

Ausarbeitung der Beispiele aus

**Rechenübungen zu
Leistungselektronik**

Teil B - Selbstgeführte Stromrichter

Die hier angeführten Berechnungen könnten fehlerhaft sein.

Inhalt

Beispiel 1	3
Beispiel 2	4
Beispiel 3	5
Beispiel 4	6
Beispiel 5	7
Beispiel 6	8
Beispiel 7	9
Beispiel 8	9
Beispiel 9	10
Beispiel 10	11
Beispiel 11	12

Beispiel 1

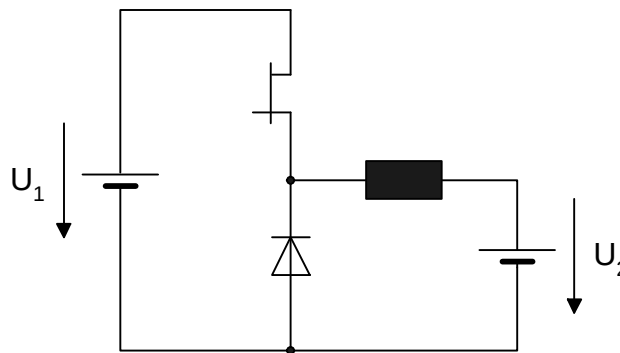
Angabe:

Gegeben ist ein nicht potentialtrennender DC/DC-Wandler (negative Versorgung verbunden) mit einer Ausgangsspannung von +12 V und einem Eingangsspannungsbereich von 18...36 V. Es wird eine Leistung von 60 W übertragen. Als Schalttransistor wird ein MOSFET eingesetzt, welcher mit einer Arbeitsfrequenz von 100 kHz betrieben wird. Der ON-Widerstand dieses Transistors beträgt 50 mΩ. Die Glättungsinduktivität hat einen Wert von 240 μH.

- Zeichnen Sie die Schaltung
- Berechnen Sie den Stromripple (Spitze-Spitze-Wert) des Stromes in der Glättungsdrossel, wobei der ungünstigste Fall zu berücksichtigen ist.
- Berechnen Sie die im ungünstigsten Fall im MOSFET auftretenden Leitverluste.

Lösung:

a)



$$\delta_{\max} = \frac{U_2}{U_{1,\min}} = \frac{12 \text{ V}}{18 \text{ V}} = \frac{2}{3}$$

$$\delta_{\min} = \frac{U_2}{U_{1,\max}} = \frac{12 \text{ V}}{36 \text{ V}} = \frac{1}{3}$$

b)

Intervall $\delta \cdot T$:

$$u_L = U_1 - U_2 = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{\Delta i_{2,\text{auf}}}{\delta \cdot T}$$

$$\Delta i_{2,\text{auf}} = (U_1 - U_2) \cdot \frac{\delta \cdot T}{L} = (36 \text{ V} - 12 \text{ V}) \cdot \frac{\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{100 \text{ kHz}}}{240 \mu\text{H}} = 0,3 \text{ A}$$

Intervall $(1-\delta) \cdot T$:

$$u_L = -U_2 = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{\Delta i_{2,ab}}{(1-\delta) \cdot T}$$

$$\Delta i_{2,ab} = -U_2 \cdot \frac{(1-\delta) \cdot T}{L} = -12 \text{ V} \cdot \frac{(1-\frac{1}{3}) \cdot \frac{1}{100 \text{ kHz}}}{240 \mu\text{H}} = 0,3 \text{ A}$$

$$\Delta i_{\max} = 0,3 \text{ A} \quad \text{bei } U_1 = 36 \text{ V}$$

c)

$$\bar{i}_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{60 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 5 \text{ A}$$

$$P_{\text{Leit}} = \delta_{\max} \cdot \bar{i}_2^2 \cdot R_{\text{Tr,ON}} = \frac{2}{3} \cdot (5 \text{ A})^2 \cdot 50 \text{ m}\Omega = 0,83 \text{ W} \quad \text{bei } U_1 = 18 \text{ V}$$

Beispiel 2

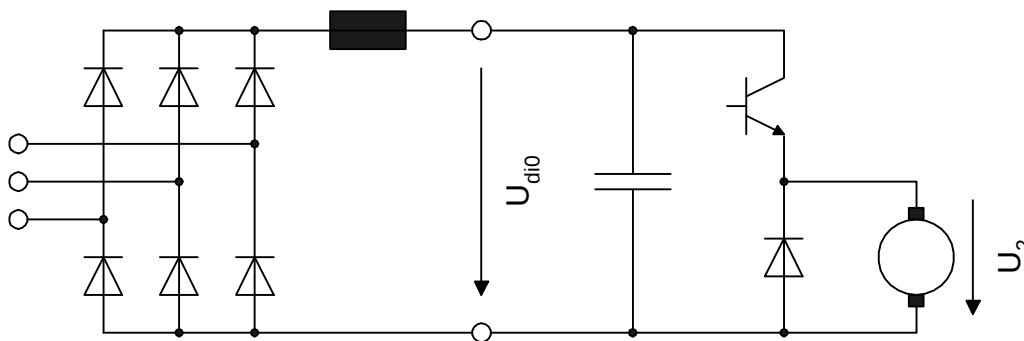
Angabe:

Ein Tiefsetzsteller mit abschaltbarem Halbleiterventil speist in eine Gleichstrommaschine mit einer Ankerspannung von 300 V einen Ankerstrom von 65 A (ideale Glättung). Die „Eingangsspannung“ des Tiefsetzstellers bildet ein Zwischenkreiskondensator, der seinerseits wieder über eine ungesteuerte B6-Schaltung mit ausgangsseitiger Glättungsinduktivität (wieder ideale Glättung) aus dem 400 V-Drehstromnetz ($U_{\text{dio}}=540 \text{ V}$) versorgt wird.

- Zeichnen Sie die Schaltung.
- Berechnen Sie den Ausgangsstrom des B6-Brückengleichrichters.
- Berechnen Sie den Effektivwert des Stromes im Zwischenkreiskondensator.
- Wie groß muß die Induktivität im Ankerkreis mindestens sein, damit die Maschine nicht mehr als 5% Momenttrippl aufweist? Die Arbeitsfrequenz der Schaltung beträgt 1 kHz.

Lösung:

a)



b)

$$\delta = \frac{U_2}{U_1} = \frac{300 \text{ V}}{540 \text{ V}} = 0,5$$

$$I_1 = \delta \cdot I_2 = 0,5 \cdot 65 \text{ A} = 36,11 \text{ A}$$

c)

$$I_{ZK,RMS} = I_2 \cdot \sqrt{\delta} = 65 \text{ A} \cdot \sqrt{0,5} = 48,45 \text{ A}$$

$$I_{C,ZK,RMS} = \sqrt{I_{ZK,RMS}^2 - I_1^2} = \sqrt{(48,45 \text{ A})^2 - (36,11 \text{ A})^2} = 32,3 \text{ A}$$

d)

$$\Delta M_{\%} = \Delta i_{2,\%}$$

Intervall $\delta \cdot T$:

$$U_1 - U_2 = L \cdot \frac{\Delta i_{2,auf}}{\delta \cdot T}$$

$$L = (U_1 - U_2) \cdot \frac{\delta \cdot T}{\Delta i_{2,auf}} = (540 \text{ V} - 300 \text{ V}) \cdot \frac{0,5 \cdot \frac{1}{1 \text{ kHz}}}{0,05 \cdot 65 \text{ A}} = 4103 \text{ mH}$$

Intervall $(1-\delta) \cdot T$:

$$-U_2 = L \cdot \frac{\Delta i_{2,ab}}{(1-\delta) \cdot T}$$

$$L = -U_2 \cdot \frac{(1-\delta) \cdot T}{\Delta i_{2,ab}} = -300 \text{ V} \cdot \frac{(1-0,5) \cdot \frac{1}{1 \text{ kHz}}}{0,05 \cdot 65 \text{ A}} = 4103 \text{ mH}$$

Beispiel 3

Angabe:

Zeichnen Sie die Spannungssteuerkennlinien $U_2/U_1=f(\delta)$ für Buck-, Boost- und Buck-Boost-Konverter und geben Sie diese auch in Gleichungsform an.

Lösung:

Buck-Konverter:

$$U_2 = \delta \cdot U_1$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \delta$$

Boost-Konverter:

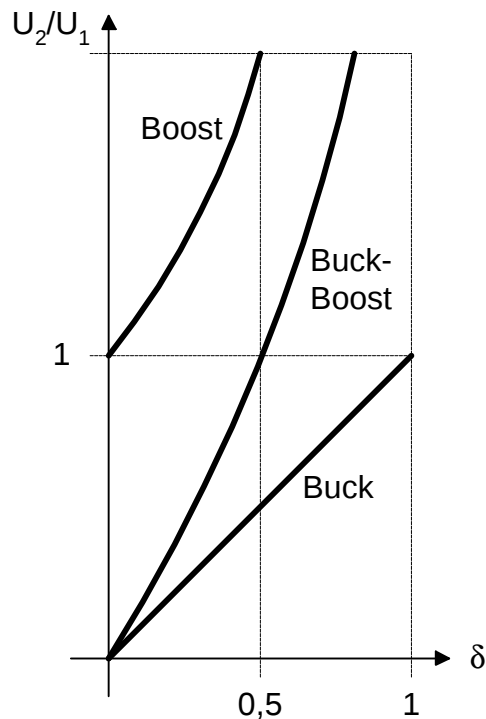
$$U_2 = \frac{1}{1-\delta} \cdot U_1$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1-\delta}$$

Buck-Boost-Konverter:

$$U_2 = \frac{\delta}{1-\delta} \cdot U_1$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\delta}{1-\delta}$$



Beispiel 4

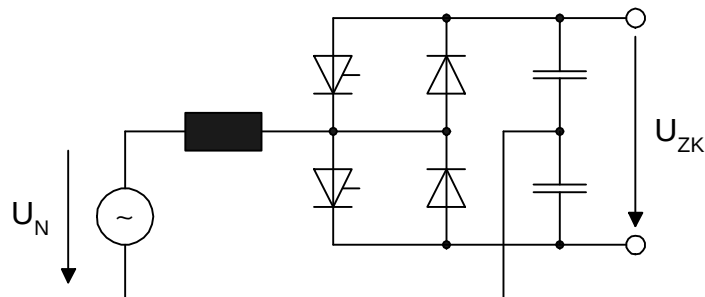
Angabe:

Ein Halbbrückenweig, welcher eine netzfrequente Rechteckspannung von ± 325 V erzeugt, ist über eine Induktivität von 15 mH an ein einphasiges Netz (230 V Effektivwert) angeschlossen (der N-Leiter ist mit dem Mittelpunkt des Zwischenkreises verbunden). Der Halbbrückenweig wird so getaktet, daß seine Ausgangsspannung der Netzspannung um 30° nacheilt.

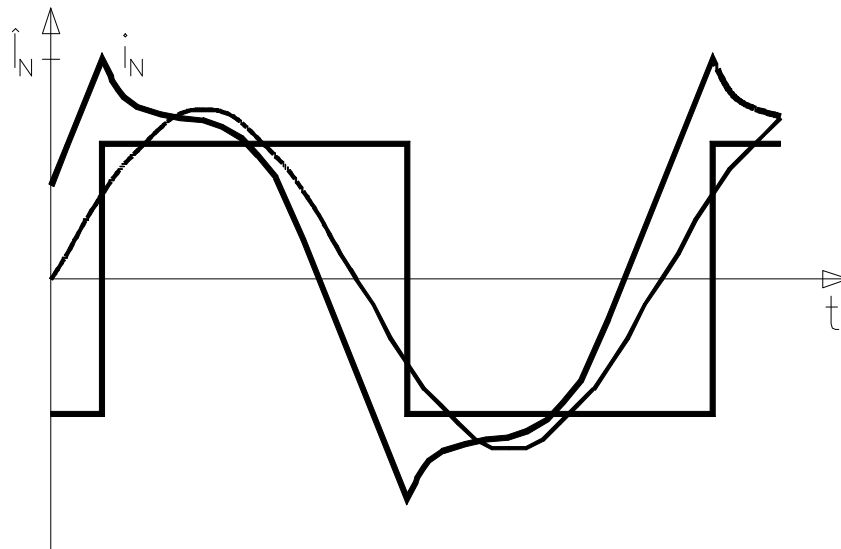
- Zeichnen Sie die Schaltung.
- Skizzieren Sie den Zeitverlauf des Netzstromes.
- Berechnen Sie den Spitzenwert des Netzstromes.

Lösung:

a)



b)



c)

$$i_N = \frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot (-\cos(x) - x) + c$$

$$x = \varphi \quad i_N = \hat{I}_N \quad \hat{I}_N = \frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot (-\cos(\varphi) - \varphi) + c$$

$$x = \varphi + \pi \quad i_N = -\hat{I}_N \quad -\hat{I}_N = \frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot (-\cos(\varphi + \pi) - (\varphi + \pi)) + c$$

$$\frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot (-\cos(\varphi) - \varphi) + c = \frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot (\cos(\varphi + \pi) + (\varphi + \pi)) + c$$

$$\frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot (-\varphi - (\varphi + \pi)) = -2 \cdot c$$

$$c = \frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\hat{I}_N = \frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot \left(-\cos(\varphi) + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\sqrt{2} \cdot 230 \text{ V}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 15 \text{ mH}} \cdot \left(-\cos(30^\circ) + \frac{\pi}{2} \right) = 48,6 \text{ A}$$

Beispiel 5

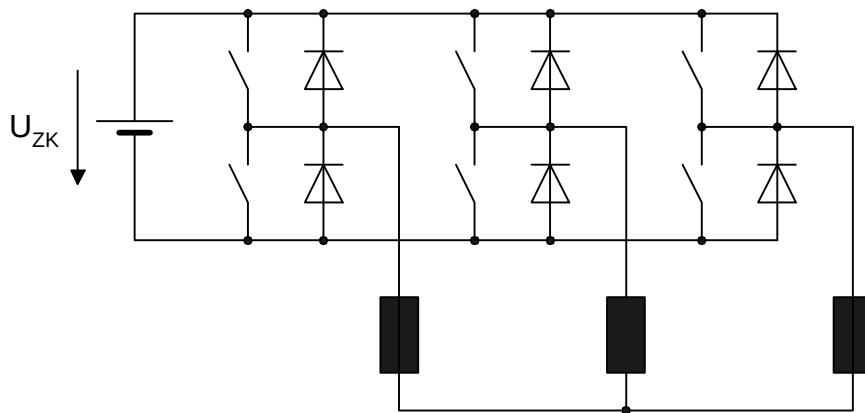
Angabe:

Eine dreiphasige, rein induktive Last ($L=60 \text{ mH}$) wird von einem dreiphasigen, im Blockbetrieb gesteuerten Spannungszwischenkreisumrichter (Grundschwingungsfrequenz 50 Hz, Zwischenkreisspannung 540 V) gespeist.

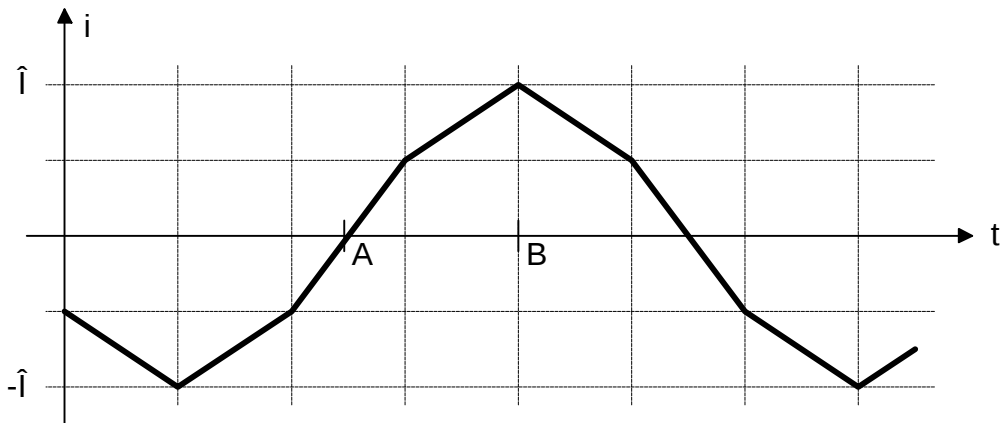
- Zeichnen Sie die Schaltung.
- Zeichnen Sie den Verlauf eines Phasenstromes.
- Berechnen Sie den maximalen Ventilstrom.

Lösung:

a)



b)



c)

$$\hat{I} = \frac{1}{L} \cdot \int_A^B u \cdot dt = \frac{1}{L} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot U_{ZK} \cdot \frac{T}{12} + \frac{1}{3} \cdot U_{ZK} \cdot \frac{T}{6} \right) = \frac{1}{9} \cdot U_{ZK} \cdot \frac{T}{L} = \frac{1}{9} \cdot 540 \text{ V} \cdot \frac{\frac{1}{50 \text{ Hz}}}{60 \text{ mH}} = 20 \text{ A}$$

Beispiel 6

Angabe:

Ein dreiphasiger Umrichter mit einer Zwischenkreisspannung von 500 V speist eine Asynchronmaschine (Leiterstrom 80 A_{RMS}, Außenleiterspannung 250 V_{RMS}, cos(φ₁)=0,85). Berechnen Sie den Mittelwert des aus dem Zwischenkreis entnommenen Stromes.

Lösung:

$$P_{ASM} = \sqrt{3} \cdot U_{ASM,AL} \cdot I_{1,RMS} \cdot \cos(\varphi_1) = \sqrt{3} \cdot 250 \text{ V} \cdot 80 \text{ A} \cdot 0,85 = 29,4 \text{ kW}$$

$$I_{ZK,AVG} = \frac{P_{ASM}}{U_{ZK}} = \frac{29,4 \text{ kW}}{500 \text{ V}} = 58,9 \text{ A}$$

Beispiel 7

Angabe:

Ein einphasiger Pulswechselrichter mit einer Zwischenkreisspannung von 700 V (Gesamtwert) soll eine Ausgangsspannung mit einer Grundschiwingung von 150 V (Effektivwert) erzeugen.

Berechnen Sie den Minimal- und Maximalwert des Tastverhältnisses δ .

Lösung:

$$\delta(x) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{\hat{U}_A}{\frac{U_{ZK}}{2}} \cdot \sin(x) \right)$$

$$\sin(x) = 1 \quad \delta_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{\sqrt{2} \cdot 150 \text{ V}}{\frac{700}{2}} \right) = 0,803$$

$$\sin(x) = -1 \quad \delta_{\min} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{2} \cdot 150 \text{ V}}{\frac{700}{2}} \right) = 0,197$$

Beispiel 8

Angabe:

Ein Tiefsetzsteller mit Löschthyristor und Umschwingkreis speist eine Leistung von 12 kW in eine Gleichstrommaschine mit einer Ankerspannung von 300 V (ideale Glättung). Die Eingangsspannung beträgt 500 V, es wird eine Schaltfrequenz von 1 kHz verwendet, die Schonzeit des Hauptthyristors soll 100 μ s betragen. Der Maximalwert des Stromes im Hauptthyristor darf 140 A nicht übersteigen.

- Zeichnen Sie die Schaltung.
- Zeichnen Sie den Zeitverlauf der Ausgangsspannung.
- Berechnen Sie die Kapazität des Löschkondensators und die Induktivität der Umschwingdrossel.

Lösung:

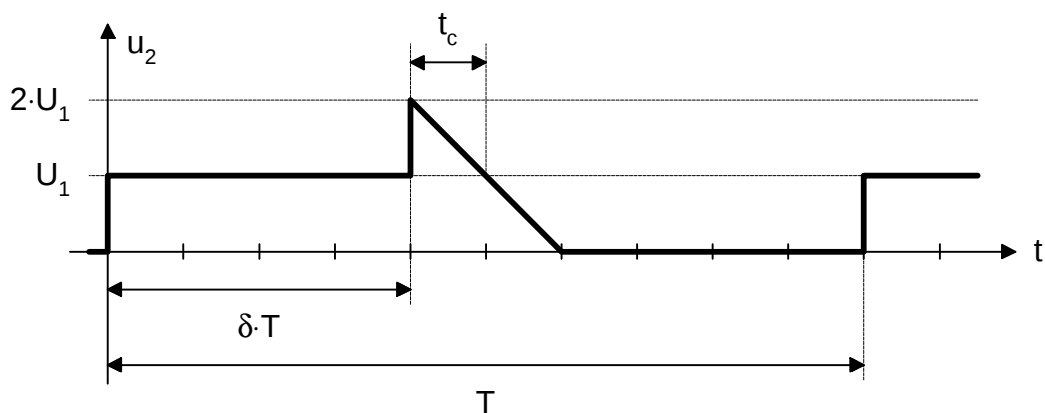
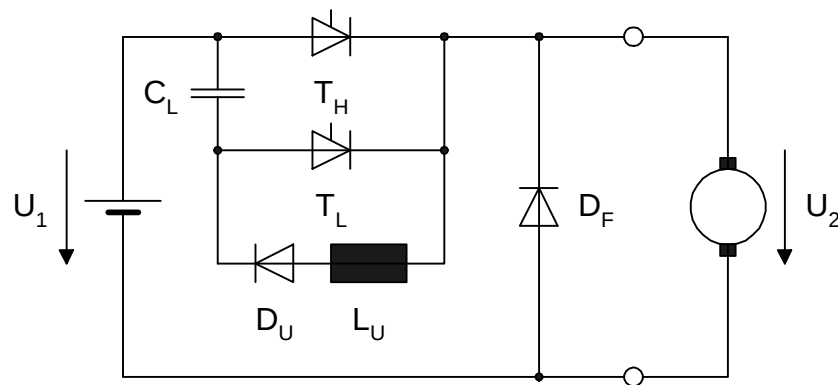
a) Siehe nächste Seite.

b) Siehe nächste Seite.

c)

$$\delta = \frac{U_2}{U_1} - \frac{2 \cdot t_c}{T} = \frac{300 \text{ V}}{500 \text{ V}} - \frac{2 \cdot 100 \mu\text{s}}{\frac{1}{1 \text{ kHz}}} = 0,4$$

$$i = C_L \cdot \frac{dU_2}{dt}$$



$$I_2 = C_L \cdot \frac{U_1}{t_c}$$

$$C_L = I_2 \cdot \frac{t_c}{U_1} = \frac{P}{U_2} \cdot \frac{t_c}{U_1} = \frac{12 \text{ kW}}{300 \text{ V}} \cdot \frac{100 \mu\text{s}}{500 \text{ V}} = 8 \mu\text{F}$$

$$i_{\text{Th,max}} = I_2 + \frac{U_1}{Z}$$

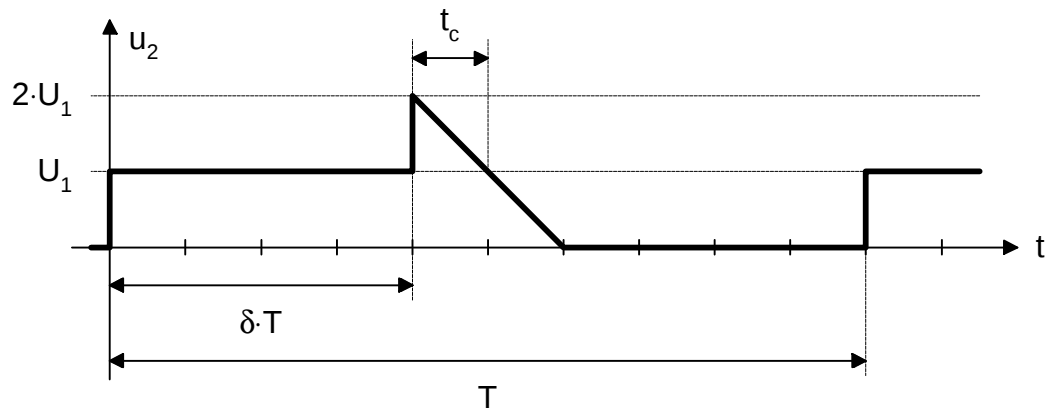
$$Z = \frac{U_1}{i_{\text{Th,max}} - I_2} = \frac{500 \text{ V}}{140 \text{ A} - 40 \text{ A}} = 5 \Omega$$

$$L_U = C_L \cdot Z^2 = 8 \mu\text{F} \cdot (5 \Omega)^2 = 200 \mu\text{H}$$

Beispiel 9

Angabe:

Berechnen Sie die Kennlinie $U_2/U_1=f(\delta)$ (δ ist hier das Tastverhältnis der Steuerung) eines Thyristor-Tiefsetzstellers mit Löscheinrichtung, wenn dieser eine RL-Last mit idealer Glättung speist. Gegeben sind δ , Lastwiderstand R , Löschkondensator C , Arbeitsspiel T .



Lösung:

$$U_2 = \bar{u}_A = \delta \cdot U_1 + \frac{2 \cdot t_c}{T} \cdot U_1$$

$$t_c = \frac{C_L \cdot U_1}{I_2} = \frac{U_1}{U_2} \cdot C_L \cdot R \quad \text{mit } I_2 = \frac{U_2}{R}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \delta + \frac{2 \cdot C_L \cdot R}{T} \cdot \frac{U_1}{U_2}$$

$$\text{Substitution: } v = \frac{U_2}{U_1}$$

$$v^2 - \delta \cdot v - \frac{2 \cdot C_L \cdot R}{T} = 0$$

$$v = \frac{\delta}{2} + \sqrt{\frac{\delta^2}{4} + \frac{2 \cdot C_L \cdot R}{T}}$$

Beispiel 10

Angabe:

Gegeben ist ein resonanter Tiefsetzsteller mit $U_1=200 \text{ V}$, $I_2=15 \text{ A}$, $L=100 \text{ } \mu\text{H}$, $C=1 \text{ } \mu\text{F}$.

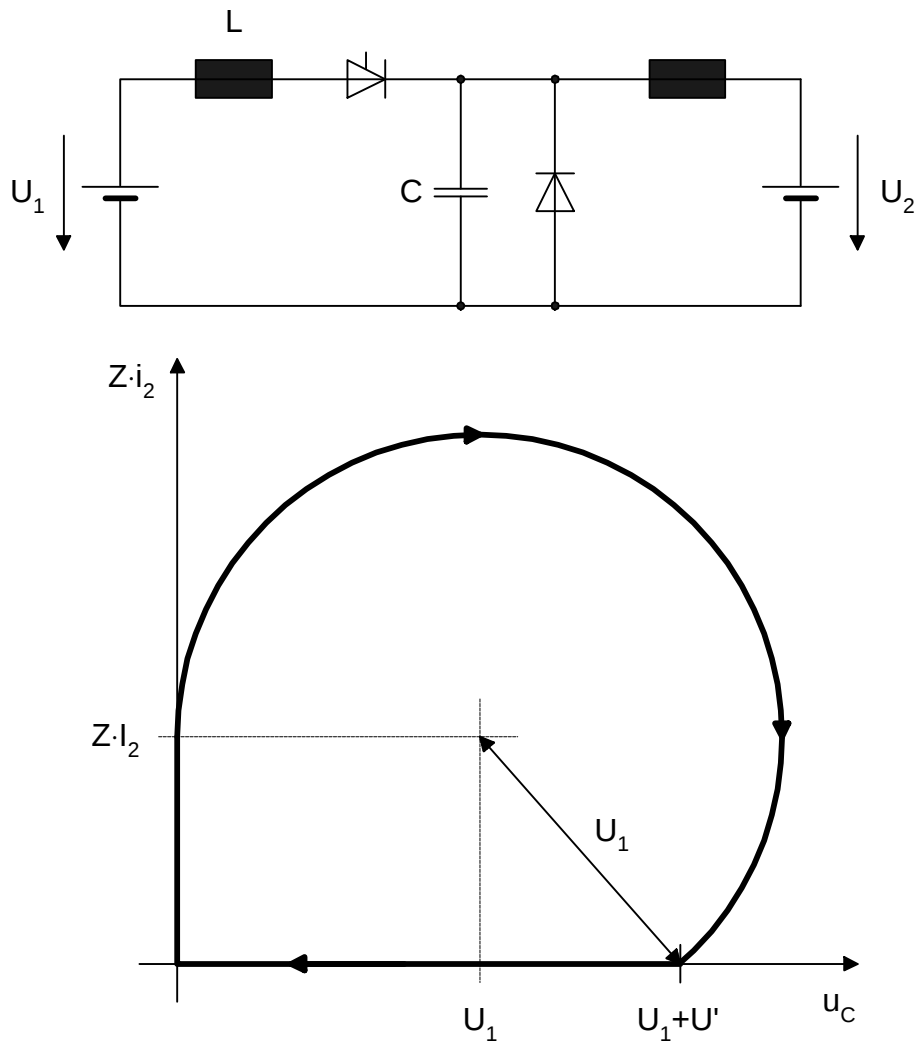
- Zeichnen Sie die Schaltung.
- Zeichnen Sie das uZi-Diagramm eines Arbeitszyklus.
- Berechnen Sie Schonzeit und Spitzenstrom des Thyristors.

Lösung:

- Siehe nächste Seite.

$$Z \cdot I_2 = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot I_2 = \sqrt{\frac{100 \text{ } \mu\text{H}}{1 \text{ } \mu\text{F}}} \cdot 15 \text{ A} = 150 \text{ V}$$

Diagramm siehe nächste Seite.



c)

$$\hat{i}_L = I_2 + \frac{U_1}{Z} = I_2 + U_1 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} = 15 \text{ A} + 200 \text{ V} \cdot \sqrt{\frac{1 \mu\text{F}}{100 \mu\text{H}}} = 35 \text{ A}$$

$$U' = \sqrt{U_1^2 - (Z \cdot I_2)^2} = \sqrt{(200 \text{ V})^2 - (10 \Omega \cdot 15 \text{ A})^2} = 132,3 \text{ V}$$

$$t_c = C \cdot \frac{U'}{I_2} = 1 \mu\text{F} \cdot \frac{132,3 \text{ V}}{15 \text{ A}} = 8,82 \mu\text{s}$$

Beispiel 11

Angabe:

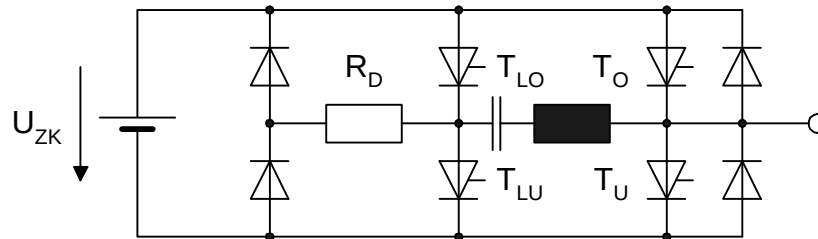
Gegeben ist ein dreiphasiger McMurray-Umrichter, der im Blockbetrieb angesteuert wird und eine Asynchronmaschine speist. Der Kommutierungskreis ist mit einem Dämpfernetzwerk ($R + 2$ Dioden) beschaltet. Es sind Lastströme von $\pm 150 \text{ A}$ abzukommutieren, der

Kommutierungskreis ist so auszulegen, daß maximal der zweifache Laststrom in ihm fließt und im Hauptthyristor eine Schonzeit von $80 \mu\text{s}$ auftritt. Zwischenkreisspannung 600 V .

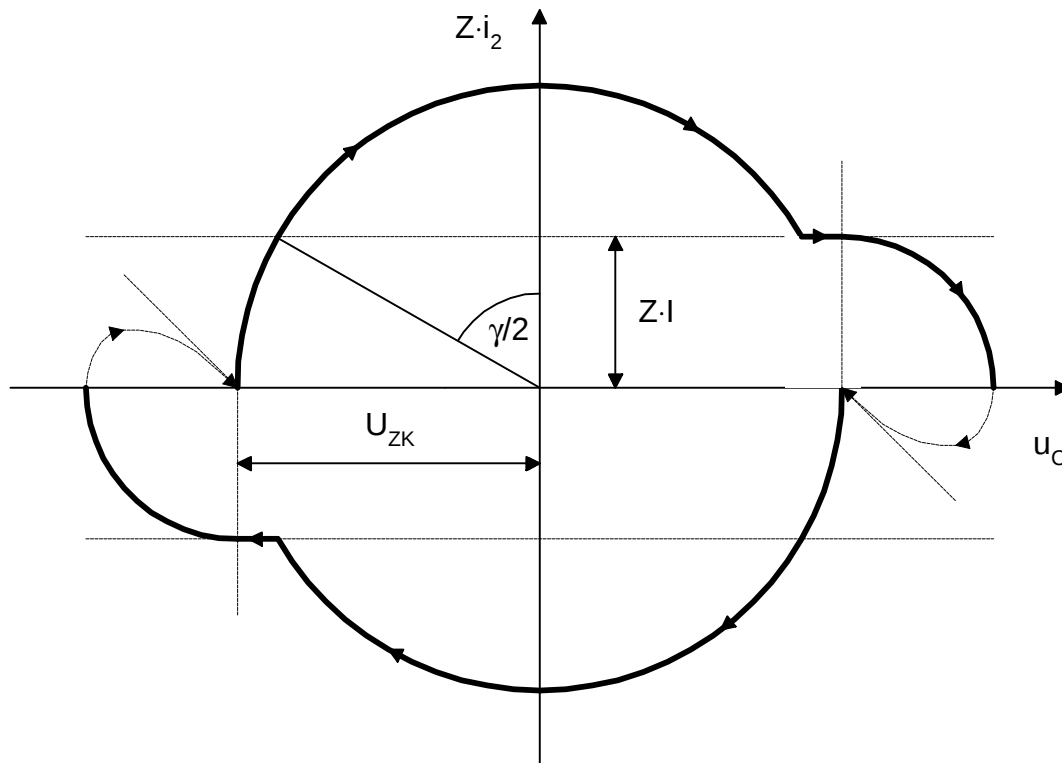
- Zeichnen Sie die Schaltung eines Halbbrückenzeiges (inkl. Kommutierungs- und Dämpfungskreis).
- Skizzieren Sie das vollständige u_{Zi} -Diagramm.
- Berechnen Sie L und C des Kommutierungskreises.

Lösung:

a)



b)



c)

$$Z = \frac{U_{ZK}}{\hat{i}_L} = \frac{600 \text{ V}}{2 \cdot 150 \text{ A}} = 2 \Omega$$

$$\gamma = 2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{Z \cdot I}{U_{ZK}} \right) \right) = 2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{2 \Omega \cdot 150 \text{ A}}{600 \text{ V}} \right) \right) = \frac{2 \cdot \pi}{3}$$

$$t_c = \gamma \cdot \sqrt{L \cdot C} = \gamma \cdot Z \cdot C$$

Beispiele aus „Rechenübungen zu Leistungselektronik“ Teil B (Selbstgeführte Stromrichter)

$$C = \frac{t_c}{\gamma \cdot Z} = \frac{80 \mu s}{\frac{2\pi}{3} \cdot 2 \Omega} = 19,1 \mu F$$

$$L = Z^2 \cdot C = (2 \Omega)^2 \cdot 19,1 \mu F = 76,4 \mu H$$