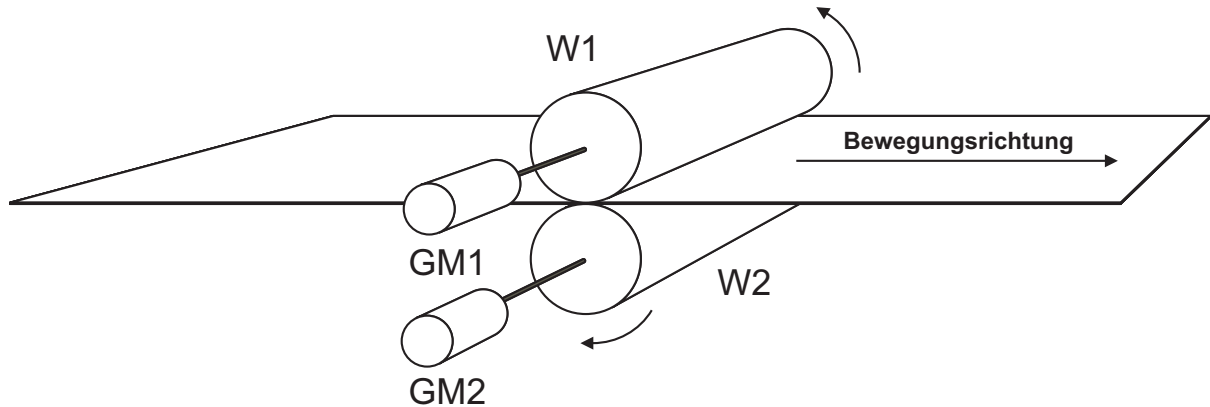


1 Walzantrieb mit Gleichstrommaschine

Zwei gleiche, fremderregte Gleichstrommotoren GM1 und GM2 treiben ein Walzgerüst mit zwei gleichen Walzen W1 und W2 an.



Folgende Daten sind gegeben:

Gleichstrommotoren (Daten je Motor)

U_{AN}	=	1200 V	Ankernennspannung
I_{AN}	=	1800 A	Ankernennstrom
P_N	=	2 MW	Nennleistung
n_N	=	240 min^{-1}	Nenndrehzahl
Φ	=	Φ_N	Maschinen sind nennernregt

Walzgerüst

r	=	0,4 m	Radius einer Walze
n	=	240 min^{-1}	Drehzahl einer Walze
J_1	=	14000 kgm^2	Trägheitsmoment der oberen Walzenanordnung
J_2	=	14000 kgm^2	Trägheitsmoment der unteren Walzenanordnung

Vereinfachende Annahmen:

- Reibungsverluste und die Ankerinduktivität seien vernachlässigbar.

- Wie groß ist die Kraft, die die Motoren im Nennbetrieb gemeinsam auf das Walzgut in Bewegungsrichtung ausüben?
- Für das schnelle Abbremsen des Antriebs soll jeder der Motoren ein konstantes Bremsmoment in Höhe seines 1,5-fachen Nennmoments erzeugen. Wie hoch ist die dazu erforderliche Ankerspannung unmittelbar zu Beginn der Bremsung bei $n = 240 \text{ min}^{-1}$ und unmittelbar vor Ende des Bremsvorgangs bei $n = 0 \text{ min}^{-1}$? Die Erregung sei dabei die gleiche wie in a).
- Wieviele Umdrehungen macht jeder der beiden Motoren beim Bremsvorgang nach b) vom Beginn der Bremsung bis zum Stillstand? Dabei wird angenommen, dass das an jedem der beiden Motoren wirksame Lastmoment während des Bremsvorgangs konstant bei $M_{Last} = 80 \text{ kNm}$ bleibt.

Lösung

- a) Für die Kraft wird zunächst das Nennmoment benötigt. Dieses kann aus der Nennleistung berechnet werden:

$$P_N = M_N \cdot \Omega_N \longrightarrow M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = 79,58 \text{ kNm}$$

Das Drehmoment und die Kraft hängen über den Radius der Walze zusammen:

$$M = F \cdot r$$

Für die insgesamt wirkende Kraft müssen beide Walzen beachtet werden:

$$F_{N,ges} = 2 \cdot \frac{M_N}{r} = 397,89 \text{ kNm}$$

- b) Bei gleicher Erregung lässt sich der Ankerstrom direkt aus dem Bremsmoment ableiten:

$$M_{brems} = 1,5 \cdot M_N \longrightarrow I_A = -1,5 \cdot I_{AN}$$

Die Ankerspannungsgleichung lautet

$$U_A = R_A \cdot I_A + c\Phi \cdot \Omega$$

Um die Ankerspannung berechnen zu können werden noch die Nennerregung und der Ankerwiderstand benötigt. Die Nennerregung lässt sich aus dem Nennmoment bestimmen:

$$c\Phi_N = \frac{M_N}{I_{AN}} = 44,21 \text{ Vs}$$

Der Widerstand ergibt sich aus dem Nennbetrieb durch Umstellen der Ankerspannungsgleichung:

$$R_A = \frac{U_{AN} - c\Phi_N \cdot \Omega_N}{I_{AN}} = 49 \text{ m}\Omega$$

Die Ankerspannung zu Beginn der Bremsung bei $n = n_N$ ergibt sich dann zu

$$U_A|_{n=n_N} = -1,5 \cdot R_A \cdot I_{AN} + c\Phi_N \cdot n_N \cdot 2\pi \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 978,8 \text{ V}$$

Unmittelbar vor Ende des Bremsvorgangs beträgt die Ankerspannung

$$U_A|_{n=0} = -1,5 \cdot R_A \cdot I_{AN} = -132,3 \text{ V}$$

- c) Die Änderung der Winkelgeschwindigkeit ergibt sich nach

$$\dot{\Omega} = \frac{1}{J_1 + J_2} \cdot (-1,5 \cdot 2 \cdot M_N - 2 \cdot M_{Last}) = \frac{1}{J} \cdot M_{ges}$$

Die Funktion der Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit ergibt sich durch Integration und unter Beachtung des Anfangswerts zu

$$\Omega(t) = \Omega_N + \frac{M_{ges}}{J} \cdot t$$

Der Bremsvorgang endet bei $\Omega = 0$. Die Dauer ergibt sich aus obiger Gleichung zu

$$\begin{aligned} 0 &= \Omega_N + \frac{M_{ges}}{J} \cdot t_b \\ \rightarrow t_b &= \Omega_N \cdot \frac{J}{M_{ges}} = 1,76 \text{ s} \end{aligned}$$

Der innerhalb dieser Zeit überstrichene Winkel der Maschinen lässt sich durch Integration bestimmen:

$$\begin{aligned}\alpha &= \int_0^{t_b} \Omega(t) dt \\ &= \int_0^{t_b} \left(\Omega_N - \frac{M_{ges}}{J} \cdot t \right) dt \\ &= \Omega_N \cdot t_b - \frac{1}{2} \cdot \frac{M_{ges}}{J} \cdot t_b^2 \\ &= 22,178 \text{ rad}\end{aligned}$$

Die Anzahl der Umdrehungen ergibt sich daraus zu

$$\frac{\alpha}{2\pi} = 3,53$$

2 Nennbetrieb eines Schenkelpolgenerators

Folgende Daten sind gegeben:

U_N	=	500 V	Nennwert der Leiterspannung
I_N	=	100 A	Nennstrom
$\cos(\varphi_N)$	=	0,85	Nennleistungsfaktor (übererregt)
X_d	=	5Ω	Synchronreaktanz in d-Richtung
X_q	=	3Ω	Synchronreaktanz in q-Richtung
f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz
p	=	4	Polpaarzahl

Vereinfachende Annahmen:

- Der Synchrongenerator sei verlustfrei.

Für die folgenden Aufgaben soll wie im Skript das Erzeugerzählpeilsystem angewandt werden.

- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm aus $\underline{U}_S$, $\underline{I}_S$ und $\underline{U}_P$ (Maßstab 20 A/cm, 50 V/cm). Berechnen Sie den Polradwinkel und den Effektivwert der Polradspannung.
- Jetzt wird das antreibende Drehmoment auf Null gesetzt. Berechnen Sie den Effektivwert des Statorstroms $I_{S(M=0)}$ und zeichnen Sie das Zeigerdiagramm aus $\underline{U}_S$, $\underline{I}_{S(M=0)}$ und $\underline{U}_P$ mit dem Maßstab aus a).

Lösung

- Für das Zeigerdiagramm werden folgende Größen benötigt:

$$U_S = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 288,68 \text{ V}$$

$$\varphi_N = 31,79^\circ$$

$$X_q I_S = 300 \text{ V}$$

Berechnung des Polradwinkels mit Hilfe der Hilfsgröße h:

Kosinussatz:

$$h = \sqrt{(X_q I_S)^2 + U_S^2 - 2 U_S X_q I_S \cos(90^\circ + \varphi)} = 514,37 \text{ V}$$

Sinussatz:

$$\frac{\sin \vartheta}{X_q I_S} = \frac{\sin(90^\circ + \varphi)}{h} \longrightarrow \vartheta = \arcsin\left(\frac{X_q I_S \cos \varphi}{h}\right) = 29,72^\circ$$

Für die Berechnung der Polradspannung müssen zunächst die beiden Stromkomponenten bestimmt werden:

$$I_d = I_S \cdot \cos(90^\circ - \varphi - \vartheta) = 87,89 \text{ A}$$

$$I_q = \sqrt{I_S^2 - I_d^2} = 47,7 \text{ A}$$

Die Polradspannung lässt sich dann berechnen zu

$$U_P = \sqrt{U_S^2 - (X_q I_q)^2} + I_d X_d = 690,17 \text{ V}$$

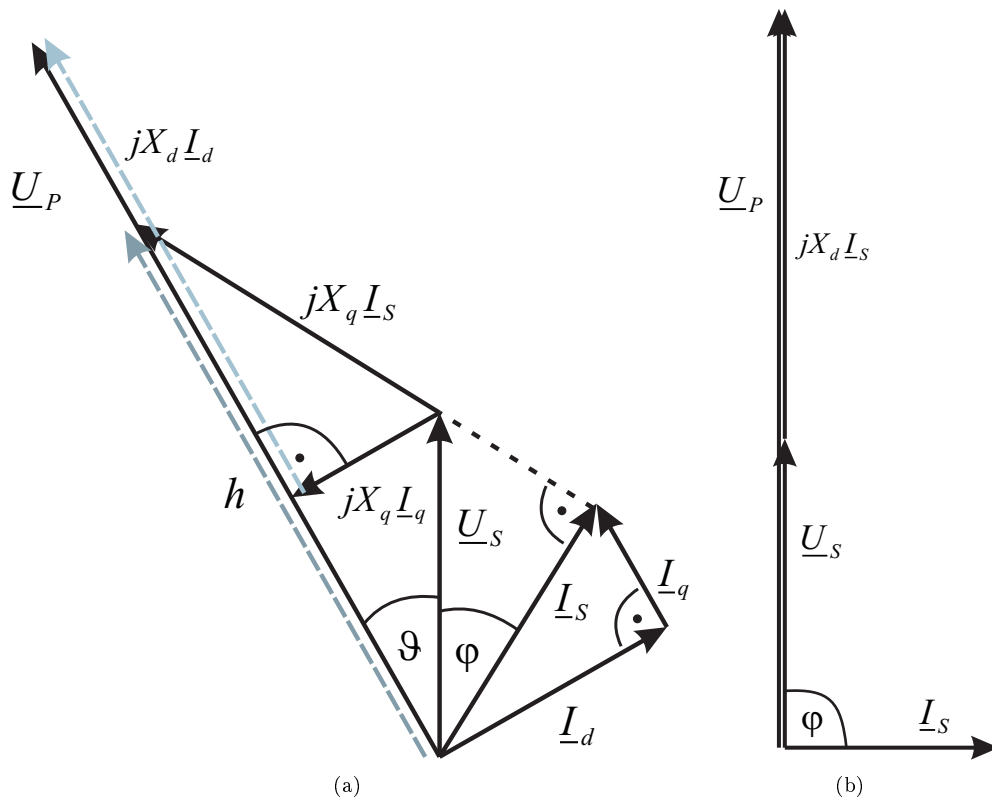


Abbildung 1: Zeigerdiagramme zu Aufgabe 2

- b) Da der Betrag der Polradspannung abhängig ist von der Erregung und der Drehzahl, welche jeweils konstant bleiben, ändert sich dieser nicht. Durch das wegfallende Drehmoment ändern sich der Polradwinkel zu $\vartheta = 0^\circ$ und der Phasenwinkel zu $\varphi = 90^\circ$ (Phasenschieberbetrieb, es wird keine Wirkleistung übertragen). Im Zeigerdiagramm ist $\underline{U}_P$ somit parallel zu $\underline{U}_S$. Die Differenz zwischen $\underline{U}_P$ und $\underline{U}_S$ entspricht dem Spannungsabfall an der Reaktanz X_d . Der Strangstrom lässt sich bestimmen zu

$$I_S|_{M=0} = \frac{U_P - U_S}{X_d} = 80,297 \text{ A}$$

3 Asynchronmaschine mit Schleifringläufer

Eine Asynchronmaschine mit Schleifringläufer soll gegen ein hohes Lastmoment von Drehzahl Null beginnend anlaufen.

Folgende Daten sind gegeben:

f_N	=	50 Hz	Nennfrequenz	} bei kurzgeschlossenen Schleifringen
n_N	=	2940 min ⁻¹	Nennzahl	
M_N	=	70 N m	Nennmoment	
s_k	=	11 %	Kippschlupf	
R_R	=	0,3 Ω	Rotorwiderstand je Strang	

Vereinfachende Annahmen:

- Eisen- und Reibungsverluste werden vernachlässigt.
- Die Streuinduktivitäten seien verschwindend klein gegenüber der Hauptinduktivität

- Geben Sie den Nennschlupf bei kurzgeschlossenen Schleifringen an.
- Berechnen Sie das Kippmoment bei kurzgeschlossenen Schleifringen.
- Berechnen Sie die Läuferverluste bei Kippmoment.

Jetzt soll der Motor mit in der Sternschaltung angeschlossenen Vorwiderständen R_V an den Schleifringen betrachtet werden.

- Welchen Wert muss R_V haben, damit das innere Moment im Stillstand gleich dem Wert des Kippmoments ist?

Der Motor soll jetzt mit angekuppelter Arbeitsmaschine in einem quasistationären Hochlauf bis zum Nennpunkt beschleunigt werden.

Das innere Moment soll soweit möglich dem Kippmoment entsprechen.

- Geben Sie den Wert des Vorwiderstandes R_V in Abhängigkeit von der Drehzahl an und skizzieren Sie $R_V(n)$.

Lösung

- Die Polpaarzahl der Maschine wird zu $p = 1$ abgelesen, womit die synchrone Drehzahl $n_{syn} = 3000 \text{ min}^{-1}$ beträgt. Der Schlupf ergibt sich dann zu

$$s_N = \frac{n_{syn} - n_N}{n_{syn}} = 0,02$$

- Das Kippmoment ergibt sich aus der Kloss'schen Formel:

$$\frac{M_N}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_k} + \frac{s_k}{s_N}}$$

$$\rightarrow M_k = \frac{M_N}{2} \cdot \left(\frac{s_N}{s_k} + \frac{s_k}{s_N} \right) = 198,86 \text{ Nm}$$

c) $P_{VR} = s \cdot P_D = s \cdot M_i \cdot \Omega_{syn} = s_k \cdot M_k \cdot \Omega_{syn} = 6,87 \text{ kW}$

- d) Durch einen Vorwiderstand wird die Kennlinie der Maschine so gestreckt, dass das Drehmoment beim Schlupf s zu einem Betriebspunkt mit s' verschoben wird. In diesem Fall soll das Kippmoment von $s = s_k = 0,11$ im Anlaufpunkt vorliegen. Damit gilt

$$\begin{aligned} s &= s_k = 0,11 \\ s' &= 1 \\ s' &= \frac{R_R + R_V}{R_R} \cdot s \\ \rightarrow R_V &= R_R \cdot \left(\frac{s'}{s_k} - 1 \right) = 2,427 \Omega \end{aligned}$$

- e) Der Schlupf s' ist nun von der Drehzahl abhängig:

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

Dies wird in die Formel eingesetzt und nach R_V aufgelöst:

$$\begin{aligned} \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} &= \frac{R_R + R_V}{R_R} \cdot s_k \\ R_V(n) &= \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \cdot \frac{R_R}{s_k} - R_R \\ &= \left[\left(1 - \frac{n}{n_{syn}} \right) \cdot \frac{1}{s_k} - 1 \right] R_R \end{aligned}$$

Dies entspricht einer Gerade mit Beginn im in d) ausgerechneten Punkt

$$R_V(0) = 2,427 \Omega$$

Ein weiterer Punkt lässt sich bestimmen, indem ermittelt wird, bei welcher Drehzahl der Vorwiderstand den Wert Null annimmt:

$$\begin{aligned} 0 &= \left[\left(1 - \frac{n}{n_{syn}} \right) \cdot \frac{1}{s_k} - 1 \right] R_R \\ \rightarrow n|_{R_V=0} &= 2670 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

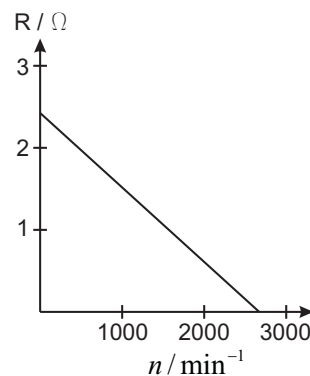
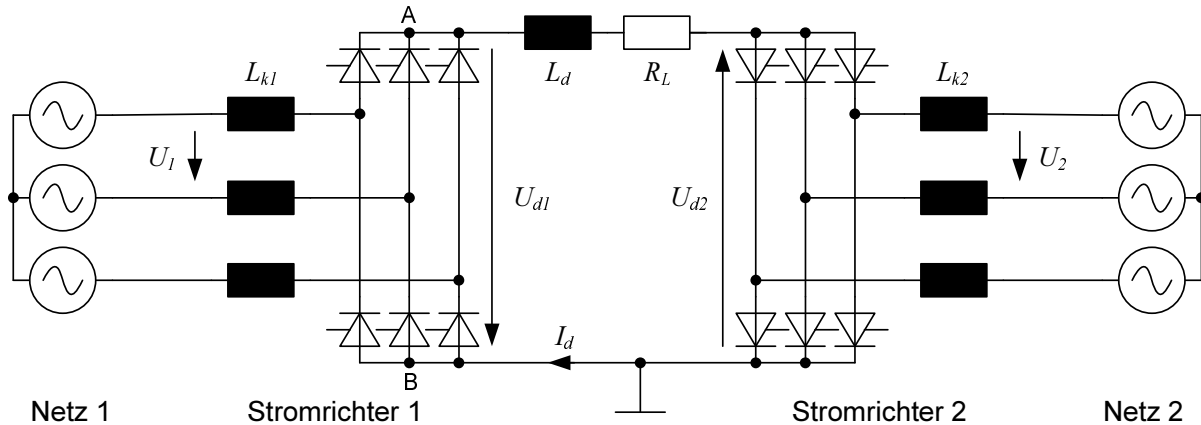


Abbildung 2: Lösung zu Aufgabe 3 e)

4 Kurzkupplung zweier Netze unterschiedlicher Frequenz

Von Netz 1 soll Energie an das Netz 2 übertragen werden. (Vereinfachte Anordnung!)



Folgende Daten sind gegeben:

U_{N1}	=	400 kV	Leiterspannung Netz 1
U_{N2}	=	400 kV	Leiterspannung Netz 2
I_{dN}	=	850 A	Nenngleichstrom
R_L	=	6 Ω	Leitungswiderstand
L_{k1}	=	110 mH	Kommutierungsinduktivität Netz 1
L_{k2}	=	110 mH	Kommutierungsinduktivität Netz 2
f_1	=	50 Hz	Netzfrequenz des Netzes 1
f_2	=	60 Hz	Netzfrequenz des Netzes 2

Vereinfachende Annahmen:

- Die Netze seien ideale Drehspannungsquellen.
- Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei.
- Der Zwischenkreisstrom I_d sei ein ideal glatter Gleichstrom.

- Berechnen Sie den maximalen Mittelwert der Gleichspannung U_{d1max} des Stromrichters 1 bei Nennstrom.
- Berechnen Sie den Überlappungswinkel des Stromrichters 1 für $\alpha_1 = 0^\circ$ bei Nennstrom.
- Berechnen Sie den Steuerwinkel α_2 des Stromrichters 2 für quasistationären Betrieb bei Nennstrom und $\alpha_1 = 0^\circ$.
- Bestimmen Sie die Leitungsverluste bei Nennstrom.
- Durch einen Kommutierungsfehler entsteht im Stromrichter 1 aus dem Nennbetrieb heraus ein Kurzschluss zwischen A und B. Welche Folgen hat dies für den Strom I_d , wenn der Steuerwinkel des Stromrichters 2 unverändert bleibt?

Lösung

- a) Der maximale Mittelwert der Gleichspannung wird bei $\alpha_1 = 0^\circ$ erreicht. Unter Beachtung des Spannungsabfalls an der Kommutierungsinduktivität bei Nennleichstrom ergibt sich

$$U_{d1_{max}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{N1} - \frac{3}{\pi} \cdot \omega_1 \cdot L_{k1} \cdot I_{dN} = 512,14 \text{ kV}$$

- b)

$$\begin{aligned} \cos(u_{\alpha_1}) &= 1 - \frac{2 \cdot \omega_1 \cdot L_k}{\sqrt{2} \cdot U_{N1}} \cdot I_{dN} \\ \rightarrow u_{\alpha_1} &= 26,34^\circ \end{aligned}$$

- c)

$$\alpha_1 = 0^\circ \rightarrow U_{d1} = 512,14 \text{ kV}$$

Die Spannung U_{d2} ergibt sich unter Beachtung des Spannungsabfalls am Leitungswiderstand zu

$$U_{d2} = -U_{d1} + I_{dN} \cdot R_L = -507,04 \text{ kV}.$$

Einsetzen in die Formel für die Gleichspannung und auflösen nach dem Steuerwinkel ergibt

$$\begin{aligned} U_{d2} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{N2} \cdot \cos(\alpha_2) - \frac{3}{\pi} \cdot \omega_2 \cdot L_{k2} \cdot I_{dN} \\ \rightarrow \alpha_2 &= \arccos\left(\frac{U_{d2} + \frac{3}{\pi} \cdot \omega_2 \cdot L_{k2} \cdot I_{dN}}{\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{N2}}\right) = 151,2^\circ \end{aligned}$$

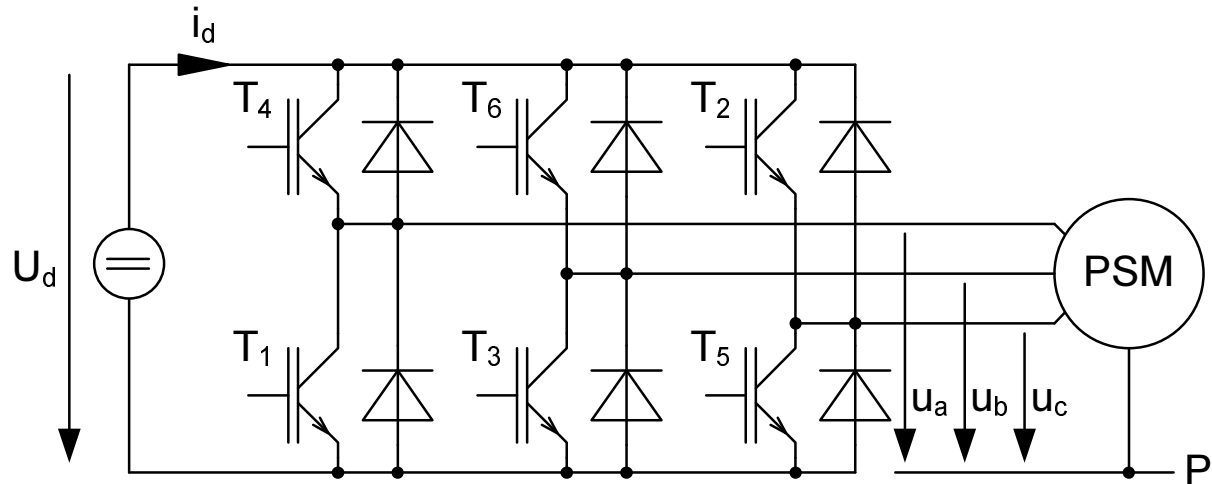
- d)

$$P_{VL} = I_{dN}^2 \cdot R_L = 4,335 \text{ MW}$$

- e) U_{d1} wird Null. Der Gleichstrom wird durch die Induktivität weitergetrieben, baut sich aber gegen U_{d2} ab und wird ebenfalls Null. Der Energiefluss kommt zum Erliegen.

5 Pulswechselrichter mit Blocksteuerung

Eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung speist eine permanentmagneterregte Synchronmaschine und wird mit Hilfe der Blocksteuerung betrieben.



Die Transistoren sollen so gesteuert werden, dass die Grundschwingungen der Spannungen u_a, u_b, u_c den Zeitverläufen

$$u_{a,1}(t) = \hat{U}_1 \cdot \cos(\omega t)$$

$$u_{b,1}(t) = \hat{U}_1 \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_{c,1}(t) = \hat{U}_1 \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

mit

$$\hat{U}_1 = 200 \text{ V}$$

entsprechen.

Vereinfachende Annahmen

- Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei.

- a) Geben Sie den Raumzeiger $\underline{u}_1$ für das Drehspannungssystem $u_{a,1}, u_{b,1}, u_{c,1}$ mit Hilfe der Exponentialfunktion an.

Zeichnen Sie den Raumzeiger des Spannungssystems $u_{a,1}, u_{b,1}, u_{c,1}$ zum Zeitpunkt $\omega t = 80^\circ$ in eine komplexe Ebene. Maßstab: 25 V/cm.

- b) Berechnen Sie den Wert der Gleichspannung U_d .

- c) Zeichnen Sie die Raumzeiger aller Schaltzustände, die bei der Blocksteuerung benutzt werden, maßstäblich in die komplexe Ebene aus a). (Maßstab ebenfalls 25 V/cm).

- d) Geben Sie an, welche Transistoren zum Zeitpunkt $\omega t = 80^\circ$ eingeschaltet sind.

- e) Beschreiben Sie kurz, welche Folgen es hat, wenn die Transistoren T_2, T_4 und T_6 während des Betriebs der permanentmagneterregten Synchronmaschine PSM dauerhaft eingeschaltet und die Transistoren T_1, T_3 und T_5 dauerhaft ausgeschaltet werden.

Lösung

a)

$$\begin{aligned}
 \underline{u}_1 &= (\underline{u}_{a,1} + \underline{a} \cdot \underline{u}_{b,1} + \underline{a}^2 \cdot \underline{u}_{c,1}) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \hat{U}_1 \cdot \left[\cos(\omega t) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \hat{U}_1 \cdot \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{2} \cdot \left(\cos(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right) \right. \\
 &\quad \left. + j\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\cos(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} \cdot \left(\cos(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + \sin(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right) \right. \\
 &\quad \left. - j\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\cos(\omega t) \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + \sin(\omega t) \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right) \right] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \hat{U}_1 \cdot \left[\cos(\omega t) + \frac{1}{4} \cos(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{4} \sin(\omega t) - j\frac{\sqrt{3}}{4} \cos(\omega t) + j\frac{3}{4} \sin(\omega t) + \frac{1}{4} \cos(\omega t) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{4} \sin(\omega t) + j\frac{\sqrt{3}}{4} \cos(\omega t) + j\frac{3}{4} \sin(\omega t) \right] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \hat{U}_1 \cdot \left(\frac{3}{2} \cos(\omega t) + j\frac{3}{2} \sin(\omega t) \right) \\
 &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{U}_1 \cdot e^{j\omega t}
 \end{aligned}$$

Das Ergebnis kann auch abgelesen werden aus dem Skript zu EMS S. 127 (Version WS 2009/2010).
Zeichnung siehe Abbildung 3.

b) Bei der Blocksteuerung gilt für den Effektivwert der Grundschiwingung der Außenleiterspannung

$$U_{ab} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d.$$

Der Zusammenhang zwischen dem Effektivwert der Außenleiterspannung und der Amplitude der Strangspannung lautet

$$U_{ab} = \hat{U}_1 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}.$$

Dies eingesetzt und nach U_d aufgelöst ergibt

$$U_d = \hat{U}_1 \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{6}} = 314,16 \text{ V}$$

c) Bei der Blocksteuerung werden insgesamt sechs verschiedene Schaltzustände genutzt. Die Länge der zugehörigen Raumzeiger ergibt sich aus der berechneten Zwischenkreisspannung zu

$$|\underline{u}| = \frac{U_d}{\sqrt{3}} = 181,4 \text{ V}$$

Zeichnung siehe Abbildung 3.

d) Es wird der Schaltzustand genutzt, der dem Raumzeiger zum Zeitpunkt $\omega t = 80^\circ$ am nächsten ist. Eingeschaltet sind dabei die Transistoren T_4 , T_6 und T_5 .

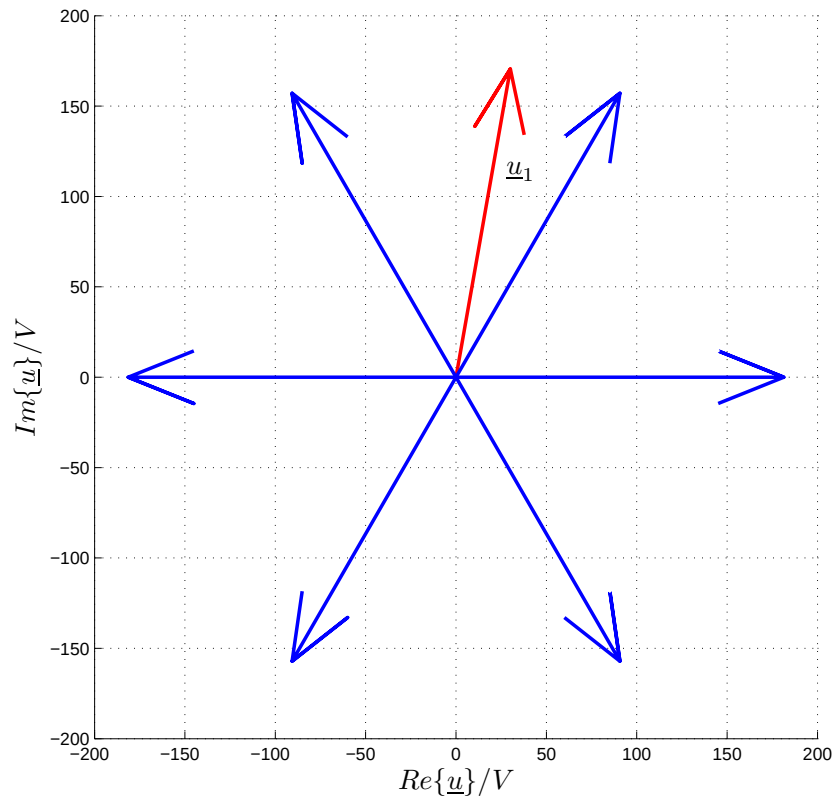


Abbildung 3: Raumzeiger zu a) und c)

- e) Die Klemmen der Synchronmaschine werden kurzgeschlossen. Die Polradspannung treibt einen Kurzschlussstrom, der lediglich durch die Induktivitäten begrenzt wird. Ein sehr hoher Strom und damit eine Überhitzung der Maschine und / oder der Leistungshalbleiter können die Folge sein. Während der Kurzschlussstrom fließt wirkt ein bremsendes Drehmoment (Kurzschlussdrehmoment).