Alberto Colotti | Felix Jenni

Übungen

Elektrische Antriebe

energieschweiz
Unser Engagement: unsere Zukunft.

EnDK
Konferenz Kantonaler Energiedirektoren

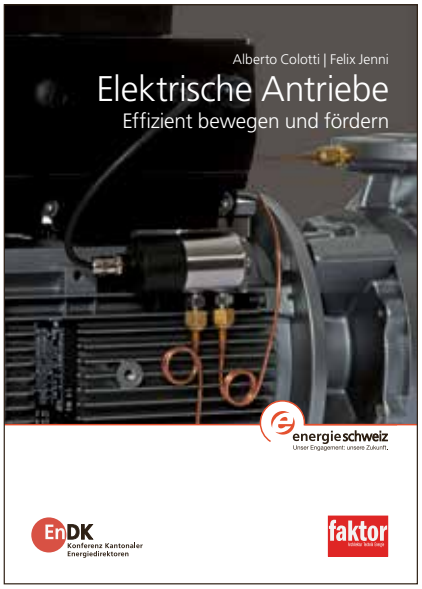
faktor
Architektur Technik Energie

Inhalt

1.	**Grundlagen**	**3**
1.1	Primärenergie	3
1.2	Energieverbrauch für Antriebe	3
1.3	Graue Energie in einer Asynchronmaschine	3
1.4	Strom und Spannung an reaktiven Elementen	3
1.5	Mittel- und Effektivwerte	4
1.6	Leistungen	4
1.7	Lineare Bewegung	4
1.8	Drehbewegung	4
1.9	Trägheitsmoment	4
2.	**Antriebsanwendungen**	**5**
2.1	Effizienz einer Prozesskette	5
2.2	Lastkennlinie	5
2.3	Beschleunigungsvorgang	5
2.4	Hubantrieb	6
3.	**Elektrische Maschinen**	**7**
3.1	Induktionsgesetz	7
3.2	Gleichstrommaschine	7
3.3	Transformatorberechnung	8
3.4	Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine	9
3.5	Identifikation Pumpenantrieb	9
3.6	ASM mit U/f Steuerung	9
3.7	Synchronmaschine am Netz	10
3.8	Synchronmaschine mit Dauermagneterregung	10
4.	**Leistungselektronik**	**11**
4.1	Diodengleichrichter	11
4.2	Verluste in einer Diodenbrücke	11
4.3	Thyristorbrücke	11
4.4	Einphasiger Wechselspannungssteller mit ohmscher Last	11
4.5	Abwärtssteller und einphasige Brücke (H-Brücke)	12
4.6	Selbstgeführte dreiphasige Brücke	12
4.7	Verluste in einer 3-Phasenbrücke	12
5.	**Antriebe**	**13**
5.1	Anlaufverfahren	13
5.2	Stern-Dreieck	13
5.3	ASM in Stern-Schaltung	14
5.4	Netzfrequente Speisung	14
5.5	U/f-Steuerung einer ASM	14
5.6	U/f-Steuerung einer SM	15
5.7	Feldschwächbetrieb bei einer PSM	15
6.	**Auslegung und Realisierung**	**16**
6.1	Betriebsart und Erwärmung	16
6.2	Spindelantrieb	16
6.3	Getriebedimensionierung	17
6.4	Antriebsabsicherung mit Schmelzsicherung	17
6.5	Absicherung mit thermischer und magnetischer Auslösung	18

Version September 2020

Das Buch zu den Übungen



Elektrische Antriebe – Effizient bewegen und fördern. Faktor Verlag, 2020, 190 Seiten, 38 Franken. Autoren: Alberto Colotti, Felix Jenni. ISBN: 978-3-905711-59-2
Bezug: Als Download (kostenfrei) unter www.energieschweiz.ch oder als Buch beim Faktor Verlag, info@faktor.ch oder unter www.faktor.ch

Lösungen

1.	**Grundlagen**	**19**
1.1	Primärenergie	19
1.2	Energieverbrauch für Antriebe	19
1.3	Graue Energie in einer Asynchronmaschine	19
1.4	Strom und Spannung an reaktiven Elementen	19
1.5	Mittel- und Effektivwerte	20
1.6	Leistungen	20
1.7	Lineare Bewegung	21
1.8	Drehbewegung	21
1.9	Trägheitsmoment	21
2.1	Effizienz einer Prozesskette	22
2.2	Lastkennlinie	22
2.	**Antriebsanwendungen**	**22**
2.3	Beschleunigungsvorgang	23
2.4	Hubantrieb	24
3.	**Elektrische Maschinen**	**27**
3.1	Induktionsgesetz	27
3.2	Gleichstrommaschine	28
3.3	Transformatorberechnung	30
3.4	Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine	31
3.5	Identifikation Pumpenantrieb	32
3.6	ASM mit U/f Steuerung	34
3.7	Synchronmaschine am Netz	35
3.8	Synchronmaschine mit Dauermagneterregung	37
4.	**Leistungselektronik**	**39**
4.1	Diodengleichrichter	39
4.2	Verluste in einer Diodenbrücke	39
4.3	Thyristorbrücke	39
4.4	Einphasiger Wechselspannungssteller mit ohmscher Last	40
4.5	Abwärtssteller und einphasige Brücke	40
4.6	Selbstgeführte dreiphasige Brücke	41
4.7	Verluste in einer 3-Phasenbrücke	41
5.	**Antriebe**	**42**
5.1	Anlaufverfahren	42
5.2	Stern-Dreieck	43
5.3	ASM in Stern-Schaltung	43
5.4	Netzfrequente Speisung	44
5.5	U/f-Steuerung einer ASM	45
5.6	U/f-Steuerung einer SM	45
5.7	Feldschwächbetrieb bei einer PSM	47
6.	**Auslegung und Realisierung**	**48**
6.1	Betriebsart und Erwärmung	48
6.2	Spindelantrieb	49
6.3	Getriebedimensionierung	50
6.4	Antriebsabsicherung mit Schmelzsicherung	51
6.5	Absicherung mit thermischer und magnetischer Auslösung	52

1. Grundlagen

1.1 Primärenergie
Der Welt-Primärenergieverbrauch in Mtoe ist bekannt.
a. Bestimmen Sie den Primärenergieverbrauch in Wh und J.

1.2 Energieverbrauch für Antriebe
Antriebe sind mit etwa 50 % die grösste Verbrauchergruppe für elektrische Energie. Gesucht sind für die Schweiz:

a. Der Gesamtverbrauch der Antriebe in Wh und in MJ
b. Die eingesparte Energie für Antriebsanwendungen, wenn sich im Mittel 25 % einsparen lassen
c. Die eingesparten Kosten bei einem Energiepreis von 0.2 Fr/kWh

1.3 Graue Energie in einer Asynchronmaschine
Die graue Energie in einer Maschine kann auf verschiedene Arten berechnet werden. Zwei mögliche Ansätze sollen verglichen werden. Betrachtet wird eine Asynchronmaschine mit den Daten (aus einem Händler-Katalog): Gewicht 102 kg; Einzelstückpreis: 1800 Fr. Geschätzte Metall-Anteile: Eisen 89 %, Kupfer 6 %, Aluminium 5 %.

a. Wie gross ist die gesamte Energie, die für die Herstellung der Maschine gebraucht wird, bestimmt über die Energie der einzelnen Werkstoffe.
b. Welches sind die Kosten für die graue Energie in der Maschine, wenn die Maschine in Deutschland hergestellt wurde.
c. Was zeigt der Vergleich des erhaltenen Resultates mit dem Verkaufspreis – Kommentar?

1.4 Strom und Spannung an reaktiven Elementen
Das Verhalten von Induktivitäten und Kapazitäten soll mit Hilfe der Signalverläufe in Abbildung 1.1 überprüft werden. Die gleiche Signalform kann dabei eine Spannung oder ein Strom sein.

a. Der Strom in Abbildung 1.1 links liegt an einer Induktivität von 1 mH. Welches ist der Spannungsverlauf über der Induktivität?
b. Der Strom in Abbildung 1.1 rechts liegt an einer Kapazität von 1 mF. Welches ist die Spannung am Kondensator ($u_C(t=0)=0$)?

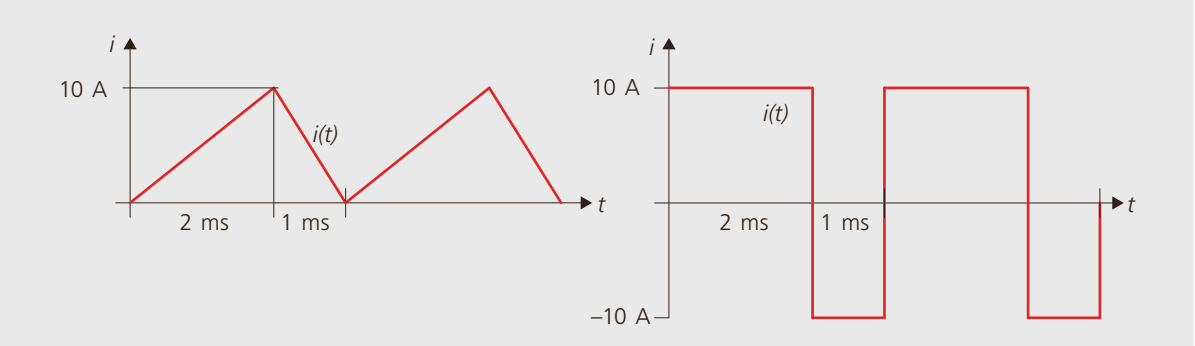


Abbildung 1.1: Stromformen (Aufgabe 1.4).

1.5 Mittel- und Effektivwerte
a. Wie gross ist der Mittelwert des Stromes in Abbildung 1.1 links.
b. Wie gross sind Mittel- und Effektivwert des Stromes in Abbildung 1.1 rechts.

1.6 Leistungen
In einer dreiphasigen 400 V-Anwendung ist bekannt, dass der Strom 20 A und die Phasenverschiebung 30 Grad betragen.

a. Wie gross werden die Schein-, Wirk- und Blindleistung der Anwendung?
b. Wie gross würde der Strom, wenn bei gleicher Wirkleistung die Phasenverschiebung 0 Grad betragen würde?

1.7 Lineare Bewegung
Die Masse von 1 kg wird aus dem Stillstand mit der Kraft von 10 N beschleunigt.
a. Welches ist die Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg nach 10 s.

1.8 Drehbewegung
Eine Maschine mit einem Trägheitsmoment von 0,1 kgm^2 bringt ausgehend von Drehzahl Null ein Moment von 5 Nm auf.
a. Welche Drehzahl und welcher Drehwinkel werden nach 5 s erreicht.

1.9 Trägheitsmoment
Betrachtet wird ein Turbogenerator mit einem Trägheitsmoment von 15000 kgm^2. Er wird mit einem Bremsmoment von –100 Nm gebremst.
a. Wie lange dauert es, bis er von 3000 U/min auf 0 abgebremst ist?
b. Wie gross ist die Leistung am Wickelanfang und -ende?

2. Antriebsanwendungen

2.1 Effizienz einer Prozesskette

Mit einer Förderanlage sollen pro Minute 5 t eines Schüttguts auf eine Höhe von 5 m gefördert werden. Die Komponenten weisen die folgenden Wirkungsgrade auf:

- Förderband und Umlenkung: 75 %
- mechanisches Getriebe: 85 %
- elektrischer Motor: 88 %
- Umrichter: 94 %
- Zuleitungen usw. 98 %

a. Wie gross ist die Nutzleistung der Anwendung?
b. Für welche Leistung an der Welle muss der Motor ausgewählt werden?
c. Welche Leistung wird aus dem Netz bezogen?
d. Wie gross sind die Energiekosten pro Jahr, welche von den Verlusten in der elektrischen Maschine verursacht werden, wenn von einem Energiepreis von 20 Rp/kWh und einer Einsatzdauer der Anlage von 50 % ausgegangen wird?

2.2 Lastkennlinie

Ein Wickelantrieb soll eine Plastikfolie mit einer konstanten Zugkraft und mit konstanter Geschwindigkeit aufwickeln (Abbildung 2.1). Die Zugkraft beträgt 150 N, die Geschwindigkeit 5 m/s. Die Rolle, auf die gewickelt wird hat einen Durchmesser von 150 mm, der fertige Wickel hat 500 mm.
a. Wie gross sind Drehzahl und Drehmoment am Anfang und am Ende des Wickelvorganges? Zeichnen Sie die resultierende Drehmoment/Drehzahlkennlinie (n(M)) in ein skaliertes und beschriftetes Diagramm.
b. Wie gross sind die Leistungen am Anfang und Ende des Wickelvorganges?

2.3 Beschleunigungsvorgang

In Abbildung 2.2 ist die Drehmomentkennlinie eines Antriebes (*M_M*) und zweier verschiedenen Lasten (*M_L1* und *M_L2*) dargestellt.
a. Schätzen Sie aufgrund der grafisch gegebenen Grössen die Zeit ab, die benötigt wird, um eine Trägheit von 4 kgm² näherungsweise auf den stationären Arbeitspunkt zu beschleunigen.

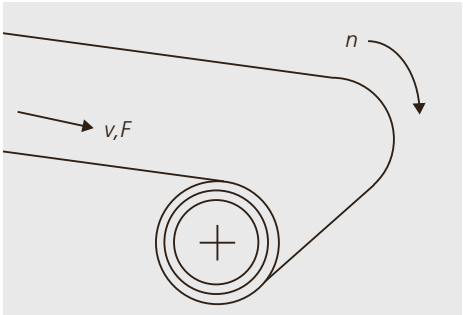


Abbildung 2.1: Wickelantrieb mit variablem Rollendurchmesser (Aufgabe 2.2).

Nehmen Sie dazu an, dass die Drehmomentdifferenz konstant sei. Bestimmen Sie dazu für beide Fälle das mittlere Moment.

2.4 Hubantrieb

Der Hubantrieb gemäss Abbildung 2.3 soll mit einem Winkel von 60° eine Masse von 50 kg auf eine Höhe von 10 m bewegen. Alle Elemente können als ideal verlustfrei betrachtet werden. Das Förderband wiegt pro Meter Länge 2 kg und ist total (Hin- und Rückweg) 25 m lang. Die Rollen haben eine Durchmesser von 250 mm und ein Trägheitsmoment von 0,4 kgm². Der Motor wird direkt an die Rolle angeschlossen. Die zulässige Geschwindigkeit des Bandes beträgt 2 m/s. Der Hubvorgang soll in 10 s abgeschlossen sein. Es kann ein Drehzahlprofil ohne Ruckbegrenzung angenommen werden. Die maximale Geschwindigkeit von 2 m/s soll dabei erreicht werden.

a. Welchen Weg muss die Masse auf dem Förderband zurücklegen?
b. Welche Beschleunigungszeiten für Anfahren und Bremsen (Annahme: gleiche Zeit für Anfahren und Bremsen) sind zulässig um die Vorgaben einzuhalten?
c. Zeichnen Sie den Verlauf des Weges, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung der Masse während den 10 s.
d. Welches Beschleunigungs-, Konstantfahrt- und Bremsmoment muss der Motor erzeugen?

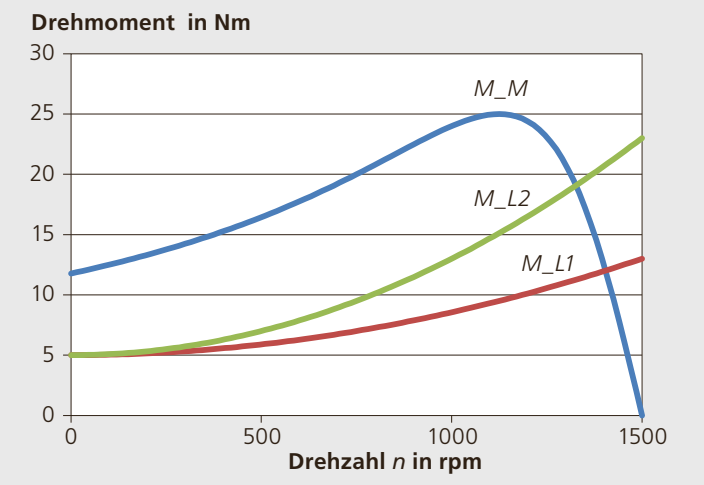


Abbildung 2.2: Antriebskennline M mit den Lasten L1 und L2 (Aufgabe 2.3).

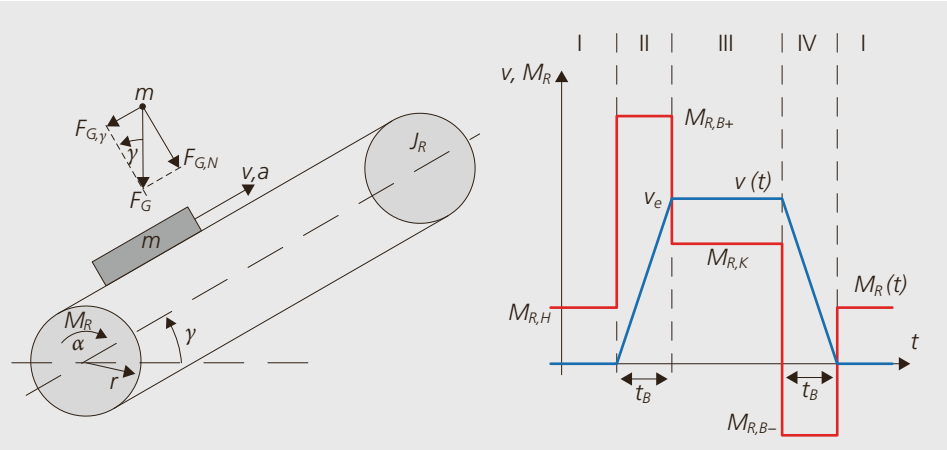


Abbildung 2.3: Antriebsanwendung als Hubanordnung auf einer schiefen Bahn mit Beispiel für die Verläufe von Drehmoment und Geschwindigkeit (Aufgabe 2.4).

3. Elektrische Maschinen

3.1 Induktionsgesetz

Eine Rechteckspule (Windungszahl N_U) mit angeschlossenem Voltmeter wird gemäss Abbildung 3.1 mit der Geschwindigkeit v durch den Luftspalt eines Magnetkreises gezogen. Der Magnetkreis wird durch eine gleichstromgespeiste Spule (Windungszahl N_I) magnetisiert. Die mittlere Weglänge im Eisen sei l_{Fe}, die Luftspaltweite δ. Die Permeabilität im Eisen sei konstant mit der relativen Permeabilität $\mu_{r,Fe} = 1000$.

Der Grundriss in Abbildung 3.1 zeigt die Position der Rechteckspule in Bezug auf den Luftspalt zum Zeitpunkt $t = 0$. Ab diesem Zeitpunkt wird die Spule nach rechts mit der Geschwindigkeit v aus dem Luftspalt gezogen. Gegeben sind die folgenden Werte:

- ϕ = 0,36 mVs
- l_{Fe} = 30 cm; δ = 1 mm
- $A_\delta = A_{Fe}$ = 4 cm² (quadratisch $b \cdot b$); a = 1,5 cm
- v = 1 m/s
- N_U = 5; I = 3 A

a. Man berechne den zeitlichen Verlauf der Spannung am Voltmeter und zeichne ein massstäbliches Diagramm dieses Spannungsverlaufs mit den zugehörigen Zeiten und Spannungsgrössen.

b. Man markiere an den Klemmen des Voltmeters durch + und – die Polarität der Spannung.

c. Man berechne die Windungszahl N_I der festen Spule, welche benötigt wird, um mit dem Gleichstrom I den angegebenen Fluss zu erzeugen. Wie gross müsste der Strom I werden, wenn der Luftspalt δ doppelt so gross wäre?

d. Man markiere an der Stromquelle die korrekte Richtung des Stroms durch einen Pfeil.

3.2 Gleichstrommaschine

Eine kleine Gleichstrommaschine sei mit einem Permanentmagneten erregt. Man nehme idealisiert eine eisen- und reibungsverlustlose Maschine an. Folgende Daten liegen vor:

- Bemessungsleistung P_N = 4 W
- Ankerspannung im Bemessungspunkt U_{AN} = 12 V
- Ankerstrom im Bemessungspunkt I_{AN} = 0,5 A
- Nenndrehzahl n_N = 12 000 U/min

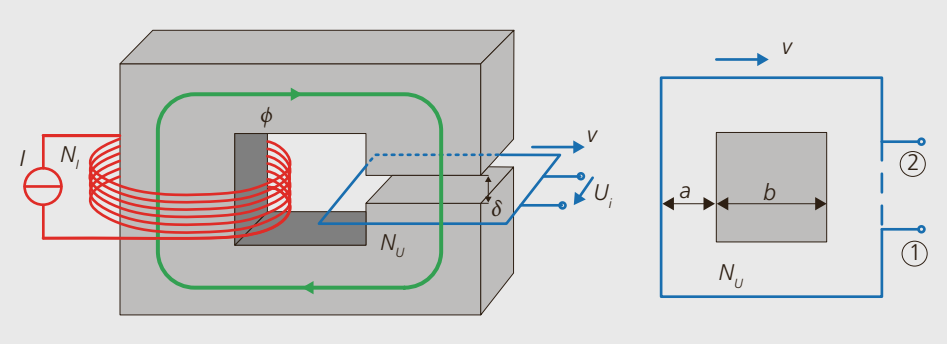


Abbildung 3.1: Magnetkreis mit Luftspalt (Aufgabe 3.1).

a. Man berechne das Nennmoment M_N und die Drehmomentkonstante k_T der Maschine
b. Wie gross ist die induzierte Spannung im Bemessungspunkt? Welchen Wert hat der Ankerwiderstand R_A?
c. Wie gross ist der Wirkungsgrad der Maschine im Bemessungspunkt?
d. Man zeichne die Kennlinie der Maschine ($M = f(n)$) bei Nennspannung U_{AN}.
e. Welcher Anlaufstrom I_{A0} und welches Anlaufmoment M_0 stellen sich nach dieser Kennlinie ein?
f. Welche Spannung U_A muss an den Anker angelegt werden, um den Arbeitspunkt $M = 2$ mNm und $n = 6000$ U/min einzustellen? Man zeichne die entstehende Kennlinie in das obige Diagramm. Wie gross sind Anlaufstrom und Leerlaufdrehzahl bei dieser Spannung? Welcher Wirkungsgrad stellt sich nun ein?

3.3 Transformatorberechnung

Für einen 50 Hz-Einphasen-Transformator, der zwischen zwei Phasen des 400 V-Netzes angeschlossen wird, sollen einige Eigenschaften bestimmt werden. Der Kern wurde aufgrund der Leistung aus einem Katalog ausgewählt. Gegeben sind die folgenden Daten:

Primäre Scheinleistung	10 kVA
Spannung	400 V (Effektivwert!)
Eisenfläche	$A_{Fe} = 10 \cdot 10$ cm^2
Eisenweglänge	$l_{Fe} = 100$ cm
Dichte Kernmaterial	$\rho_{Fe} = 7700$ kg/m^3
Mittlere Länge pro Windung	70 cm
Maximale Induktion	$\hat{B} = 1{,}4$ T
Stromdichte Kupferdraht	$J = 2$ A/mm^2
	Spezifischer Widerstand
	$\rho = 0{,}0175(\Omega\ \text{mm}^2/\text{m})$
Verlustziffer Kernmaterial	$_{v15} = 3$ W/kg

a. Wie gross wird die Windungszahl N_1, damit beim Scheitelwert der Spannung $\hat{u}_1$ die maximale Induktion $\hat{B}$ erreicht wird?
b. Wie gross wird der Strom $I_1 = I_N$ in der Primärwicklung für die geforderte Scheinleistung S_1 und wie gross die Drahtfläche $A_{Cu,1}$ bei der gegebenen Stromdichte?
c. Bestimmen Sie die Drahtlänge $l_{Cu,1}$ der Wicklung N_1 und den resultierenden Widerstand R_1.
d. Wie gross werden die Kupferverluste $P_{V,Cu,1}$ bei Nennstrom I_N in der Primärwicklung und wieviel schätzen Sie für beide Wicklungen, wenn für Primär- und Sekundärwicklung gleich viel Platz für die Wicklungen zur Verfügung stehen?
e. Bestimmen Sie das Gewicht des Transformators und die Verluste im Eisen $P_{V,Fe}$.
f. Wie gross wird der Wirkungsgrad des Transformators bei Belastung mit Nennstrom und einem $\cos\varphi = 0{,}9$?

3.4 Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine

Eine Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine in Dreieckschaltung hat gemäss Leistungsschild:

- $U_N = 400$ V; Δ; $f_N = 50$ Hz; $P_N = 5{,}5$ kW; $I_N = 10{,}0$ A (Leiterstrom); $n_N = 1430$ U/min; $\cos\varphi_N = 0{,}87$
- Statorwiderstand je Strang $R_S = 2{,}1\ \Omega$

Die Leerlaufmessung ergibt: $U_N = 400$ V; $I_L = 2{,}3$ A (Leiterstrom); $P_{el} = 60$ W. Es kann für die Berechnung von einem idealen Leerlauf mit $s = 0$ ausgegangen werden.

a. Man berechne im Nennbetrieb die Eingangsleistung und den Wirkungsgrad.
b. Man berechne jeweils für Nennbetrieb und Leerlauf die Statorkupferverluste und die Eisenverluste in der Maschine
c. Man bestimme die Polpaarzahl der Maschine
d. Man berechne im Nennbetrieb den Schlupf der Maschine sowie Luftspaltleistung und Rotorverluste.

3.5 Identifikation Pumpenantrieb

Die Asynchronmaschine eines Pumpenantriebes hat einen Kurzschlussläufer, ist zweipolig und in Dreieck geschaltet. Es liegen die Ergebnisse der Leerlauf- und der Kurzschlussmessung an den Anschlussleitern L der Maschine bei 50 Hz vor:

- Leerlauf (Index 0): $U_{LL,0} = 400$ V; $I_{L,0} = 80$ A; $P_{S,0} = 4{,}5$ kW
- Stillstand (Index k): $U_{LL,k} = 45$ V; $I_{L,k} = 220$ A; $P_{S,k} = 5{,}6$ kW

Die Messung an den Klemmen ergibt einen Widerstand von 30 mΩ. Die Reibung der Maschine sei vernachlässigbar.
a. Bestimmen Sie die Parameter der Maschine unter der Annahme eines vereinfachten Ersatzschaltbildes: $X_\sigma = X_{S\sigma} + X'_{R\sigma}$, R_S, R'_R, R_{Fe} und X_h.

3.6 ASM mit U/f Steuerung

Ein vierpoliger Asynchronmotor hat die folgenden Daten in Sternschaltung bei 50 Hz:

- $U_N = 400$V (verkettete Spannung); $P_{N,mech} = 4{,}6$ kW; $n_N = 1440$ U/min; $s_K = 25$ %
- mechanische Verluste und Statorverluste werden vernachlässigt

a. Wie gross sind der Nennschlupf s_N und das Kippmoment M_K der Maschine?
b. Die Drehzahl der Maschine wird bei konstanter Speisespannung U_N durch Erhöhung der Frequenz f_S angehoben. Dadurch reduziert sich gemäss dem stationären Betriebsverhalten das Kippmoment M_K. Bis zu welcher Drehzahl kann unter diesen Bedingungen im Feldschwächebereich mit konstantem Nennmoment gefahren werden?

3.7 Synchronmaschine am Netz

Eine Synchronmaschine für den Netzbetrieb hat folgende Daten:

- Polpaarzahl $p = 2$
- Speisung Drehstrom, $U_N = 400$ V, 50 Hz, Δ-Schaltung
- symmetrischer Rotor mit $L_S = L_d = L_q = 10$ mH, der Statorwiderstand sei vernachlässigbar

Die Maschine wird mit der Polradspannung $U_P = U_N$ betrieben. Im Nennpunkt ist der Polradwinkel $\vartheta = 20°$.

a. Wie gross ist die Nenndrehzahl n_N der Maschine?
b. Wie gross sind das Kippmoment M_K und das Nennmoment M_N?
c. Wie gross ist die Nennleistung P_N?
d. Wie gross sind der Leerlaufstrom I_0 und der Nennstrom I_N?
e. Wie gross muss die Polradspannung U_P gewählt werden, um bei Wirkleistung $P = 0$ eine Blindleistung von $Q = 20$ kVAr ans Netz abgeben zu können?

3.8 Synchronmaschine mit Dauermagneterregung

Eine PSM mit den folgenden Werten aus dem Datenblatt ist gegeben:

- Polzahl: $2p = 4$
- Nennmoment: $M_N = 1{,}4$ Nm
- Drehmomentkonstante $k_T = 1{,}46$ Nm/A
- Statorwiderstand $R_{2Ph} = 32{,}3\ \Omega$
- Statorinduktivität $L_{2Ph} = 73$ mH

Die Maschine soll bei der Nenndrehzahl von 4500 U/min das Nennmoment abgeben. Die angegebenen Werte von Widerstand und Induktivität beziehen sich auf die Grössen zwischen zwei Klemmen der Maschine, was mit dem Index $_{2Ph}$ gekennzeichnet wird. Diese Angabe gilt unabhängig von der Schaltungsart der Maschine.

a. Wie gross ist der Strom I_N der Maschine und wie gross sind die Leiterverluste $P_{VS,N}$ im Nennbetrieb? Welchen Einfluss hat die Schaltungsart auf die Berechnung und auf das Ergebnis?
b. Die Maschine wird mit einem reinen q-Strom gespeist. Welche Spannung muss für den Nennbetrieb an die Klemmen angelegt werden?

4. Leistungselektronik

4.1 Diodengleichrichter
Dreiphasennetze werden auch in Flugzeugen eingesetzt. Eine häufig anzutreffende Spannungs-Frequenzkombination sind dabei 115 V 400 Hz. Im Flugzeug werden auch dreiphasige Diodengleichrichter mit rein kapazitiver Glättung eingesetzt.

a. Wie gross ist der Spitzenwert der Zwischenkreisspannung?
b. Wie gross ist der Mittelwert der Spannung, wenn immer zwei Dioden leiten?
c. Welches sind die ersten vier Frequenzen, die in der Zwischenkreisspannung auftreten?
d. Die Stromspitzen im Netzstrom sind zu gross – mit welcher Massnahme auf der Netzseite lassen sich diese reduzieren?

4.2 Verluste in einer Diodenbrücke
Eine dreiphasige Diodenbrücke am 400 V-Netz habe im Gleichspannungskreis eine Spannung von 540 V. Die Last im Zwischenkreis bezieht eine Leistung von 10 kW. Es treten nur die Leitverluste in den Dioden auf.

a. Bestimme den Strom im Zwischenkreis
b. Bestimme den Strommittelwert pro Diode
c. Bestimme die Verluste pro Diode (festen Spannungsabfall wählen)
d. Bestimme den Wirkungsgrad des Gleichrichters (welches ist die aufgenommene Leistung?)

4.3 Thyristorbrücke
In Japan existieren Dreiphasennetze mit 173 V/60 Hz.

a. Welche maximale Spannung (Mittelwert) ist im Zwischenkreis erreichbar?
b. Wie gross wird die Zwischenkreisspannung bei einem Zündwinkel von $\alpha = 60°$?
c. Wie gross wird die Phasenverschiebung φ des Netzstromes gegenüber der Spannung bei $\alpha = 60°$?

4.4 Einphasiger Wechselspannungssteller mit ohmscher Last
Betrachtet wird eine Glühlampensteuerung mit einem Wechselspannungssteller. Die Lampe bezieht bei 230 V eine Leistung von 75 W.

a. Was ist eine Glühlampe für eine Last (Ohmsch? Induktiv?...)?
b. Wie gross sind die Spannung an und die Wirkleistung in der Lampe bei einem Zündwinkel von $\alpha = 30°$ und bei $\alpha = 90°$?
c. Wie gross ist die Scheinleistung auf der Netzseite in den beiden Fällen?

d. Wie gross ist der Leistungsfaktor λ auf der Netzseite in den beiden Fällen?

4.5 Abwärtssteller und einphasige Brücke (H-Brücke)
Betrachtet werden ein Abwärtssteller und eine H-Brücke. Beide werden mit einer Gleichspannung von $U_d = 300$ V versorgt (feste Spannungsquelle) und der Strom-Scheitelwert der Leistungshalbleiter beträgt 20 A.

a. Wie gross werden die mögliche Ausgangsspannung und -leistung bei einem Abwärtssteller bei $m = 0{,}7$.
b. Welches sind die betragsmässig maximalen möglichen Leistungen bei einer einphasigen Brücke?
c. Mit der einphasigen Brücke soll eine sinusförmige Wechselspannung erzeugt werden. Wie gross ist die maximale Amplitude der Grundschwingung und ihr Effektivwert und wie gross ist die mögliche Leistung bei einem $\cos\varphi = 1$?
d. Beim Abbremsen einer Gleichstrommaschine speist die Maschine 2 kW zurück. Für welchen Strom muss eine Bremsschaltung ausgelegt werden?

4.6 Selbstgeführte dreiphasige Brücke
Eine dreiphasige IGBT-Brückenschaltung zur Speisung eines 400 V-Normmotors wird über eine Diodenbrücke ab dem 400 V-Netz gespeist. Die gut geglättete Zwischenkreisspannung sei 540 V. Der Maximalwert (Scheitelwert) des Ausgangsstromes in jeder Phase beträgt 100 A und die Last habe einen $\cos\varphi = 0{,}8$.

a. Wie gross wird die maximale Aussenleiterspannung am Stromrichter bei einer einfachen Modulation?
b. Wie gross wird die maximale Spannung, wenn dem Sollwertsignal dritte Harmonische zugefügt werden?
c. Wie gross werden die maximalen Schein- und Wirkleistungen in beiden Fällen?
d. Wie gross wird die maximale Schein- und Wirkleistung, wenn der Motor direkt ans 400V-Netz angeschlossen wird?

4.7 Verluste in einer 3-Phasenbrücke
Eine dreiphasige Brücke mit einem sinusförmigen Ausgangsstrom von 10 A pro Phase (Effektivwert, Mittelwert pro Halbwelle 9 A) wird mit 10 kHz pro Zweig geschaltet. Der Stromrichter wird vom einphasigen Netz gespeist, die Zwischenkreisspannung beträgt etwa 300 V. Bei $U_d = 300$ V betragen die Schaltverluste gemäss Datenblatt pro Schaltvorgang und Halbleiter 0,8 mWs.

a. Bestimmen Sie die Leitverluste der Halbleiter (festen Spannungsabfall wählen)
b. Wie gross sind die Schaltverluste?
c. Wie gross wären Schalt- und Leitverluste bei der Anwendung am 400-V-Netz?

5. Antriebe

5.1 Anlaufverfahren

Eine Asynchronmaschine (ASM) mit Nennleistung 5,5 kW, Nennstrom 10 A und Nenndrehzahl 1440 min^{-1} soll aus dem Stillstand ohne Last bis zur Synchrondrehzahl beschleunigt werden. Das gesamte Trägheitsmoment beträgt $J = 0{,}02\ kg\,m^2$. Die Daten der Maschine in Abbildung 5.1 sind für den Dreieckbetrieb gegeben.
Wie lange dauert es in den folgenden Fällen, bis der Nennbetriebspunkt erreicht wird?
Hinweis: Vereinfachend kann $M_M \approx konst = M_{M,AVG}$ angenommen werden. Wie gross ist der maximal auftretende Strom (unter Vernachlässigung der Stromspitze wegen der Phasendrehung beim Umschalten)?

a. Die ASM wird im Dreieckbetrieb hochgefahren.
b. Die ASM wird bis zu einer Drehzahl von 750 min^{-1} im Sternbetrieb betrieben, dann wird auf den Dreieckbetrieb gewechselt.
c. Die ASM wird bis zu einer Drehzahl von 1250 min^{-1} im Sternbetrieb betrieben, dann wird auf den Dreieckbetrieb gewechselt.
d. Die ASM wird bis zu einer Synchrondrehzahl im Sternbetrieb betrieben, erst dann wird auf den Dreieckbetrieb gewechselt.

5.2 Stern-Dreieck

Eine Asynchronmaschine (ASM) ist für eine Strangspannung von 230 V ausgelegt (d. h. Sternschaltung am 400 V-Netz). Der Nennstrom beträgt 12 A.

a. Was würde passieren, wenn diese Maschine mit der Stern-Dreieck-Schaltung betrieben würde?
b. Wie gross sind die Kupferverluste im Nennbetrieb, wenn jede Phase des Stators einen Widerstand von $R_S = 0{,}40\ \Omega$ hat (bei Betriebstemperatur) bei Stern und bei Dreieckschaltung?
c. Wie ändert sich der Strom in der Zuleitung?

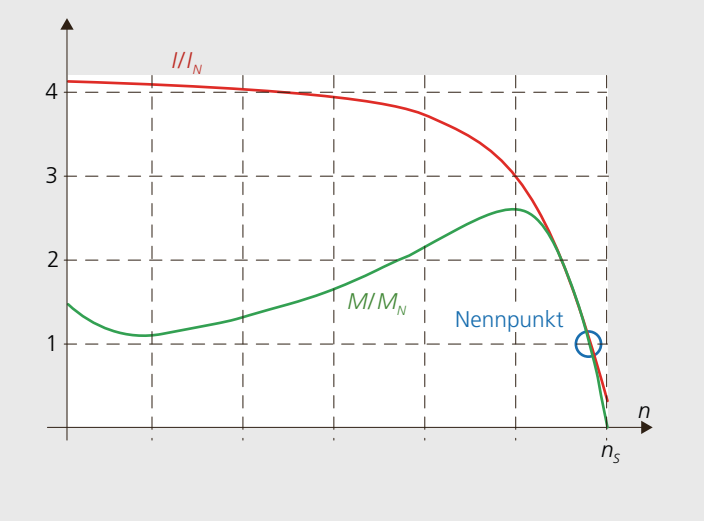


Abbildung 5.1: Drehmoment und Stromkurve der gegebenen ASM in Dreieckschaltung (Aufgabe 5.1).

5.3 ASM in Stern-Schaltung

Eine Asynchronmaschine mit den Nenndaten $U_N = 400$ V, $I_N = 7$ A, $\cos\varphi = 0{,}8$ ist für Sternschaltung ausgelegt.

a. Wie gross ist die Strangspannung U_S der Maschine?
b. Wie gross werden die aufgenommene Schein-, Wirk- und Blindleistung im Nennpunkt?
c. Wie gross wird die abgegebene Leistung an der Welle (qualifizierte Schätzung).
d. Wie gross werden die Kupferverluste $P_{V,Cu}$ im Nennbetrieb, wenn jede Phase des Stators (bei Betriebstemperatur) einen Widerstand von $R_S = 1{,}2\ \Omega$ hat?

5.4 Netzfrequente Speisung

Eine Asynchronmaschine (ASM) mit Nennleistung 3 kW, Nennstrom 5,9 A und Nenndrehzahl 1440 min^{-1} soll eine Last antreiben. Das Lastmoment entspricht während Hälfte der Betriebszeit dem Nennmoment (Index 1), während der anderen Hälfte 25 % des Nennmomentes (Index 2). Es sollen im Folgenden nur die Statorverluste mit einem Strangwiderstand $R_S = 1{,}5\ \Omega$ und die Rotorverluste berücksichtigt werden. Die Maschine ist in Stern geschaltet und wird am 50 Hz-Netz betrieben.

a. Welche Polpaarzahl hat die Asynchronmaschine und wie gross ist der Schlupf im Nennbetrieb?
b. Wie gross ist der Wirkungsgrad im Nennbetrieb?
c. Wie gross ist der Wirkungsgrad bei $M = M_n/4$, wenn der Statorstrom in diesem Betriebspunkt 4,2 A beträgt?
d. Lohnt sich für einen derartigen Anwendungsfall der Einsatz eines Frequenzumrichters?

5.5 U/f-Steuerung einer ASM

Eine Asynchronmaschine in Dreieckschaltung hat die Typenschilddaten: $P_N = 3$ kW, $U_N = 400$ V, $I_N = 5{,}9$ A, $f_N = 50$ Hz, $n_N = 1440\ \text{min}^{-1}$. Der gemessene Stator-Strangwiderstand ist $R_S = 1{,}5\ \Omega$ und der Leerlaufstrom beträgt $I_0 = 3$ A. Für die gegebene Maschine sollen U/f-Kennlinien für Nennlast und Leerlauf eingestellt werden.

a. Welche Boost-Spannung wird im Stillstand (bei $f_S \approx 0$) für Nennmagnetisierung benötigt?
b. Wie gross wird die Boost-Spannung im Stillstand für Nennmoment?
c. Wie gross ist die Stromrichter-Ausgangsspannung für Nenndrehzahl und Nennlast?
d. Welches ist der Nennschlupf der Maschine?
e. Mit welcher Drehzahl dreht die Maschine bei 35 Hz Statorfrequenz im Leerlauf und um wie viel muss die Frequenz bei Belastung mit Nennmoment erhöht werden, damit die Drehzahl gleich bleibt wie im Leerlauf?

5.6 U/f-Steuerung einer SM

Eine Permanentmagnet-Synchronmaschine in Sternschaltung für die USA hat die Typenschilddaten 480 V / 15 A / 60 Hz und ist in Stern geschaltet. Gemessen wurde weiter ein Statorwiderstand von $R_S = 0{,}8\,\Omega$. Eine Messung an der angetriebenen Maschine hat bei offenen Klemmen eine Spannung von $U_{S,0} = 432$ V bei 60 Hz ergeben. Im Nennpunkt ist der Strom exakt in Phase zur Polradspannung. Für die gegebene Maschine sollen die notwendigen Daten für eine U/f-Führung berechnet werden.

a. Wie gross ist die innere mechanische Leistung $P_{i,me}$ der Maschine (mechanische Leistung ohne Reibungs- und Lüfterverluste)? Zu welcher Spannung ist der Statorstrom in Phase?
b. Wie gross ist die Nenn-Strangspannung eines Wicklungsstranges?
c. Wie gross muss die Boost-Spannung U_{Boost} im Stillstand für Moment Null und Nennmoment gewählt werden?
d. Wie lautet die Gleichung für die Polradspannung in Funktion der Frequenz?
e. Welchen Wert hat die Induktivität L_S (Hinweis: der Einfluss von R_S kann vernachlässigt werden)?
f. Was passiert, wenn die Maschine im Leerlauf an das europäische 400 V / 50 Hz angeschlossen wird?

5.7 Feldschwächbetrieb bei einer PSM

Eine Permanentmagnet erregte Synchronmaschine in Sternschaltung soll mit Feldschwächung bis zur 1,5-fachen Nenndrehzahl betrieben werden. Die Nenndaten sind 400 V / 15 A / 50 Hz. Die Leerlaufspannung bei 50 Hz beträgt 360 V und L_d wurde zu 21 mH bestimmt. R_S kann vernachlässigt werden.

a. Wie gross muss der feldschwächende Strom I_d bei 75 Hz werden? Die Spannung des Stromrichters bleibt fest auf 400 V.
b. Wie gross wird der zulässige Strom in q-Richtung noch, wenn der Nennstrom $I_{S,n}$ nicht überschritten werden soll? Interpretation?
c. Vergleiche das Resultat von b) qualitativ mit dem, was bei einer ASM zu erwarten ist.

6. Auslegung und Realisierung

6.1 Betriebsart und Erwärmung

In einer zu realisierenden Anwendung liegt das in Abbildung 6.1 gegebene Drehmomentprofil vor. Die Drehzahl sei dabei konstant.

a. Welche der Betriebsarten gemäss IEC 60034-1 entspricht am ehesten diesem Profil? Nennen Sie zwei mögliche Beispiele für eine solche Belastungsform.
b. Wie gross ist das effektiv benötigte Drehmoment?
c. Die gewählte Maschine habe ein zulässiges S1 Dauermoment von 20 Nm und erreiche dabei eine Erwärmung von 80 K. Die maximal zulässige Temperatur betrage 120 °C. Welche mittlere Erwärmung wird im gegebenen Lastfall erreicht?
d. Schätzen Sie die Temperaturerhöhung ab, die sich während der Zeit mit den 20 Nm einstellt. Die thermische Zeitkonstante T_{Th} beträgt 30 Sekunden. Nehmen Sie dazu eine lineare Erwärmungskurve nach folgender Formel an:

$$\Delta T \approx \Delta T_N \frac{t}{T_{Th}} \left(\frac{M}{M_N} \right)^2$$

e. Zwischen welchen beiden Werten wird sich die Temperatur im Betrieb bewegen, wenn die Maschine in einer Umgebung mit 40 °C aufgestellt wird und wenn näherungsweise angenommen werden kann, dass die Temperatur mit der berechneten Erhöhung symmetrisch um die mittlere Temperatur schwankt?

6.2 Spindelantrieb

Ein Spindelantrieb gemäss Abbildung 6.2 soll eine Last von 100 kg zwischen zwei Punkten über eine Fahrdistanz von 1 m bewegen. Es wird ein dreieckiges Drehzahlprofil angestrebt, um die kürzeste Bewegungszeit zu erhalten. Die eingesetzte Spindel hat eine Steigung von 10 mm. Es soll ein Servoantrieb eingesetzt werden, der mit einem Resolver ausgerüstet ist. Dessen Messgenauigkeit beträgt 20 Bogenminuten (1/3° mechanisch). Für die Dimensionierung kann die Anlage als ideal angenommen werden, d.h. es treten keine Reibungsverluste auf.

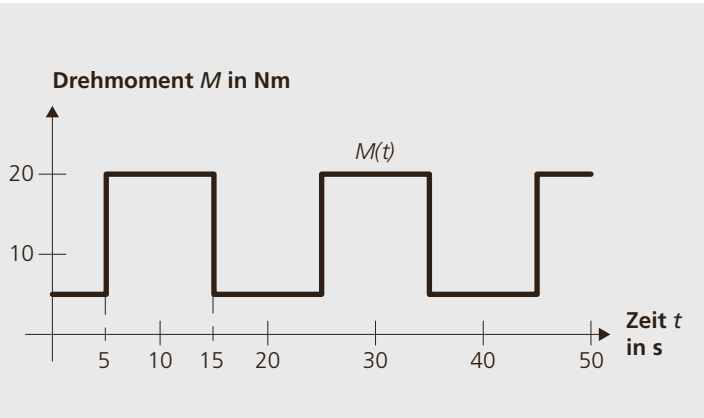


Abbildung 6.1: Gegebenes Lastprofil (Aufgabe 6.1).

a. Genügt die Messgenauigkeit des Resolvers, um die Last mit einer Genauigkeit von 0,5 mm positionieren zu können? Welche Eigenschaften des Systems schränken diese theoretische Genauigkeit ein?
b. Welche maximale Geschwindigkeit muss erreicht werden können, um die Bewegung in 2 s auszuführen?
c. Welches Drehmoment wird an der Maschine benötigt, und welche Spitzenleistung muss der Stromrichter liefern können?
d. Welche Energie wird während der Bremsphase in den Zwischenkreis zurückgespeist (Annahme: idealer Stromrichter)?
e. Der Stromrichter wird aus dem 400 V-Netz gespeist. Während der Beschleunigungszeit kann der Netzgleichrichter die benötigte Energie liefern und der Zwischenkreis kann auf der Nennspannung von 560 V gehalten werden. Wie gross müsste ein Kondensator dimensioniert werden, um die Energie während der Bremsphase aufzunehmen, wenn die zulässige Spannungserhöhung 80 V beträgt? Für die Abschätzung können die Verluste vernachlässigt werden.

6.3 Getriebedimensionierung

Eine Last mit einem Trägheitsmoment von $J_L = 3 \cdot 10^{-2}$ kg m^2 soll in $t_B = 100$ ms auf eine Drehzahl n_L von 800 U/min beschleunigt werden.
Es stehen dazu drei Maschinen als Antrieb zur Verfügung:
1. Direktantrieb mit $n_{max} = 800$ U/min und $J_{M1} = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ kg m^2.
2. Maschine mit $n_{max} = 3000$ U/min und $J_{M1} = 4{,}6 \cdot 10^{-3}$ kg m^2.
3. Kleinantrieb mit $n_{max} = 24\,000$ U/min und $J_{M1} = 7{,}4 \cdot 10^{-5}$ kg m^2.

a. Dimensionieren Sie für die drei Maschinen eine geeignete Getriebeübersetzung unter Beachtung der maximal möglichen Drehzahl der Maschine und mit dem Ziel, das benötigte Drehmoment zu minimieren. Wie gross ist jeweils das Drehmoment?

6.4 Antriebsabsicherung mit Schmelzsicherung

Gegeben ist ein 15 kW Antrieb am dreiphasigen 400 V/50Hz Netz. Der Wirkungsgrad des gesamten Stromrichters beträgt 95 % und der netzseitige $\cos\varphi = 0{,}90$. Als Maschine ist eine IE3 ASM mit 2 Polpaaren eingesetzt (Abbildung 6.1). Als Sicherungen sind die Werte 10, 13, 16, 20, 25, 35, 50, 63 und 100 A träge und flink verfügbar.

a. Wie gross ist der Nennwirkungsgrad η der gegebenen Maschine gemäss Effizienzklasse?

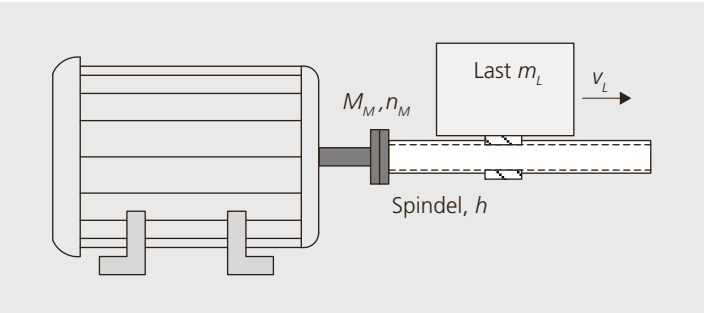


Abbildung 6.2: Umformung der rotativen Bewegung mit einer Spindel in eine lineare Bewegung (Aufgabe 6.2).

b. Wie gross wird die nominale vom Netz bezogene Leistung P_N und die Scheinleistung S_N?
c. Wie gross ist der Netzstrom I_N?
d. Auf welchen Wert muss der Stromrichter abgesichert werden, und welche Sicherungscharakteristik wählen Sie? Begründung?

6.5 Antriebsabsicherung mit thermischer und magnetischer Auslösung

Eine Asynchronmaschine am dreiphasigen 400 V-Netz wird während 20 % der Zeit auf 150 % der Nennleistung und während der restlichen 80 % auf 30 % der Nennleistung betrieben. Die Zykluszeit beträgt 2 s. Bei Nennleistung beträgt der Netzstrom 50 A bei einem $cos\varphi = 0{,}85$ und die Blindleistung kann als belastungsunabhängig angenommen werden.
Der Antrieb soll thermisch und magnetisch vor Überlast geschützt werden.

a. Wie gross ist die Blindleistung der Maschine?
b. Wie gross wird die Scheinleistung in beiden Betriebsfällen?
c. Wie gross sind die Netzströme bei 20 % und 150 % Last?
d. Wir gross ist der mittlere Effektivwert des Netzstromes, der die thermische Auslösung bestimmt?
e. Auf welche Werte müssen die thermische und die magnetische Sicherung eingestellt werden, wenn der Grenzwert einen Abstand von 30 % zum Effektivwert aufweisen soll?

1. Grundlagen

1.1 Primärenergie

a. Der Energieinhalt einer Megatonne Erdöl (Mtoe) ist $E = 41{,}9 \cdot 10^{15}$ J und der Weltenenergieverbrauch beträgt $13 \cdot 10^3$ Mtoe. Die Umrechnungen ergeben:

$$E_{Welt} = 13 \cdot 10^3 \,\text{Mtoe} \cdot 41{,}9 \cdot 10^{15} \,\text{J/Mtoe} = \underline{544{,}7 \cdot 10^{18} \,\text{J}}$$
$$= 151{,}3 \cdot 10^{15} \,\text{Wh} = \underline{151{,}3 \,\text{PWh}}$$

1.2 Energieverbrauch für Antriebe

a. Motoren verbrauchen etwa die Hälfte der gesamten elektrischen Energie. Diese beträgt gemäss Grafik für die Schweiz $E_{el,tot} \approx 60$ TWh.

$$E_{Mot} \approx 0{,}5\, E_{el,tot} = \underline{30 \,\text{TWh}} = \underline{108 \,\text{PJ}}$$

b. Bei Antrieben allein lassen sich etwa 25 % einsparen:

$$E_{Einsp,Mot} \approx E_{Mot}\, 0{,}25 = \underline{7{,}5 \,\text{TWh}} = \underline{27 \,\text{PJ}}$$

c. Die möglichen finanziellen Einsparungen pro Jahr bei 0.2 Fr./kWh sind damit:

$$Einsparpotenzial = E_{Einsp,Mot} \cdot 0.2 \,\text{Fr./kWh} = \underline{1.5 \,\text{Mrd Fr./Jahr}}$$

1.3 Graue Energie in einer Asynchronmaschine

a. Energieaufwand nach Werkstoffen:

$$E_{Eisen} \approx 102 \,\text{kg} \cdot 0{,}89 \cdot 7 \,\text{kWh/kg} = \underline{636 \,\text{kWh}}$$
$$E_{Kupfer} \approx 102 \,\text{kg} \cdot 0{,}06 \cdot 17 \,\text{kWh/kg} = \underline{104 \,\text{kWh}}$$
$$E_{Aluminium} \approx 102 \,\text{kg} \cdot 0{,}05 \cdot 43 \,\text{kWh/kg} = \underline{219 \,\text{kWh}}$$
$$E_{Motor} \approx \underline{956 \,\text{kWh}}$$

b. Für 1.3 $ kann in Deutschland etwa 1 kWh graue Energie «gekauft» werden.

$$\text{Kosten} \approx E_{Motor} / (1{,}3 \,\text{kWh/\$}) = \underline{737 \,\$}$$

c. Die Faustregel besagt, dass ein Drittel der Anschaffungskosten etwa den Kosten für die graue Energie entsprechen, d.h. 1800 Fr. /3= <u>600 Fr.</u> Die Abschätzungen stimmen damit relativ gut überein.

1.4 Strom und Spannung an reaktiven Elementen

(in Abbildung 1.1 eingezeichnet)

a. Spannung an einer Induktivität (bei 1 mH):

$$u_L = L \cdot di_L/dt \;(= 1 \,\text{mH} \cdot di_L/dt)$$

b. Spannung an einer Kapazität (bei 1 mF):

$$u_C(t) = u_{C,0} + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_C(\tau)\, d\tau \;\; (= \frac{1}{1 \,\text{mF}} \cdot \int_0^t i_C(\tau)\, d\tau)$$

1.5 Mittel- und Effektivwerte

a. Für den Mittelwert des dreieckförmigen Stromverlaufes gilt:

$$I_{DC} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t)\,dt = \frac{1}{3\,\text{ms}} \left(\frac{10\,\text{A}}{2}\, 3\,\text{ms} \right) = \underline{5\,\text{A}}$$

b. In der gleichen Art gilt für den Mittelwert des rechteckförmigen Stromes:

$$I_{DC} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t)\,dt = \frac{1}{3\,\text{ms}} (10\,\text{A} \cdot 2\,\text{ms} - 10\,\text{A} \cdot 1\,\text{ms}) = \underline{3{,}33\,\text{A}}$$

Für den Effektivwert (quadratischer Mittelwert) des rechteckförmigen Stromes resultiert:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t)\,dt} = \sqrt{\frac{1}{3\,\text{ms}} ((10\,\text{A})^2 \cdot 2\,\text{ms} + (-10\,\text{A})^2 \cdot 1\,\text{ms})} = \underline{10\,\text{A}}$$

Bemerkung zu Effektivwerten: Da durch das Quadrieren negative Vorzeichen wegfallen, kann sehr oft grafisch ermittelt werden, wie ein Effektivwert zustande kommt. Im vorliegenden Fall werden die negativen Anteile «hochgeklappt» der Strom ist konstant und die Amplitude entspricht direkt dem Effektivwert.

1.6 Leistungen

a. Für die verschiedenen Leistungen gilt:

$$S = \sqrt{3} U_{eff}\, I_{eff} = \sqrt{3} UI = \sqrt{3} \cdot 400\,\text{V} \cdot 20\,\text{A} = \underline{13{,}9\,\text{kVA}}$$

$$P = \sqrt{3} UI \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot 400\,\text{V} \cdot 20\,\text{A} \cdot \cos(30°) = \underline{12{,}0\,\text{kW}}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(13{,}9\,\text{kVA})^2 - (12{,}0\,\text{kW})^2} = \underline{7{,}01\,\text{kVAr}}$$

b. Der Strom für eine Wirkleistung von 12,0 kW bestimmt sich mit:

$$P = \sqrt{3} UI \cos(\varphi) \quad \Rightarrow \quad I = P \big/ (\sqrt{3} U \cos(0°)) = 12\,\text{kW} \big/ (\sqrt{3} \cdot 400\,\text{V} \cdot 1) = \underline{17{,}33\,\text{A}}$$

1.7 Lineare Bewegung

a. Ausgegangen wird von den Grundgleichungen:

$$F = m \cdot a \quad \Rightarrow \quad a = F/m$$

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(\tau)\,d\tau \quad \text{und} \quad s = s_0 + \int_0^t v(\tau)\,d\tau$$

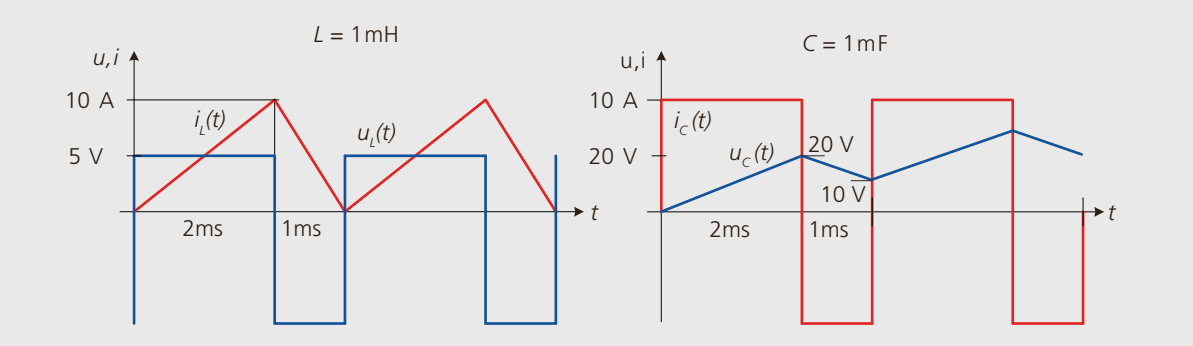


Abbildung 1.1: Verläufe von Aufgabe 1.4.

Mit konstanter Beschleunigung sowie Anfangsgeschwindigkeit und -position Null resultieren:

$$a = F/m = 10\,\mathrm{N}/1\mathrm{kg} = 10\,\mathrm{N/kg} = \underline{10\,\mathrm{m/s^2}}$$

$$v(t = 10\mathrm{s}) = \int_0^{10\mathrm{s}} a \cdot dt = a \cdot t = 10\,\mathrm{m/s^2}\,10\mathrm{s} = \underline{100\,\mathrm{m/s}}$$

$$s(t = 10\mathrm{s}) = \int_0^{10\mathrm{s}} a \cdot t \cdot dt = \frac{a}{2} t^2 = \underline{500\mathrm{m}}$$

1.8 Drehbewegung

a. Es gelten die analogen Gleichungen zur Linearbewegung:

$$M = J \cdot d\Omega/dt \quad \Rightarrow \quad d\Omega/dt = M/J$$

$$\Omega(t) = \Omega_0 + \frac{M}{J}\,t \quad \text{und} \quad \varphi = \varphi_0 + \int_0^t \Omega(t')\,dt'$$

Mit konstanter Beschleunigung und Anfangs-Winkelgeschwindigkeit und -winkel von Null resultieren:

$$d\Omega/dt = M/J = 5\,\mathrm{Nm}/0{,}1\ \mathrm{kgm^2} = 50\ \mathrm{N}/\mathrm{kgm} = 50\ \mathrm{rad/s^2}$$

$$\Omega(t = 5\mathrm{s}) = \frac{M}{J}\,t = 50\,\mathrm{rad/s^2}\,5\mathrm{s} = \underline{250\,\mathrm{rad/s}}$$

$$n(t = 5\mathrm{s}) = \Omega \cdot 60/2\pi = \underline{2387\ \mathrm{U/min}}$$

$$\varphi(t = 5\mathrm{s}) = \int_0^{5\mathrm{s}} \frac{M}{J} \cdot t' \cdot dt' = \frac{50\,\mathrm{rad/s^2}}{2}\,5^2 = \underline{625\,\mathrm{rad}}$$

1.9 Trägheitsmoment

a. Es gelten die Gleichungen aus der vorhergehenden Aufgabe:

$$\Omega(t) = \Omega_0 + \int_0^t \frac{d\Omega}{d\tau} \cdot d\tau$$

$$= \Omega_0 + \int_0^t \frac{M}{J} \cdot d\tau = \Omega_0 + \frac{M}{J} \cdot t \overset{!}{=} 0$$

$$\rightarrow t = -\frac{\Omega_0 \cdot J}{M}$$

$$\Omega_0 = n_0 \cdot \frac{2\pi}{60} = 314{,}16\ \mathrm{rad/s}$$

$$\rightarrow t = -\frac{314{,}16\ \mathrm{rad/s} \cdot 15\,000\ \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m^2}}{-100\,\mathrm{Nm}} = \underline{47124\,\mathrm{s}}$$

$$= 13{,}09\,\mathrm{h}$$

2. Antriebsanwendungen

2.1 Effizienz einer Prozesskette

a. Die Nutzleistung ergibt sich aus der Arbeit pro Zeiteinheit. Für die Arbeit in einer Minute gilt:

$$E = m \cdot g \cdot h = 5000\,\text{kg} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5\text{m} = 245\,\text{kJ} = 245\,\text{kWs}$$

Und daraus: $P = \dfrac{245{,}2\text{kWs}}{60\text{s}} = \underline{4{,}09\text{kW}}$

b. Die Leistung an der Welle ist aufgrund der Wirkungsgrade des Förderbands sowie Umlenkung (F) und mechanischen Getriebes (G) geringer. Demnach muss der Motor mehr leisten, damit die 4,09 kW zustande kommen:

$$P_{M,mech} = \frac{P}{\eta}\text{; wobei } \eta = \eta_F \cdot \eta_G \rightarrow P_{M,mech} = \frac{4{,}09\text{kW}}{0{,}75 \cdot 0{,}85} = \frac{4{,}09\text{kW}}{0{,}638} = \underline{6{,}41\text{kW}}$$

c. Um die Leistung aus dem Netz bestimmen zu können, müssen die Wirkungsgrade des Motors (M), des Umrichters (U) sowie der Zuleitung (Z) berücksichtigt werden.

$$P_N = \frac{P_{M,mech}}{\eta_M \cdot \eta_U \cdot \eta_Z} = \frac{6{,}41\text{kW}}{0{,}88 \cdot 0{,}94 \cdot 0{,}98} = \frac{6{,}41\text{kW}}{0{,}81} = \underline{7{,}91\text{kW}}$$

d. Ausgehend von der abgegebenen Leistung des Motors wird die aufgenommene Leistung des Motors und anschliessend die Differenz zu der mechanischen Leistung bestimmt:

$$P_{V,M} = \frac{P_{M,mech}}{\eta_M} - P_{M,mech} = P_{M,mech}\left(\frac{1}{\eta_M} - 1\right) = 6{,}41\text{kW}\left(\frac{1}{0{,}88} - 1\right) = 874\,\text{W}$$

Bei 12 h Einschaltdauer pro Tag ergeben sich folgende Energiekosten:

$$E_V = P_{V,M} \cdot t_B = 874\,\text{W} \cdot 12\text{h} \cdot 365\text{d} = 3829\,\text{kWh}$$

$$\rightarrow \text{ Kosten } = 3829\,\text{kWh} \cdot \frac{0.20\text{ Fr.}}{\text{kWh}} = \underline{766\text{ Fr.}}$$

2.2 Lastkennlinie

a. Drehzahl und Drehmoment am Anfang des Wickelvorgangs:

$$M_A = F \cdot r_A = 150\,\text{N} \cdot \frac{0{,}15\text{m}}{2} = \underline{11{,}3\text{Nm}}$$

$$n_A = \frac{v}{2\pi \cdot r_A} \cdot 60\text{s/min} = \frac{5\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2\pi \cdot 0{,}075\text{m}} \cdot 60\text{s/min} = \underline{637\text{U/min}}$$

Drehzahl und Drehmoment am Ende des Wickelvorgangs:

$$M_E = F \cdot r_E = 150\,\text{N} \cdot \frac{0{,}5\text{m}}{2} = \underline{37{,}5\text{Nm}}$$

$$n_E = \frac{v}{2\pi \cdot r_E} \cdot 60\text{s/min} = \frac{5\text{m/s}}{2\pi \cdot 0{,}25\text{m}} \cdot 60\text{s/min} = \underline{191\text{U/min}}$$

Das Produkt von Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit ist konstant, da die Kraft und Aufrollgeschwindigkeit konstant sind:

$$P = F \cdot v \rightarrow P = 150\,N \cdot 5\text{m/s} = \underline{750\,\text{W}}$$

b. Leistung am Anfang und Ende des Wickelvorganges:

Anfang: $P_A = M_A \cdot \Omega_A = 11{,}3\text{Nm} \cdot \frac{637\text{U/min}}{60} \cdot 2\pi = \underline{750\,\text{W}}$

Ende: $P_E = 37{,}5\text{Nm} \cdot \frac{191\text{U/min}}{60} \cdot 2\pi = \underline{750\,\text{W}}$

In Abbildung 2.1 ist die Hyperbel der Kennlinie dargestellt.

2.3 Beschleunigungsvorgang

a. Der stationäre Arbeitspunkt liegt im Schnittpunkt der Drehmomentkennlinie des Antriebs und der jeweiligen Lastkurve, siehe Grafik. Bei diesem Arbeitspunkt stellt sich die Endgeschwindigkeit ein. Für die beiden Lasten ergibt sich demnach:

$$n_{E_L1} \approx 1400\text{U/min}; \quad n_{E_L2} \approx 1300\text{U/min}$$

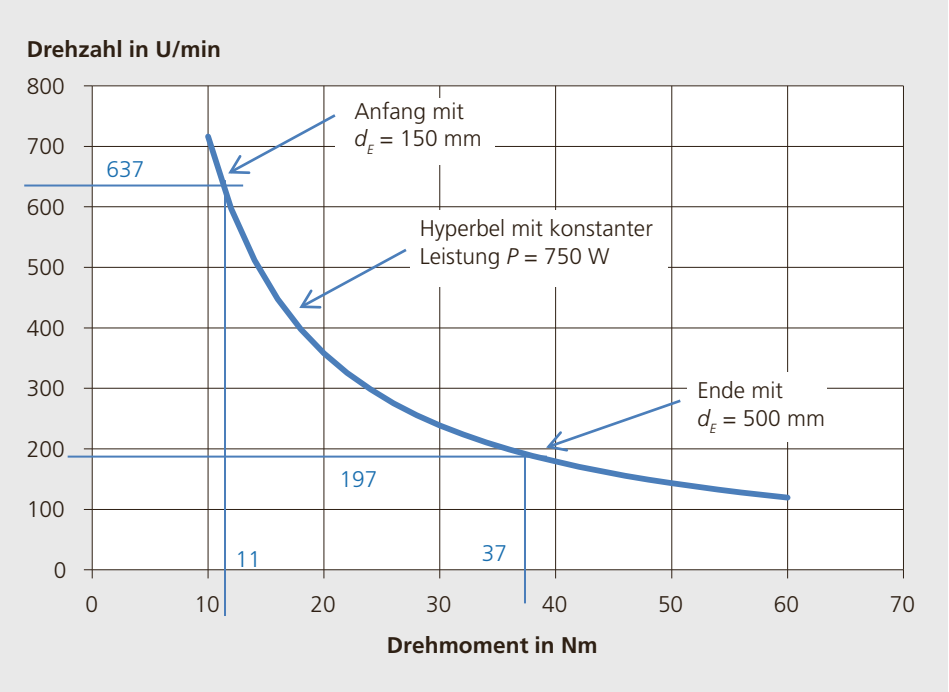


Abbildung 2.1: Drehzahl-Drehmomentverlauf des Wickelns mit konstanter Leistung (Aufgabe 2.2).

Für den Beschleunigungsvorgang steht die Differenz zwischen M_M und M_L zur Verfügung. Diese kann grafisch aus den Kurven näherungsweise abgeschätzt werden.

Fall M_L1

Bei 0 U/min: $M_{BA} \approx 12\text{Nm} - 5\text{Nm} = 7\text{Nm}$

Maximalwert: $M_{BM} \approx 15\text{Nm}$

Mittelwert: $M_B \approx \frac{7\text{Nm}+15\text{Nm}}{2} = \underline{11\text{Nm}}$

Mittels der Winkelbeschleunigung $\dot{\Omega}$ und der Winkelgeschwindigkeitsänderung $\Delta\Omega$ von Stillstand bis zur Maximalgeschwindigkeit kann die Beschleunigungszeit bestimmt werden:

$$T_B = \frac{\Delta\Omega}{\dot{\Omega}};\ \Delta\Omega = \Omega_{E_L1}$$

$$\dot{\Omega} = \frac{M}{J} = \frac{11\text{Nm}}{4\text{kgm}^2} = \underline{2{,}75\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}};\ \Omega_{E_L1} = \frac{2\pi \cdot n_{E_L1}}{60} = \underline{147\frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$T_B = \frac{147\frac{\text{rad}}{\text{s}}}{2{,}75\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}} = \underline{53\text{s}}$$

Fall M_L2

Über den ganzen Drehzahlbereich ist $M_B \approx 7\text{Nm}$ näherungsweise konstant.

$$T_B = \frac{\Delta\Omega}{\dot{\Omega}};\ \dot{\Omega} = \frac{M}{J} \rightarrow T_B = \frac{\Delta\Omega \cdot J}{M_B}$$

$$T_B = \frac{\Omega_{E_L2} \cdot J}{M_B} = \frac{\frac{2\pi \cdot n_{E_L2}}{60} \cdot J}{M_B} = \frac{136\frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 4\text{kgm}^2}{7\text{Nm}} = \underline{78\text{s}}$$

Bemerkungen: Theoretisch wird die Enddrehzahl nie ganz erreicht, da das Beschleunigungsmoment M_B vor Erreichen des Arbeitspunktes gegen Null geht.
Eine Anlaufzeit von 53 s bzw. 78 s ist für einen kleinen Motor sehr lange. Gegebenenfalls kann er nicht so lange mit der Belastung betrieben werden, weil diese bis zum Erreichen des Arbeitspunktes höher ist als im stationären Arbeitspunkt.

2.4 Hubantrieb

a. Der Weg der Masse auf dem Förderband wird mittels Trigonometrie (Abbildung 2.2) bestimmt:

$$s_{\text{Hub}} = \frac{10m}{\sin(60°)} = \underline{11{,}6\text{m}}$$

b. Die maximale Beschleunigungszeit für das Anfahren bzw. Bremsen lässt sich über folgenden Zusammenhang ermitteln: Die Gesamtfahrt besteht aus Anfahr- und Bremszeit ($2 \times t_B$) sowie der Zeit für eine konstante Fahrt (t_K). Weil die Zeit für die Gesamtfahrt bekannt ist (10 s) und die Beschleunigung konstant ist (Durchschnittsgeschwindigkeit = Maximalgeschwindigkeit $v_m/2$), kann

die Zeit der Konstantfahrt mittels der Anfahr- und Bremszeit ausgedrückt werden ($t_K = T - 2 \times t_B$) → es bleibt somit nur noch die eine Unbekannte t_B übrig:

$$s_{\text{Hub}} = t_K \cdot v_m + 2t_B \cdot \frac{v_m}{2}$$

$$= (T - 2t_B) \cdot v_m + 2t_B \cdot \frac{v_m}{2} = T \cdot v_m - 2t_B \cdot v_m + t_B \cdot v_m = T \cdot v_m - t_B \cdot v_m$$

$$\rightarrow t_B = T \cdot v_m - s_{\text{Hub}} \frac{1}{v_m} = (10\text{s} \cdot 2\frac{\text{m}}{\text{s}} - 11{,}6\text{m}) \cdot \frac{1}{2\frac{\text{m}}{\text{s}}} = \underline{4{,}23\text{s}}$$

c. Der Graph soll so erstellt werden, dass die x-Achse der Zeit $t = 10$ s entspricht. Die Beschleunigung- und Bremszeit ist bekannt: $t_B = 4{,}23$ s; die Zeit für die konstante Fahrt lässt sich daher berechnen:

$$t_K = 10\text{s} - 2 \cdot 4{,}23\text{s} = 1{,}55\text{s}$$

$$a = \frac{v}{t} \rightarrow a_B = \frac{2\frac{\text{m}}{\text{s}}}{4{,}23\text{s}} = 0{,}47\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Kontrollrechnung:

$$\left.\begin{aligned} s_B &= \frac{v_m}{2} \cdot t_B = 4{,}23\text{m} \\ s_K &= v_m \cdot t_K = 3{,}1\text{m} \end{aligned}\right\} s = s_K + 2 \cdot s_B = 11{,}6\text{m}$$

d. Zuerst soll die Kraft für eine konstante Fahrt mit 60°-Steigung berechnet werden:

$$F_{G,\gamma} = F_G \cdot \sin(60°)$$

$$F_G = m \cdot g = 50\text{kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}} = 490\text{N} \rightarrow F_{G,\gamma} = 50\text{kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sin(60°) = \underline{424\text{N}}$$

Das Drehmoment des Motors ist abhängig vom Radius der Rolle:

$$M_K = F_{G,\gamma} \cdot r_R = 424\text{N} \cdot \frac{0{,}25\text{m}}{2} = 53{,}1\text{Nm}$$

Anfahren: Das Drehmoment M_B ist das Produkt von Trägheit J_T und der Winkelbeschleunigung $\dot{\Omega}$:

$$M_B = J_T \cdot \dot{\Omega}$$

Die Trägheit J_T der Mechanik setzt sich aus der Trägheit der einzelnen Komponenten zusammen: 2 x Rollen J_R, Masse des Förderbandes und zu befördernde Masse. Für eine Masse auf dem Radius r_R gilt: $J = m \cdot r_R^2$

$$J_T = 2 \cdot J_R + \frac{m_B}{l} l_B \cdot r_R^2 + m_M \cdot r_R^2$$

$$J_T = 2 \cdot 0{,}4\text{kgm}^2 + 2\frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 25\text{m} \cdot (\frac{0{,}25}{2})^2 + 50\text{kg} \cdot (\frac{0{,}25}{2})^2$$

$$J_T = 0{,}8\text{kgm}^2 + 0{,}78\text{kgm}^2 + 0{,}78\text{kgm}^2 = \underline{2{,}36\text{kgm}^2}$$

Die Winkelbeschleunigung $\dot{\Omega}$ ergibt sich aus der Drehzahl n_m der Rollen und der dazugehörigen Beschleunigungszeit t_B:

$$n_m = \frac{v_{max}}{\pi d} \cdot 60\text{s/min} = \frac{2\text{m/s}}{\pi \cdot 0{,}25\text{m}} \cdot 60\text{s/min} = \underline{153\text{U/min}}$$

$$\dot{\Omega} = \frac{n_m}{t_B} \cdot \frac{2\pi}{60} = \frac{153\text{U/min}}{4{,}23\text{s}} \cdot \frac{2\pi}{60} = \underline{3{,}78\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}}$$

$$M_B = J_T \cdot \dot{\Omega} = 2{,}36\text{kgm}^2 \cdot 3{,}78\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = \underline{8{,}94\text{Nm}}$$

Das Drehmoment M_{MA} für die Anfahrt setzt sich aus demjenigen der Konstantfahrt M_K und der Beschleunigung M_B zusammen:

$$M_{MA} = M_K + M_B = 53{,}1\text{Nm} + 8{,}94\text{Nm} = \underline{62{,}0\text{Nm}}$$

Beim Bremsen ist das Drehmoment M_{MB} um das Bremsmoment M_B geringer als dasjenige der Konstantfahrt M_K:

$$M_{MB} = M_K - M_B = 53{,}1\text{Nm} - 8{,}94\text{Nm} = \underline{44{,}2\text{Nm}}$$

Bemerkung: Die maximale Leistung P_{max} wird am Ende der Anfahrt benötigt:

$$P_{max} = M_{MA} \cdot \frac{n_m}{60} \cdot 2\pi = 62{,}0\text{Nm} \cdot \frac{153\text{U/min}}{60} \cdot 2\pi = \underline{992\text{W}}$$

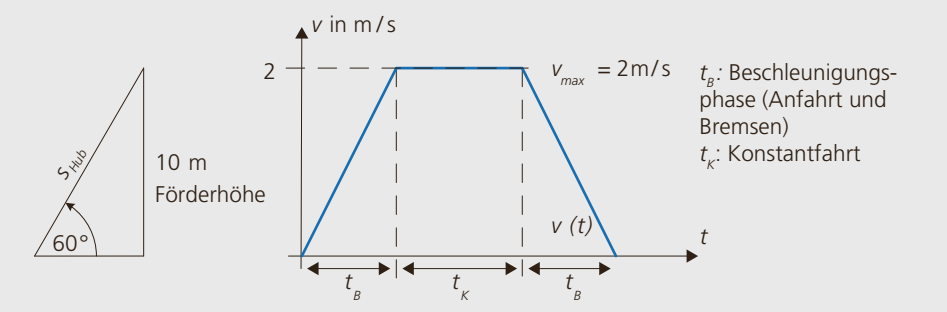


Abbildung 2.2: Bahn der Hubbewegung und Geschwindigkeitsprofil mit begrenzter Geschwindigkeit v_{max} (Aufgabe 2.4).

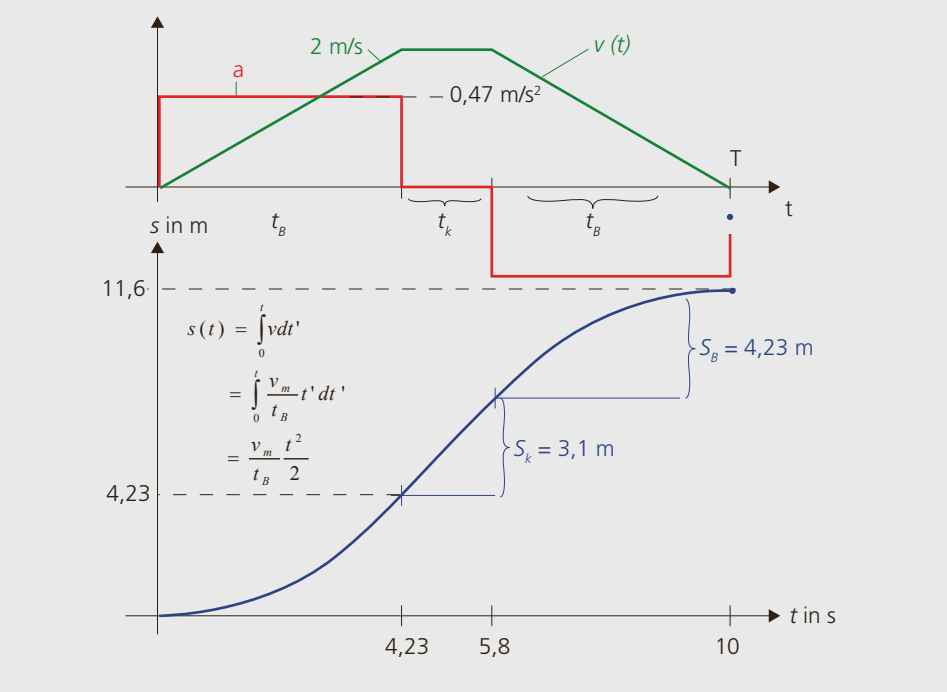


Abbildung 2.3: Resultierende Verläufe von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg in Funktion der Zeit (Aufgabe 2.4).

3. Elektrische Maschinen

3.1 Induktionsgesetz

a. Durch die Spule mit der Windungszahl N_I fliesst ein Gleichstrom. Daher ändert sich der magnetische Fluss ϕ nicht; es tritt demnach keine transformatorisch induzierte Spannung auf. In der Rechteckspule mit der Windungszahl N_U wird nur dann eine Bewegungsspannung induziert, wenn sich die Fläche der Leiterschleife ändert. Dies ist der Fall, sobald die Leiterschleife die Kante des Luftspaltes passiert. Tritt die Leiterschleife wieder aus dem Luftspalt heraus, fällt die induzierte Bewegungsspannung auf Null zurück.

Es sind drei Zeitbereiche zu betrachten: $0..t_a$, $t_a..t_a+t_b$, $>t_a+t_b$. Da die Geschwindigkeit konstant ist, ist auch die induzierte Spannung im Zeitbereich $t_a..t_a+t_b$ konstant. Abbildung 3.1 zeigt den Spannungsverlauf.

Die Dauer für den Weg t_a und den Weg t_b lassen sich anhand der Längen a und b mit der Bewegungsgeschwindigkeit der Leiterschlaufe bestimmen:

$$t_a = \frac{a}{v} = \frac{15\cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}}{1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = \underline{15\mathrm{ms}} \text{ und } t_b = \frac{b}{v} = \frac{20\cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}}{1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = \underline{20\mathrm{ms}}$$

Mithilfe des Induktionsgesetzes lässt sich im nächsten Schritt die induzierte Spannung während t_b berechnen:

$$u_{12} = N_U \cdot \frac{d}{dt}\phi(t) = 5\cdot\frac{-0{,}36\mathrm{mVs}}{0{,}02\mathrm{s}} = -90\mathrm{mV} \rightarrow u_i = \underline{90\mathrm{mV}}$$

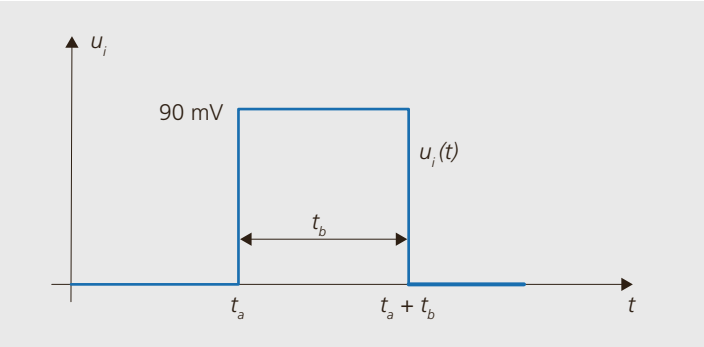


Abbildung 3.1: Spannungsverlauf in den drei Zeitbereichen (Aufgabe 3.1).

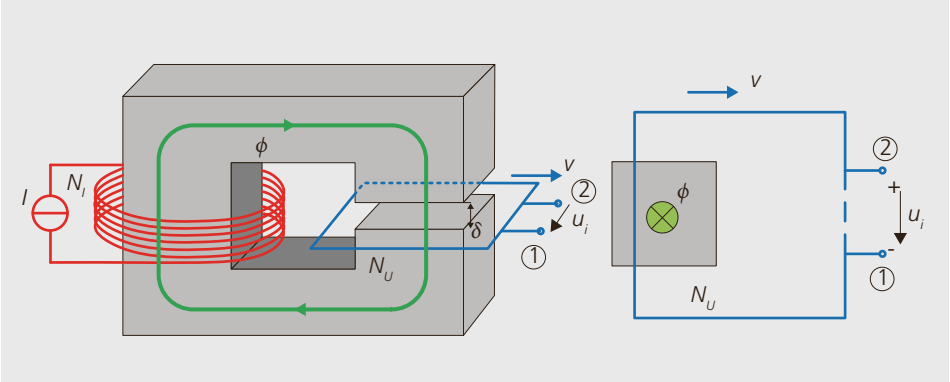


Abbildung 3.2: Polarität der induzierten Spannung (Aufgabe 3.1).

b. Der Fluss nimmt nach t_a ab. Somit ist die Spannung u_{12} negativ und u_i positiv.
c. Die Windungszahl ist der Quotient von der magnetischen Durchflutung und dem Strom, der durch den Leiter fliesst $N = \Theta / I$. Die benötigte magnetische Durchflutung setzt sich aus den Anteilen im Luftspalt und im Eisenweg zusammen.

Mit $A_\delta = A_{Fe}$ gilt auch $B_\delta = B_{Fe}$ da der Fluss konstant ist:

$$\Theta = \Theta_\delta + \Theta_{Fe} = H_\delta \cdot \delta + H_{Fe} \cdot l_{Fe} = \frac{B}{\mu_0}\left(\delta + \frac{l_{Fe}}{\mu_r}\right)$$

$$\text{mit: } B = B_\delta = B_{Fe} = \frac{\phi}{A_\delta} = \frac{0{,}36\text{mVs}}{4 \cdot 10^{-4}\text{m}^2} = 0{,}9\text{T}$$

$$\rightarrow \Theta = \frac{0{,}9\text{T}}{4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}}\left(0{,}001\text{m} + \frac{0{,}3\text{m}}{1000}\right) = 716\text{A} + 215\text{A} = \underline{931\text{A}}$$

$$\text{und daraus: } N = \frac{\Theta}{I} = \frac{931\text{A}}{3\text{A}} = 310\text{Wdg}$$

Wird der Luftspalt verdoppelt, muss der Anteil der magnetischen Durchflutung im Luftspalt verdoppelt werden:

$$\Theta_{neu} = 2\Theta_\delta + \Theta_{Fe} = 2 \cdot 716\text{A} + 215\text{A} = \underline{1647\text{A}}$$

$$I = \frac{\Theta}{N} = \frac{1647\text{A}}{310\text{Wdg}} = \underline{5{,}31\text{A}}$$

d. Der Stromfluss ergibt sich infolge der Richtung des magnetischen Flusses gemäss Abbildung 3.3.

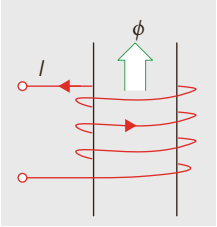


Abbildung 3.3: Rechtssinnige Anordnung von Strom zu Fluss (Aufgabe 3.1).

3.2 Gleichstrommaschine

a. Die Leistung entspricht dem Produkt aus Nennmoment M_N und der Winkelgeschwindigkeit Ω:

$$P_N = M_N \cdot \Omega \rightarrow M_N = \frac{P_N}{\Omega}, \text{ wobei } \Omega = \frac{2\pi \cdot n_N}{60}$$

$$\rightarrow M_N = \frac{60 \cdot P_N}{2\pi \cdot n_N} = \frac{60 \cdot 4\text{W}}{2\pi \cdot 12\,000\,\text{U/min}} = 3{,}18\text{mNm}$$

Die Drehmomentkonstante k_T entspricht der Maschinenkonstante $k\phi$ und kann folgendermassen bestimmt werden:

$$k_T = k\phi = \frac{M_N}{I_{AN}} \rightarrow k_T = \frac{3{,}18\text{mNm}}{0{,}5\text{A}} = \underline{6{,}37\,\frac{\text{mNm}}{\text{A}}} \quad (=6{,}37\,\text{mVs})$$

b. Die induzierte Spannung im Bemessungspunkt ist das Produkt von Maschinenkonstante und Winkelgeschwindigkeit:

$$U_i = k\phi \cdot \Omega = k\phi \cdot \frac{2\pi \cdot n_N}{60} \rightarrow U_i = 6{,}37\text{mVs} \cdot \frac{2\pi \cdot 12000\,\text{U/min}}{60} = \underline{8\text{V}}$$

Der Ankerwiderstand R_A lässt sich im stationären Betrieb wie folgt bestimmen:

$$U_A = R_A \cdot I_A + U_i \rightarrow R_A = \frac{U_A - U_i}{I_A} = \frac{12\text{V} - 8\text{V}}{0{,}5\text{A}} = \underline{8\Omega}$$

c. Der Wirkungsgrad η der Maschine im Bemessungspunkt ist das Verhältnis zwischen Bemessungsleistung P_N und der Eingangsleistung P_1:

$$\eta = \frac{P_N}{P_1} = \frac{P_N}{U_{AN} \cdot I_{AN}} = \frac{4\text{W}}{12\text{V} \cdot 0{,}5\text{A}} = \underline{66{,}7\%}$$

d. Um die Kennlinie erstellen zu können, müssen die Leerlaufgeschwindigkeit n_0 und das Anlaufmoment M_0 bestimmt werden:

$$n_0 = \frac{60 \cdot \Omega_0}{2\pi} = \frac{60 \cdot U_A}{2\pi \cdot k\phi} = \frac{60 \cdot 12\text{V}}{2\pi \cdot 6{,}37\,\text{mVs}} = \underline{18000\,\text{U/min}}$$

$$M_0 = k\phi \cdot I_{A0} = k\phi \cdot \frac{U_A}{R_A} = 6{,}37\text{mVs} \cdot \frac{12\text{V}}{8\Omega} = \underline{9{,}56\text{mNm}}$$

Die Verbindung zwischen den beiden Werten n_0 und M_0 auf den Achsen ergibt die Kennlinie in Abbildung 3.4.

e. Der Anlaufstrom wird durch die Grössen Ankerspannung und -widerstand begrenzt:

$$I_{A0} = \frac{U_A}{R_A} = \frac{12\text{V}}{8\Omega} = \underline{1{,}5\text{A}}$$

f. Die Ankerspannung setzt sich zusammen aus $U_A = U_{RA} + U_i$.
Die Anteile sind:

$$U_{RA} = I_A \cdot R_A, \text{ wobei } I_A = \frac{M}{k\phi} = \frac{2\text{mNm}}{6{,}37\,\text{mVs}} = 0{,}31\text{A}$$

$$\rightarrow U_{RA} = 0{,}31\text{A} \cdot 8\Omega = \underline{2{,}5\text{V}}$$

$$U_i = k\phi \cdot \Omega = k\phi \cdot \frac{2\pi \cdot n_{0_neu}}{60} = 6{,}37\text{mVs} \cdot \frac{2\pi \cdot 6000\,\text{U/min}}{60} = \underline{4\text{V}}$$

$$\rightarrow U_A = 2{,}5\text{V} + 4\text{V} = \underline{6{,}5\text{V}}$$

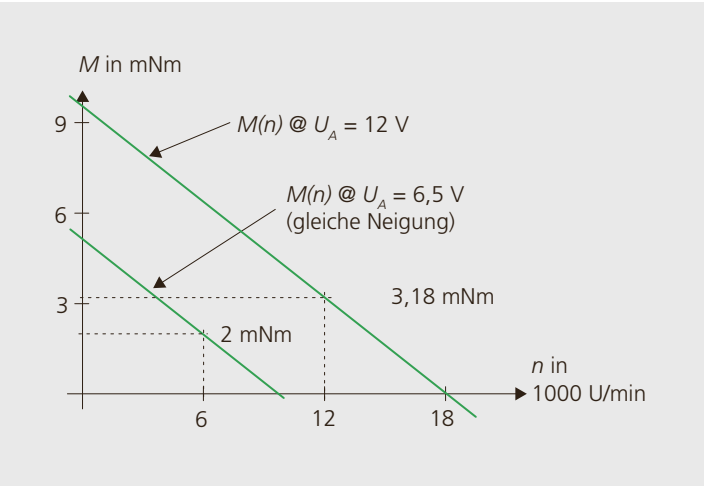


Abbildung 3.4: Drehzahl-Drehmomentkennlinien bei 12 und 6,5 V (Aufgabe 3.2).

Eckpunkte für die Kennlinie:

$$I_{A0} = \frac{U_A}{R_A} = \frac{6{,}5\text{V}}{8\Omega} = \underline{0{,}81\text{A}}\,;\; M_0 = k\phi \cdot I_{A0} = 6{,}37\,\text{mVs} \cdot 0{,}81\text{A} = \underline{5{,}2\text{mNm}}$$

Die Leerlaufdrehzahl mit der neuen Ankerspannung U_{A_neu} kann direkt über das Verhältnis der neuen Ankerspannung zur ursprünglichen bestimmt werden:

$$n_0 = 18000\frac{\text{U}}{\text{min}} \cdot \frac{U_{A_neu}}{U_A} = 18000\frac{\text{U}}{\text{min}} \cdot \frac{6{,}5\text{V}}{12\text{V}} = \underline{9750\text{U/min}}$$

Die Kennlinie hat die gleiche Neigung wie die Kennlinie mit 12 V, weil die Maschinenkonstante $k\phi$ zwischen Leerlauf und Maximaldrehmoment konstant ist.
Der Wirkungsgrad der Maschine im Bemessungspunkt ist das Verhältnis zwischen mechanischen Leistung P_{Mech} und der Eingangsleistung P_1:

$$\eta = \frac{P_{Mech}}{P_1} = \frac{P_{Mech}}{U_{AN_neu} \cdot I_{AN_neu}}$$

$$P_{Mech} = M \cdot \Omega_{0_neu} = M \cdot \frac{2\pi \cdot n_{0_neu}}{60} = 2\text{mNm} \cdot \frac{2\pi \cdot 6000\text{U/min}}{60} = \underline{1{,}26\text{W}}$$

$$\rightarrow\; \eta = \frac{1{,}26\text{W}}{6{,}5\text{V} \cdot 0{,}31\text{A}} = \underline{62{,}5\%}$$

3.3 Transformatorberechnung

a. Die Berechnung der Windungszahl erfolgt am einfachsten mit Hilfe der Transformatorformel:

$$U_{i(eff)} = \frac{1}{\sqrt{2}}\, NA_{Fe} 2\pi f \hat{B} = 4{,}44\, fNA_{Fe}\hat{B}$$

Umformen nach der Windungszahl ergibt:

$$N_1 = \frac{U_{i(eff)}}{4{,}44\, fNA_{Fe}\hat{B}} = \frac{400\text{ V}}{4{,}44 \cdot 50\frac{1}{\text{s}} \cdot 0{,}1\,\text{m}^2 \cdot 1{,}4\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}} = \underline{129\text{ Wdg}}$$

Hier ist zu beachten, dass es nur ganze Windungen gibt!
b. Für die Scheinleistung beim einphasigen Transformator gilt $S = U \cdot I$ und entsprechend für den Strom:

$$I_1 = \frac{S}{U} = \frac{10\text{ kVA}}{400\text{ V}} = \underline{25\text{ A}}$$

Der Kupferquerschnitt wird aus dem fliessenden Strom und der zulässigen Stromdichte berechnet:

$$A_{Cu,1} = \frac{I}{J} = \frac{25\text{ A}}{2\text{ A/mm}^2} = \underline{12{,}5\text{ mm}^2}$$

c. Die Drahtlänge ist direkt durch die Windungszahl mal den mittleren Kupferweg gegeben:

$$l_{Cu,1} = Wdg \cdot l_{Cu}/Wdg = 129 \cdot 0{,}7\,\text{m} = \underline{90{,}3\,\text{m}}$$

Für den ohmschen Widerstand folgt:

$$R_1 = \rho \frac{l_{Cu}}{A_{Cu}} = 0{,}0175 \frac{\Omega\,\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}} \frac{90{,}3\,\mathrm{m}}{12{,}5\,\mathrm{mm}^2} = \underline{126\,\mathrm{m}\Omega}$$

d. Wird die Stromdichte auf der Primär und auf der Sekundärseite gleich gewählt, so werden die Verluste in den beiden Wicklungen gleich gross. Pro Wicklung gilt:

$$P_{V,Cu,1} = R \cdot I^2 = 126\,\mathrm{m}\Omega \cdot 25\,\mathrm{A}^2 = \underline{78{,}8\,\mathrm{W}}$$

und für Primär- und Sekundärwicklung zusammen resultieren

$$P_{V,Cu} = \underline{158\,\mathrm{W}}$$

e. Die Eisenverluste werden über das Gewicht des Eisens bestimmt. Für das Volumen gilt näherungsweise Eisenfläche mal Eisenweglänge und damit für das Gewicht:

$$m = V_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 0{,}01\,\mathrm{m}^2 \cdot 1{,}0\,\mathrm{m} \cdot 7700\,\mathrm{kg/m}^3 = \underline{77\,\mathrm{kg}}$$

$$P_{V,Fe} = m_{Fe} \cdot V_{15} = 77\,\mathrm{kg} \cdot 3\,\mathrm{W/kg} = \underline{231\,\mathrm{W}}$$

f. Für den Wirkungsgrad resultiert schliesslich:

$$\eta = \frac{P_1 - P_{V,Cu} - P_{V,Fe}}{P_1} = \frac{10\,000\,\mathrm{W} \cdot 0{,}9 - 158\,\mathrm{W} - 231\,\mathrm{W}}{10\,000\,\mathrm{W} \cdot 0{,}9} = \frac{8611\,\mathrm{W}}{9000\,\mathrm{W}} = \underline{95{,}7\,\%}$$

3.4 Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine

a. Es gilt:

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos(\varphi)_N = \sqrt{3} \cdot 400\mathrm{V} \cdot 10{,}0\mathrm{A} \cdot 0{,}87 = \underline{6{,}03\mathrm{kW}}$$

$$\eta = \frac{P_N}{P_{el}} = \frac{5{,}5\mathrm{kW}}{6{,}03\mathrm{kW}} = \underline{91{,}2\,\%}$$

b. Im Leerlauf ist der Schlupf Null und im Rotor fliesst kein Strom: $I_R = 0$. Es gilt das Ersatzschaltbild in Abbildung 3.5. Der Eingangsstrom eines Strangs wird aufgrund der Dreieckschaltung wie folgt berechnet:

$$I_S = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{2{,}3\mathrm{A}}{\sqrt{3}} = 1{,}33\mathrm{A}$$

Die Statorkupferverluste $P_{V,S}$ in der Maschine d. h. in allen drei Strängen sind:

$$P_{V,S} = 3 \cdot I_S{}^2 \cdot R_S = 3 \cdot (1{,}33\mathrm{A})^2 \cdot 2{,}1\Omega = \underline{11{,}1\mathrm{W}}$$

Die Eisenverluste P_{Fe} ergeben sich aus der Leistung im Leerlauf (Gesamtverluste) $P_{el,L}$ abzüglich der ohmschen Verluste $P_{V,S}$.

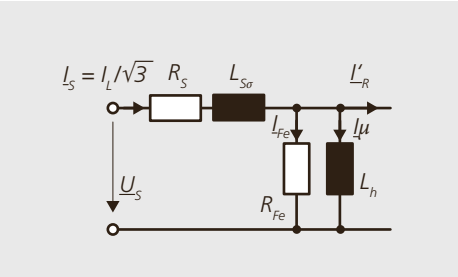


Abbildung 3.5: Ersatzschaltbild eines Stranges bei Leerlauf (Aufgabe 3.4).

$$P_{Fe} = P_{el,L} - P_{V,S} = 60\,\text{W} - 11{,}1\,\text{W} = \underline{48{,}9\,\text{W}}$$

Im Nennbetrieb ist ein Nennstrom I_N von 10,0 A wirksam. Daraus folgt:

$$P_{V,S} = 3 \cdot (\frac{I_N}{\sqrt{3}})^2 \cdot R_S = 3 \cdot (\frac{10{,}0\,\text{A}}{\sqrt{3}})^2 \cdot R_S = 3 \cdot (5{,}77\,\text{A})^2 \cdot 2{,}1\,\Omega = 210\,\text{W}$$

Die Impedanz Z_1 ist wesentlich höher als der Statorwiderstand R_1:

$$Z_1 = \frac{U_1}{\frac{I_N}{\sqrt{3}}} = \frac{400\,\text{V} \cdot \sqrt{3}}{10{,}0\,\text{A}} = 69\,\Omega >> R_S = 2{,}1\,\Omega$$

Daraus folgt, dass der Spannungsabfall am Statorwiderstand R_1 wesentlich geringer ist als die Eingangsspannung U_1 und dass die Eisenverluste als unabhängig von der Belastung betrachtet werden können.

$$\Delta U_{R,S} = R_S \cdot \frac{I_N}{\sqrt{3}} = 2{,}1\Omega \cdot \frac{I_N}{\sqrt{3}} = 2{,}1\Omega \cdot \frac{10{,}0\,\text{A}}{\sqrt{3}} = 12{,}1\,\text{V} << U_1 = 400\,\text{V}$$

c. Die Polpaarzahl der Maschine lässt sich aus der Abhängigkeit $n_S = f_S / p \cdot 60$ bestimmen.
Die Nenndrehzahl n_N beträgt 1430 U/min. Der Schlupf beträgt in der Regel 2..10 %. Bei einer Drehzahl von 1500 U/min bedeutet eine Abweichung von 10 % eine Drehzahl von 1350 U/min. Daraus folgt: Die Polpaarzahl beträgt 2.
d. Für den Schlupf gilt:

$$s = \frac{n_S - n_0}{n_S} = \frac{1500 - 1430}{1500} = \underline{4{,}7\%}$$

Die Luftspaltleistung P_δ berechnet sich aus der elektrischen Eingangsleistung P_{el} abzüglich der ohmschen Verluste $P_{V,S}$ sowie den Eisenverlusten P_{Fe}:

$$P_\delta = P_{el} - P_{V,S} - P_{Fe} = 6{,}03\,\text{kW} - 210\,\text{W} - 48{,}9\,\text{W} = \underline{5771\,\text{W}}$$

Die Rotorverluste sind proportional zum Schlupf:

$$P_\delta = 3 \cdot \frac{R_R'}{s} \cdot (I_R')^2 \rightarrow s \cdot P_\delta = 3 \cdot R_R' \cdot (I_R')^2 = P_{V,R}$$

$$\rightarrow P_{V,R} = s \cdot P_\delta = 0{,}047 \cdot 5771\,\text{W} = \underline{271\,\text{W}}$$

3.5 Identifikation Pumpenantrieb

a. Aufgrund der Dreieckschaltung ist der gemessene Widerstand $R_\Delta = ⅔\, R_S$ und somit:

$$R_S = \frac{3}{2} \cdot R_\Delta = \frac{3}{2} \cdot 30\,\text{m}\Omega = \underline{45\,\text{m}\Omega}$$

Aus der Praxis ist bekannt, dass die Hauptreaktanz X_h in Abbildung 3.6 und der Eisenwiderstand R_{Fe} viel grösser sind als die anderen Impedanzen des Modells. Deshalb können diese vernachlässigt werden.

Daraus ergibt sich bei der **Kurzschlussmessung** das modifizierte Ersatzbild in Abbildung 3.7.

Die Leistung P_k teilt sich auf in die Statorkupferverluste und die Luftspaltleistung:

$$P_k = P_{V,S} + P_\delta$$

$$P_k = 3 \cdot R_S \cdot I_S^2 + 3 \cdot \frac{R'_R}{s} \cdot I'^2_R \text{, wobei } s = 1 \text{ et } I_S = I'_R$$

$$P_k = 3 \cdot (R_S + R'_R) \cdot I_S^2 \text{ mit } I_S = I_{L,k} / \sqrt{3}$$

$$\rightarrow R'_R = \frac{P_k}{3 \cdot I_S^2} - R_S = \frac{5{,}6\text{kW}}{3 \cdot \left(220\text{A}/\sqrt{3}\right)^2} - 45\text{m}\Omega = 115\,\text{m}\Omega - 45\text{m}\Omega = \underline{70\text{m}\Omega}$$

Im **Leerlauf** entfällt der Rotorkreis in Abbildung 3.6 wegen s → 0. Der Spannungsabfall über R_S ist gegenüber der angelegten Spannung vernachlässigbar, so dass praktisch die ganze Spannung am Eisenwiderstand anliegt.

$$P_{Fe} \approx 3 \frac{U_{L,0}^2}{R_{Fe}} = P_{S,0} - 3R_S \left(I_{L,0}/\sqrt{3}\right)^2 = 4{,}5\text{kW} - 3 \cdot 45\text{m}\Omega \left(80\text{A}/\sqrt{3}\right)^2 = 4500\,\text{W} - 288\,\text{W} = 4212\,\text{W}$$

$$R_{Fe} \approx \frac{U_{L,0}^2}{P_{Fe}/3} = \frac{(400\text{V})^2}{4212\,\text{W}/3} = \underline{114\,\Omega}$$

Eine Asynchronmaschine, die im Leerlauf dreht, nimmt näherungsweise nur den Magnetisierungsstrom aus dem Netz auf.

$$\cos\varphi \approx \frac{P_{S,0}}{\sqrt{3} U_{L,0}\, I_{L,0}} = \frac{4500\,\text{W}}{\sqrt{3} \cdot 400\,\text{V} \cdot 80\,\text{A}} = 0{,}081$$

Der Spannungsabfall über dem Widerstand und der Streuinduktivität sind klein gegenüber der Spannung an der Hauptinduktivität. Somit kann gerechnet werden:

$$X_h \approx \frac{U_{L,0}}{I_{L,0}/\sqrt{3}} = \frac{400\text{V}}{80\text{A}/\sqrt{3}} = \underline{8{,}66\Omega}$$

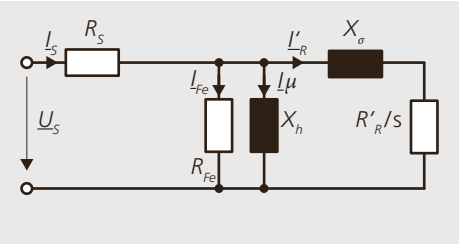


Abbildung 3.6: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Stranges der ASM mit den gesuchten Komponenten (Aufgabe 3.5)

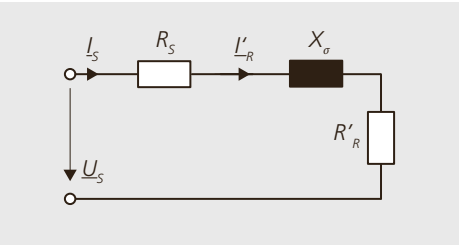


Abbildung 3.7: Ersatzschaltbild im Kurzschluss (Stillstand mit s = 1) und vernachlässigten Hauptreaktanz und Eisenwiderstand (Aufgabe 3.5).

Bei der **Kurzschlussmessung** gilt, basierend auf dem vereinfachten Ersatzschaltbild, folgender Zusammenhang:

$$\frac{U_{L,k}}{I_{L,k}/\sqrt{3}} = \sqrt{(X_\sigma)^2 + (R_S + R'_R)^2} \quad \text{mit} \quad X_\sigma = X_{S\sigma} + X_{R\sigma}$$

$$\rightarrow X_\sigma = \sqrt{\left(\frac{U_{L,k}}{I_{L,k}/\sqrt{3}}\right)^2 - (R_S + R'_R)^2} = \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{45\,\text{V}}{220\,\text{A}/\sqrt{3}}\right)^2 - (45\,\text{m}\Omega + 70\,\text{m}\Omega)^2}$$

$$X_\sigma = \sqrt{(354\,\text{m}\Omega)^2 - (115\,\text{m}\Omega)^2} = \underline{325\,\text{m}\Omega}$$

3.6 ASM mit U/f Steuerung

a. Für den Nennschlupf gilt

$$s_N = \frac{n_S - n_N}{n_S} = \frac{1500 - 1440}{1500} = \underline{4\%}$$

Das Kippmoment M_K lässt sich mithilfe der Klossschen Gleichung bestimmen, wobei s_N und s_K lediglich im Verhältnis zueinander stehen müssen (Abbildung 3.8):

$$\frac{M}{M_K} = \frac{2}{\left(\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}\right)} \rightarrow M_K = \frac{1}{2} \cdot M\left(\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}\right), \text{ wobei } M_K = M \text{ wenn } s_K = s$$

Das Nennmoment folgt aus der Nennleistung:

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega} = \frac{60 \cdot P_{N,mech}}{2\pi \cdot n_N} = \frac{60 \cdot 4{,}6\,\text{kW}}{2\pi \cdot 1440\,\frac{\text{U}}{\text{min}}} = 30{,}5\,\text{Nm}$$

$$M_K = \frac{1}{2} \cdot M_N\left(\frac{s_N}{s_K} + \frac{s_K}{s_N}\right) = \frac{1}{2} \cdot 30{,}5\,\text{Nm} \cdot \left(\frac{4}{25} + \frac{25}{4}\right) = 15{,}25\,\text{Nm} \cdot 6{,}41 = \underline{97{,}8\,\text{Nm}}$$

b. Übersteigt die Drehzahl n die Eckdrehzahl n_{eck}, befindet sich der Motor im Bereich der Feldschwächung. Für diesen Bereich gilt:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_S^2}{4\pi f_S \cdot \omega_S \cdot L_\sigma} = \frac{3 \cdot U_S^2}{4\pi f_S \cdot 2\pi f_S \cdot L_\sigma} = \frac{1}{f_S^2} \cdot \frac{3 \cdot U_S^2}{4\pi \cdot 2\pi \cdot L_\sigma} \propto \frac{1}{f_S^2}$$

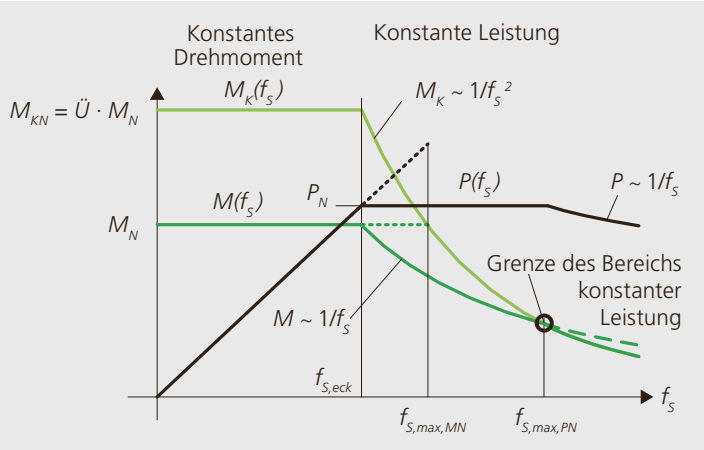


Abbildung 3.8: Drehmomentkennlinien im Bereich der Feldschwächung.

Das Kippmoment nimmt oberhalb der Eckdrehzahl n_{eck} in Abhängigkeit der Drehfrequenz f_S mit $1/f_S^2$ ab. Wenn das Drehmoment M oberhalb der Eckdrehzahl n_{eck} konstant gehalten wird, entsteht ein Schnittpunkt bei der Drehzahl $f_{S,max,MN}$. Abbildung 3.8 zeigt, dass sich die beiden Kurven schneiden; an jenem Punkt gilt: $M_{KN} = M_N$.
$\ddot{U}$ bedeutet Überlastbarkeit: $M_K = \ddot{U} \cdot M_N$.
Im Ankerstellbereich ($f_S < f_{S,eck}$) gilt:

$$\ddot{U} = \frac{M_K}{M_N} = \frac{97{,}8\,\text{Nm}}{30{,}5\,\text{Nm}} = 3{,}2$$

Da das Kippmoment M_K bei steigender Frequenz mit $1/f^2$ abnimmt, kann folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$M_K = M_{KN} \cdot \left(\frac{f_{S,eck}}{f_S}\right)^2 = M_N \text{ bei gesuchtem } f_{S,max,MN}$$

$$\rightarrow\ f_{S,\max,MN} = \sqrt{\frac{M_{KN}}{M_N}} \cdot f_{S,eck} = \sqrt{\ddot{U}} \cdot f_{S,eck} = \sqrt{3{,}2} \cdot 50\text{Hz} = \underline{90\text{Hz}}$$

Bei der maximal zulässigen Statorfrequenz $f_{S,max,MN}$ ist $M = M_K = M_N$ und daher auch $s = s_k$.
Die Drehzahl $n_{max,MN}$ bei der Statorfrequenz $f_{S,max,MN}$ lässt sich mit folgendem Zusammenhang ermitteln:

$$n_{\max,MN} = n_{0,\max,MN} \cdot (1 - s_{k,\max,MN}), \text{ wobei } n_{0,\max,MN} = \frac{60 \cdot f_{S,\max,MN}}{p}$$

Für den Kippschlupf gilt bei einer beliebigen Frequenz f_s ausgehend von den Werten beim Eckpunkt:

$$s_K \approx \frac{R_R'}{\omega_S \cdot L_\sigma} = \frac{f_{S,eck}}{f_S} \frac{R_R'}{\omega_{S,eck} \cdot L_\sigma} = \frac{f_{eck}}{f_{S,\max}} s_{K,eck} \rightarrow s_{K,\max,PN} = 0{,}25 \cdot \frac{50\text{Hz}}{90\text{Hz}} = \underline{0{,}139}$$

$$\rightarrow n_{\max,MN} = \frac{60 \cdot 90\text{Hz}}{2} \cdot (1 - 0{,}139) = \underline{2325\ \text{U/min}}$$

Eine ähnliche Berechnung kann für die Bedingung von konstanter Leistung im Feldschwächebereich durchgeführt werden.
Dort wird $f_{S,max,PN} = \ddot{U} \cdot f_{s,eck}$.

3.7 Synchronmaschine am Netz

a. Die Nenndrehzahl n_N ist:

$$n_N = \frac{60 \cdot f_S}{p} = \frac{60 \cdot 50\text{Hz}}{2} = \underline{1500\,\text{U/min}}$$

b. Das Kippmoment ist:

$$M_K = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{U_N}{n_N/60} \cdot \frac{U_P}{X_d} = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{60 \cdot 400\text{V}}{1500\,\text{U/min}} \cdot \frac{400\text{V}}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 0{,}01\text{H}} = \underline{973\,\text{Nm}}$$

Mit dem gegebenen Polradwinkel im Nennpunkt wird (Abbildung 3.9):

$$M_N = -M_K \cdot \sin(\vartheta) = -973\text{Nm} \cdot \sin(20°) = \underline{-333\text{N}}$$

c. Mit der Nenndrehzahl wird die Leistung:

$$P_N = \Omega \cdot M_N = \frac{2\pi \cdot 1500\,\mathrm{U/min}}{60} \cdot -333\,\mathrm{Nm} = \underline{-52{,}3\,\mathrm{kW}}$$

d. Im Leerlauf sind Amplitude und Lage der Klemmenspannung $\underline{U}_N$ und der Polradspannung $\underline{U}_P$ gleich:

$$I_0 = \frac{\underline{U}_N - \underline{U}_P}{jX_d} = 0\,\mathrm{A}$$

Die synchrone Reaktanz ist: $X_S = 2\pi\, f_S\, L_S = 2\pi \cdot 50\,\mathrm{Hz} \cdot 10\,\mathrm{mH} = 3{,}14\,\Omega$
Im Nennbetrieb gilt:

$$\underline{I}_S = \frac{\underline{U}_N - \underline{U}_P}{jX_S} = \frac{400\,\mathrm{V} - 400\,\mathrm{V}\, e^{j\frac{20}{180}\pi}}{j\,3{,}14\,\Omega} = \frac{(24 - j137)\,\mathrm{V}}{j\,3{,}14\,\Omega} = (-7{,}7 - j43{,}6)\,\mathrm{A} = 44{,}2\,\mathrm{A}\; e^{-j\frac{170}{180}\pi}$$

$$I_N = \sqrt{3} I_S = \sqrt{3} \cdot 44{,}2\,A = \underline{76{,}6\,\mathrm{A}}$$

Die Differenz der Spannungen kann auch trigonometrisch bestimmt werden (Abbildung 3.9).

$$\Delta U = \sqrt{(U_S - U_P \cdot \cos(\vartheta))^2 + (U_P \cdot \sin(\vartheta))^2}$$

$$\Delta U = \sqrt{(400\,\mathrm{V} - 400\,\mathrm{V} \cdot \cos(20°))^2 + (400\,\mathrm{V} \cdot \sin(20°))^2} = \sqrt{(24{,}1\,\mathrm{V})^2 + (137\,\mathrm{V})^2} = \underline{139\,\mathrm{V}}$$

e. Wenn Blindleistung ins Netz abgegeben wird, ist die Maschine im kapazitiven Betrieb. Da keine Wirkleistung umgesetzt wird, ist der Polradwinkel Null und $\underline{U}_S$ und $\underline{U}_P$ sind in Phase. Es ergibt sich das Diagramm in Abbildung 3.10.
Die Differenz der Spannungen wird trigonometrisch bestimmt:

$$\underline{U}_P = U_S - \Delta\underline{U} \rightarrow U_P = U_S + |\Delta U|, \text{ wobei } \Delta U = X_S \cdot I_S$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \sin(\varphi) = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \sin(\varphi) = 3 \cdot U_S \cdot I_S \cdot \sin(90°) = 3 \cdot U_S \cdot I_S$$

$$\rightarrow I_S = \frac{Q}{3 \cdot U_S} = \frac{20\,\mathrm{kvar}}{3 \cdot 400\,\mathrm{V}} = 16{,}7\,\mathrm{A}$$

$$\rightarrow \Delta U = 3{,}14\,\Omega \cdot 16{,}7\,\mathrm{A} = 52{,}3\,\mathrm{V}$$

$$\rightarrow U_P = 400\,\mathrm{V} + 52{,}3\,\mathrm{V} = \underline{452\,\mathrm{V}}$$

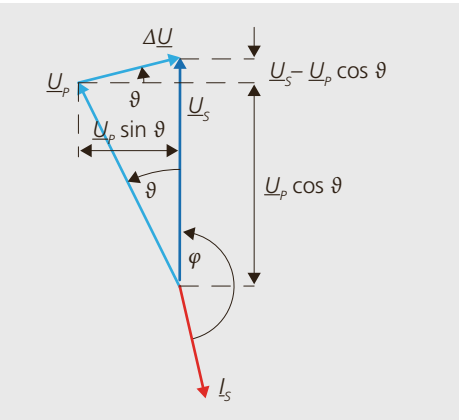


Abbildung 3.9: Zeigerdiagramm für den Nennbetrieb mit ϑ=20° (Aufgabe 3.7).

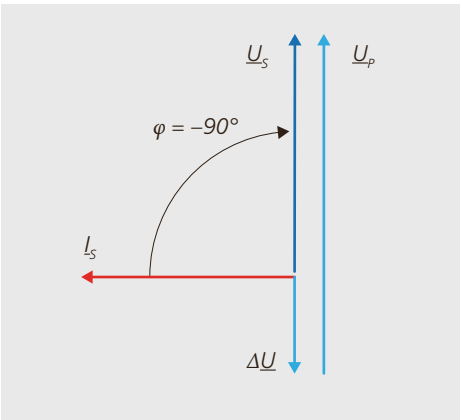


Abbildung 3.10: Zeigerdiagramm für rein kapazitiven Betrieb mit 90° voreilendem Strom (Aufgabe 3.7).

3.8 Synchronmaschine mit Dauermagneterregung

a. Der Strom I_N ist abhängig vom Drehmoment und der Drehmomentkonstante:

$$M_N = k_T \cdot I_N \rightarrow I_N = \frac{M_N}{k_T} = \frac{1{,}4\,\text{Nm}}{1{,}46\,\text{Nm/A}} = \underline{0{,}959\,\text{A}}$$

Wird eine Sternschaltung vorausgesetzt, so ist der Strangwiderstand $R_S = R_{2Ph}/2$:

$$P_{VS,N} = 3 \cdot \frac{R_{2Ph}}{2} \cdot (I_N)^2 = 3 \cdot \frac{32{,}3\Omega}{2} \cdot (0{,}959\,\text{A})^2 = \underline{44{,}6\,\text{W}}$$

Wäre die Maschine in Dreieck geschaltet, so ergäbe sich der gemessene Leiterwiderstand an den Klemmen zu

$$R_{2Ph} = \frac{R_S \cdot 2R_S}{3R_S} \quad \text{und daraus der Strangwiderstand zu } R_S = \tfrac{3}{2} R_{2Ph}$$

Nach Abbildung 3.11 berechnet sich in diesem Fall die Verlustleistung mit

$$P_{VS,N} = 3 \cdot \frac{3}{2} R_{2Ph} \cdot \left(\frac{I_N}{\sqrt{3}}\right)^2 = 3 \cdot \frac{3}{2} \cdot 32{,}3\Omega \cdot \left(\frac{0{,}959\,\text{A}}{\sqrt{3}}\right)^2 = \underline{44{,}6\,\text{W}}$$

was das gleiche Resultat ist wie für die Sternschaltung. Die Schaltungsart spielt demnach für diese Berechnung keine Rolle.

b. Die Leistung der Maschine berechnet sich aus der Drehmomentkonstanten, dem Strom und der Drehzahl oder aus der induzierten Spannung und dem Strom. Da ein reiner *q*-Strom eingespeist wird, sind U_p und I_N in Phase (Abbildung 3.12). Unter Annahme einer Sternschaltung gilt somit:

$$P = M \cdot \Omega = k_T I_N \frac{2\pi}{60} n = 3 U_P I_N \quad \text{und somit } U_P = \frac{k_T}{3} \frac{2\pi}{60} n$$

Bei dieser Voraussetzung für die Schaltung wird die anzulegende Spannung $U_N = \sqrt{3}\ U_S$ sein. Würde eine Dreieckschaltung angenommen, so müsste mit den unter a. ermittelten Widerständen und Impedanzen für die Stranggrössen gerechnet werden. Die anzulegende Spannung ist dann gleich der Strangspannung. Der resultierende Wert ist wiederum unabhängig von der Annahme für die Schaltung.

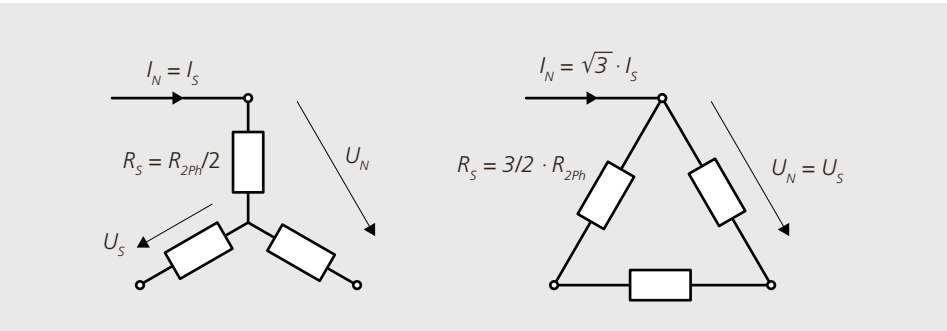


Abbildung 3.11: Vergleich der Schaltungsarten für die Berechnung der Statorverluste (Aufgabe 3.8).

In der Sternschaltung gilt für die Spannungsanteile:

$$U_P = \frac{k_T}{3}\frac{2\pi}{60}\cdot n = \frac{1{,}46\,\mathrm{Nm/A}}{3}\cdot\frac{2\pi}{60}4500\,\frac{\mathrm{U}}{\mathrm{min}} = 230\,\mathrm{V}$$

$$U_R = I_N\frac{R_{2Ph}}{2} = 0{,}959\,\mathrm{A}\cdot\frac{32{,}3\Omega}{2} = 15{,}5\,\mathrm{V}$$

Für die Berechnung von U_X muss die anzulegende Frequenz bestimmt werden:

$$f_S = \frac{n}{60}p = \frac{4500\,\mathrm{U/min}}{60}2 = 150\,\mathrm{Hz}$$

$$U_X = X_S\cdot I_N = \omega_S\cdot\frac{L_{2Ph}}{2}I_N = 2\pi\cdot f_S\frac{L_{2Ph}}{2}I_N = 34{,}4\Omega\cdot 0{,}959\,\mathrm{A} = 33{,}0\,\mathrm{V}$$

Die Strangspannung ist gemäss Abbildung 3.12:

$$U_S = \sqrt{(U_R+U_P)^2+U_X^2} = \sqrt{(15{,}5\,\mathrm{V}+230\,\mathrm{V})^2+(33\,\mathrm{V})^2} = 248\,\mathrm{V}$$

Die benötigte Klemmenspannung ist:

$$U_N = \sqrt{3}\cdot 248\,\mathrm{V} = \underline{429\,\mathrm{V}}$$

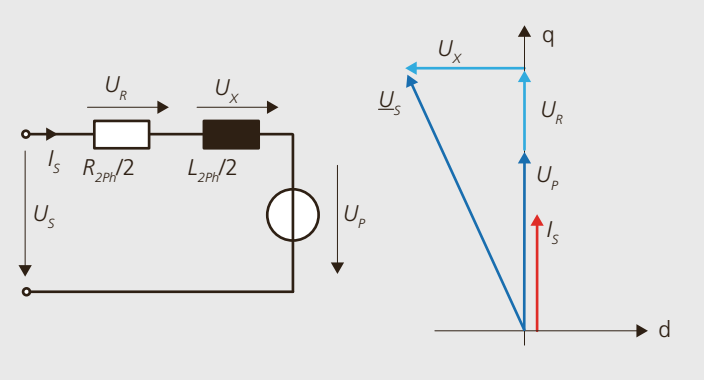


Abbildung 3.12: Ersatzschaltbild für Sternschaltung und Zeigerdiagramm mit I_S als reinem q-Strom (Aufgabe 3.8).

4. Leistungselektronik

4.1 Diodengleichrichter

a. Der Kondensator lädt sich bis auf den Spitzenwert der Netzspannung auf:

$$\hat{u}_d = \hat{u}_{UV} = 115\,\text{V}\sqrt{2} = \underline{162{,}6\,\text{V}}$$

b. Der Mittelwert bei dreiphasiger Gleichrichtung beträgt ohne kapazitive Glättung:

$$\bar{u}_d = U_d = 1{,}35 U_{UV} = 1{,}35 \cdot 115\,\text{V} = \underline{155{,}3\,\text{V}}$$

Damit wird sich lastabhängig eine Spannung zwischen dem Mittel- und den Spitzenwert einstellen: $\underline{\bar{u}_d \leq u_d \leq \hat{u}_d}$.

c. Die Welligkeit der Zwischenkreisspannung hat die 6-fache Netzfrequenz:

$$f_d = 6 f_N = 6 \cdot 400\,\text{Hz} = \underline{2{,}4\,\text{kHz}}$$

Es treten daher die Frequenzen f_d und Vielfache davon auf. Die ersten 4 sind: 2,4 kHz; 4,8 kHz; 7,2 kHz und 9,6 kHz.

d. Vergrössern der Netzimpedanz L_S durch den Einbau weiterer Induktivitäten.

4.2 Verluste in einer Diodenbrücke

a. Die Zwischenkreisleistung ist gegeben durch die Mittelwert von Zwischenkreisstrom und -spannung:

$$P_d = U_d I_d \quad \Rightarrow \quad I_d = P_d / U_d = 10\,\text{kW}/540\,\text{V} = \underline{18{,}5\,\text{A}}$$

b. Jede Diode führt den Strom während einem Drittel der Zeit und damit wird der Mittelwert ein Drittel des Zwischenkreisstromes:

$$\bar{i}_F = I_d / 3 = 18{,}5\,\text{A}/3 = \underline{6{,}17\,\text{A}}$$

c. Bei einen festen Spannungsabfall von 2 V pro Diode werden die Verluste pro Diode:

$$P_D = \bar{i}_F \cdot 2\,\text{V} = 6{,}17\,\text{A} \cdot 2\,\text{V} = \underline{12{,}4\,\text{W}}$$

d. Die aufgenommene Leistung P_{Auf} des Stromrichters entspricht der Zwischenkreisleistung P_d plus den Verlusten P_D aller Dioden. Damit gilt für den Wirkungsgrad η:

$$P_{Auf} = P_d + 6 P_D = 10\,\text{kW} + 6 \cdot 12{,}4\,\text{W} = \underline{10{,}07\,\text{kW}}$$

$$\Rightarrow \quad \eta = P_d / P_{Auf} = 10\,\text{kW}/10{,}07\,\text{kW} = \underline{99{,}3\%}$$

4.3 Thyristorbrücke

a. Der maximale Spannungsmittelwert ist gleich wie bei einer Diodenbrücke:

$$\bar{u} = U_{di0} = 1{,}35\, U_{UV} = 1{,}35 \cdot 173\,\text{V} = \underline{233{,}6\,\text{V}}$$

b. In Funktion des Zündwinkels resultiert anschliessend:

$$U_{di\alpha} = 1{,}35\, U_{UV} \cos(\alpha) = 233{,}6\,V \cos(60°) = \underline{116{,}8\,\text{V}}$$

c. Die Phasenverschiebung des Netzstromes ist gleich dem Zündwinkel: $\alpha = 60°$

4.4 Einphasiger Wechselspannungssteller mit ohmscher Last

a. Der Heizwendel einer Glühlampe kann bei 50 Hz als rein ohmsche Last betrachtet werden. Für den Widerstand gilt, ausgedrückt durch Spannung und Leistung:

$$P = U^2/R \quad \Rightarrow \quad R = U^2/P = 230\,\mathrm{V}^2/75\,\mathrm{W} = \underline{705{,}3\Omega}$$

b. Spannungen und Leistungen bei $\alpha = 30°$ und $\alpha = 90°$. Man beachte, dass in der Formel die Winkel in Radiant eingesetzt werden müssen, d. h.: $30° \mathrel{\hat{=}} \pi/6$ und $90° \mathrel{\hat{=}} \pi/2$

$$U_2 = U_1\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin(2\alpha)} \quad \Rightarrow \quad P = U^2/R$$

$$U_{2,\alpha=\pi/6} = 230\,\mathrm{V}\sqrt{1 - \frac{\pi/6}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin(\pi/3)} = 230\,\mathrm{V}\cdot 0{,}986 = \underline{226{,}7\,\mathrm{V}}$$

$$P_{2,\alpha=\pi/6} = 226{,}7\,\mathrm{V}^2/705{,}3\Omega = \underline{72{,}8\,\mathrm{W}}$$

$$U_{2,\alpha=\pi/2} = 230\,\mathrm{V}\sqrt{1 - \frac{\pi/2}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin(\pi)} = 230\,\mathrm{V}\cdot 0{,}707 = \underline{162{,}6\,\mathrm{V}}$$

$$P_{2,\alpha=\pi/2} = 162{,}6\,\mathrm{V}^2/705{,}3\Omega = \underline{37{,}5\,\mathrm{W}}$$

c. Der Stromeffektivwert in der Last, der durch die Lastspannung und den Lastwiderstand ausgedrückt werden kann, ist gleich dem des Netzstromes. Daraus lässt sich die Scheinleistung berechnen:

$$I_{2,\alpha=\pi/6} = U_{2,\alpha=\pi/6}/R = 226{,}7\,\mathrm{V}/705{,}3\Omega = 0{,}321\ \mathrm{A}$$

$$S_{1,\alpha=\pi/6} = U_1 \cdot I_{2,\alpha=\pi/6} = 230\,\mathrm{V}\cdot 0{,}321\ \mathrm{A} = \underline{73{,}9\,\mathrm{VA}}$$

$$I_{2,\alpha=\pi/2} = U_{2,\alpha=\pi/2}/R = 162{,}6\,\mathrm{V}/705{,}3\Omega = 0{,}231\ \mathrm{A}$$

$$S_{1,\alpha=\pi/2} = U_1 \cdot I_{2,\alpha=\pi/2} = 230\,\mathrm{V}\cdot 0{,}231\ \mathrm{A} = \underline{53{,}0\,\mathrm{VA}}$$

d. Der Leistungsfaktor λ ist das Verhältnis von Wirk- zu Blindleistung:

$$\lambda_{\alpha=\pi/6} = P_{\alpha=\pi/6}/S_{1,\alpha=\pi/6} = 72{,}8\,\mathrm{W}/73{,}9\,\mathrm{VA} = \underline{0{,}985}$$

$$\lambda_{\alpha=\pi/2} = P_{\alpha=\pi/2}/S_{1,\alpha=\pi/2} = 37{,}5\,\mathrm{W}/53{,}0\,\mathrm{VA} = \underline{0{,}708}$$

4.5 Abwärtssteller und einphasige Brücke

a. Für die Ausgangsspannung bei einem Modulationsgrad von $M = 0{,}7$ gilt:

$$U_a = m \cdot U_d = 0{,}7 \cdot 300\,\mathrm{V} = \underline{210\,\mathrm{V}}$$

Mit dem gegebenen Strom von $\hat{i}_{HL} = 20$ A der Halbleiter folgt für die Leistung in diesem Arbeitspunkt:

$$P_a = U_a \cdot \hat{i}_{HL} = 210\,\mathrm{V}\cdot 20\,\mathrm{A} = 4{,}2\,\mathrm{kW}$$

b. Bei einer einphasigen Brücke kann an der Last maximal die Zwischenkreisspannung auftreten und der maximale Halbleiterstrom fliessen:

$$|P_{\max}| = U_d \cdot \hat{i}_{HL} = 300\,\mathrm{V}\cdot 20\,\mathrm{A} = \underline{6\,\mathrm{kW}}$$

c. Der Scheitelwert der Spannung ist gleich der Zwischenkreisspannung $U_d = 300$ V. Die Effektivwerte von harmonischen Strom- und Spannungsgrundschwingungen entsprechen den

Scheitelwerten jeweils geteilt durch Wurzel Zwei:

$U = \hat{u}/\sqrt{2} = 300\text{V}/\sqrt{2} = \underline{212\text{V}};\qquad I = \hat{i}/\sqrt{2} = 20\,\text{A}/\sqrt{2} = \underline{14{,}1\,\text{A}}$

Die bei einem $\cos\varphi = 1$ mögliche Leistung beträgt $P = U \cdot I = 3\,\text{kW}$.

d. Bei konstanter Zwischenkreisspannung gilt für den von der Maschine in den Zwischenkreis fliessenden Strom:

$I_d = P/U_d = 2\text{kW}/300\text{V} = \underline{6{,}67\,\text{A}}$

Auf diesen Strom muss auch eine Bremsschaltung ausgelegt werden.

4.6 Selbstgeführte dreiphasige Brücke

a. Für die maximale Aussenleiterspannung gilt mit einem maximalen Modulationsgrad von $M = 1{,}0$:

$\hat{u}_{UV} = \sqrt{3}\dfrac{U_d}{2} = \underline{467{,}7\,\text{V}}$ und $U_{UV} = \dfrac{\hat{u}_{UV}}{\sqrt{2}} = \underline{330{,}7\,\text{V}}$

b. Mit der Injektion von einer dritten Harmonischen, d. h. einem Modulationsgrad von $M = 1{,}155$ lässt sich die Spannung weiter vergrössern:

$\hat{u}_{UV} = U_d = \underline{540\,\text{V}}$ und $U_{UV} = \dfrac{U_d}{\sqrt{2}} = \underline{381{,}8\,\text{V}}$

c. Bei einem Strom-Scheitelwert von 100 A und Sinusform beträgt der Effektivwert $I_{eff} = \hat{i}/\sqrt{2} = 100\,\text{A}/\sqrt{2} = \underline{70{,}7\,\text{A}}$.

Für die Schein- und Wirkleistungen resultieren damit:

$S = \sqrt{3}UI;\qquad P = \sqrt{3}UI\cos(\varphi);$

$S_{M=1} = \sqrt{3}\cdot 330{,}7\text{V}70{,}7\,\text{A} = \underline{40{,}5\,\text{kVA}};\qquad P_{M=1} = 40{,}5\,\text{kVA}\cdot 0{,}8 = \underline{32{,}4\,\text{kW}}$

$S_{M=1{,}155} = \sqrt{3}\cdot 381{,}8\text{V}100\,\text{A} = \underline{46{,}8\,\text{kVA}};\qquad P_{M=1{,}155} = 46{,}8\,\text{kVA}\cdot 0{,}8 = \underline{37{,}4\,\text{kW}}$

d. Leistung bei Direktanschluss des Motors ans Netz:

$P = \sqrt{3}UI\cos(\varphi) = \sqrt{3}\cdot 400\text{V}\cdot 70{,}7\text{A}\cdot 0{,}8 = \underline{39{,}2\,\text{kW}}$

Durch den Spannungsverlust über dem Diodengleichrichter und dem Ausgansstromrichter kann am Ausgang des Stromrichters nicht mehr der Wert der vollen Netzspannung eingestellt werden. Deshalb sinkt die mögliche Leistung mit Stromrichter leicht ab.

4.7 Verluste in einer 3-Phasenbrücke

a. Pro Brückenzweig fliesst der Strom immer durch einen Leistungshalbleiter. Für die drei Zweige des Stromrichters gilt damit:

$P_L = 3u_F\cdot\bar{i}_F = 3\cdot 2\text{V}\cdot 9\,\text{A} = \underline{54\text{W}}$

b. Schaltverluste aller 6 Halbleiter bei 10 kHz:

$P_S = 6f_S\cdot E_S = 6\cdot 10^4\cdot 0{,}8\,\text{mW} = \underline{48\,\text{W}}$

c. Bei steigender Zwischenkreisspannung steigen die Schaltverluste proportional zur Spannung an. Die Leitverluste bleiben gleich:

$P_{S,400\text{V}} = P_{S,300\text{V}}\,(400\text{V}/300\text{V}) = 48\text{W}\cdot 1{,}33 = \underline{64\text{W}}$

$P_{tot} = P_L + P_{S,400\text{V}} = 54\text{W} + 64\text{W} = \underline{118\,\text{W}}$

5. Antriebe

5.1 Anlaufverfahren

a. Das Nennmoment ist gemäss den Leistungsdaten:

$$M_N = \frac{5500\text{W} \cdot 60}{1440\text{U/min} \cdot 2\pi} = 36{,}5\text{Nm}$$

Der grafisch geschätzte Mittelwert der Momentenkurve (Abbildung 5.1) ergibt:

$$M_{M,AVG,1} \approx 1{,}6 \cdot M_N = 1{,}6 \cdot 36{,}5\text{Nm} \approx 58\text{Nm}$$

$$\dot{\Omega} = \frac{M_{M,AVG,1}}{J} = \frac{58\text{Nm}}{0{,}02\text{kgm}^2} = 2900\ \text{rad}/\text{s}^2$$

$$\rightarrow \dot{n}_1 = 2900\ \text{rad}/\text{s}^2 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{60 \cdot s}{\text{min}} = 27700\ \frac{\text{U/min}}{\text{s}}$$

Bis Synchrondrehzahl (die aber nur annähernd erreicht wird):

$$\Delta t = \frac{n_S}{\dot{n}_1} = \frac{1500\,\text{U/min}}{27700\ \frac{\text{U/min}}{\text{s}}} = \underline{54\text{ms}}$$

b. Bis 750 U/min gilt: $M_{M,AVG,2} \approx 1{,}4 \cdot M_N$, danach gilt: $M_{M,AVG,3} \approx 1{,}8 \cdot M_N$

Im Sternbetrieb ist das Drehmoment um den Faktor 3 reduziert:

$$\dot{n}_2 = \dot{n}_1 \cdot \frac{1{,}4}{1{,}6 \cdot 3} = 8080\,\frac{\text{U/min}}{\text{s}}$$

Beschleunigung auf 750 U/min: $\Delta t_2 = \frac{750\ \text{U/min}}{8080\ \frac{\text{U/min}}{\text{s}}} = 93\text{ms}$

Im Dreieckbetrieb gilt:

$$\dot{n}_3 = \dot{n}_1 \cdot \frac{1{,}8}{1{,}6} = 31163\ \frac{\text{U/min}}{\text{s}} \rightarrow \Delta t_3 = \frac{750\ \text{U/min}}{31163\ \frac{\text{U/min}}{\text{s}}} = 24\text{ms}$$

Ergibt total: $\Delta t_{2+3} = 93\text{ms} + 24\text{ms} = \underline{117\text{ms}}$

c. Bis 1250 U/min =gilt: $M_{M,AVG,4} = M_{M,AVG,1} \approx 1{,}6 \cdot M_N$, danach gilt: $M_{M,AVG,5} = M_{M,AVG,3} \approx 1{,}8 \cdot M_N$

Für den Anlauf im Stern gilt:

$$\dot{n}_4 = \frac{\dot{n}_1}{3} = 9230\,\frac{\text{U/min}}{\text{s}} \rightarrow \Delta t_4 = \frac{1250\ \text{U/min}}{9230\,\frac{\text{U/min}}{\text{s}}} = 135\text{ms}$$

Im Dreieckbetrieb gilt:

$$\dot{n}_4 \approx \dot{n}_3 = 31163\,\frac{\text{U/min}}{\text{s}} \rightarrow \Delta t_5 = \frac{250\text{U/min}}{31163\,\frac{\text{U/min}}{\text{s}}} = 8\text{m}$$

Das Total ist die Summe der beiden Betriebsarten:

$$\Delta t_{4+5} = 135\ ms + 8\text{ms} = \underline{143\text{ms}}$$

d) $\dot{n}_6 = \frac{\dot{n}_1}{3} \rightarrow \Delta t_6 = 3 \cdot \Delta t_1 = \underline{162\text{ms}}$

5.2 Stern-Dreieck

a. Die Impedanz eines Stranges liegt an einer unterschiedlichen Spannung, daraus folgt:

$$I_{S(\text{Stern})} = \frac{230\text{V}}{Z}; \quad I_{S(\text{Dreieck})} = \frac{400\text{V}}{Z} = \sqrt{3} \cdot I_{S(\text{Stern})}$$

→ Die Spannung am Strang wird um das $\sqrt{3}$-fache grösser. Damit wird auch der Strom vergrössert. Es besteht daher die Gefahr der Überhitzung! Durch Sättigung im Eisen kann das Problem noch verschärft werden.

b. $R_S = 0{,}4\ \Omega$ (Widerstand einer Phase oder Stranges)

Bei Sternschaltung fliesst der Nennstrom:

$$P_{V,S} = 3 \cdot 0{,}4\Omega \cdot (12\text{A})^2 = \underline{173\text{W}}$$

Bei Dreieckschaltung ist der Strom um $\sqrt{3}$ grösser:

$$P_{V,\Delta} = 3 \cdot 0{,}4\Omega \cdot (\sqrt{3} \cdot 12\text{A})^2 = \underline{518\text{W}}$$

c. In der Zuleitung fliesst wegen der Dreieckschaltung ein nochmals um den Faktor $\sqrt{3}$ vergrösserter Strom:

$$I_{L(\text{Dreieck})} = \sqrt{3} \cdot I_{Str(\text{Dreieck})} = 3 \cdot I_{Str(\text{Stern})} = 3 \cdot 12\text{A} = \underline{36\text{A}}$$

5.3 ASM in Stern-Schaltung

a. Bei Sternschaltung ist die Strangspannung um $\sqrt{3}$ kleiner als die Klemmenspannung (Abbildung 5.2):

$$U_S = U_N / \sqrt{3} = 400\text{V} / \sqrt{3} = \underline{231\text{V}}$$

b. Schein-, Wirk- und Blindleistung:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n = \sqrt{3} \cdot 400\text{V} \cdot 7\text{A} = \underline{4{,}85\text{kVA}}$$
$$P = S \cdot \cos(\varphi) = 4850\text{VA} \cdot 0{,}8 = \underline{3{,}88\text{kW}}$$
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \underline{2{,}91\text{kVAr}}$$

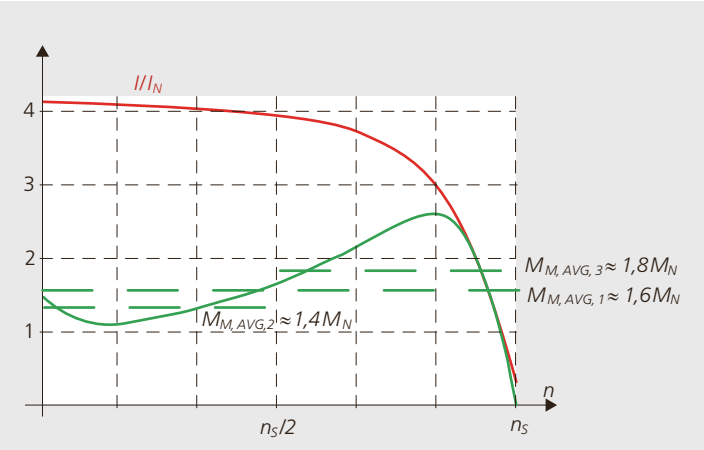


Abbildung 5.1: Drehmoment und Stromkurve mit eingezeichneten grafischen bestimmten Mittelwerten (Aufgabe 5.1).

c. Eine 2- oder 4-polige IE3-ASM-Maschine mit etwa 4 kW hat gemäss Vorschriften einen Wirkungsgrad von ca. 87 %:

$$P_{me} \approx 0{,}87 P_{el} = 3{,}88\text{kW} \cdot 0{,}87 \approx \underline{3{,}38\text{kW}}$$

d. Stator-Kupferverluste:

$$P_{V,Cu} = 3 \cdot R_S \cdot I_S^2 = 3 \cdot 1{,}2\Omega \cdot (7\text{A})^2 = \underline{176\text{W}}$$

5.4 Netzfrequente Speisung

a. Aus der gegebenen Nenndrehzahl ist erkennbar, wo die nächste Synchrondrehzahl ist:

$$n = 1440\ \text{U/min} \rightarrow n_s = 1500\ \text{U/min} \rightarrow p = \underline{2}$$

$$s_N = \frac{60\text{U/min}}{1500\text{U/min}} = \underline{4\%}$$

b. Mit dem Strangwiderstand $R_S = 1{,}5\,\Omega$ und Sternschaltung ergibt sich für die Statorverluste:

$$\rightarrow P_{V,S} = 3 \cdot 1{,}5\Omega \cdot (5{,}9\text{A})^2 = 156\text{W}$$

Die Rotorverluste werden über die Luftspaltleistung bestimmt.

$$\rightarrow P_\delta = \frac{P_{mech}}{1 - s}, \text{ mit } s_N = 4\%:$$

$$P_{\delta 1} = \frac{3000\text{W}}{0{,}96} = 3125\text{W}\ ;\quad \eta_1 = \frac{3000\text{W}}{P_{\delta 1} + P_{V,S}} = \frac{3000\text{W}}{3125\text{W} + 156\text{W}} = \underline{91{,}4\%}$$

c. Mit dem Strom von 4,2 A sind die Kupferverluste

$$P_{V,S2} = 3 \cdot 1{,}5\Omega \cdot (4{,}2\text{A})^2 = 79{,}4\text{W}$$

Wegen der bei kleinen Belastungen nahezu linearen Kennlinie ist der Schlupf bei einem Viertel des Nennmoment noch ein Viertel so gross wie im Nennbetrieb. Ausgehend von der synchronen Winkelgeschwindigkeit Ω_S wird:

$$P_{mech,2} = \Omega_S \cdot (1 - s_2)\frac{M_N}{4} = \frac{\Omega_N}{(1 - s_N)} \cdot (1 - s_2)\frac{P_N}{4 \cdot \Omega_N} = \frac{(1 - s_2)}{(1 - s_N)} \cdot P_N = \frac{0{,}99}{0{,}96}\frac{3000\text{W}}{4} = 773\text{W}$$

und daraus für den Wirkungsgrad mit der Luftspaltleistung:

$$P_{\delta 2} = \frac{773\text{W}}{0{,}99} = 781\text{W}\ ;\quad \eta_2 = \frac{P_{mech,2}}{P_{\delta 2} + P_{V,S2}} = \frac{773\text{W}}{781\text{W} + 79{,}4\text{W}} = \underline{89{,}8\%}$$

d. Da nur die angelegte Last ändert und die Drehzahl nicht gesteuert werden muss, führt ein Frequenzumrichter nicht zu einer Reduktion der Verluste. Er trägt im Gegenteil mit dem eigenen

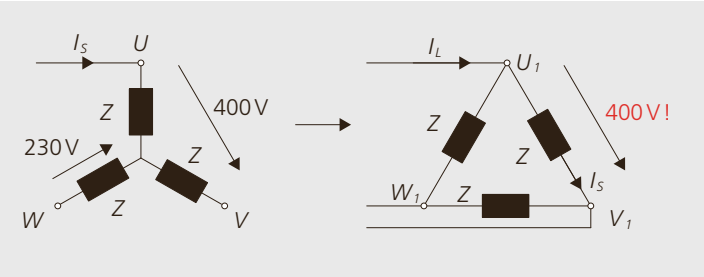


Abbildung 5.2: Vergleich Stern- und Dreieckschaltung (Aufgabe 5.2).

Wirkungsgrad zu einer Verschlechterung des Gesamtsystems bei. (Bei Betrieb mit reduziertem Feld wäre bei Teillast eine leichte Verlustreduktion möglich.)

5.5 U/f-Steuerung einer ASM

a. Zuerst wird der Strangstrom bei Leerlauf und Nennlast ermittelt.

$$I_{S,0} = I_0 / \sqrt{3} = 3\text{A} / \sqrt{3} = \underline{1{,}73\text{A}}$$

$$I_{S,N} = I_N / \sqrt{3} = 5{,}9\text{A} / \sqrt{3} = \underline{3{,}41\text{A}}$$

Die Boostspannung (zwischen zwei Zuleitern) ist im Stillstand nur durch den ohmschen Widerstand bestimmt:

$$U_{boost,0} = R_S I_0 = 1{,}5\Omega \cdot 1{,}73\text{A} = \underline{2{,}60\text{V}}$$

b. Boostspannung bei Nennlast:

$$U_{boost,N} = R_S I_N = 1{,}5\Omega \cdot 3{,}41\text{A} = \underline{5{,}11\text{V}}$$

c. Die Ausgangsspannung des Stromrichters bei Nenndrehzahl und Nennlast entspricht dem Nennpunkt der Maschine, d. h. $U_n = 400\,\text{V}$.

d. Nennschlupf der Maschine:

$$s_N = \frac{n_S - n_N}{n_N} = \frac{1500\ \text{U/min} - 1440\ \text{U/min}}{1500\ \text{U/min}} = \underline{4{,}0\%}$$

e. Für die Leerlaufdrehzahl bei f_S gilt:

$$n_0 = f_S 60 / p = 35\text{Hz} \cdot 60/2 = \underline{1050\ \text{U/min}}$$

Die elektrische Frequenz im Rotor ist gegeben durch die Beziehung: $f_R = f_{S,N} s_N$. Aus den Daten im Nennpunkt lässt sich die notwendige Rotorfrequenz für Nennmoment bestimmen:

$$f_{R,N} = f_{S,N} s_N = 50\text{Hz} \cdot 4{,}0\% = \underline{2{,}0\text{Hz}}$$

Setzt man in der Näherung des Drehmomentes für einen kleinen Schlupf die Frequenzen ein, so ergibt sich, dass das Drehmoment proportional zu der Rotorfrequenz verläuft:

$$M = \frac{2M_K}{s_K} s = \frac{2M_K}{s_K} \frac{f_R}{f_S} = 2M_K \frac{2\pi f_S L_\sigma}{R'_R} \frac{f_R}{f_S} = 2M_K \frac{2\pi L_\sigma}{R'_R} f_R$$

Zu beachten ist, dass in dieser Gleichung das Kippmoment nur dann konstant ist, wenn das Verhältnis U/f und damit die Magnetisierung der Maschine konstant ist. Dies ist nur im Spannungsstellbereich der Fall. Demnach muss die Statorfrequenz um die Rotorfrequenz bei Nennbelastung angehoben werden:

$$f_S = f_{S,0} + f_{R,N} = 35\text{Hz} + 2{,}0\text{Hz} = \underline{37\text{Hz}}$$

5.6 U/f-Steuerung einer SM

a. Die Definitionen für die Bezeichnungen und die Winkel sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Der Strom ist zu der Polradspannung U_P in Phase. Damit ist der innere Leistungsfaktor $\cos\varphi = 1$. Der Strom der Maschine ist wegen der Sternschaltung gleich dem

Strangstrom.

$$P_{i,me} = 3 \cdot U_P \cdot I_{S,N} \cdot \cos\varphi = 3 \cdot \frac{U_{S,0}}{\sqrt{3}} I_{S,N} \cdot 1$$

$$= 3 \cdot \frac{432\text{V}}{\sqrt{3}} 15\text{A} \cdot 1 = \underline{11{,}2\text{kW}}$$

b. Strangspannung bei Sternschaltung:

$$U_{S,N} = U_N / \sqrt{3} = 480\text{V}/\sqrt{3} = \underline{277\text{V}}$$

c. Boostspannung für Stillstand und Moment Null: Dazu ist kein Strom notwendig und entsprechend ist die Boostspannung Null. Boostspannung bei Stillstand und Nennmoment: Hier muss Nennstrom fliessen.

$$U_{boost} = \sqrt{3} \cdot R_S I_S = \sqrt{3} \cdot 0{,}8\Omega \cdot 15\text{A} = \underline{20{,}8\text{V}}$$

d. Als erstes wird die Polradspannung (d. h. Leerlaufspannung eines Stranges) im Nennpunkt benötigt:

$$U_{P,N} = U_{N,0} / \sqrt{3} = 432\text{V}/\sqrt{3} = \underline{249\text{V}}$$

Die Polradspannung ist immer proportional zur Drehzahl und es gilt:

$$U_P = U_{P,N} \frac{f_S}{f_{S,N}} = \underline{249\text{V} \frac{f_S}{60\text{Hz}}}$$

e. Der Strom fliesst in Phase zur Polradspannung, d. h. die Spannung an der Induktivität L_d ist gegenüber der Polradspannung 90 Grad voreilend. Damit resultieren für Spannung und Induktivität:

$$U_{S,N} = \sqrt{U_P^2 + U_L^2} = 480\text{V}/\sqrt{3} = 277\text{V}$$

$$\Rightarrow \quad U_{Ld} = \sqrt{U_{S,N}^2 - U_P^2} = \sqrt{(277\text{V})^2 - (249\text{V})^2} = \underline{121\text{V}}$$

Für die Impedanz X_d und die Induktivität L_d gilt schliesslich:

$$X_S = \omega L_S = U_L / I_S = 121\text{V}/15\text{A} = 8{,}09\Omega$$

$$L_S = X_S / \omega = 8{,}09\Omega / (2\pi 60\text{Hz}) = \underline{21{,}5\text{mH}}$$

f. Anschluss der Maschine an das 400 V / 50 Hz-Netz im Leerlauf: Strang- und Polradspannungen bei 50 Hz:

$$U_S = 400\text{V}/\sqrt{3} = 231\text{V}$$

$$U_P = U_{P,N} \frac{50\,Hz}{60\,Hz} = 249\text{V} \cdot 0{,}833 = 207\text{V}$$

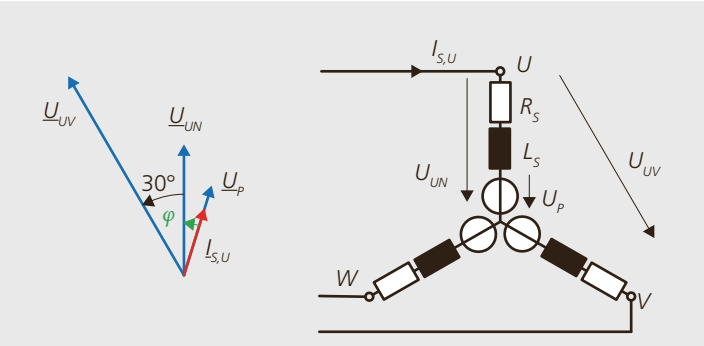


Abbildung 5.3: Zählgrössen und Zeigerdiagramm der SM (Aufgabe 5.6).

Die Differenz zwischen Strang- und Polradspannung ergibt einen reinen Blindstrom, weil im Leerlauf bei Vernachlässigung des Strangwiderstandes die Wirkleistung Null ist:

$$I_S = U_{LS}/X_{LS} = \frac{U_S - U_P}{\omega_{LS}}$$

$$= \frac{231\text{V} - 207\text{V}}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 21{,}5\text{mH}} = \underline{3{,}55\text{A}}$$

5.7 Feldschwächbetrieb bei einer PSM

a. Der feldschwächende Strom I_d wird durch den Spannungsabfall über der Induktivität L_d erzeugt. Die Klemmenspannung bleibt fest auf 400 V. Die Polradspannung dagegen steigt mit dem Verhältnis 75 Hz / 50 Hz, d. h. um den Faktor 1,5. Der Spannungsabfall pro Strang bestimmt sich durch:

$$U_{Ld} = U_S - U_P = 400\text{V}/\sqrt{3} - (75\text{Hz}/50\text{Hz}) \cdot 360\text{V}/\sqrt{3} = -80{,}8\text{V}$$

Der Strom I_d durch L_d ist ausgedrückt durch Spannung und Impedanz:

$$I_d = \frac{U_{Ld}}{\omega L_d} = \frac{-80{,}8\text{V}}{2\pi \cdot 75\text{Hz} \cdot 0{,}021\,\Omega} = \underline{-8{,}16\text{A}}$$

b. Der Zeiger des noch verfügbare Strom in q-Richtung steht senkrecht auf dem Zeiger des Stromes I_d. Zusammen bilden sie den Statorstrom. Daher gilt:

$$I_q = \sqrt{I_n^2 - I_d^2} = \sqrt{15\text{A}^2 - 8{,}16\text{A}^2} = \underline{12{,}6\text{A}}$$

Für die Drehmomentbildung stehen also nur noch 84 % des ursprünglichen Stromes zur Verfügung, um den gleichen Faktor wird auch das zulässige Moment kleiner.

Hinweis: Durch die Feldschwächung wird eine Spannung über den Impedanzen der Maschine aufgebaut, welche die resultierende Klemmenspannung reduziert. Die innere Polradspannung der Maschine ändert sich dadurch aber nicht. Somit kann mit der gleichen Drehmomentkonstante der Maschine für die Momentenbildung gerechnet werden.

c. Bei der SM entsteht erst bei Feldschwächung ein feldbildender Strom. Dadurch wird der momentbildende (bei gleichem $I_{S,n}$) kleiner.

Umgekehrt bei der ASM: Bei Feldschwächung wird der feldbildende Strom kleiner und damit der zulässige momentbildende grösser.

Hinweis: Da das Magnetfeld der ASM durch den feldbildenden Strom erzeugt wird, reduziert sich bei Feldschwächung die Drehmomentkonstante bezüglich des momentenbildenden Stromes.

6. Auslegung und Realisierung

6.1 Betriebsart und Erwärmung

a. Das gegebene Lastprofil entspricht einem Dauerbetrieb (keine Ausschaltintervalle) mit Aussetzleistung (Leerlauflast z. B. Reibung). Dies ist der sogenannte S6-Betrieb. Beispiele dafür sind:

- Bearbeitungsmaschine (wie z. B. Fräsen oder Schleifen) mit zyklischer Belastungsphasen und Reibmoment
- Hubwerk mit Lastfahrt bei Beladung und Zurückfahrt ohne Last auf den Ausgangspunkt
- Walzwerke mit Belastungszyklus

b. Das effektiv benötigte Drehmoment berechnet sich mit

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int M^2(t)dt}$$

Das Integral berechnet sich Abschnittsweise mit dem jeweils konstanten Drehmoment:

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{20\text{s}}\cdot\left((5\text{Nm})^2\cdot 10\text{s} + (20\text{Nm})^2\cdot 10\text{s}\right)} = \underline{14{,}6\text{Nm}}$$

c. Die mittlere Erwärmung im gegebenen Lastfall beträgt:

$$\Delta T_{S6} = \Delta T_N \cdot \left(\frac{M_{eff}}{M_N}\right)^2 = 80°\text{C}\cdot\left(\frac{14{,}6}{18}\right)^2 = \underline{52.6°\text{C}}$$

d. Die Abschätzung der Temperaturerhöhung während der 10 s mit 20 Nm ist:

$$\Delta T_Z = \Delta T_N \cdot \frac{\Delta t}{T_{Th}}\cdot\left(\frac{M}{M_N}\right)^2 = 80°\text{C}\cdot\frac{10\text{s}}{30\text{s}}\left(\frac{20}{18}\right)^2 = \underline{32.9°\text{C}}$$

e. Die Maximal- und Minimaltemperatur ergibt sich demnach:

$$T = T_U + \Delta T_{S6} \pm \Delta\frac{T_Z}{2} = 40°\text{C} + 52{,}6°\text{C} \pm 16{,}5°\text{C} = \underline{109°\text{C}/76°\text{C}}$$

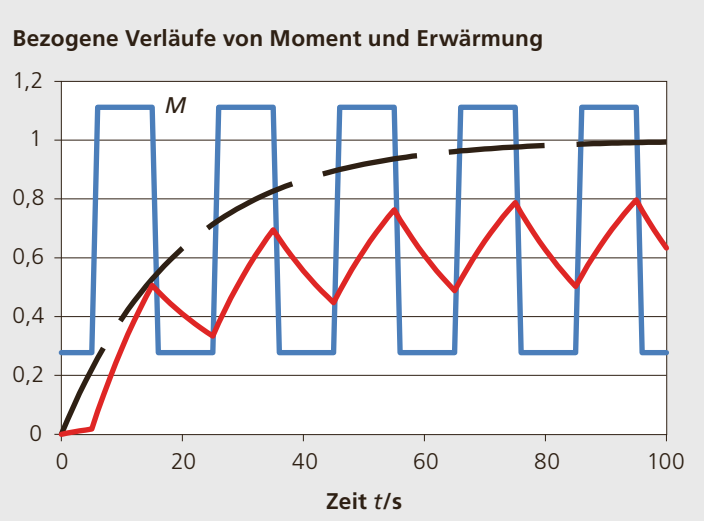


Abbildung 6.3: Berechneter Erwärmungsverlauf (rot) für die gegebene Belastung (Drehmoment blau). Zur Illustration: Erwärmung bei konstanter Nennbelastung (schwarz). (Aufgabe 6.1)

Hinweis: Mit den 5 Nm wird eine stationäre Erwärmung von 80 °C $(5/18)^2$ = 6,2 °C erreicht. Der Motor würde sich also um 63 °C von 109 °C auf 46,2 °C abkühlen. Mit einer linearen Betrachtung innerhalb der Aussetzphase von 10 s wird um 63 °C · 10s/30s = 21 °C abgekühlt. Die beiden Temperaturdifferenzen (32,9 °C und 21 °C) weisen einen grossen Unterschied auf. Die linearisierte Berechnung ist also nur als Näherung zu verwenden. Eine exakte Berechnung muss über die Erwärmungsformel in Kapitel 6.3 erfolgen. In Abbildung 6.3 ist das Ergebnis dieser Berechnung dargestellt. Es resultiert auf diese Weise eine mittlere Erwärmung von 52 °C und ein Temperaturbereich von 104/80 °C.

6.2 Spindelantrieb

a. Die Messgenauigkeit kann wie folgt bestimmt werden:

$$\Delta\varphi = 20' = \frac{1}{3}° \rightarrow \Delta x = \frac{h}{360°} \cdot \Delta\varphi = \underline{0{,}01\text{mm}}$$

Es ist zu beachten, dass das mechanische Spiel und Elastizitäten die Genauigkeit einschränken.

b. Die Distanz von 1m soll in 2s mit einem Dreieckprofil überwunden werden:

$$v_{Mittel} = \frac{1\text{m}}{2\text{s}} = 0{,}5\ \text{m/s}$$

Aus Abbildung 6.4 mit dem Dreiecks-Geschwindigkeitsprofil ist zu erkennen, dass die Maximalgeschwindigkeit doppelt so hoch ist wie die Durchschnittsgeschwindigkeit. Demnach gilt:

v_{max} = 1 m/s

Die maximale Geschwindigkeit der Spindel kann mittels der maximalen Bewegungsgeschwindigkeit und der Steigung der Spindel ermittelt werden:

$$f_{\max} = \frac{1\text{m/s}}{10\text{mm/U}} = 100\text{Hz} \cong \underline{6000\ \text{U/min}}$$

c. Das benötigte Drehmoment wird mittels der Spindelsteigung und der wirkenden Kraft wie folgt bestimmt:

$$M = \frac{h \cdot F}{2\pi}, \text{ wobei } F = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = 100\text{kg} \cdot \frac{1\text{m/s}}{1\text{s}} = 100\text{N}$$

$$\rightarrow M = \frac{h \cdot F}{2\pi} = \frac{10\text{mm} \cdot 100\text{N}}{2\pi} = \underline{1{,}6\text{Nm}}$$

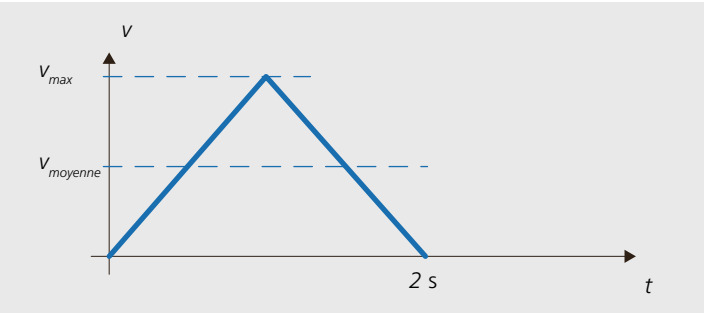


Abbildung 6.4: Geschwindigkeitsverlauf des Spindelantriebs (Aufgabe 6.2).

Die Spitzenleistung ergibt sich bei der maximalen Drehzahl:

$$P_{\max} = M \cdot \frac{n_{\max}}{60} \cdot 2\pi = 1{,}6\text{Nm} \cdot \frac{6000\ \text{U/min}}{60} \cdot 2\pi = \underline{1\text{kW}}$$

d. Es wird während dem Bremsvorgang die gesamte kinetische Energie abgebremst:

$$E_B = m \cdot \frac{v^2}{2} = \frac{100\text{kg} \cdot (1\,\text{m/s})^2}{2} = 50\text{J} = \underline{50\text{Ws}}$$

e. Die im Kondensator speicherbare Energie beträgt:

$$E_K = \frac{1}{2} C U^2 \rightarrow \Delta E = \frac{1}{2} C \cdot [(U + \Delta U)^2 - U^2] = \frac{1}{2} C \cdot (\Delta U^2 + 2 \cdot U \cdot \Delta U)$$

$$\rightarrow C = \frac{2 \cdot \Delta E}{\Delta U^2 + 2 \cdot U \cdot \Delta U} = \frac{2 \cdot 50\text{Ws}}{(80\text{V})^2 + 2 \cdot 560\text{V} \cdot 80\text{V}} = \underline{1{,}04\text{mF}}$$

6.3 Getriebedimensionierung

a. Es gilt ohne Last: $\sqrt{\frac{J_L}{J_M}}$

Das benötigte Beschleunigungsmoment auf der Lastseite ist in allen Fällen gleich und berechnet sich wie folgt:

$$M_{BL} = \frac{n_L}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{1}{t_B} \cdot J_L = 25{,}1\text{Nm}$$

An der Maschine (vor dem Getriebe) gilt: $M_{BL}^* = \frac{M_{BL}}{i}$

Das Drehmoment für die Eigenbeschleunigung der Maschine selbst ist:

$$M_{BM} = \frac{i}{t_B} \cdot \frac{n_L}{60} \cdot 2\pi \cdot J_M$$

Das total benötigte Drehmoment ist die Summe der beiden Anteile:

$$M_{Tot} = M_{BL}^* + M_{BM}$$

In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse der drei Fälle aufgelistet und mit dem minimal erreichbaren Moment $M_{tot,opt}$ verglichen.

Fall	**1**	**2**	**3**
i_{opt}	1,1	4,37	20,2
wegen Drehzahl i_{max} $i_{\max} = \frac{n_{\max}}{n_L}$	1	3,75	30
gewähltes i	1	3,75	20,2
M_{BL}	25.1	25.1	25.1
M_{BL}*	25,1	6,7	1,24
M_{BM}	20,8	4,92	1,24
M_{tot}	45,9	11,6	2,50
$M_{tot,opt}$	45,7	11,4	2,50

Tabelle 6.1: Resultate für die drei betrachteten Antriebe.

Fall 1: Weil es sich um einen Direktantrieb handelt, ist i fix = 1. Das optimale Verhältnis kann nicht gewählt werden.
Fall 2: Der Motor kann nicht genug schnell drehen, deshalb muss i kleiner gewählt werden als i_{opt}.
Fall 3: Der Motor kann genug schnell drehen, deshalb kann die Untersetzung optimal gewählt werden. Das resultierende Moment entspricht $M_{tot,opt}$. Der Motor und die Last benötigen im Falle der Anpassung mit $i_{gewählt} = i_{opt}$ gleich viel Drehmoment für die Beschleunigung, also je die Hälfte der 2,5 Nm. Das ist das niedrigste Drehmoment für die Beschleunigungsvorgabe dieser Last.

6.4 Antriebsabsicherung mit Schmelzsicherung

a. Gemäss Abbildung 6.1 liegt der Nennwirkungsgrad bei ca. 92 %.

b. Wirk- und Scheinleistung am Netz:

$$P_N = P_{me} / (\eta_{ASM}\, \eta_{SR}) = 15\text{kW} / (0{,}92 \cdot 0{,}95) = \underline{17{,}2\text{kW}}$$

$$S_N = P_N / \cos\varphi = 17{,}2\text{kW} / 0{,}90 = \underline{19{,}1\text{kVA}}$$

c. Bei bekannter Scheinleistung gilt im Dreiphasennetz:

$$S_N = U_N I_N \sqrt{3} \quad \rightarrow \quad I_N = S_N / (U_N \sqrt{3}) = 19{,}1\text{kVA} / (400\text{V}\sqrt{3}) = \underline{27{,}6\text{A}}$$

d. Absicherung: Ist nur mit kurzen und kleinen Überlastungen zu rechnen, so ist eine träge 35 A Sicherung optimal. Bei grösseren Überlastungen muss ev. auf 50 A gewechselt werden. Dabei müssen aber auch die Anschlussleitungen entsprechend angepasst werden.

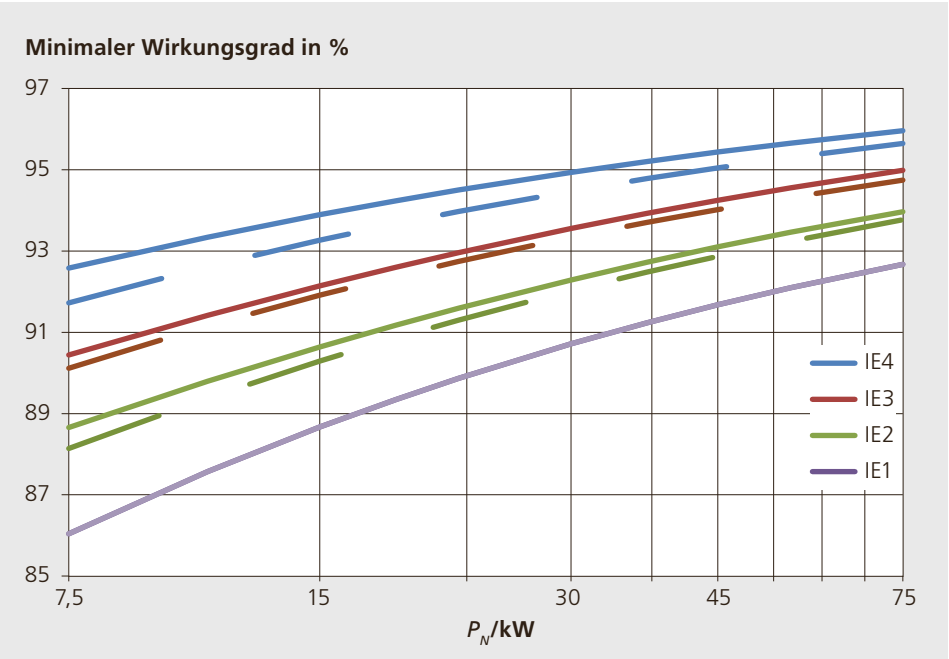


Abbildung 6.1: Wirkungsgradanforderungen für die IE-Klassen, durchgezogene Linien für vierpolige Motoren (Aufgabe 6.4).

6.5 Antriebsabsicherung mit thermischer und magnetischer Auslösung

a. Die konstante Blindleistung muss aus den Daten im Nennpunkt bestimmt werden:

$$P_N = S_N \cos\varphi_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N = \sqrt{3} \cdot 400\text{V} \cdot 50\text{A} \cdot 0{,}85 = 34{,}6\text{kVA} \cdot 0{,}85$$

$$Q_N = \sqrt{S_N^2 - P_N^2} = \underline{18{,}25\text{kVAr}}$$

b. Die Scheinleistung in den beiden Betriebsfällen berechnet sich aus der konstanten Blindleistung und der jeweiligen Wirkleistung:

$$S_{150\%} = \sqrt{P_{150\,\%}^2 + Q_N^2} = \sqrt{(1{,}5 \cdot 29{,}4\text{kW})^2 + 18{,}25\text{kVAr}^2} = \underline{47{,}8\text{kVA}}$$

$$S_{30\%} = \sqrt{P_{30\,\%}^2 + Q_N^2} = \sqrt{(0{,}3 \cdot 29{,}4\text{kW})^2 + 18{,}25\text{kVAr}^2} = \underline{20{,}27\text{kVA}}$$

c. Für die Netzströme gilt aus den Scheinleistungen

$$I_{150\%} = S_{150\,\%} \big/ (U\sqrt{3}) = 47{,}8\text{kVA} \big/ (400\text{V}\sqrt{3}) = \underline{69{,}0\text{A}}$$

$$I_{30\%} = S_{30\,\%} \big/ (U\sqrt{3}) = 20{,}3\text{kVA} \big/ (400\text{V}\sqrt{3}) = \underline{29{,}3\text{A}}$$

d. Für den Mittelwert des Effektivwertes mit abschnittweise konstanten Werten gilt:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{t'} i'^2(t)\,dt'} = \sqrt{\frac{1}{T}(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T}(I_{30\%}^2 \cdot 0{,}8T + I_{150\%}^2 \cdot 0{,}2T)} = \sqrt{(29{,}3\text{A}^2 \cdot 0{,}8 + 69{,}0\text{A}^2 \cdot 0{,}2)} = \underline{40{,}5\text{A}}$$

e. **Einstellung der Grenzwerte:** Die Grenzwerte werden sinnvollerweise so eingestellt, dass sie im Normalbetrieb sicher nicht ansprechen. Daher wird ein Abstand von 30 % gewählt. Damit werden die thermischen und die magnetischen Grenzwerte:

$I_M = 1{,}3 \cdot 69{,}0\,\text{A} \approx \underline{90\,\text{A}}$

$I_T = 1{,}3 \cdot 40{,}5\,\text{A} \approx \underline{53\,\text{A}}$