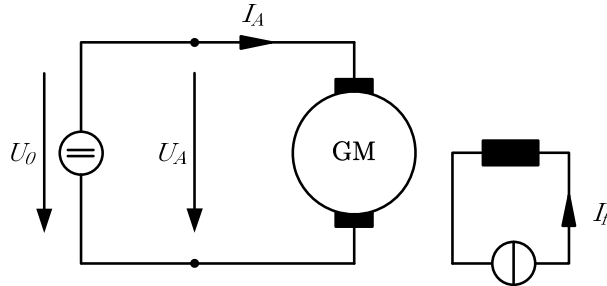


1 Fremderregte Gleichstrommaschine im Grunddrehzahl- und Feldschwächbereich

Der Ankerkreis einer fremderregten Gleichstrommaschine wird von einer Gleichspannungsquelle U_0 gespeist.



Folgende Daten sind gegeben:

U_{AN}	$= 300 \text{ V}$	Ankernennspannung der Gleichstrommaschine
I_{AN}	$= 120 \text{ A}$	Ankernennstrom der Gleichstrommaschine
M_N	$= 360 \text{ Nm}$	Nenndrehmoment der Gleichstrommaschine bei Nennerregung ($I_f = I_{fN}$)
n_N	$= 900 \text{ min}^{-1}$	Nenndrehzahl der Gleichstrommaschine bei Nennerregung ($I_f = I_{fN}$)

Vereinfachende Annahmen:

- Bis auf die Stromwärmeverluste im Ankerkreis sei die Gleichstrommaschine verlustfrei.

Aufgabenstellung:

- Berechnen Sie die Drehmoment-Drehzahlcharakteristik $\Omega = f(M_i)$ bei Nennerregung und Speisung des Ankerkreises mit $U_{AN} = 300 \text{ V}$. Stellen Sie den Zusammenhang im Bereich von Leerlauf bis Nennmoment (motorisch) maßstäblich dar.
Maßstab: $10 \text{ s}^{-1}/\text{cm}$ und $30 \text{ Nm}/\text{cm}$.
- Bei Betrieb mit $U_{AN} = 300 \text{ V}$ soll durch Feldschwächung die zweifache Nenndrehzahl eingestellt werden. Dabei soll der Nennstrom I_{AN} im Ankerkreis fließen (Motorbetrieb). Berechnen Sie den Feldschwächgrad k und das Drehmoment in diesem Betriebspunkt.
- Welche Leerlaufdrehzahl n_0 stellt sich ein, wenn die Gleichstrommaschine bei Speisung mit U_{AN} und Feldschwächgrad $k = 0,6$ im Leerlauf betrieben wird ($M_L = 0$)?

Lösung

a) Parameter der Gleichstrommaschine berechnen:

$$c\Phi_N = \frac{M_N}{I_{AN}} = 3 \text{ Vs} \quad (1)$$

$$\Omega_N = \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot n_N = 94,25 \frac{1}{\text{s}} \quad (2)$$

$$R_A = \frac{U_{AN} - c\Phi_N \cdot \Omega_N}{I_{AN}} = 0,144 \Omega \quad (3)$$

Formel für Drehmoment-/Drehzahlcharakteristik aufstellen:

$$\Omega(M_i) = \frac{U_A}{c\phi} - \frac{R_A}{(c\phi)^2} \cdot M_i \quad (4)$$

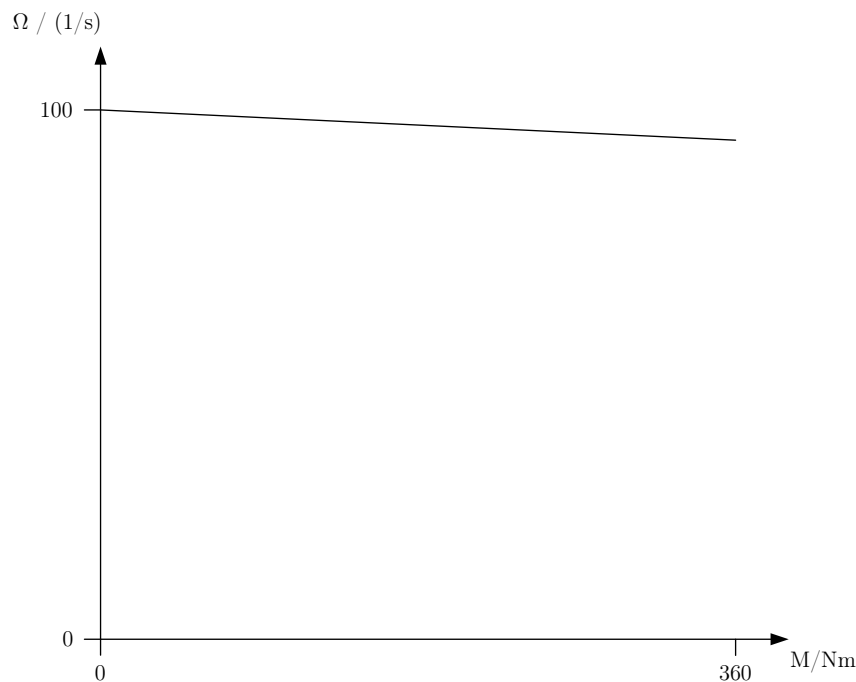
$$= \frac{300 \text{ V}}{3 \text{ Vs}} - \frac{0,144 \Omega}{(3 \text{ Vs})^2} \cdot M_i \quad (5)$$

Zwei Punkte auf der Gerade berechnen:

$$\Omega(0 \text{ Nm}) = 100 \frac{1}{\text{s}} \quad (6)$$

$$\Omega(360 \text{ Nm}) = 94,25 \frac{1}{\text{s}} \quad (7)$$

Kennlinie zeichnen:



b) Innere Spannung U_i bei Nennstrom berechnen:

$$U_i = U_{AN} - R_A \cdot I_{AN} = 282,74 \text{ V} \quad (8)$$

Feldschwächgrad k berechnen:

$$\Omega = 2 \cdot \Omega_N = 2 \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot n_N = 188,4 \frac{1}{\text{s}} \quad (9)$$

$$c\Phi = \frac{U_i}{\Omega} = 1,5 \text{ Vs} \quad (10)$$

$$k = \frac{c\Phi}{c\Phi_N} = 0,5 \quad (11)$$

Drehmoment M_i berechnen:

$$M_i = c\Phi \cdot I_{AN} = 180 \text{ Nm} \quad (12)$$

c) Im Leerlauf gilt $M_i = 0$ und damit $I_A = 0$

$$U_i = U_{AN} - R_A \cdot I_A = U_{AN} \quad (13)$$

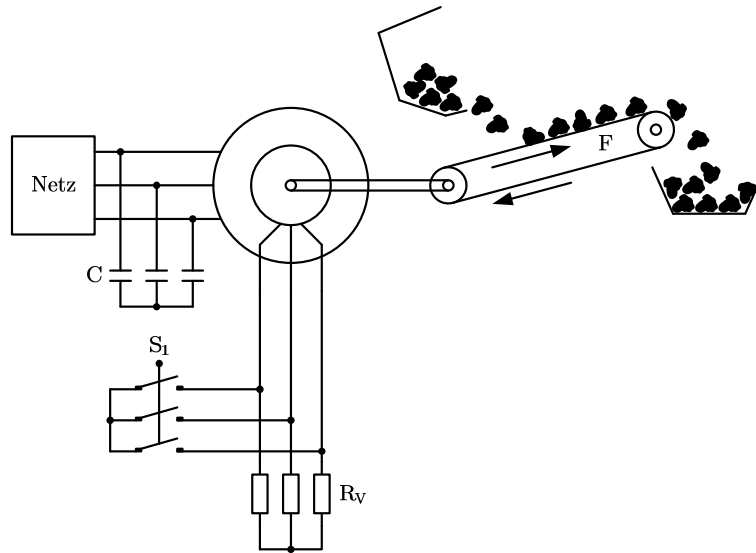
$$\Omega_0 = \frac{U_{AN}}{c\Phi} \quad (14)$$

$$c\Phi = 0,6 \cdot c\Phi_N = 1,8 \text{ Vs} \quad (15)$$

$$n_0 = \frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \cdot \Omega_0 = \frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \cdot \frac{U_{AN}}{c\Phi} = 1591,5 \text{ min}^{-1} \quad (16)$$

2 Asynchronmotor mit Schleifringläufer

Ein 6-poliger Asynchronmotor mit Schleifringläufer treibt ein Förderband F an. Im Dauerbetrieb wird der Läuferwiderstand R_V mit dem Schalter S_1 kurzgeschlossen.



Folgende Daten des Drehstromasynchronmotors sind gegeben:

f_N	=	60 Hz	Nennspeisefrequenz
s_N	=	2 %	Nennschlupf des Asynchronmotors
I_N	=	580 A	Nennstrom des Asynchronmotors (Effektivwert)
U_N	=	400 V	Nennleiterspannung des Asynchronmotors (Effektivwert)
R_S	=	10 mΩ	Statorwiderstand je Phase
R_R	=	5 mΩ	Rotorwiderstand je Phase
$\cos \varphi_N$	=	0,86	Nennleistungsfaktor
p	=	3	Polpaarzahl

Vereinfachende Annahmen:

- Eisen- und Reibungsverluste können vernachlässigt werden.

Aufgabenstellung:

Der Schalter S_1 sei geöffnet (Anfahrvorgang).

- Berechnen Sie den Wert des Läuferwiderstands R_V so, dass das innere Drehmoment beim Anfahren aus dem Stillstand für $n = 0$ dem Nennmoment entspricht.
- Geben Sie die Frequenz der Ströme im Läuferwiderstand R_V bei $n = 0$ an.
- Berechnen Sie den Wert der Verlustleistung P_{RR} im Rotor und den Wert der Verlustleistung P_{RV} im Vorwiderstand bei Stillstand für $n = 0$.

Der Schalter S_1 sei geschlossen (Dauerbetrieb).

- Bestimmen Sie die Nenndrehzahl in Umdrehungen pro Minute.

Lösung

a) Wert des Läuferwiderstands berechnen:

$$\frac{s^*}{s} = \frac{R_R + R_V}{R_R} \quad (17)$$

$$R_V = R_R \cdot \left(\frac{s^*}{s} - 1 \right) \quad (18)$$

$s = s_N$ ist der Nennschlupf, auf den sich das Nennmoment bezieht. Im Stillstand gilt $s^* = 1$. Damit lässt sich der Wert von R_V berechnen:

$$R_V = 245 \text{ m}\Omega \quad (19)$$

b) Im Stillstand entspricht die Frequenz der Rotorströme der Frequenz der Statorströme. Die Frequenz der Rotorströme findet sich auch in den Vorwiderständen wieder.

$$f_R = f_S = f_N = 60 \text{ Hz} \quad (20)$$

c) Drehfeldleistung bei Nennmoment und damit Nennstrom berechnen:

$$P_D = P_{el} - P_{VS} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos(\varphi_N) - 3 \cdot R_S \cdot I_N^2 = 335,49 \text{ kW} \quad (21)$$

Im Stillstand wird keine mechanische Leistung abgegeben. Damit entspricht die Summe der Verlustleistungen im Rotor und in den Rotorvorwiderständen der Drehfeldleistung.

$$P_{RR} + P_{RV} = P_D \quad (22)$$

Das Verhältnis zwischen P_{RR} und P_{RV} lässt sich aus dem Verhältnis der Widerstandswerte bestimmen:

$$P_{RR} = 3 \cdot R_R \cdot I_R^2 \quad (23)$$

$$P_{RV} = 3 \cdot R_V \cdot I_R^2 \quad (24)$$

$$\frac{P_{RR}}{P_{RV}} = \frac{R_R}{R_V} \quad (25)$$

Die Verluste ergeben sich aus (22) und (25):

$$P_{RV} = \frac{P_D}{\left(\frac{R_R}{R_V} + 1 \right)} = 328,78 \text{ kW} \quad (26)$$

$$P_{RR} = P_D - P_{RV} = 6,71 \text{ kW} \quad (27)$$

d) Nenndrehzahl bei Nennschlupf bestimmen:

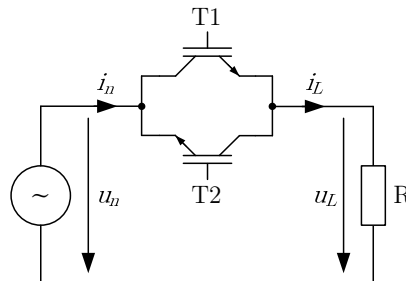
$$n_{syn} = \frac{f_N}{p} = 1200 \text{ min}^{-1} \quad (28)$$

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \quad (29)$$

$$n_N = n_{syn} \cdot (1 - s_N) = 1176 \text{ min}^{-1} \quad (30)$$

3 Wechselstromsteller (Dimmer) mit An- und Abschnittsteuerung und rückwärtssperrfähigen Transistoren

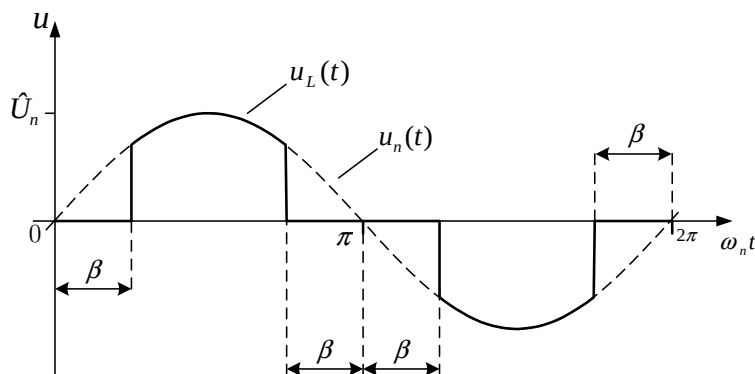
Ein Wechselstromsteller mit rückwärtssperrfähigen Transistoren speist eine ohmsche Last.



Vereinfachende Annahmen:

- Die Transistoren seien ideal
- Die Netzspannung sei ideal
- Der Stromkreis sei frei von Induktivitäten

Um Grundschwingungsblindleistung zu vermeiden, wird die Netzspannung $u_n(t) = \hat{U}_n \cdot \sin(\omega_n t)$ sowohl auf der ansteigenden als auch auf der abfallenden Flanke der Sinusschwingungen geschaltet.



Zeitverlauf der Spannung u_L am Lastwiderstand R als Funktion des Steuerwinkels β

Hilfestellung:

$$\int \sin^2 ax \, dx = \frac{1}{2}x - \frac{1}{4a} \sin(2ax)$$

Aufgabenstellung:

- Berechnen Sie den Effektivwert U_L der Spannung $u_L(t)$ an der Last als Funktion des Steuerwinkels β .
- Berechnen Sie die dem Netz entnommene Scheinleistung und die dem Netz entnommene Verzerungsblindleistung als Funktion des Steuerwinkels β .
- Machen Sie einen Schaltungsvorschlag, wie die Funktion der beiden Transistoren T1 und T2 mit einem einzigen Transistor und vier zusätzlichen Dioden realisiert werden kann.

Lösung

a) Berechnen des Effektivwerts U_L :

$$U_L = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u_L^2(t) dt} \quad (31)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u_L^2(\omega_n t) d\omega_n t} \quad (32)$$

$$(33)$$

Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften:

$$U_L = \sqrt{\frac{1}{\frac{\pi}{2}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} u_L^2(\omega_n t) d\omega_n t} \quad (34)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \int_{\beta}^{\frac{\pi}{2}} \left(\hat{U}_n \cdot \sin(\omega_n t) \right)^2 d\omega_n t} \quad (35)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \hat{U}_n^2 \cdot \left[\frac{1}{2} \omega_n t - \frac{1}{4} \sin(2\omega_n t) \right]_{\beta}^{\frac{\pi}{2}}} \quad (36)$$

$$= \hat{U}_n \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\beta}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\beta)} \quad (37)$$

b) Berechnen der Scheinleistung S für beliebige Steuerwinkel β :

$$S = U_n \cdot I_n \quad (38)$$

$$= U_n \cdot I_L \quad (39)$$

$$= U_n \cdot \frac{U_L}{R} \quad (40)$$

$$= \frac{\hat{U}_n}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_L}{R} \quad (41)$$

$$S = \frac{\hat{U}_n^2}{\sqrt{2} \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\beta}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\beta)} \quad (42)$$

Die Schaltung nimmt keine Grundswingungsblindleistung auf, da die Grundswingung des Netzstroms phasengleich zur Netzspannung ist. Die Scheinleistung setzt sich nur aus der Wirkleistung und der Verzerrungsblindleistung zusammen. Da die Transistoren ideal sind, ist die Wirkleistung am Verbraucher gleich der Wirkleistung am Netz. Die Verzerrungsblindleistung kann dann wie folgt berechnet werden:

$$P = \frac{U_L^2}{R} \quad (43)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (44)$$

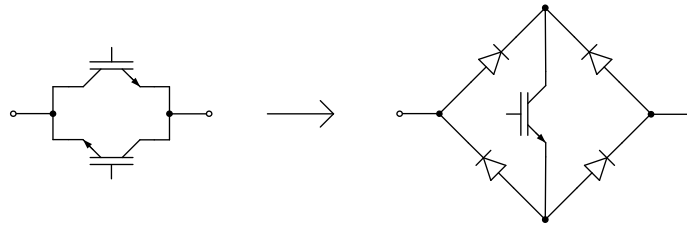
$$= \sqrt{S^2 - \left(\frac{U_L^2}{R} \right)^2} \quad (45)$$

$$= \sqrt{\frac{\hat{U}_n^4}{2 \cdot R^2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\beta) \right) - \frac{\hat{U}_n^4}{R^2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\beta) \right)^2} \quad (46)$$

$$= \frac{\hat{U}_n^2}{R} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\beta) \right) - \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\beta) \right)^2} \quad (47)$$

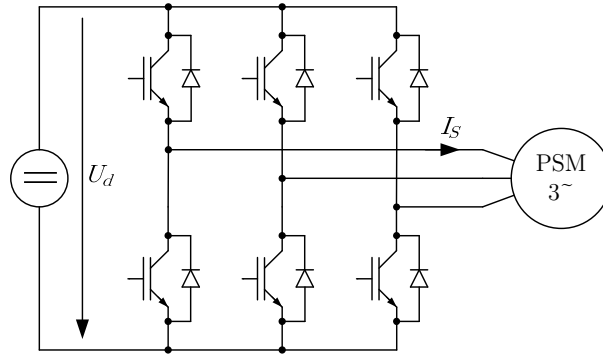
$$(48)$$

c) Die beiden Transistoren können durch die folgende Schaltung ersetzt werden:



4 Selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung mit permanentmagneterregtem Synchronmotor und Blocktaktung

Eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung speist einen permanentmagneterregten Synchronmotor mit Oberflächenmagneten. Als Leistungshalbleiter werden IGBT-Transistoren eingesetzt, die nach dem Steuerverfahren der Blocktaktung angesteuert werden.



Vereinfachende Annahmen:

- Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei
- Es werden nur die Grundswingungen der Spannungen und Ströme betrachtet

Folgende Daten des Synchronmotors sind gegeben:

U_{1SN}	=	460 V	Effektivwert der Grundswingung der Sternspannung im Nennbetrieb
f_N	=	280 Hz	Nennwert der Speisefrequenz
p	=	4	Polpaarzahl
$L_d = L_q = L_S$	=	7,84 mH	Induktivitäten in d- und q-Richtung bzw. Wert je Strang
I_{1N}	=	20 A	Effektivwert der Grundswingung der Strangströme im motorischen Nennbetrieb bei rotororientierter Steuerung

Aufgabenstellung:

Der Stromrichter wird so gesteuert, dass die Grundswingung des Statorstroms in Gegenphase zur Polradspannung liegt (Rotororientierte Steuerung, Motorbetrieb, Erzeugerzählpfeilsystem).

- Berechnen Sie den Effektivwert der Polradspannung U_P und den Wert des Polradwinkels ϑ im motorischen Nennbetrieb.
- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm ($\underline{U}_P$, $\underline{U}_{1S}$, $\underline{I}_S$) maßstäblich (40 V/cm, 5 A/cm).
- Welchen Wert muss die Gleichspannung U_d aufweisen, damit die Synchronmaschine bei Blocktaktung im Nennpunkt betrieben werden kann?
- Wie hoch ist die Schaltfrequenz eines IGBT-Transistors der selbstgeführten Drehstrombrückenschaltung bei Nenndrehzahl der Synchronmaschine?

Durch einen Schaden im Speisegerät wird die Speisespannung dauerhaft kurzgeschlossen ($U_d = 0$), während die Transistoren weiterhin mit Blocktaktung betrieben werden. Der Motor dreht sich aufgrund der Trägheit der Last weiter mit Nenndrehzahl.

- Berechnen Sie den Effektivwert der Motorströme, die sich in diesem Betriebszustand einstellen.
- Im Betrieb nach e) werden alle Transistoren gleichzeitig abgeschaltet. Werden die Motorströme dadurch schnell auf den Wert null reduziert? (Bitte zur Antwort eine kurze Begründung geben)

Lösung

- a) Bei rotororientierter Steuerung wird I_d zu null geregelt. Es ist hilfreich zunächst ein Zeigerdiagramm (siehe b) zu skizzieren. Der Statorstrom $I_S = I_q = I_{1N}$ zeigt entgegengesetzt zur Polradspannung U_P .

$$X_S \cdot I_S = \omega \cdot L_S \cdot I_S \quad (49)$$

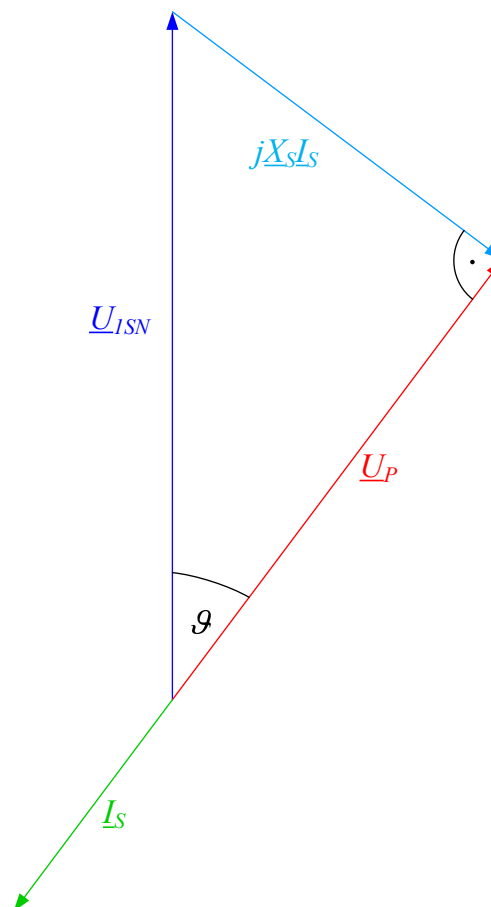
$$= 2\pi \cdot f_N \cdot L_S \cdot I_S = 275,9V \quad (50)$$

$$U_P = \sqrt{U_{1SN}^2 - (X_S \cdot I_S)^2} = 368,11V \quad (51)$$

$$\sin \vartheta = \frac{X_S \cdot I_S}{U_{1SN}} \quad (52)$$

$$\vartheta = 36,85^\circ \quad (53)$$

- b) Zeigerdiagramm:



- c) Berechnung der Gleichspannung U_d bei Blocktaktung:

$$U_{1ab} = \sqrt{3} \cdot U_{1SN} \quad (54)$$

$$U_{1ab} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d \quad (55)$$

$$U_d = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1SN} \approx 1021V \quad (56)$$

- d) Die Schaltfrequenz f_S entspricht bei Blocktaktung genau der Speisefrequenz f_N der elektrischen Maschine, da jeder Halbleiter pro Grundschwingungsperiode einmal ein- und einmal ausgeschaltet wird.

$$f_S = f_N = 280\text{ Hz} \quad (57)$$

- e) Da alle Leistungshalbleiter ideal und verlustfrei sind, entspricht ein Kurzschluss der Spannung U_d einem dreiphasigen Kurzschluss der Motorleitungen. U_S ist damit null und die gesamte Polradspannung U_P fällt über der Synchronreaktanz X_S ab.

$$I_S = \frac{U_P}{X_S} \quad (58)$$

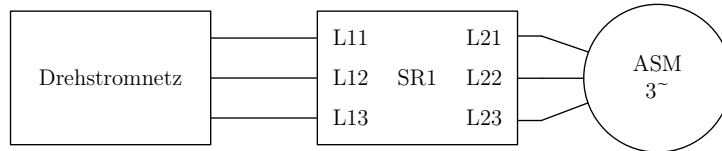
$$= \frac{U_P}{\omega \cdot L_S} \quad (59)$$

$$= \frac{U_P}{2\pi \cdot f_N \cdot L_S} \approx 26,69 \text{ A} \quad (60)$$

- f) Im Betrieb nach e) fließen die Motorströme nur über die Freilaufdioden, da $U_d = 0$. Damit macht es keinen Unterschied, ob die Transistoren weiterhin getaktet werden oder nicht. Die Motorströme bleiben unverändert hoch.

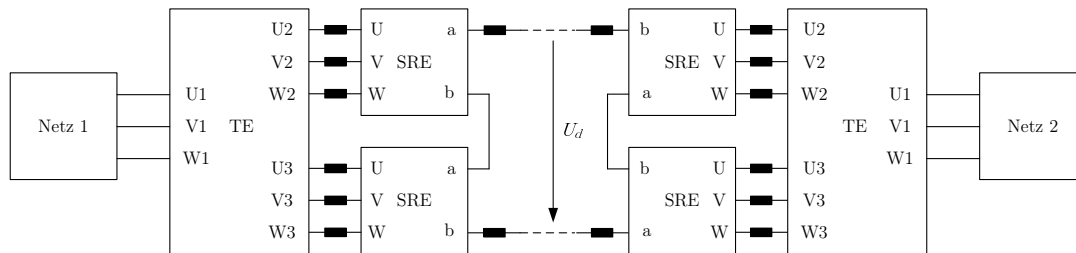
5 Stromrichterschaltungen für unterschiedliche Anforderungen

a)



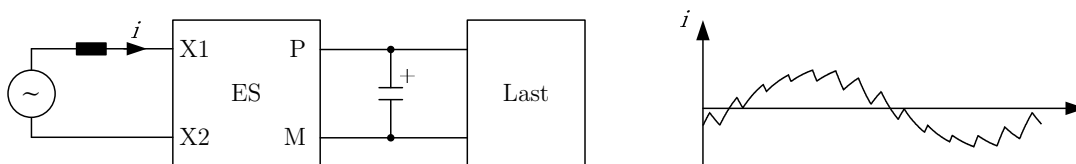
Um den Anlaufstrom einer Asynchronmaschine ASM zu begrenzen, wird ein Stromrichter SR1 zwischen das speisende Drehstromnetz und die Asynchronmaschine geschaltet. Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR1 mit den Eingangsklemmen L11, L12, L13 und den Ausgangsklemmen L21, L22, L23.

b) Für eine Hochspannungsgleichstromübertragung soll eine zwölfpulsige Anlage gebaut werden, die aus vier gleichen Stromrichtereinheiten SRE besteht. Der Anschluss der Einheiten soll über zwei gleiche Transformatoreinheiten TE erfolgen. Der Leistungsfluss soll bei $U_d > 0$ von Netz 1 nach Netz 2 erfolgen.



Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild einer Stromrichtereinheit SRE mit den Eingangsklemmen U, V, W und den Ausgangsklemmen a und b. Zeichnen Sie auch das Prinzipschaltbild einer Transformatoreinheit TE mit den Eingangsklemmen U1, V1, W1 und den Ausgangsklemmen U2, V2, W2, U3, V3 und W3.

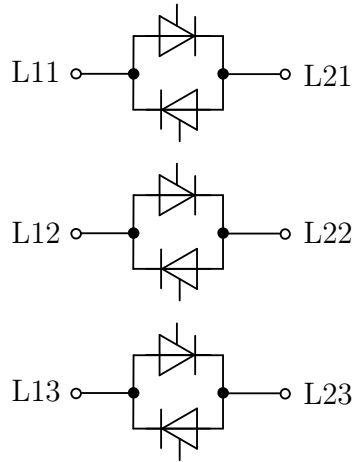
c) Der Eingangsstrom einer einphasigen Einspeiseschaltung ES zeigt einen sinusförmigen Verlauf mit überlagertem sägezahnförmigen Ripple.



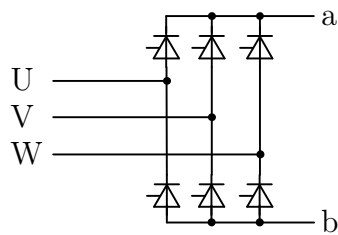
Die Einspeiseschaltung ES soll die Leistungsübertragung in beide Richtungen ermöglichen. Skizzieren Sie das Prinzipschaltbild der Einspeiseschaltung ES mit den Eingangsklemmen X1, X2 und den Ausgangsklemmen P und M. Geben Sie an, für welche typische Anwendung diese Schaltung benutzt wird.

Lösung

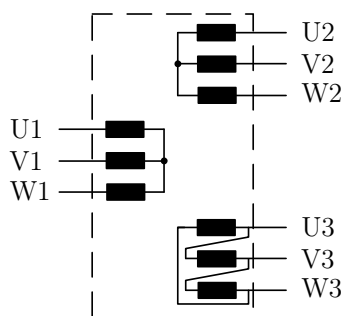
a) Der Stromrichter SR1 wird als Drehstromsteller ausgeführt:



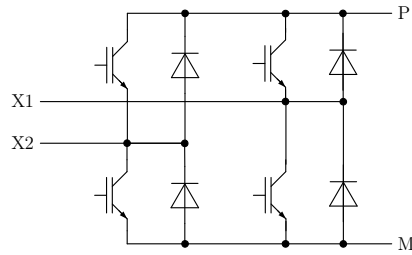
b) Die Stromrichtereinheiten SRE werden als netzgeführte Drehstrombrückenschaltungen ausgeführt:



Die Transformatoreinheit TE weist stromrichterseitig eine Drehstromwicklung in Sternschaltung und eine Drehstromwicklung in Dreieckschaltung auf.



c) Die Einspeiseschaltung ES wird als selbstgeführte Wechselstrombrückenschaltung ausgeführt:



Eine typische Anwendung ist die einphasige Einspeiseschaltung einer Lokomotive.