungsquelle (Umrichter) versorgt. Der Spannungseffektivwert U_S und die Frequenz f_s werden so gesteuert, dass die Hauptflussverkettung ψ_h im gesamten Arbeitsbereich ihrem Nennwert ψ_{hN} entspricht.

Vereinfachende Annahmen

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

Folgende Daten sind gegeben

R'_R	=	0,27 Ω	auf die Statorwicklung umgerechneter Rotorwiderstand
$L'_{R\sigma}$	=	1,85 mH	auf die Statorwicklung umgerechnete Rotorstreuinduktivität
L_{Sh}	=	36,3 mH	Statorhauptinduktivität
$I_{\mu N}$	=	17,6 A	Magnetisierungsstrom im Nennbetrieb
ψ_h	=	ψ_{hN}	Hauptflussverkettung
p	=	3	Polpaarzahl
M_L	=	400 Nm	Lastmoment

- a) Welcher Zusammenhang muss in diesem beschriebenen Arbeitsfall zwischen der Spannung U_S und der Frequenz f_s gelten?
- b) Wie groß muss f_s eingestellt werden, damit der Motor den stabilen Drehzahlwert $n = 0 \text{ min}^{-1}$ einnimmt?

4 Transformator

4.1 Wechselstromtransformator

Vereinfachende Annahmen

- Der Magnetisierungsstrom kann vernachlässigt werden.
- $Z_k = u_k \cdot \frac{U_{1N}}{I_{1N}} \approx u_k \cdot \frac{U_{2N}}{I_{2N}}$

Folgende Daten sind gegeben

U_{2N}	=	400 V	sekundäre Nennstrangspannung
w_1	=	w_2	Windungsverhältnis
u_k	=	10 %	relative Kurzschlussspannung
R_1	=	0	Widerstand im Transformatorersatzschaltbild
R_2'	=	0	Widerstand im Transformatorersatzschaltbild

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?

- a) bei rein ohmscher Last
- b) bei rein induktiver Last
- c) bei rein kapazitiver Last

4.2 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 Ω	primärseitiger Widerstand
$L_{1\sigma}$	=	25 mH	primärseitige Streuinduktivität
R_2	=	32 Ω	sekundärseitiger Widerstand
$L_{2\sigma}$	=	127 mH	sekundärseitige Streuinduktivität
X_h	=	150 Ω	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.

4.3 Drehstromtransformator

Vereinfachende Annahmen

- Der Magnetisierungsstrom kann vernachlässigt werden.
- Die Sättigung kann vernachlässigt werden.
- Alle Verluste, bis auf den ohmschen Widerstand, können vernachlässigt werden.

Folgende Daten sind gegeben

Transformator

U_{1N}	$= \frac{10}{\sqrt{3}}$ kV	primärseitige Nennstrangspannung
U_{2N}	$= \frac{400}{\sqrt{3}}$ V	sekundärseitige Nennstrangspannung
u_k	$= 10\%$	relative Kurzschlussspannung
S_N	$= 500$ kVA	Nennscheinleistung
f_N	$= 50$ Hz	Nennfrequenz

Der Transformator wurde sekundärseitig kurzgeschlossen, der Strom $I_{K'}$ eingepreßt und dabei wurde die Verlustleistung P_K gemessen.

P_K	$= 1,0$ kW	Kurzschlussleistung
$I_{K'}$	$= 0,3 I_{1N}$	Kurzschlussstrom

Asynchronmotor

S_N	$= 400$ kVA	Nennscheinleistung
U_N	$= 400$ V	Nennspannung
$\cos(\varphi_N)$	$= 0,85$	Leistungsfaktor

- Wie groß sind die relativen Kurzschlussspannungen u_r und u_x ?
- Geben Sie die Größen Z_{1k} , U_{1k} und R_{1k} für die Oberspannungsseite an. Geben Sie weiterhin die selben Größen für die Unterspannungsseite an.

Der Transformator wird nun durch die Asynchronmaschine belastet. Der Strom und Leistungsfaktor der ASM entsprechen den Nennwerten.

- Welche Spannung stellt sich an den Klemmen der Asynchronmaschine ein?
- Die induktive Blindleistung des Motors soll durch Kondensatoren in Sternschaltung vollkommen kompensiert werden. Wie groß sind die Kondensatoren zu wählen, wenn der selbe Wirkstrom wie in Aufgabenteil c) aufgenommen werden soll?
- Welche Spannung stellt sich an den Motorklemmen bei reiner Wirkstromaufnahme ein?

5 Netzgeführte Stromrichter

Das Diagramm aus Abbildung 3 vereinfacht die Bearbeitung der Aufgaben, in denen Strom- und Spannungsverläufe der netzgeführten Stromrichter dargestellt werden sollen.

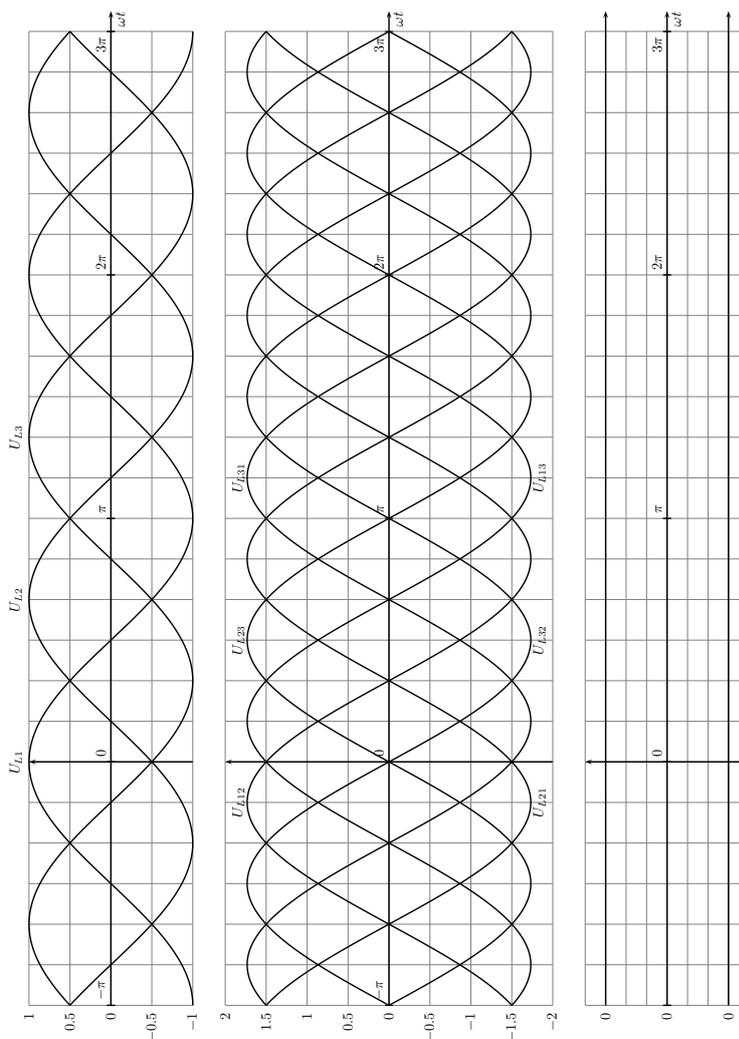


Abbildung 3: Zeichenblatt für den zeitlichen Verlauf von Strömen und Spannungen

5.1 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

a) rein ohmschen Last

b) rein induktiven Last

als Funktion des Steuerwinkels α .

5.2 Netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung

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

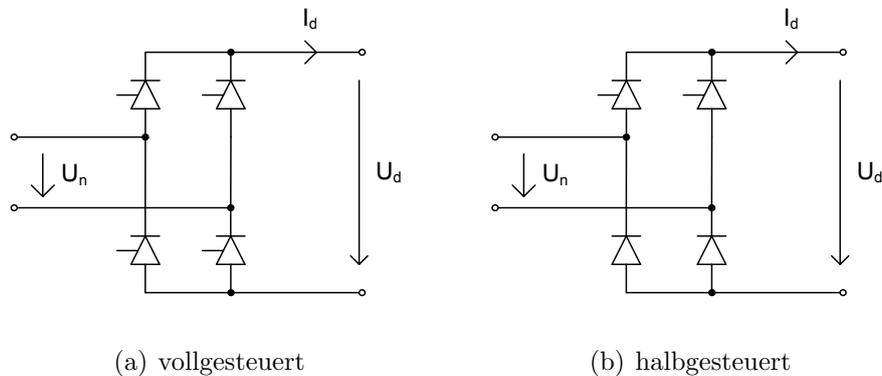


Abbildung 4: Wechselstrombrückenschaltung

Vereinfachende Annahmen

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

Folgende Daten sind gegeben

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

$$I_d = 15 \text{ A} \quad \text{Ausgangsgleichstrom der Brückenschaltung}$$

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 α_b so eingestellt wird, dass die gleiche Verbraucherspannung wie in Fall a) auftritt?
- Geben Sie die jeweils am Stromrichtereingang auftretende Grundschwingungsblindleistung an.
- In welchem Bereich liegen die möglichen Ausgangsspannungen, die mit den beiden Schaltungen eingestellt werden können?

5.3 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

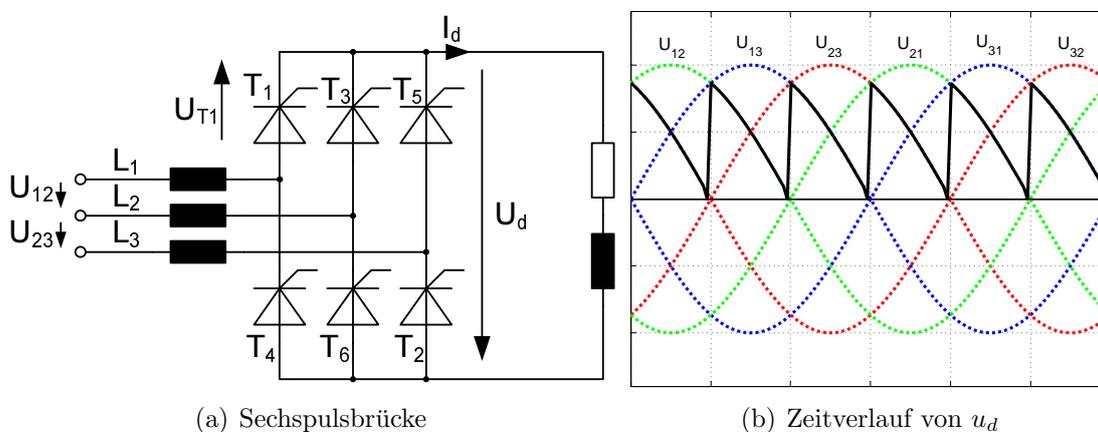


Abbildung 5: zu Aufgabe 5.3

- Berechnen Sie die ideale Gleichspannung U_{di} .
 - Wie lautet die Steuerkennlinie $\frac{U_{di\alpha}}{U_{di}}$ im nicht lückenden Betrieb?
In Abbildung 5(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 α ?
 - 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.

5.4 Gleichstromantrieb mit netzgeführter DBS

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

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

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

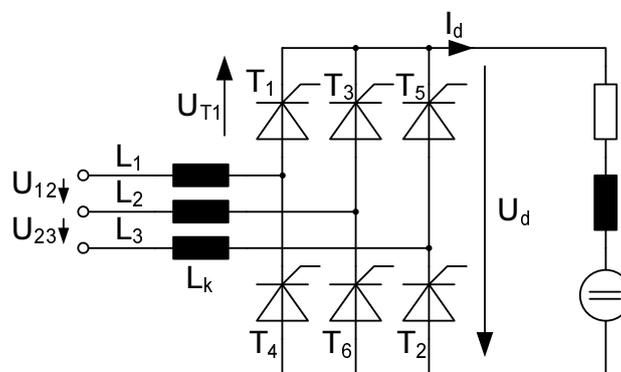


Abbildung 6: Drehstrombrückenschaltung mit Kommutierungsinduktivität

Kommutierungseffekte können vernachlässigt werden. Berechnen Sie:

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

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

- e) Berechnen Sie erneut den Zündwinkel α .
- f) Für welche Maschine würden Sie sich entscheiden?

5.5 Blindleistung der WBS (Zusatzaufgabe)

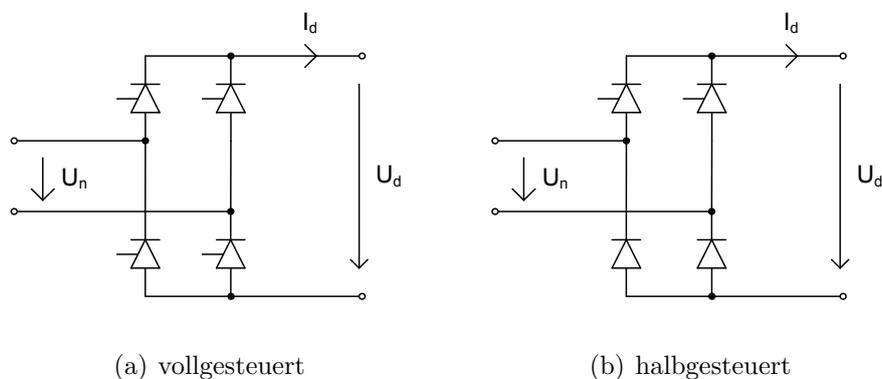


Abbildung 7: Wechselstrombrückenschaltung

Vereinfachende Annahmen

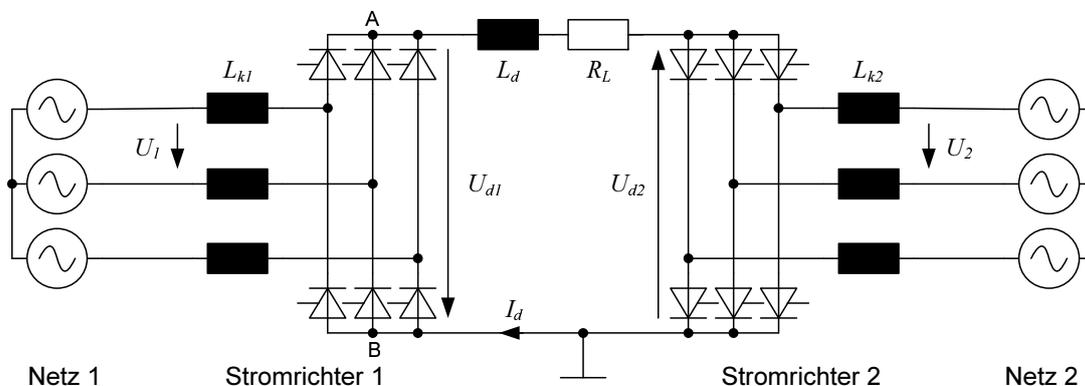
- Die Halbleiterbauelemente sind ideale Schalter.
- Der Strom I_d ist vollkommen glatt.
- Sämtliche Kommutierungsvorgänge können vernachlässigt werden.

Die vollgesteuerte Zweipulsbrückenschaltung (Abb. 7(a)) ist mit der halbgesteuerten Brückenschaltung (Abb. 7(b)) bezüglich der vom Netz aufgenommenen Blindleistung zu vergleichen.

Die Funktion $\frac{Q_1}{U_{d0}I_d} \left(\frac{U_{d\alpha}}{U_{d0}} \right)$ ist für beide Schaltungen jeweils für alle möglichen Betriebszustände einzuzeichnen.

5.6 Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (F2012, A4)

Elektrische Energie soll vom Netz 1 zum Netz 2 übertragen werden (vereinfachte Anordnung).



Folgende Daten sind gegeben:

U_{N1}	=	500 kV	Leiterspannung Netz 1
U_{N2}	=	450 kV	Leiterspannung Netz 2
I_{dN}	=	1200 A	Nenngleichstrom
L_{k1}	=	150 mH	Kommutierungsinduktivität Netz 1
L_{k2}	=	100 mH	Kommutierungsinduktivität Netz 2
f_1	=	50 Hz	Netzfrequenz des Netzes 1
f_2	=	50 Hz	Netzfrequenz des Netzes 2

Der Gesamtwiderstand der Übertragungsleitung wird durch R_L modelliert:

$$R_L = 5 \Omega$$

Vereinfachende Annahmen:

- Die Netze seien ideale Drehspannungsquellen.
 - Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei.
 - Der Zwischenkreisstrom I_d sei ein ideal glatter Gleichstrom.
- a) Berechnen Sie den maximal zulässigen Steuerwinkel des Stromrichters 2 bei Nenngleichstrom I_{dN} und Nennspannung $U_2 = U_{2N}$.
Berechnen Sie den Wert der Gleichspannung U_{d2} in diesem Betriebsfall.
- b) Der Stromrichter 2 wird jetzt mit dem Steuerwinkel $\alpha_2 = 130^\circ$ betrieben.
Berechnen Sie die Spannung U_{d1} , die am Stromrichter 1 eingestellt werden muss, um den Nenngleichstrom einzustellen.

- c) Skizzieren Sie den Zeitverlauf eines Thyristorstroms bei $I_d = I_{dN}$ während zwei Perioden der Netzfrequenz und berechnen Sie dessen Mittelwert.

Zur Beantwortung dieser Frage wird eine vereinfachte Betrachtung mit $L_{k1} = 0$ und ein beliebiger Steuerwinkel akzeptiert.

- d) Geben Sie an, in welchen wesentlichen Punkten die obige Anordnung gegenüber real ausgeführten Anlagen vereinfacht ist (Anregungen: Stromrichterschaltung, zusätzliche Drosselpulen, zusätzliche Kondensatoren).

6 Selbstgeführte Stromrichter

6.1 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 Ω	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 $a = \frac{T_e}{T}$

- a) Berechnen und zeichnen Sie maßstäblich den zeitlichen Verlauf von zwei Perioden des Laststroms für quasi stationären Betrieb.
- b) 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.

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

6.2 Schaltnetzteil

Ein Schaltnetzteil wird nach dem Prinzip des Tiefsetzstellers aufgebaut.

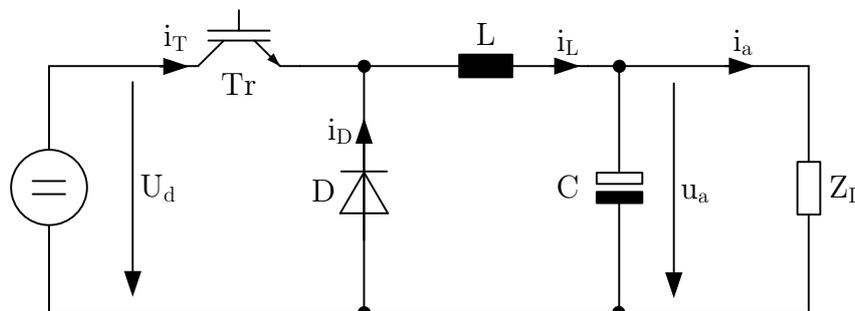


Abbildung 8: Schaltplan des Tiefsetzstellers

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 μ 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?

6.3 Vierquadrantensteller

Eine Gleichstromstellerschaltung versorgt eine Gleichstrommaschine.

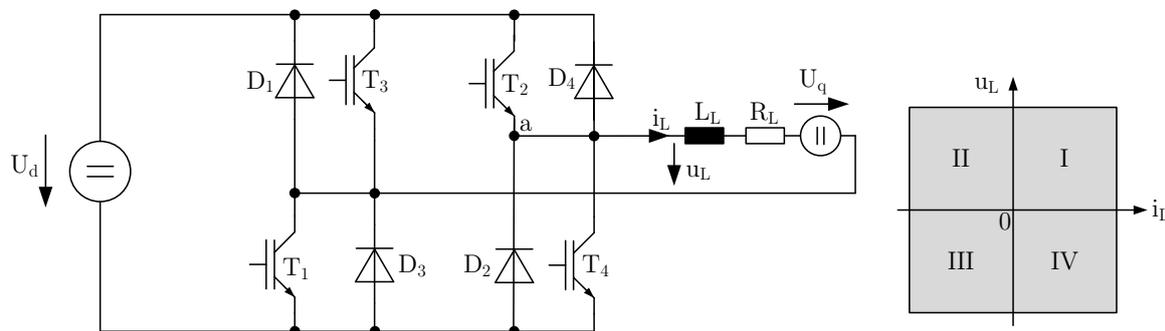


Abbildung 9: Vierquadrantensteller

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

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

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

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

- | | | |
|----------|-----------------------|---|
| | $U_d = 400 \text{ V}$ | Eingangsspannung des Stellers |
| | $U_q = 180 \text{ V}$ | Innere Spannung der Gleichstrommaschine |
| gegeben: | $I_L = 100 \text{ A}$ | Ankerstrom |
| | $R_L = 0,2 \Omega$ | Ankerkreiswiderstand |
| | $f_s = 1 \text{ kHz}$ | Schaltfrequenz |

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

6.4 Pulswechselrichter



Abbildung 10: Umrichtervorlage

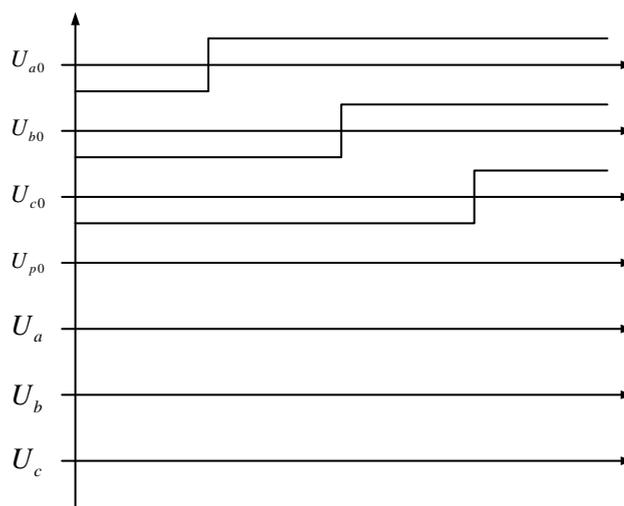


Abbildung 11: Zeitverläufe

- a) Skizzieren Sie eine Möglichkeit für die Erzeugung der Schaltsignale der selbstgeführten Drehstrombrücke, bei der die Ausgangsspannungen mit Hilfe der Pulsweitenmodulation/Dreieckmodulation generiert werden. Verwenden Sie dafür einen Dreiecksgenerator, Komparatoren und Logikbausteine. Um beim Umschalten der Halbleiter keine Kurzschlüsse zu verursachen, soll eine Verriegelungszeit eingehalten werden, in der sowohl der obere als auch der untere Transistor eines Brückenzeiges sperrt.
- b) Erweitern Sie die Abbildung 10 zu einer dreiphasigen IGBT-Brücke mit angeschlossenem Synchronmotor als Last in Stern-Schaltung (Maschine durch passive Bauteile und Spannungsquelle modellieren).

- c) Ergänzen Sie die Spannungsverläufe in den Abbildungen 11 und 12 und geben Sie in Abhängigkeit des Trägersignals und der Referenzsignale $u_{a,b,c}^*(\omega t)$ an, welche Halbleiter in den Phasen-Halbbrücken eingeschaltet sind. (Halbleiter können als ideale Schalter angenommen werden; U_a , U_b und U_c seien Sternspannungen)

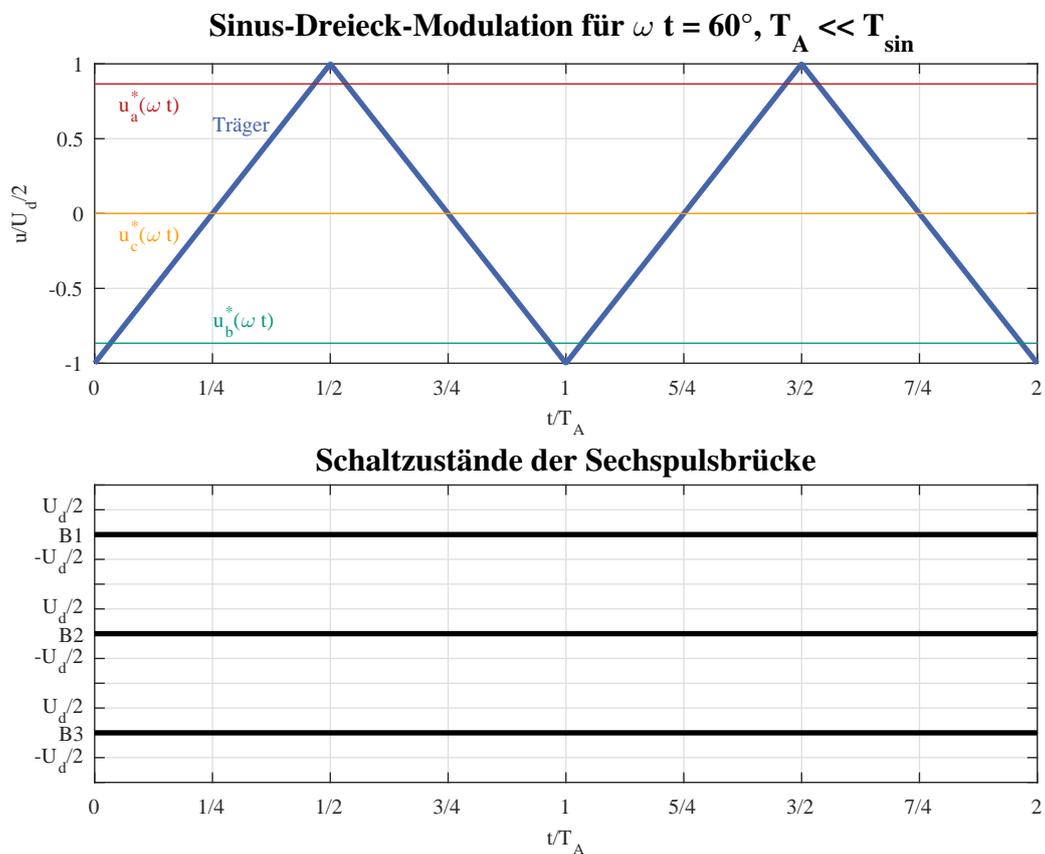


Abbildung 12: Sinus-Dreieck-Modulation für $\omega t = 60^\circ$

6.5 Pulswechselrichter mit Raumzeigermodulation

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

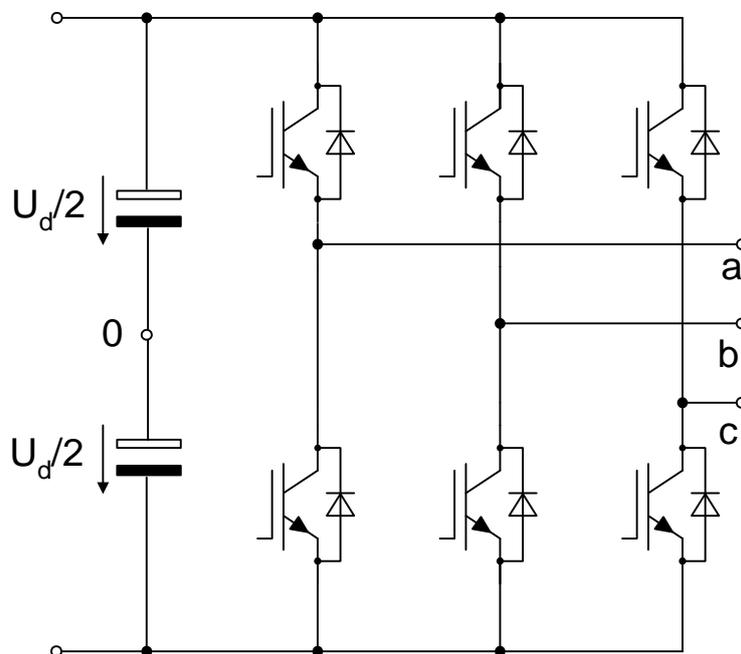


Abbildung 13: Pulswechlerichter

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 ωt .
- 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 Einschalt-dauer der diskreten Raumzeiger.

f) Zeichnen Sie für zwei Modulationsperioden die Größen $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$ und $u_{ca}(t)$.

6.6 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}	=	5Ω	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 ϑ_2 , die Phasenverschiebung φ_2 und die Höhe des Statorstroms I_{S2} .
- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm.

6.7 Umrichtergespeister permanentmagneterregter Synchronmotor mit rotororientierter Steuerung

Eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung speist einen permanentmagneterregten Drehstromsynchronmotor mit Oberflächenmagneten ($L_d = L_q = L_S$). Die Statorströme des Motors werden durch eine Stromregelung eingestellt. Der Motor wird mit der rotororientierten Steuerung („Drehmomentsteuerung“) betrieben. Dabei liegt der Zeiger des Statorstroms \underline{I}_S stets in Phase oder Gegenphase mit der Polradspannung ($I_S = I_{Sq}$) und die Reaktanzen sowie die Polradspannung sind proportional zur Speisefrequenz ($X_S = \omega_S \cdot L_S$ und $U_P/U_{PN} = \omega_S/\omega_{SN}$).

Vereinfachende Annahmen:

- Der Motor sei verlustfrei.
- Der Umrichter sei ideal.

Folgende Daten sind gegeben:

p	=	3	Polpaarzahl
U_{PN}	=	180 V	Nennwert der Polradspannung
I_{SN}	=	70 A	Nennstrom
ω_{SN}	=	$2\pi \cdot 100$ Hz	Nennkreisfrequenz (elektrisch)
L_S	=	3 mH	Synchroninduktivität

- Berechnen Sie die vom Motor abgegebene Leistung und das Drehmoment im Nennpunkt.
- Berechnen Sie die Statorspannung U_{SN} im Nennpunkt und zeichnen Sie das Zeigerdiagramm mit \underline{I}_{SN} , \underline{U}_{SN} und dem Spannungsabfall an der Synchronreaktanz X_{SN} .
- Jetzt wird die Drehzahl auf den zweifachen Wert der Nenndrehzahl erhöht und das Drehmoment auf den halben Wert des Nenndrehmoments verringert. Berechnen Sie die Statorstromkomponente I_{Sq2} , die Polradspannung U_{P2} , den Spannungsabfall an X_{S2} und die Strangspannung U_{S2} . Zeichnen Sie die entsprechenden Zeiger ins Diagramm ein.
- Um den Betrieb nach c) an unveränderter Zwischenkreisspannung zu ermöglichen, wird ein zusätzlicher Strom $I_{Sd2} \neq 0$ mit einer Phasenverschiebung von 90° zur Polradspannung U_{P2} eingepreßt. Berechnen Sie den Wert von I_{Sd2} so, dass der Motor mit dem Nennwert der Statorspannung gemäß b) betrieben werden kann. Zeichnen Sie den zusätzlichen Strom I_{Sd2} in das Zeigerdiagramm ein. Hinweis: Der Zeiger des Statorstroms \underline{I}_{S2} liegt jetzt nicht mehr in Phase oder Gegenphase zur Polradspannung.
- Geben Sie an, ob beim Betrieb nach d) der Nennstrom I_{SN} des Motors überschritten wird.