Ausarbeitung der Beispiele aus

Rechenübungen zu Leistungselektronik

Teil A - Netzgeführte Stromrichter

Die hier angeführten Berechnungen könnten fehlerhaft sein.

Inhalt

Beispiel 1

Angabe:

Ein gesteuerter netzgeführter Stromrichter mit einem U_{di0}=207 V speist eine RL-Last (ohmscher Anteil R=8 Ω) bei einem Steuerwinkel von α=60°.
Wie groß ist der Ausgangsgleichstrom?

Lösung:

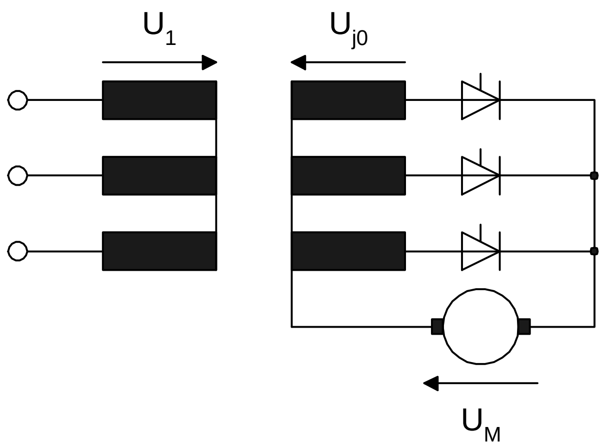
$$I = \frac{U_{di0} \cdot \cos(\alpha)}{R} = \frac{207\ \text{V} \cdot \cos(60°)}{8\ \Omega} = 12{,}9\ \text{A}$$

Beispiel 2

Angabe:

Eine M3-Schaltung am 230 V/400 V-Netz speist eine Gleichstrommaschine mit einer Klemmenspannung von U_M=200 V. Es wird ein Stromrichtertrafo in Yy-Schaltung mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1 verwendet.
Wie groß ist der Steuerwinkel des Stromrichters?

Lösung:



$$\hat{U}_{j0} = \sqrt{2} \cdot U_1 = \sqrt{2} \cdot 230\ \text{V} = 325\ \text{V}$$

$$U_{di0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi} = 325\ \text{V} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi} = 268{,}8\ \text{V}$$

$$U_{di\alpha} = U_{di0} \cdot \cos(\alpha) = U_M$$

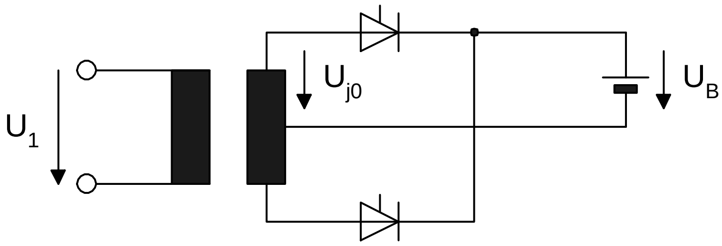
$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_M}{U_{di0}}\right) = \arccos\left(\frac{200\ \text{V}}{268{,}8\ \text{V}}\right) = 42°$$

Beispiel 3

Angabe:

Ein Batterieladegerät in M2-Schaltung am 230 V-Netz (Netzspannungstoleranz ±20%) soll eine 60 V-Batterie aufladen.
Wie groß ist das Übersetzungsverhältnis $ü = w_{prim}/w_{sek}$ des Trafos zu wählen, wenn möglichst gutes Netzverhalten (d.h. hoher $\cos\varphi_1$) angestrebt werden soll?

Lösung:



$$\hat{U}_{j0} = \sqrt{2}\cdot U_{j0} = \sqrt{2}\cdot\frac{U_1}{ü}$$

$$U_{di0} = \hat{U}_{j0}\cdot\frac{2}{\pi} = \frac{2\cdot\sqrt{2}}{\pi}\cdot\frac{U_1}{ü}$$

$$U_{di\alpha} = U_{di0}\cdot\cos(\alpha) = U_B$$

Da lt. Angabe möglichst gutes Netzverhalten erzielt werden soll, wird hier φ_1 und somit α gleich Null gesetzt.

$$U_{di0} = U_B = \frac{2\cdot\sqrt{2}}{\pi}\cdot\frac{U_1}{ü}$$

$$ü = \frac{U_1}{U_B}\cdot\frac{2\cdot\sqrt{2}}{\pi}$$

Aufgrund der Netzspannungstoleranz ergeben sich nun für das Übersetzungsverhältnis des Trafos drei Werte:

U_1=230 V ü=3,45
U_1=276 V ü=4,14
U_1=184 V ü=2,76

Daraus ist nun jener Wert auszuwählen, der für den gesamten Bereich der Netzspannung korrekte Werte für $\cos\varphi_1$ ergibt.

$$\cos(\varphi_1) = \frac{U_B}{U_{di0}} = ü\cdot\frac{U_B}{U_1}\cdot\frac{\pi}{2\cdot\sqrt{2}}$$

ü	U_1=184 V	U_1=230 V	U_1=276 V
2,76	1	0,8	0,66
3,45	1,25	1	0,83
4,14	1,5	1,2	1

Aus obiger Tabelle ist zu entnehmen, daß nur für ü=2,76 im gesamten Netzspannungsbereich korrekte Werte für cos φ_1 berechnet werden.

Andere Möglichkeit: ü so wählen, daß bei minimaler Netzspannung gerade α_{max} erreicht wird.

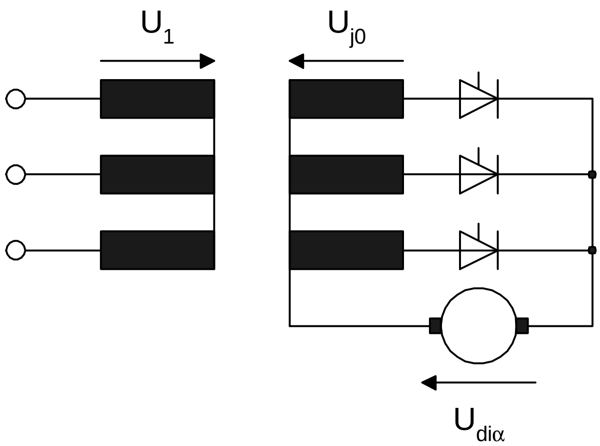
Beispiel 4

Angabe:

Ein 250 V-GS-Generator speist über eine M3-Schaltung (Yy-Stromrichtertrafo mit ü=1:1) eine Leistung von 6 kW ins 230 V/400 V-Netz.

a) Wie groß sind Mittelwert bzw. Effektivwert der Ströme in den Thyristoren?
b) Wie groß ist die Schonzeit der Thyristoren?
c) Wie groß ist die aus dem Netz entnommene Grundschwingungs-Blindleistung? (ind. oder kap.?)
d) Wie groß ist der totale Leistungsfaktor?

Lösung:



$$P = U_{di\alpha} \cdot I_d$$

$$I_d = \frac{P}{U_{di\alpha}} = \frac{6\text{ kW}}{250\text{ V}} = 24\text{ A}$$

a)

$$I_{T,avg} = \frac{I_d}{3} = \frac{24\text{ A}}{3} = 8\text{ A}$$

$$I_{T,rms} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = \frac{24\text{ A}}{\sqrt{3}} = 13{,}9\text{ A}$$

b)

$$U_{di\alpha} = U_{di0} \cdot \cos(\alpha)$$

$$U_{di0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi} = U_1 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{2 \cdot \pi}$$

$$\hat{U}_{j0} = \sqrt{2} \cdot U_1$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}}\right) = \arccos\left(\frac{U_{di\alpha}}{U_1} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot \sqrt{6}}\right) = \arccos\left(\frac{250\ \text{V}}{230\ \text{V}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot \sqrt{6}}\right) = 158° = \varphi_1$$

$$t_c = \frac{1}{f_N} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{180°}\right) = \frac{1}{50\ \text{Hz}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{158°}{180°}\right) = 1{,}2\ \text{ms}$$

c)

$$I_{N,1,rms} = \frac{3}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot I_d = \frac{3}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot 24\ \text{A} = 16{,}21\ \text{A}$$

$$Q_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{N,1,rms} \cdot \sin(\varphi_1) = \sqrt{3} \cdot 230\ \text{V} \cdot 16{,}21\ \text{A} \cdot \sin(158°) = 2{,}42\ \text{kVA} \quad \text{ind.}$$

d)

$$I_{N,rms} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot 24\ \text{A} = 19{,}6\ \text{A}$$

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{N,rms}} = \frac{6\ \text{kW}}{\sqrt{3} \cdot 230\ \text{V} \cdot 16{,}9\ \text{A}} = 0{,}768$$

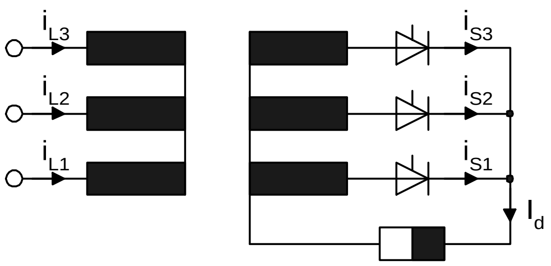
Beispiel 5

Angabe:

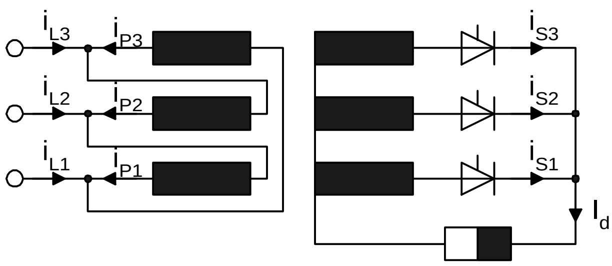
Wie sieht der Zeitverlauf der Netzströme bei einem Stromrichter in M3-Schaltung aus:
a) Bei Yy-Schaltung des Trafos?
b) Bei Dy-Schaltung des Trafos?

Lösung:

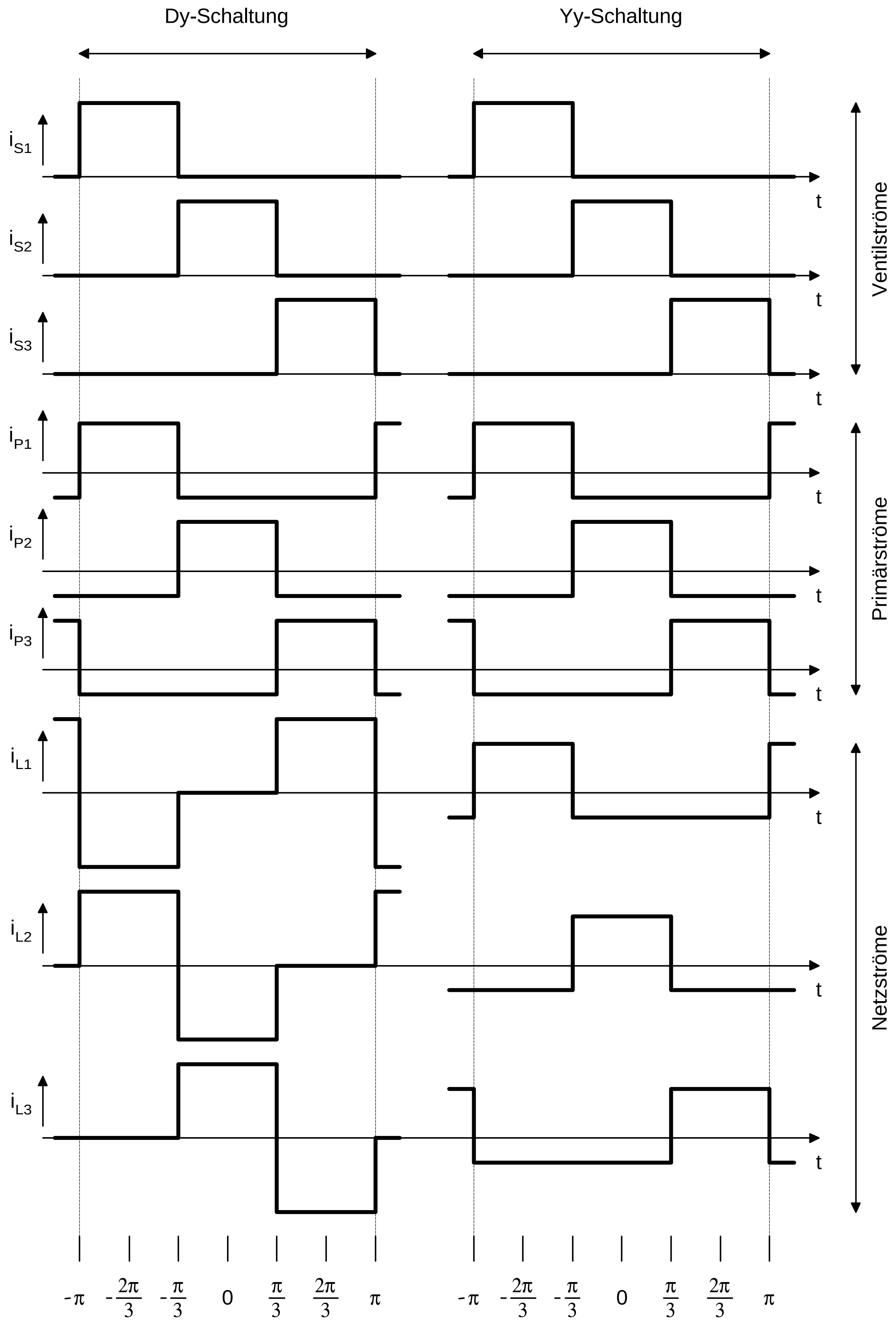
a)



b)



Siehe Seite 7.



Dy-Schaltung
Yy-Schaltung
i_{S1}
i_{S2}
i_{S3}
i_{P1}
i_{P2}
i_{P3}
i_{L1}
i_{L2}
i_{L3}
t
Ventilströme
Primärströme
Netzströme
$-\pi$ $-\frac{2\pi}{3}$ $-\frac{\pi}{3}$ 0 $\frac{\pi}{3}$ $\frac{2\pi}{3}$ π

Beispiel 6

Angabe:

Eine M2-Schaltung am 230 V-Netz (Trafo mit ü=1:1) hat einen größtmöglichen Aussteuerbereich von α_{max}=150° bei einem maximalen Ausgangsgleichstrom von I_{max}=50 A.
Wie groß sind die größtmöglichen Leistungen im Gleich- bzw. Wechselrichterbetrieb?

Lösung:

$$\hat{U}_{j0} = \sqrt{2} \cdot U_1 = \sqrt{2} \cdot 230\ \text{V} = 325\ \text{V}$$

$$U_{di0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{2}{\pi} = 325\ \text{V} \cdot \frac{2}{\pi} = 207\ \text{V}$$

$$P_{GR} = U_{di0} \cdot I_{max} \cdot \cos(\alpha_{min}) = 207\ \text{V} \cdot 50\ \text{A} \cdot \cos(0°) = 10{,}35\ \text{kW}$$

$$P_{WR} = U_{di0} \cdot I_{max} \cdot \left|\cos(\alpha_{max})\right| = 207\ \text{V} \cdot 50\ \text{A} \cdot \left|\cos(150°)\right| = 8{,}96\ \text{kW}$$

Beispiel 7

Angabe:

Bei einem Stromrichter mit Kommutierungsinduktivitäten (reale Kommutierung):
a) Die Kippgefahr sinkt/bleibt unbeeinflußt/steigt wenn der Laststrom steigt?
b) Die Gefahr des Kippens steigt/sinkt bei steigender Netzspannung?

Lösung:

a)
Mit steigendem Laststrom steigt die Freiwerdezeit und sinkt die zur Verfügung stehende Schonzeit, somit steigt auch die Kippgefahr.
b)
Steigende Netzspannung bewirkt schnelleres Ausräumen der Ladungsträger bzw. es steigt die zum Kommutieren nötige Spannungs-Zeit-Fläche mit der Netzspannung, also sinkt die Kippgefahr.

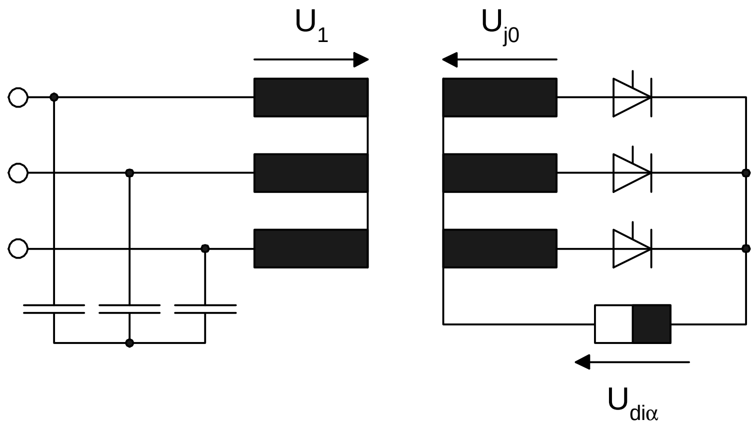
Beispiel 8

Angabe:

Ein gesteuerter M3-Stromrichter speist in eine RL-Last eine Leistung von 20 kW bei einem Steuerwinkel von α=45° am 230 V/400 V-Netz.
a) Wie groß ist der Wert der in Stern geschalteten Kompensationskondensatoren am Netz wenn die Steuerblindleistung (Grundschwingungsgehalt!) vollständig kompensiert werden soll?
b) Wie groß ist der Wert der in Dreieck geschalteten Kompensationskondensatoren am Netz wenn auf cos φ_1=0,85 kompensiert werden soll?

Lösung:

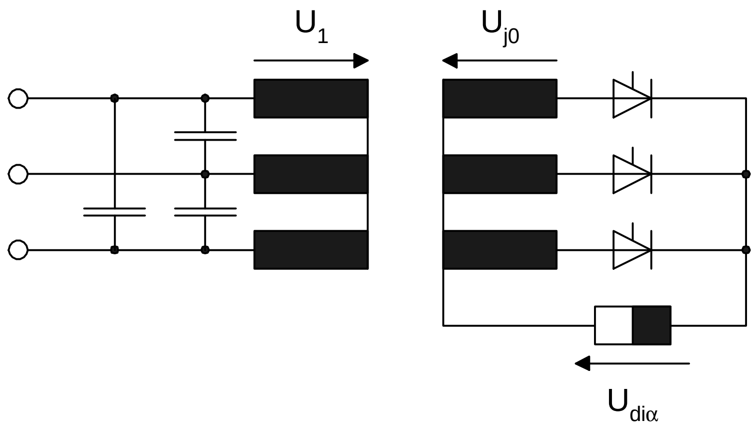
a)



$$Q_1 = P \cdot \tan(\alpha) = 20\text{ kW} \cdot \tan(45°) = 20\text{ kVA} = Q_C$$

$$C_* = \frac{Q_C}{3 \cdot U_C^2 \cdot \omega} = \frac{20\text{ kVA}}{3 \cdot (230\text{ V})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50\text{ Hz}} = 401\,\mu\text{F}$$

b)



$$Q_1 = P \cdot \left(\tan(\alpha) - \tan\left(\arccos(0{,}85)\right)\right) = 20\text{ kW} \cdot \left(\tan(45°) - \tan\left(\arccos(0{,}85)\right)\right) =$$

$$= 7{,}61\text{kVA} = Q_C$$

$$C_\Delta = \frac{Q_C}{3 \cdot U_C^2 \cdot \omega} = \frac{7{,}61\text{kVA}}{3 \cdot (400\text{ V})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50\text{ Hz}} = 50{,}4\,\mu\text{F}$$

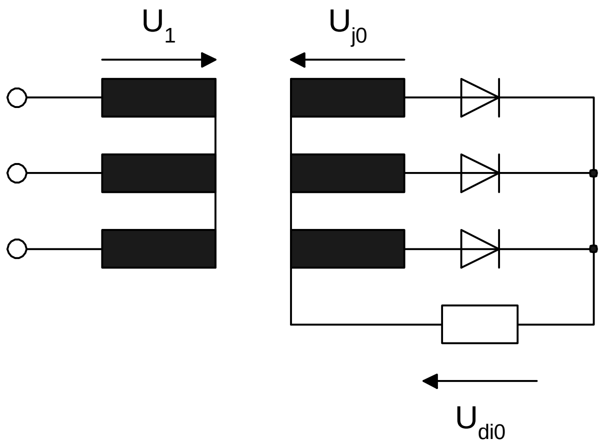
Beispiel 9

Angabe:

Eine ungesteuerte M3-Schaltung speist eine rein ohmsche Last (keine Glättung!) mit R=5 Ω. Der Yy-Stromrichtertrafo (Netzspannung 230 V/400 V) hat ein Übersetzungsverhältnis von $ü=w_{prim}/w_{sek}=3$.

a) Wie groß ist die in R umgesetzte Leistung?
b) Wie groß ist die Spitzenstrombelastung der Gleichrichterdioden?
c) Wie sieht der Zeitverlauf der Netzströme aus?

Lösung:



a)

$$U_{j0} = \frac{1}{3} \cdot U_1 = \frac{1}{3} \cdot 230\ \text{V} = 76{,}7\ \text{V}$$

$$\hat{U}_{j0} = \sqrt{2} \cdot U_{j0} = \sqrt{2} \cdot 76{,}7\ \text{V} = 108{,}4\ \text{V}$$

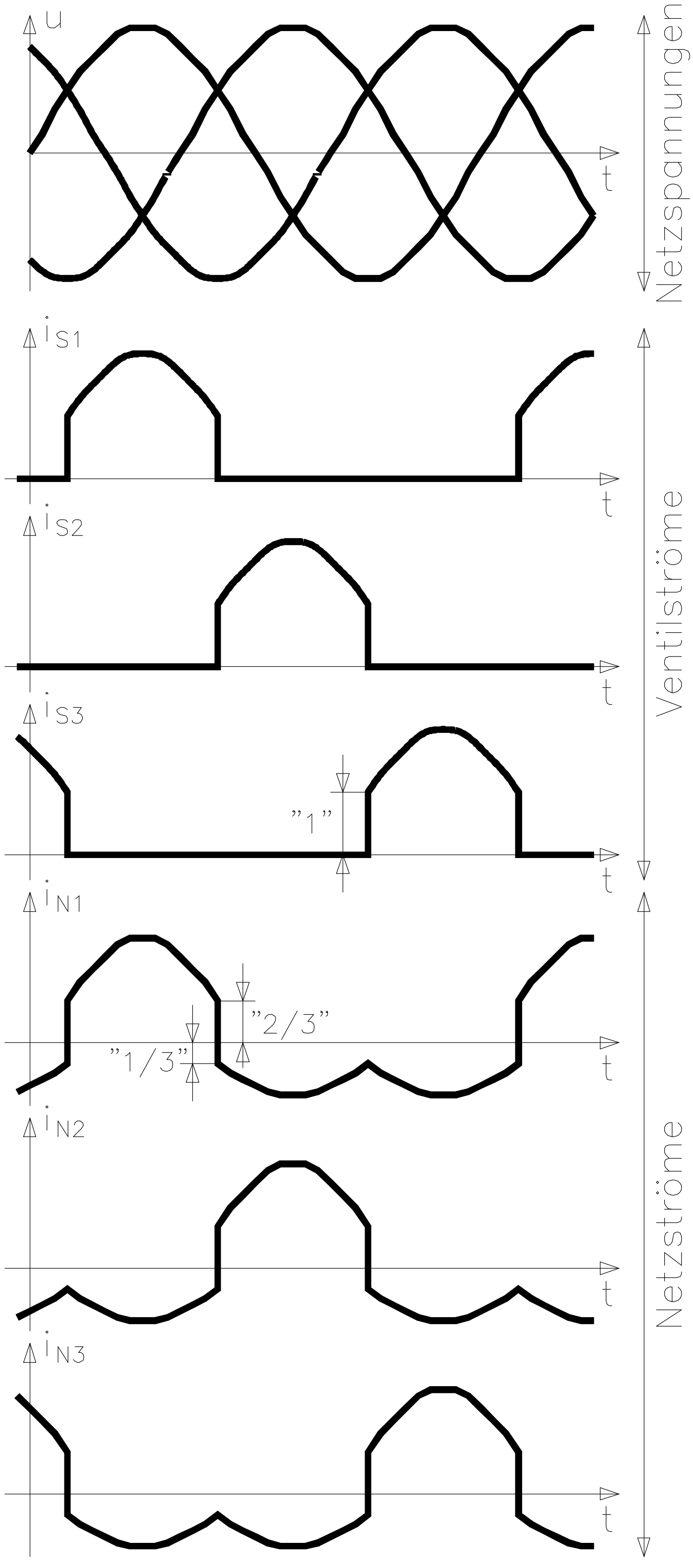
$$U_{rms}^2 = \frac{1}{\frac{2\cdot\pi}{3}} \cdot \int_{\pi/6}^{5\cdot\pi/6} \hat{U}_{j0}^2 \cdot \sin^2(t) \cdot dt = \hat{U}_{j0}^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{8 \cdot \pi} \right) = 8304{,}69\ \text{V}^2$$

$$P_R = \frac{U_{rms}^2}{R} = \frac{8304{,}69\ \text{V}^2}{5\ \Omega} = 1{,}661\ \text{kW}$$

b)

$$i_{D,pk} = \frac{\hat{U}_{j0}}{R} = \frac{108{,}4\ \text{V}}{5\ \Omega} = 21{,}7\ \text{A}$$

c)
Siehe Seite 11.


u
t
Netzspannungen
i_{S1}
t
i_{S2}
t
Ventilströme
i_{S3}
"1"
t
i_{N1}
"2/3"
"1/3"
t
i_{N2}
t
Netzströme
i_{N3}
t

Beispiel 10

Angabe:

Ein Stromrichter hat im ungesteuerten Betrieb eine Kommutierungsüberlappung von u_0=15°. Wie lange dauert die Kommutierung an der Wechselrichtertrittgrenze, wenn ein maximaler Steuerwinkel von α_{max}=160° gegeben ist (Der Laststrom bleibt unverändert)?

Lösung:

$$\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_1 + u_1) = \cos(\alpha_2) - \cos(\alpha_2 + u_2)$$

$$u_2 = \arccos\big(\cos(\alpha_2) - \cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_1 + u_1)\big) - \alpha_2 =$$

$$= \arccos(\cos(160°) - \cos(0°) + \cos(0°+15°)) - 160° = 6{,}85°$$

$$\text{Kommutierungszeit} = \frac{u_2}{360°} \cdot \frac{1}{f_N} = \frac{6{,}85°}{360°} \cdot \frac{1}{50\ \text{Hz}} = 380\ \mu\text{s}$$

Beispiel 11

Angabe:

Bei einem gesteuerten Stromrichter mit U_{di0}=269V wird bei einem Laststrom von 10 A eine Ausgangsgleichspannung von $U_{d\alpha}$=160 V gemessen. Verdoppelt man den Laststrom, so geht die Ausgangsspannung auf 150 V zurück.
Wie groß ist der Steuerwinkel des Stromrichters?

Lösung:

Der hier beobachtete Spannungseinbruch bei Stromerhöhung folgt dem 2. Dällenbach-schen Gesetz, demzufolge der Spannungsabfall proportional zum Strom ist.
Es sind aus der Angabe zwei Punkte der entsprechenden Geraden bekannt, der Schnitt-punkt dieser Geraden mit der Achse I=0 kann also leicht ermittelt werden.

$$U_{di\alpha} = U_{di\alpha 0} + k \cdot I$$

$$k = \frac{\Delta U_{di\alpha}}{\Delta I} = \frac{-10\ \text{V}}{10\ \text{A}} = -1\,\Omega$$

$$U_{di\alpha 0} = U_{di\alpha} - k \cdot I = 160\ \text{V} - (-1\,\Omega) \cdot 10\ \text{A} = 170\ \text{V}$$

$$U_{di\alpha 0} = U_{di0} \cdot \cos(\alpha)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_{di\alpha 0}}{U_{di0}}\right) = \arccos\left(\frac{170\ \text{V}}{269\ \text{V}}\right) = 50{,}8°$$

Beispiel 12

Angabe:

Gegeben ist ein 6-pulsiger Stromrichter (z.B. eine B6-Schaltung) mit Kommutierungs-induktivitäten von L_K=1 mH (Netzfrequenz 50 Hz).
Um welchen Wert sinkt die Ausgangsspannung, wenn der Laststrom um 100 A ansteigt?

Lösung:

Aus dem 2. Dällenbachschen Gesetz folgt:

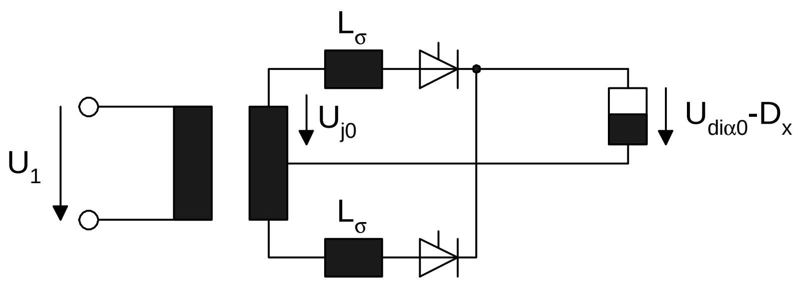
$$D_x = \frac{\omega \cdot L \cdot I \cdot p}{2 \cdot \pi} = f \cdot L \cdot \Delta I \cdot p = 50\,\text{Hz} \cdot 1\,\text{mH} \cdot 100\,\text{A} \cdot 6 = 30\,\text{V}$$

Beispiel 13

Angabe:

Ein gesteuerter M2-Stromrichter speist eine RL-Last mit idealer Glättung, deren ohmscher Anteil R=4 Ω ist. Der Stromrichtertrafo, der ein Übersetzungsverhältnis von $ü=w_{prim}/w_{sek}=1$ hat (w_{sek} ist die Windungszahl einer Sekundärwicklung), liegt primär am 230 V-Netz und hat eine Streuinduktivität zwischen Primär- und Sekundärwicklung von L_σ=10 mH.
Wie groß ist der Laststrom wenn der Steuerwinkel α=60° beträgt?

Lösung:



Die vorhandene Streuinduktivität äußert sich im Dällenbach-Abfall D_x.

$$U_{di\alpha 0} - D_x = I_d \cdot R$$

$$U_{di\alpha 0} = U_{di0} \cdot \cos(\alpha)$$

$$U_{di0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{2}{\pi} = U_1 \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi}$$

$$\hat{U}_{j0} = U_1 \cdot \sqrt{2}$$

$$D_x = \frac{\omega \cdot L \cdot I_d \cdot p}{2 \cdot \pi} = f \cdot L \cdot I_d \cdot p$$

$$U_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} - f \cdot L \cdot I_d \cdot p = I_d \cdot R$$

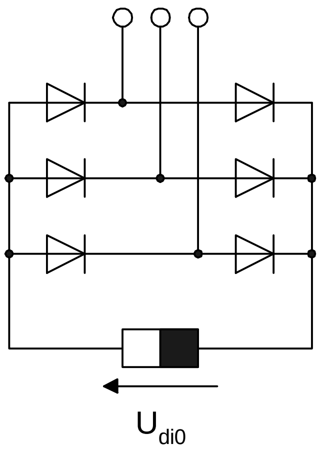
$$I_d = \frac{U_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{\pi \cdot (R + p \cdot f \cdot L)} = \frac{230\ \text{V} \cdot \cos(60°) \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{\pi \cdot (4\ \Omega + 2 \cdot 50\ \text{Hz} \cdot 10\ \text{mH})} = 20{,}7\ \text{A}$$

Beispiel 14

Angabe:

Eine ungesteuerte B6-Schaltung wird ohne eigene Kommutierungsinduktivitäten an ein 230 V/400 V-Netz mit einer Kurzschlußleistung von S_K=1 MW (ohmscher Teil der Netzimpedanz vernachlässigt).
Welcher maximale Ausgangsgleichstrom kann der Brücke entnommen werden unter Berücksichtigung der Norm VDE160, d.h. daß die maximal zulässige Netzspannungsverzerrung am Anschlußpunkt des Stromrichters 20% der Netzspannungsamplitude betragen darf?

Lösung:



Spannungseinbruch am Thyristor:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{U}_{j0} \cdot \sin(\alpha + u) = 0{,}2 \cdot \hat{U}_{j0}$$

Ungesteuerte Brücke $\Rightarrow$ α=0

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hat{U}_{j0} \cdot \sin(u_{max}) = 0{,}2 \cdot \hat{U}_{j0}$$

$$u_{max} = \arcsin\left(\frac{2}{5 \cdot \sqrt{3}}\right) = 13{,}35°$$

$$X_N = \frac{U_N^2}{S_K} = \frac{(400\ \text{V})^2}{1\,\text{MW}} = 160\ \text{m}\Omega$$

$$\frac{2 \cdot \omega \cdot L \cdot I}{\sqrt{3} \cdot \hat{U}_{j0}} = \cos(\alpha) - \cos(\alpha - u_{max})$$

$$\frac{2 \cdot X_N \cdot I}{\sqrt{3} \cdot \hat{U}_{j0}} = 1 - \cos(u_{max})$$

$$\hat{U}_{j0} = \sqrt{2} \cdot U_1 = \sqrt{2} \cdot 230\ \text{V} = 325\ \text{V}$$

$$I = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\hat{U}_{j0}}{X_N} \cdot \left(1 - \cos(u_{max})\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{325\ \text{V}}{160\ \text{m}\Omega} \cdot \left(1 - \cos(13{,}35°)\right) = 47{,}57\ \text{A}$$

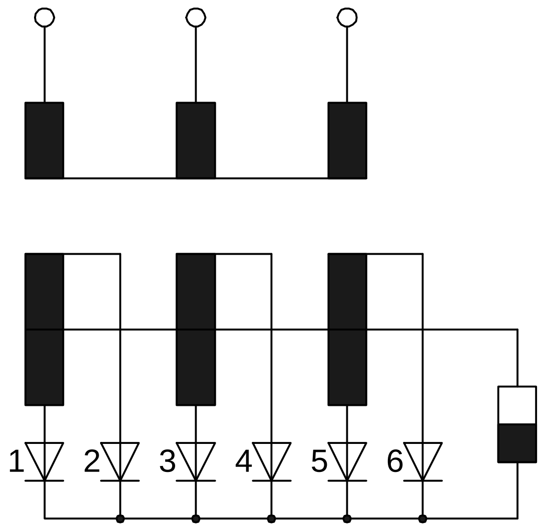
Beispiel 15

Angabe:

Ein Stromrichter im M6-Schaltung speist in einen Gleichstromantrieb einen Strom von I=30 A. Der Yyy-Stromrichtertrafo hat ein Übersetzungsverhältnis von $ü=w_{prim}/w_{sek}=1$ (w_{sek} ist die Windungszahl <u>einer</u> Sekundärwicklung).

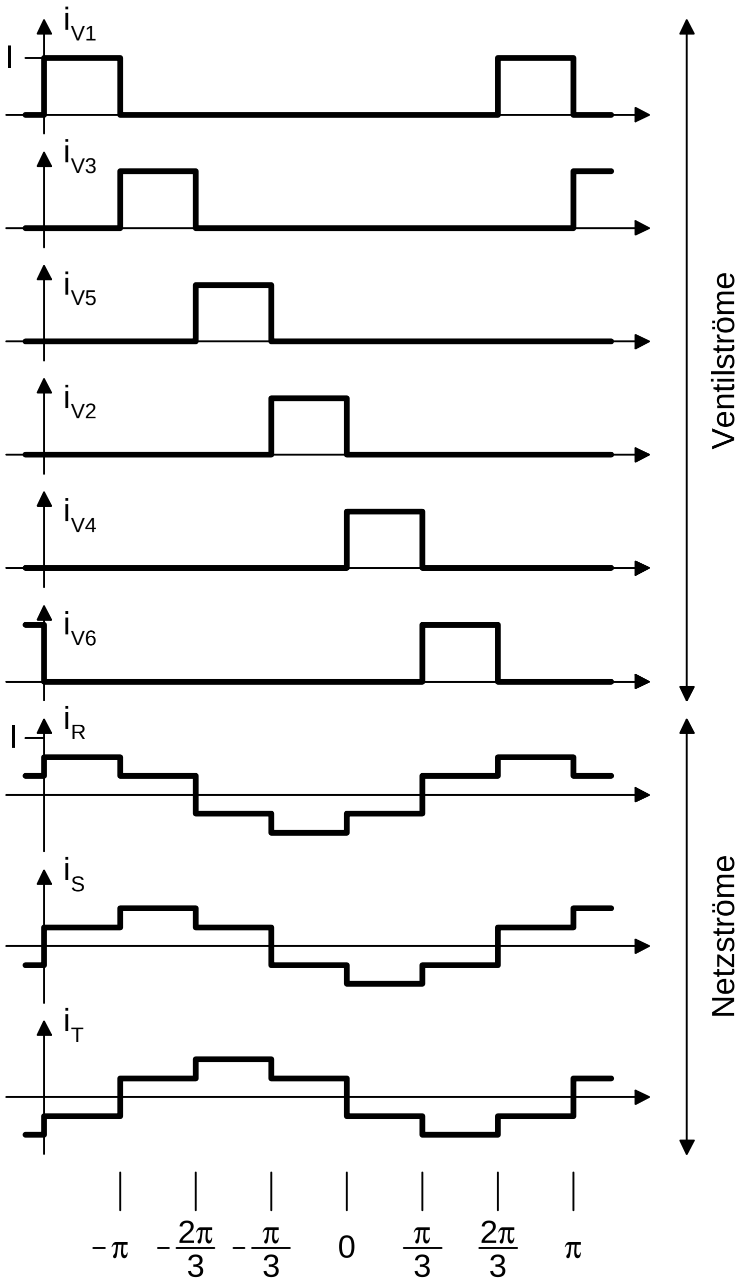
a) Wie sieht der Zeitverlauf der Netzströme aus?
b) Wie groß sind Mittelwert und Effektivwert der Ventilströme?
c) Wie groß ist der Effektivwert der Netzströme?

Lösung:



a)
Siehe Seite 16.
b)

$$I_{T,avg} = \frac{I_d}{6} = \frac{30\ \text{A}}{6} = 5\ \text{A}$$



$$I_{T,rms} = \frac{I_d}{\sqrt{6}} = \frac{30\ A}{\sqrt{6}} = 12{,}2\ A$$

c)

$$I_{N,rms} = I_d \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} = 30\ A \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} = 14{,}14\ A$$

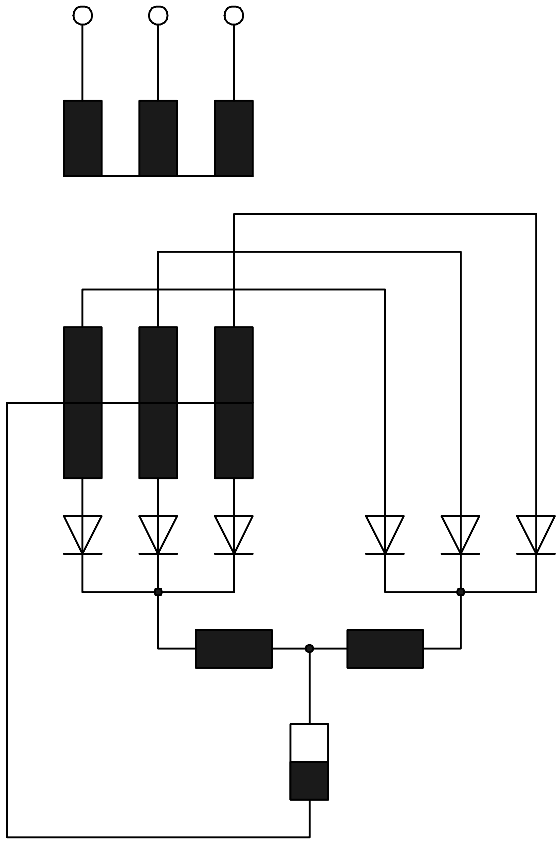
Beispiel 16

Angabe:

Gegeben sind zwei über eine Saugdrossel parallelgeschaltete ungesteuerte M3-Stromrichter.

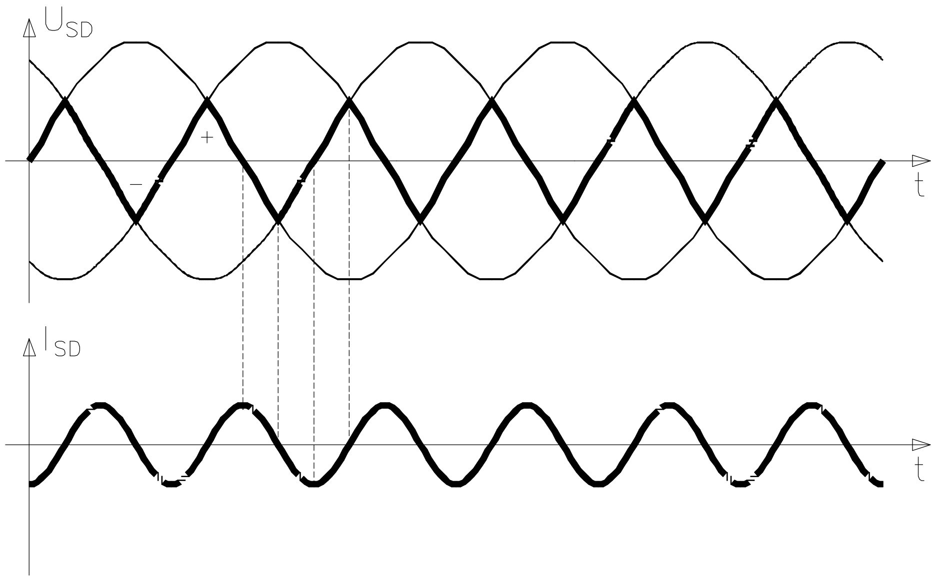
a) Zeichnen Sie den Verlauf der Saugdrosselspannung.
b) Skizzieren Sie den Wechselanteil (Rippel) des Saugdrosselstromes (es kann vorausgesetzt werden, daß dieser Strom stets größer Null ist, d.h. daß er nicht lückt).
c) Berechnen Sie die Amplitude (Spitze-Spitze-Wert) des Wechselstromanteiles in der Saugdrossel. Auf der Sekundärseite des Stromrichtertrafos gilt: $U_{j0,rms}$=200 V (50 Hz). Induktivität der Saugdrossel (Gesamtwert): L=10 mH. Anmerkung: Es genügt eine näherungsweise Berechnung („graphische Integration“).

Lösung:



a) und b)
Siehe Seite 18.
c)

$$\Delta I = \frac{\hat{U}_{j0}}{\omega \cdot L} \cdot 0{,}262 = \frac{200\ \mathrm{V} \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot 50\ \mathrm{Hz} \cdot 10\ \mathrm{mH}} \cdot 0{,}262 = 23{,}6\ \mathrm{A}$$



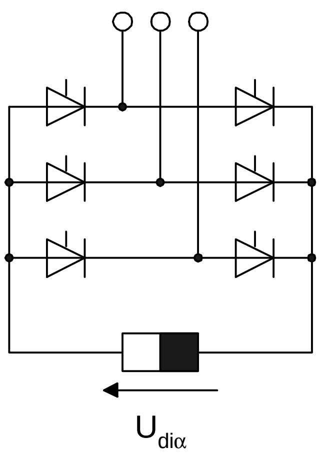
Beispiel 17

Angabe:

Eine direkt ans 230 V/400 V-Netz geschaltete vollgesteuerte B6-Schaltung speist in eine RL-Last mit idealer Glättung (ohmscher Anteil R=8 Ω) eine Leistung von 20 kW.

a) Berechnen Sie den Effektivwert des Netzstromes.
b) Berechnen Sie den Grundschwingungsverschiebungsfaktor am Netz.
c) Berechnen Sie die Verluste je Thyristor. Es kann angenommen werden, daß jeder Thyristor eine Flußspannung von 1,5 V (stromunabhängig!) hat.

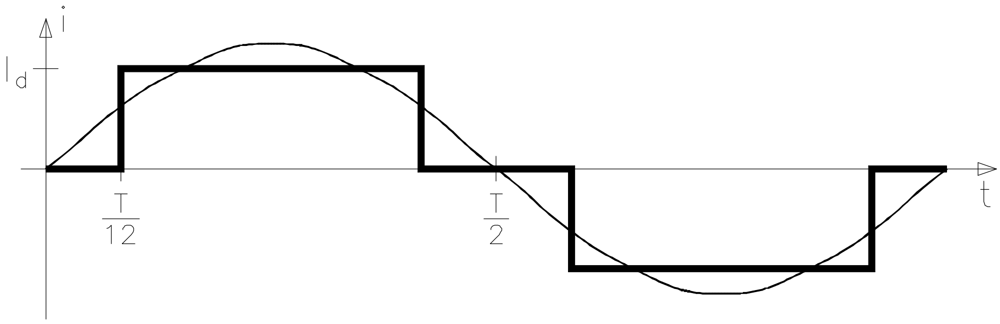
Lösung:



a)

$$I_d = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{20\ \text{kW}}{8\ \Omega}} = 50\ \text{A}$$

Stromverlauf im Netz:



$$I_{N,rms}^2 = I_d^2 \cdot \frac{2}{3}$$

$$I_{N,rms} = I_d \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 50\ \text{A} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} = 40{,}82\ \text{A}$$

b)

$$U_{di\alpha} = \frac{P}{I_d} = \frac{20\ \text{kW}}{50\ \text{A}} = 400\ \text{V} = U_{di0} \cdot \cos(\alpha)$$

$$U_{di0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} = 325\ \text{V} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} = 537{,}5\ \text{V}$$

$$\hat{U}_{j0} = \sqrt{2} \cdot U_1 = \sqrt{2} \cdot 230\ \text{V} = 325\ \text{V}$$

$$\cos(\alpha) = \frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} = \frac{400\ \text{V}}{537{,}5\ \text{V}} = 0{,}744 = \cos(\varphi_1)$$

c)

Mittelwert des Thyristorstromes:

$$I_{T,avg} = \frac{I_d}{3} = \frac{50\ \text{A}}{3} = 16{,}7\ \text{A}$$

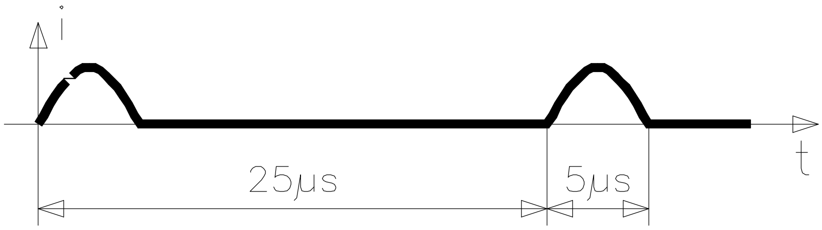
$$P_T = I_{T,avg} \cdot U_{T0} = 16{,}7\ \text{A} \cdot 1{,}5\ \text{V} = 25\ \text{W}$$

Beispiel 18

Angabe:

Durch einen MOSFET fließen sinusförmige Strompulse (180°-Halbschwingungen) der Breite 5 µs und mit einer Amplitude von I_{pk}=20 A. Die Wiederholfrequenz der Pulse beträgt 4 kHz. Berechnen Sie unter der Annahme, daß der FET einen ON-Widerstand von $R_{DS,on}$=0,3 Ω hat, die in ihm auftretenden Leitverluste.

Lösung:



$$I^2 = \frac{1}{25\ \mu s} \cdot I_{pk}^2 \int_{0\ \mu s}^{5\ \mu s} \sin^2\left(\frac{\pi \cdot t}{5\ \mu s}\right) \cdot dt = \frac{1}{25\ \mu s} \cdot \frac{I_{pk}^2}{2} \cdot \int_{0\ \mu s}^{5\ \mu s} \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{5\ \mu s}\right)\right) \cdot dt =$$

$$= \frac{I_{pk}^2}{50\ \mu s} \cdot \left(t - \frac{5\ \mu s}{2 \cdot \pi} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{5\ \mu s}\right)\right)\Bigg|_{0\ \mu s}^{5\ \mu s} = \frac{I_{pk}^2}{10} = \frac{(20\ A)^2}{10} = 40\ A^2$$

$$P_{leit} = I^2 \cdot R_{DS,on} = 40\ A^2 \cdot 0{,}3\ \Omega = 12\ W$$

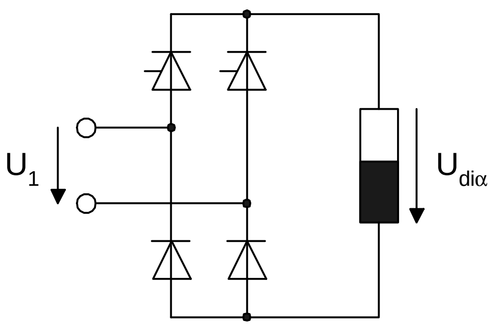
Beispiel 19

Angabe:

Eine halbgesteuerte zweipulsige Brücke (B2HK) speist direkt aus dem 230 V/400 V-Netz die Feldwicklung einer fremderregten GS-Maschine. Der Erregerstrom der Maschine soll 1,5 A betragen, die Feldwicklung hat einen ohmschen Anteil von 90 Ω, ihr induktiver Anteil ist so groß, daß ideale Glättung vorausgesetzt werden kann.

a) Wie groß ist der Steuerwinkel?
b) Wie groß ist der Grundschwingungsverschiebungsfaktor?
c) Wie groß ist der Effektivwert des Netzstromes?
d) Wie groß ist der totale Leistungsfaktor?

Lösung:



a)

$$U_{di\alpha} = I_d \cdot R = 1{,}5\ \text{A} \cdot 90\ \Omega = 135\ \text{V} = U_{di0} \cdot \frac{1+\cos(\alpha)}{2}$$

$$U_{di0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{2}{\pi} = 325\ \text{V} \cdot \frac{2}{\pi} = 207\ \text{V}$$

$$\hat{U}_{j0} = \sqrt{2} \cdot U_1 = \sqrt{2} \cdot 230\ \text{V} = 325\ \text{V}$$

$$\alpha = \arccos\left(2 \cdot \frac{U_{di\alpha}}{U_{di0}} - 1\right) = \arccos\left(2 \cdot \frac{135\ \text{V}}{207\ \text{V}} - 1\right) = 72{,}3°$$

b)

$$\varphi_1 = \frac{\alpha}{2} = \frac{72{,}3°}{2} = 36{,}15°$$

$$\cos(\varphi_1) = \cos(36{,}15°) = 0{,}808$$

c)

$$I_{N,rms} = I_d \cdot \sqrt{\frac{180° - \alpha}{180°}} = 1{,}5\ \text{A} \cdot \sqrt{\frac{180° - 72{,}3°}{180°}} = 1{,}16\ \text{A}$$

d)

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U_{di\alpha} \cdot I_d}{U_1 \cdot I_{N,rms}} = \frac{135\ \text{V} \cdot 1{,}5\ \text{A}}{230\ \text{V} \cdot 1{,}16\ \text{A}} = 0{,}76$$

Beispiel 20

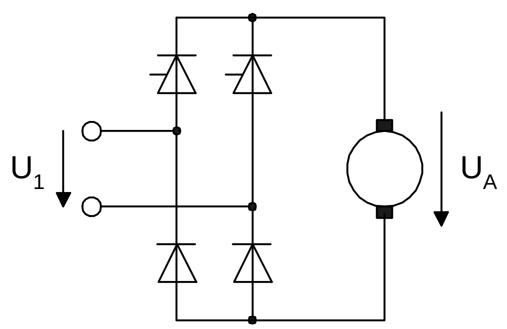
Angabe:

Eine halbgesteuerte zweipulsige Brücke (B2HK) speist direkt aus dem 230 V/400 V-Netz eine Leistung von 3 kW in eine permanenterregte GS-Maschine mit einer Klemmenspannung von U_A=150 V. Die Induktivität im Ankerkreis betrage L_A=400 mH, der Ankerwiderstand sei vernachlässigt.

a) Wie groß ist der Steuerwinkel?

b) Wie groß ist der relative Momentrippel (Spitze-Spitze-Wert)?

Lösung:



a)

$$U_A = U_{di0} \cdot \frac{1+\cos(\alpha)}{2}$$

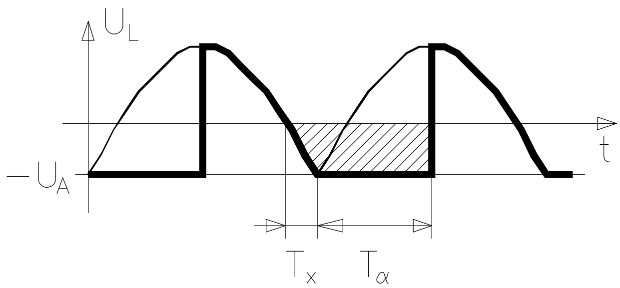
$$U_{di0} = \hat{U}_{j0} \cdot \frac{2}{\pi} = 325\ \mathrm{V} \cdot \frac{2}{\pi} = 207\ \mathrm{V}$$

$$\hat{U}_{j0} = \sqrt{2} \cdot U_1 = \sqrt{2} \cdot 230\ \mathrm{V} = 325\ \mathrm{V}$$

$$\alpha = \arccos\left(2 \cdot \frac{U_A}{U_{di0}} - 1\right) = \arccos\left(2 \cdot \frac{150\ \mathrm{V}}{207\ \mathrm{V}} - 1\right) = 63{,}3°$$

b)

Bei Gleichstrommaschinen ist das Drehmoment proportional zum Maschinenstrom und somit der Momentrippel proportional dem Stromrippel, deren Relativwerte sind gleich.
Näherungsweise Berechnung:



$$\Delta I = \frac{1}{L_A} \cdot \int_{T_x+T_\alpha} u_L \cdot dt$$

$$T_\alpha = \frac{\alpha}{180°} \cdot \frac{1}{2 \cdot f_N} = \frac{63{,}3°}{180°} \cdot \frac{1}{2 \cdot 50\ \mathrm{Hz}} = 3{,}5\ \mathrm{ms}$$

$$T_x = \frac{\arcsin\left(\frac{U_A}{\hat{U}_{j0}}\right)}{180°} \cdot \frac{1}{2 \cdot f_N} = \frac{\arcsin\left(\frac{150\ \mathrm{V}}{325\ \mathrm{V}}\right)}{180°} \cdot \frac{1}{2 \cdot 50\ \mathrm{Hz}} = 1{,}5\ \mathrm{ms}$$

$$\int_{T_x+T_\alpha} u_L \cdot dt = U_A \cdot \left(T_\alpha + \frac{T_x}{2}\right) = 150\ \mathrm{V} \cdot \left(3{,}5\ \mathrm{ms} + \frac{1{,}5\ \mathrm{ms}}{2}\right) = 637{,}5\ \mathrm{mVs}$$

$$\Delta I = \frac{1}{L_A} \cdot \int_{T_x+T_\alpha} u_L \cdot dt = \frac{1}{400\ \mathrm{mH}} \cdot 637{,}5\ \mathrm{mVs} = 1{,}59\ \mathrm{A}$$

$$I_d = \frac{P}{U_A} = \frac{3\ \mathrm{kW}}{150\ \mathrm{V}} = 20\ \mathrm{A}$$

$$\Delta I_{rel} = \frac{\Delta I}{I_d} = \frac{1{,}59\ \mathrm{A}}{20\ \mathrm{A}} = 0{,}08 \mathrel{\hat{=}} 8\% \mathrel{\hat{=}} \Delta M$$