

## 1 Universalmotor

Von einer Gleichstromreihenschlussmaschine sind folgende Daten bekannt:

### Daten der Reihenschlussmaschine bei Speisung mit Gleichspannung

|             |   |                |                                     |
|-------------|---|----------------|-------------------------------------|
| $U_{MN}$    | = | 220 V          | Nennspannung an den Motorklemmen    |
| $I_{MN}$    | = | 9 A            | Nennstrom des Motors                |
| $P_{mechN}$ | = | 1800 W         | Mechanische Nennleistung des Motors |
| $R_{FW}$    | = | 400 m $\Omega$ | Widerstand der Feldwicklung         |

### Vereinfachende Annahmen

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

Durch eine Messung wurden außerdem folgende Daten eines Betriebspunktes 1 ermittelt:

|          |   |                        |
|----------|---|------------------------|
| $U_{M1}$ | = | 110 V                  |
| $I_{M1}$ | = | 6 A                    |
| $n_1$    | = | 6000 min <sup>-1</sup> |

### Aufgabenstellung:

- Berechnen Sie den Widerstand  $R_{AW}$  der Ankerwicklung.
- Berechnen Sie das Nennmoment  $M_N$  des Motors.
- Berechnen Sie die Nenndrehzahl  $n_N$  des Motors.
- Welche Drehzahl  $n_2$  stellt sich ein, wenn der Motor an Nennspannung betrieben und mit dem Moment  $M_2 = 0,3 \cdot M_N$  belastet wird?
- Für welche Antriebsaufgaben wird der Universalmotor eingesetzt? Nennen Sie zwei konkrete Beispiele.

## Lösung

a) Der Widerstand  $R_{AW}$  der Ankerwicklung wird über die Leistungsbilanz berechnet:

$$P_{mech,N} = P_{el,N} - P_{VA} - P_{VF} \quad (1)$$

$$P_{mech,N} = U_{MN} \cdot I_{MN} - R_{AW} \cdot I_{MN}^2 - R_{FW} \cdot I_{MN}^2 \quad (2)$$

$$\Rightarrow R_{AW} = \frac{U_{MN} \cdot I_{MN} - P_{mech,N}}{I_{MN}^2} - R_{FW} = 1,822 \, \Omega \quad (3)$$

b) Es treten keine Sättigungseffekte im Eisen auf. Daher gilt:  $c\Phi \sim I_M$ .

$$U_{M1} = c\Phi_1 \cdot \Omega_1 + R_{AW} \cdot I_{M1} + R_{FW} \cdot I_{M1} \quad (4)$$

$$c\Phi_1 = \frac{U_{M1} - (R_{AW} + R_{FW}) I_{M1}}{2\pi \cdot \frac{n_1}{60 \frac{s}{min}}} = 0,154 \, Vs \quad (5)$$

$$c\Phi_N = c\Phi_1 \cdot \frac{I_{MN}}{I_{M1}} = 0,231 \, Vs \quad (6)$$

$$M_N = c\Phi_N \cdot I_{MN} = 2,077 \, Nm \quad (7)$$

c)

$$P_{mech,N} = \Omega_N \cdot M_N \quad (8)$$

$$n_N = \frac{P_{mech,N}}{M_N} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot 60 \frac{s}{min} = 8275,9 \, min^{-1} \quad (9)$$

d)

$$M_2 = c\Phi_2 \cdot I_{M2} \quad (10)$$

$$c\Phi_2 = c\Phi_N \cdot \frac{I_{M2}}{I_{MN}} \quad (11)$$

$$I_{M2} = \sqrt{0,3 \cdot M_N \cdot \frac{I_{MN}}{c\Phi_N}} = 4,93 \, A \quad (12)$$

$$c\Phi_2 = 0,126 \, Vs \quad (13)$$

$$U_{M2} = c\Phi_2 \cdot \Omega_2 + R_{AW} \cdot I_{M2} + R_{FW} \cdot I_{M2} \quad (14)$$

$$\Omega_2 = \frac{U_{M2} - (R_{AW} + R_{FW}) \cdot I_{M2}}{c\Phi_2} = 1653,8 \, s^{-1} \quad (15)$$

$$n_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot 60 \frac{s}{min} \cdot \Omega_2 = 15793 \, min^{-1} \quad (16)$$

Alternativer Lösungsweg (siehe auch Formelsammlung):

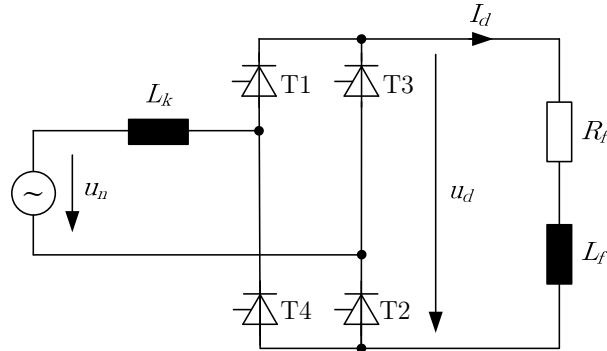
$$\Omega_2 = \frac{U_{MN}}{\sqrt{M_2 \cdot \frac{c\Phi_N}{I_{MN}}}} - \frac{R_{AW} + R_{FW}}{\frac{c\Phi_N}{I_{MN}}} \quad (17)$$

e) Universalmotoren werden z.B. in Bohrmaschinen und Staubsaugern eingesetzt.

Anmerkung: Es gibt auch weitere richtige Antworten.

## 2 Netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung

Eine netzgeführte Wechselstrombrückenschaltung speist die Erregerwicklung einer Gleichstrommaschine:



Folgende Daten sind gegeben:

|       |   |       |                                     |
|-------|---|-------|-------------------------------------|
| $U_n$ | = | 380 V | Effektivwert der Netzspannung $u_n$ |
| $f_n$ | = | 50 Hz | Netzfrequenz                        |

Vereinfachende Annahmen:

- Die Netzspannung  $u_n$  sei ideal sinusförmig.
- Der Gleichstrom  $I_d$  sei wegen  $L_f \rightarrow \infty$  ideal geglättet.
- Die Leistungshalbleiter seien ideal.

Die Wechselstrombrückenschaltung wird mit  $\alpha = 30^\circ$  betrieben und erzeugt bei einem Gleichstrom von  $I_d = 10 \text{ A}$  eine Ausgangsspannung mit dem Mittelwert  $U_d = 280 \text{ V}$ .

**Aufgabenstellung:**

- Berechnen Sie den Wert der Kommutierungsinduktivität  $L_k$ .
- Berechnen Sie den Überlappungswinkel  $u$ .
- Auf der Rückseite Ihres Deckblattes ist der Zeitverlauf der Spannung  $u_n(t)$  dargestellt. Zeichnen Sie in das Diagramm I den Zeitverlauf der Spannung  $u_d(t)$  mit  $\alpha = 30^\circ$  und  $u = 15^\circ$  ein.
- Zeichnen Sie in das Diagramm II auf der Rückseite Ihres Deckblattes die Bereiche ein, in denen die Thyristoren T1 und T2 sowie T3 und T4 leiten.

## Lösung

a)

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_n \cdot \cos(\alpha) - \frac{2}{\pi} \cdot \omega_n \cdot L_k \cdot I_d \quad (18)$$

$$L_k = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_n \cdot \cos(\alpha) - U_d}{\frac{2}{\pi} \cdot 2\pi \cdot f_n \cdot I_d} \quad (19)$$

$$= 8,142 \text{ mH} \quad (20)$$

b)

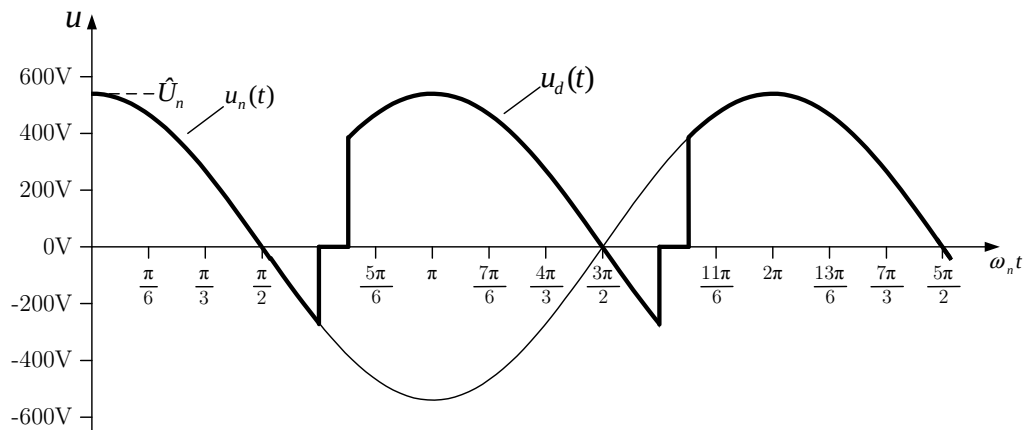
$$\cos(\alpha + u) = \cos(\alpha) - \frac{2 \cdot \omega_n \cdot L_k \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot U_n} \quad (21)$$

$$\alpha + u = 39,57^\circ \quad (22)$$

$$u = 9,57^\circ \quad (23)$$

c)

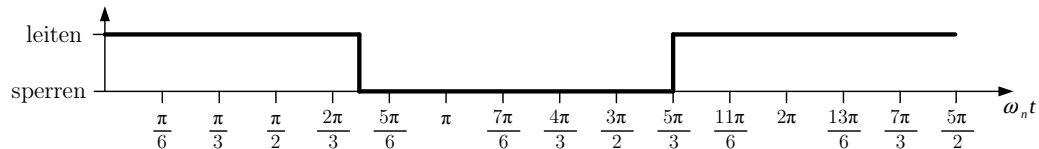
Diagramm I:



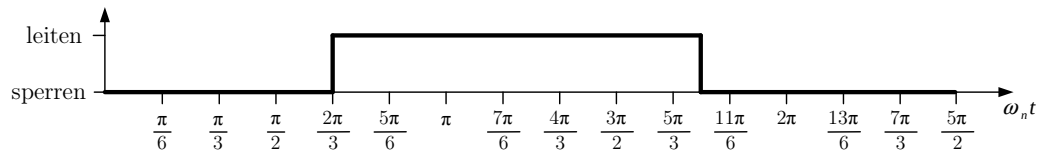
d)

Diagramm II:

T1 und T2



T3 und T4



### 3 Drehstromasynchronmaschine mit Schleifringläufer

Eine Drehstromasynchronmaschine mit Schleifringläufer treibt ein Förderband an. Die Drehstromasynchronmaschine wird durch das einphasige Ersatzschaltbild für den quasistationären Fall bei Nennfrequenz beschrieben.

#### Vereinfachende Annahmen

- Der Wert der Hauptinduktivität  $L_h$  sei unendlich.
- Die Asynchronmaschine sei sättigungs- und stromverdrängungsfrei.

#### Folgende Daten sind gegeben

##### Asynchronmaschine

|                |   |                        |                                                     |
|----------------|---|------------------------|-----------------------------------------------------|
| $U_N$          | = | 560 V                  | Nennspannung                                        |
| $f_N$          | = | 60 Hz                  | Nennfrequenz                                        |
| $p$            | = | 2                      | Polpaarzahl                                         |
| $R_S$          | = | 0,05 $\Omega$          | Statorwiderstand im einphasigen Ersatzschaltbild    |
| $X_{S\sigma}$  | = | 0,12 $\Omega$          | Statorstreureaktanz im einphasigen Ersatzschaltbild |
| $R'_R$         | = | 0,065 $\Omega$         | Rotorwiderstand im einphasigen Ersatzschaltbild     |
| $X'_{R\sigma}$ | = | 0,14 $\Omega$          | Rotorstreureaktanz im einphasigen Ersatzschaltbild  |
| $n_k$          | = | 1350 min <sup>-1</sup> | Kippdrehzahl bei kurzgeschlossenen Schleifringen    |

Die Schleifringe sind zunächst kurzgeschlossen.

- Berechnen Sie den Effektivwert des Anlaufstroms ( $n=0 \text{ min}^{-1}$ ) bei Betrieb an Nennspannung und Nennfrequenz.
- Bestimmen Sie den Leistungsfaktor  $\cos(\varphi)$  nach a).
- Berechnen Sie das Anlaufdrehmoment beim Betrieb nach a).

Angabe zur Lösung des Aufgabenteils d):

Zwischen zwei Schleifringen des in Stern geschalteten Läufers misst man bei abgeschalteter, stillstehender Asynchronmaschine einen Widerstandswert von 0,4  $\Omega$ .

- Jetzt soll das Anlaufdrehmoment durch einen dreisträngigen Vorwiderstand im Läuferkreis erhöht werden. Berechnen Sie den Wert des Vorwiderstands so, dass das Anlaufdrehmoment gleich dem Kippmoment wird.

## Lösung

a)

$$\underline{U}_S = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 323,3 \text{ V} \quad (24)$$

$$\frac{\underline{U}_S}{\underline{I}_S} = R_S + R'_R + j \cdot X_{S\sigma} + j \cdot X'_{R\sigma} \quad (25)$$

$$\underline{I}_S = 460 \text{ A} - j \cdot 1040 \text{ A} \quad (26)$$

$$I_S = |\underline{I}_S| = 1137,25 \text{ A} \quad (27)$$

b)

$$\cos(\varphi) = \frac{P_{el}}{S} = \frac{\operatorname{Re}\{3 \cdot \underline{U}_S \cdot \underline{I}_S\}}{3 \cdot |\underline{U}_S| \cdot |\underline{I}_S|} \quad (28)$$

$$\operatorname{Im}\{\underline{U}_S\} = 0 \quad (29)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{\operatorname{Re}\{\underline{I}_S\}}{|\underline{I}_S|} = 0,405 \quad (30)$$

c)

$$P_D = M_i \cdot \Omega_{syn} \quad (31)$$

$$P_D = P_{el} - P_{VS} = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_S \cdot \cos(\varphi) - 3 \cdot R_S \cdot I_S^2 = 252,2 \text{ kW} \quad (32)$$

$$\Omega_{syn} = \frac{\omega_N}{p} = \frac{2\pi \cdot f_N}{p} = 188,5 \frac{1}{s} \quad (33)$$

$$M_i = \frac{P_D}{\Omega_{syn}} = 1338 \text{ Nm} \quad (34)$$

d)

$$n_{syn} = \frac{f_N}{p} \cdot 60 \frac{s}{\min} = 1800 \text{ min}^{-1} \quad (35)$$

$$s_k = \frac{n_{syn} - n_k}{n_{syn}} = 0,25 \quad (36)$$

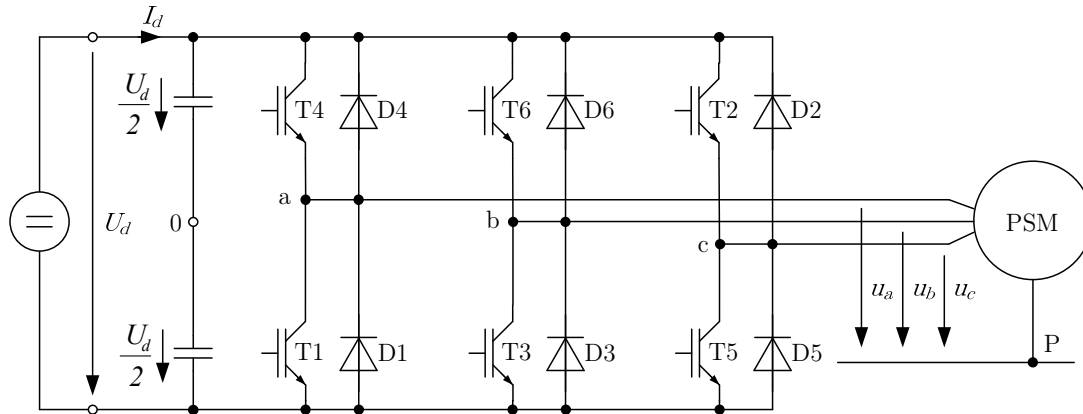
$$\frac{s^*}{s} = \frac{1}{s_k} = \frac{R_R + R_V}{R_R} \quad (37)$$

$$R_R = \frac{0,4 \Omega}{2} = 0,2 \Omega \quad (38)$$

$$R_V = \frac{R_R}{s_k} - R_R = 0,6 \Omega \quad (39)$$

## 4 Pulswechselrichtersteuerung für eine Synchronmaschine

Eine selbstgeführte Drehstrombrückenschaltung speist eine permanentmagneterregte Synchronmaschine.



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

$$\begin{aligned} u_{a,1}(t) &= \hat{U}_1^* \cdot \cos(\omega t) \\ u_{b,1}(t) &= \hat{U}_1^* \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_{c,1}(t) &= \hat{U}_1^* \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

entsprechen.

### Vereinfachende Annahmen:

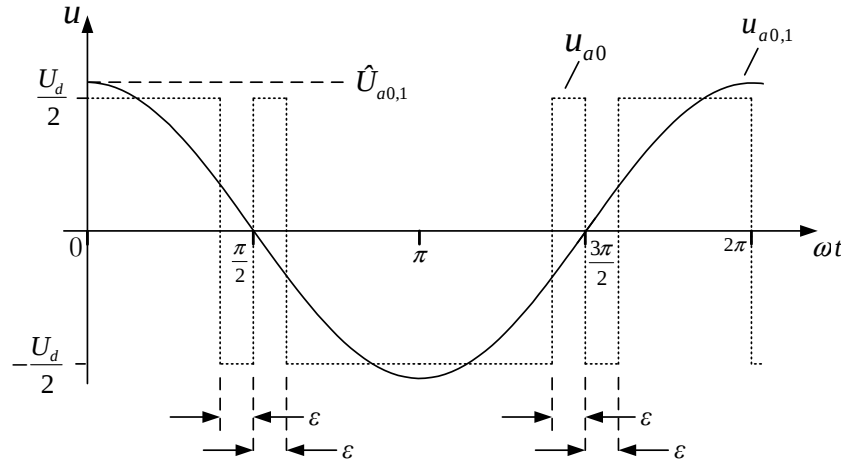
- Die Leistungshalbleiter seien ideal und verlustfrei.

### Folgende Daten sind gegeben:

$$U_d = 450 \text{ V} \quad \text{Speisespannung}$$

- Berechnen Sie die maximalen Amplituden der Grundswingung für die Raumzeigermodulation  $\hat{U}_{1,RZM}^*$  und die Blocktaktung  $\hat{U}_{1,BT}^*$ .
- Zeichnen Sie maßstäblich alle Raumzeiger der bei der Raumzeigermodulation benutzten Schaltzustände in eine komplexe Ebene (50 V/cm). Tragen Sie den Raumzeiger  $\underline{u}_1^*$  der Grundswingung für  $\omega t = \frac{\pi}{3}$  und  $\hat{U}_1^* = 200 \text{ V}$  ein.
- Geben Sie an, welche Raumzeiger bei der Raumzeigermodulation für  $\omega t = \frac{\pi}{3}$  und  $\hat{U}_1^* = 200 \text{ V}$  benutzt werden und berechnen Sie die zeitlichen Anteile an der Taktperiode  $T$ .
- Siehe nächste Seite
- Siehe nächste Seite

Im Bereich hoher Drehzahlen soll ein Steuerverfahren gemäß folgender Abbildung benutzt werden. Die Zeitverläufe von  $u_{b0}$  und  $u_{c0}$  haben die gleiche Gestalt, sind aber um  $\frac{2\pi}{3}$  bzw.  $\frac{4\pi}{3}$  gegenüber der Spannung  $u_{a0}$  versetzt.



- d) Geben Sie die mittlere Schaltfrequenz eines Transistors bei einer Grundswingungsfrequenz von  $f_1 = \frac{\omega}{2\pi} = 400 \text{ Hz}$  an.
- e) Berechnen Sie die Amplitude der Grundschiwingung  $\hat{U}_{a0,1}$  für den Schaltwinkel  $\epsilon = 20^\circ$ .

## Lösung

- a) Bei Raumzeigermodulation gilt:

$$\hat{U}_{1,RZM}^* = \sqrt{2} \cdot U_{1max,RZM} \quad (40)$$

$$= \sqrt{2} \cdot \frac{U_d}{\sqrt{6}} \quad (41)$$

$$= 259,8 \text{ V} \quad (42)$$

Bei Blocktaktung gilt:

$$\hat{U}_{1,BT}^* = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{1ab,BT}}{\sqrt{3}} \quad (43)$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_d \quad (44)$$

$$= 286,5 \text{ V} \quad (45)$$

- b) Länge der Raumzeiger berechnen:

$$|\underline{U}_x| = \frac{2}{3} \cdot U_d \quad (46)$$

$$= 300 \text{ V} \quad (47)$$

$$l_{RZ1..6} = \frac{|\underline{U}_x|}{50 \text{ V/cm}} = \frac{300 \text{ V}}{50 \text{ V/cm}} \quad (48)$$

$$= 6 \text{ cm} \quad (49)$$

Raumzeiger der Grundschiwingung für  $\omega t = \frac{\pi}{3}$  und  $\hat{U}_1^* = 200\text{V}$ :

$$\underline{u}_1^* = \hat{U}_1^* \cdot e^{j \cdot \frac{\pi}{3}} \quad (50)$$

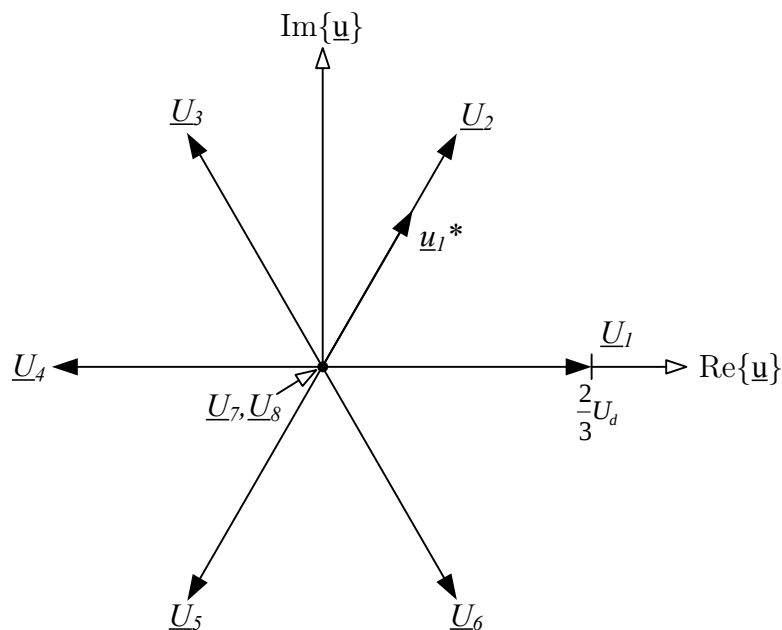
$$|\underline{u}_1^*| = \hat{U}_1^* \quad (51)$$

$$= 200\text{ V} \quad (52)$$

$$l_{RZ} = \frac{|\underline{u}_1^*|}{50\text{ V/cm}} = \frac{200\text{ V}}{50\text{ V/cm}} \quad (53)$$

$$= 4\text{ cm} \quad (54)$$

$$\angle \{\underline{u}_1^*\} = 60^\circ \quad (55)$$



- c) Es werden die Raumzeiger 2, 7 und 8 verwendet.  
Berechnung des Winkels  $\gamma$ :

$$\gamma = \angle \{\underline{u}_1^*\} - \angle \{\underline{U}_2\} \quad (56)$$

$$= 0 \quad (57)$$

Berechnung der zeitlichen Anteile der Schaltzustände an der Taktperiode  $T$ :

$$\frac{t_2}{T} = \frac{\hat{U}_1^*}{U_d} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \gamma\right) \quad (58)$$

$$= \frac{2}{3} \quad (59)$$

$$\frac{t_7 + t_8}{T} = 1 - \frac{t_2}{T} \quad (60)$$

$$= \frac{1}{3} \quad (61)$$

- d) Während einer Taktperiode treten drei positive und drei negative Schaltflanken auf. Damit beträgt die Schaltfrequenz:

$$f_S = 3 \cdot f_1 = 1,2\text{ kHz} \quad (62)$$

e) Die Spannung  $u_{a0}$  lässt sich mit Hilfe einer Fourierreihe als  $s(\omega t)$  darstellen:

$$s(\omega t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{\nu=1}^{\infty} A_{\nu} \cdot \cos(\nu \omega t) + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\nu} \cdot \sin(\nu \omega t) \quad (63)$$

$$(64)$$

Aus Symmetriegründen ist  $A_0 = 0$  und  $B_{\nu} = 0$ . Die Grundschiwingung lässt sich wie folgt darstellen:

$$u_{a0,1} = \hat{U}_{a0,1} \cdot \cos(\omega t) \quad (65)$$

$$= A_1 \cdot \cos(\omega t) \quad (66)$$

Die Amplitude  $\hat{U}_{a0,1}$  kann wie folgt berechnet werden:

$$\hat{U}_{a0,1} = A_1 \quad (67)$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{a0}(\omega t) \cdot \cos(1 \cdot \omega t) \cdot d\omega t \quad (68)$$

$$= \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u_{a0}(\omega t) \cdot \cos(\omega t) \cdot d\omega t \quad (69)$$

$$= \frac{4}{\pi} \cdot \left( \int_0^{\frac{\pi}{2}-\epsilon} \frac{U_d}{2} \cdot \cos(\omega t) \cdot d\omega t + \int_{\frac{\pi}{2}-\epsilon}^{\frac{\pi}{2}} -\frac{U_d}{2} \cdot \cos(\omega t) \cdot d\omega t \right) \quad (70)$$

$$= \frac{4}{\pi} \cdot \left( \left[ \frac{U_d}{2} \cdot \sin(\omega t) \right]_0^{\frac{\pi}{2}-\epsilon} + \left[ -\frac{U_d}{2} \cdot \sin(\omega t) \right]_{\frac{\pi}{2}-\epsilon}^{\frac{\pi}{2}} \right) \quad (71)$$

$$= \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \left( \sin\left(\frac{\pi}{2} - \epsilon\right) - \sin(0) - \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \epsilon\right) \right) \quad (72)$$

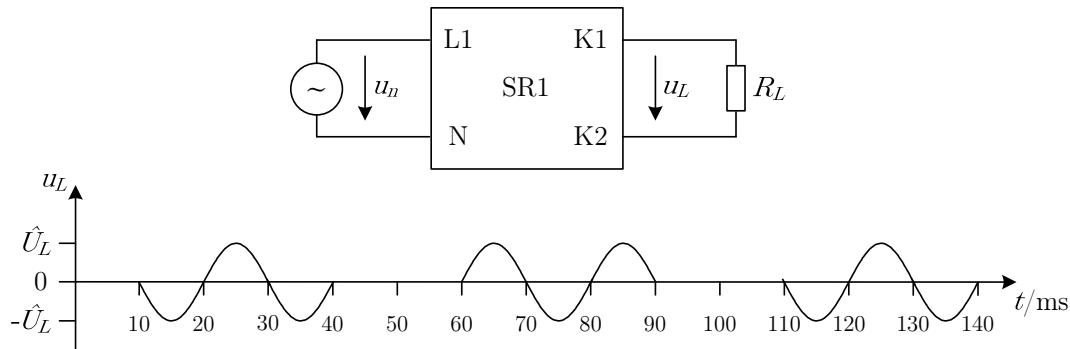
$$= \frac{2 \cdot U_d}{\pi} \cdot \left( 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \epsilon\right) - 1 \right) \quad (73)$$

Mit  $\epsilon = 20^\circ$  ergibt sich:

$$\hat{U}_{a0,1} = 251,9 \text{ V} \quad (74)$$

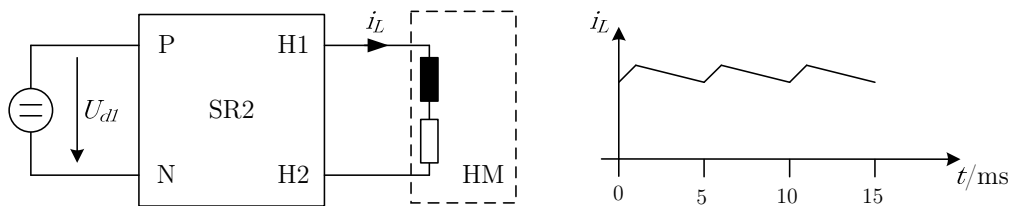
## 5 Stromrichterschaltungen für unterschiedliche Anwendungen

- a) Ein Stromrichter SR1 steuert die von der Widerstandslast  $R$  abgegebene Wärmeleistung. Als Energiequelle steht ein einphasiges Wechselspannungsnetz mit  $f_n = 50 \text{ Hz}$  zur Verfügung. Die Spannung  $u_L$  hat den unten dargestellten Zeitverlauf:



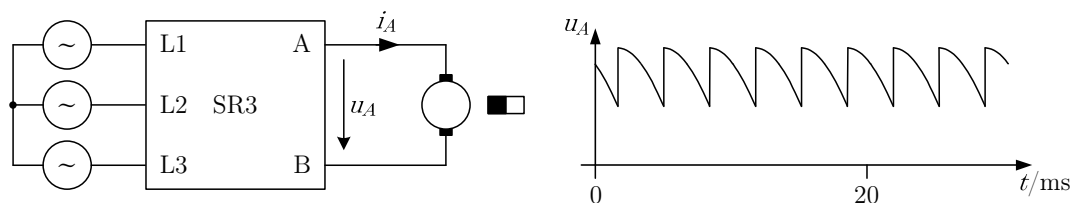
Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR1 zwischen den Anschlussklemmen L1, N und K1, K2. Wie heißt die angewandte Steuermethode?

- b) Ein Stromrichter SR2 steuert die Kraft eines Hubmagneten HM. Als Energiequelle steht eine Gleichspannungsquelle zur Verfügung. Der Strom  $i_L$  hat den rechts dargestellten Zeitverlauf:



Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR2 zwischen den Anschlüssen P, N und H1, H2. Wählen Sie von den möglichen Schaltungsvarianten diejenige mit der minimalen Anzahl an abschaltbaren Bauelementen.

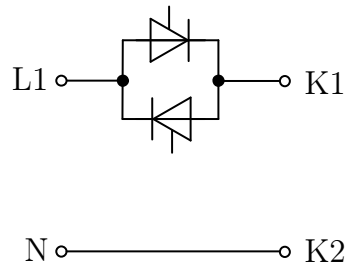
- c) Ein Stromrichter SR3 steuert das Drehmoment und die Drehzahl eines Gleichstrommotors. Beide Drehmomentrichtungen und beide Drehrichtungen sind möglich („Vierquadrantenbetrieb“). Die Ankerkreisspannung  $u_A$  hat den rechts dargestellten Zeitverlauf.



Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild des Stromrichters SR3 zwischen den Klemmen des Drehspannungsnetzes L1, L2, L3 und den Anschlussklemmen A, B des Gleichstrommotors.

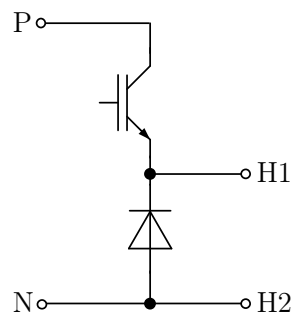
## Lösung

a)



Es wird die Methode der Schwingungspaketsteuerung angewendet.

b) Der Stromrichter SR2 ist ein Tiefsetzsteller:



c)

