Leistungselektronik Zusammenfassung

Renato Netzer

16. Januar 2023



Inhaltsverzeichnis

1 Leistungselektronik **3**
1.1 Halbleiterphysik . . . 3

2 Halbleiter **4**
2.1 Halbleiter Übersicht . . . 4
2.2 Bipolarer Transistor . . . 4
2.3 Darlington Transistoren . . . 4
2.4 IG Bipolar Transistor (IGBT) . . . 4
2.5 Thyristoren . . . 5
2.6 Abschaltbarer Thyristor . . . 5
2.7 Integrated Gate Commuted Thyristor . . . 5

3 Stromrichter Schaltungen **6**
3.1 Gruppierung nach Führung . . . 6
3.2 Ungesteuerter Gleichrichter M1U . . . 6
3.3 Ungesteuerter Gleichrichter B2U . . . 7
3.4 Ungesteuerter Gleichrichter B6U . . . 8
3.5 Gesteuerte Gleichrichter M1C . . . 8
3.6 Vergleiche . . . 9

4 Schaltverluste und Kühlung **10**
4.1 Schaltverluste B2C . . . 10

5 Wechselstromsteller **11**
5.1 Funktionsweise . . . 11

6 Gleichstromumrichter **12**
6.1 Buck Converter . . . 12
6.2 Boost Converter . . . 12
6.3 Buck Boost Converter . . . 13

7 Gleichstromschalter und Gleichstromschalter **13**
7.1 Gleichstromschalter . . . 13
7.2 Gleichstromsteller . . . 13

8 Wechselrichter **15**
8.1 Einphasiger Wechselrichter . . . 15
8.2 Dreiphasiger Wechselrichter . . . 16

9 Frequenzumrichter **16**
9.1 Gleichspannung Zwischenkreis . . . 17
9.2 Gleichstrom Zwischenkreis . . . 17
9.3 Direktumrichter . . . 17

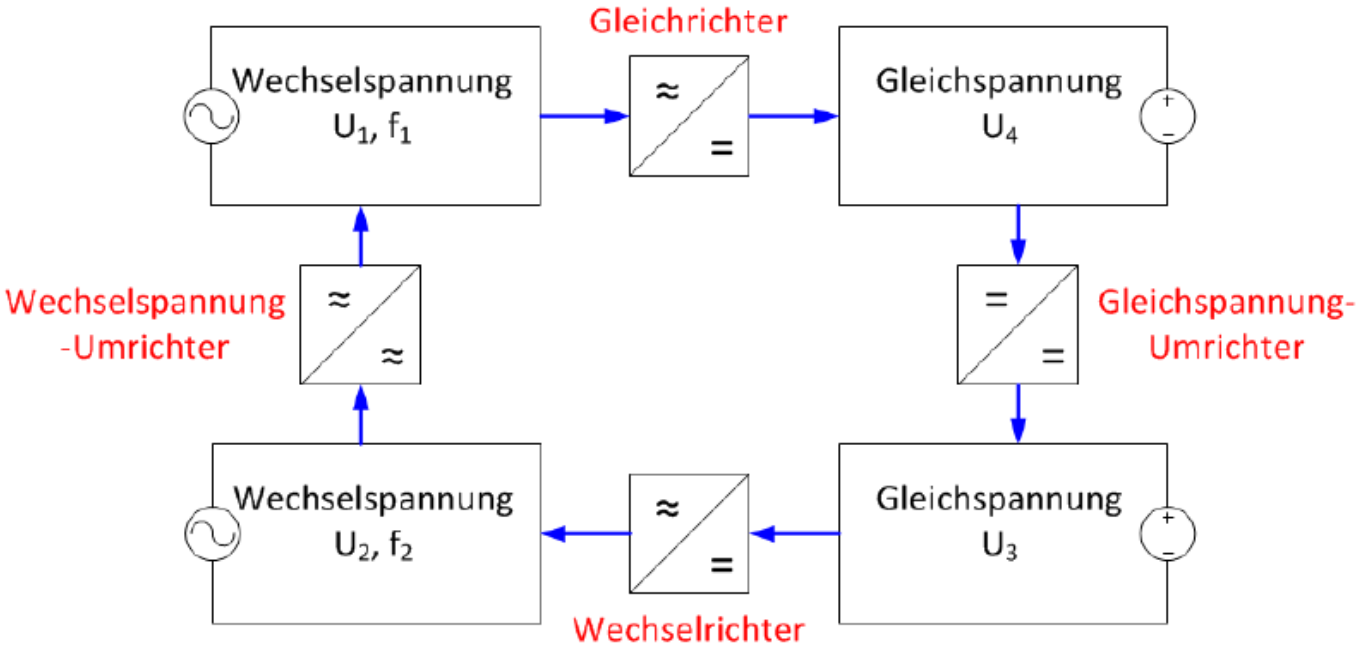
10 Analysis Trickkiste **18**

11 Trickkiste der Elektroingenieure **19**

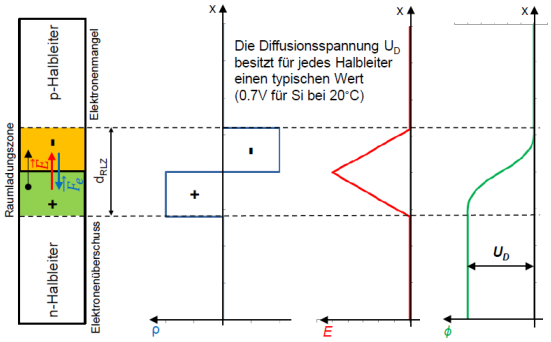
12 Formeln ElMasch **20**

13 Formeln WsDsT **22**

1 Leistungselektronik

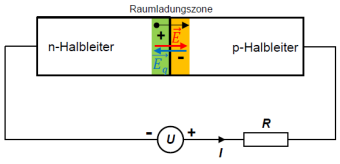


1.1 Halbleiterphysik

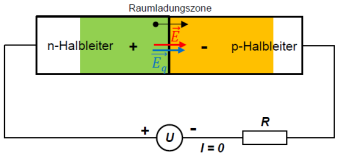


Der Diffusionsstrom wird durch den Ladungsträgeraustausch zwischen beiden Halbleitergebieten erzeugt und dadurch verschwinden in der Grenzschicht alle freien Ladungsträger.
Durch die Elektronenabwanderung entsteht im n-Teil des Grenzgebiets die ortsfeste positive Ladung. Die eindiffundierten Elektronen erzeugen im p-Teil des Grenzgebiets die ortsfeste negative Ladung. Die ortsfesten Ladungen erzeugen das elektrische Feld in der Raumladungszone und damit auch den Driftstrom.
Der Driftstrom ist gegen den Diffusionsstrom gerichtet. So bald die Ströme gleich sind, ist eine stabile Raumladungszone etabliert.

1.1.1 Sperr- und Durchflussrichtung



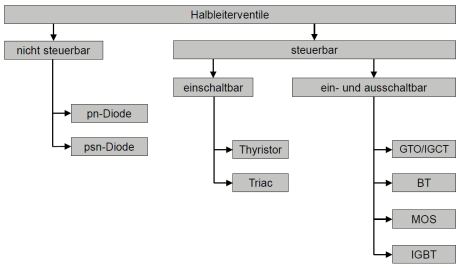
Spannungsquelle ist ist an den pn-Übergang in **Durchflussrichtung** angeschaltet. Die Spannung U verringert die Breite der Raumladungszone. Wenn $U > U_D$ ist, denn die Raumladungszone ist abgebaut und der Strom fliesst über den pn-Übergang



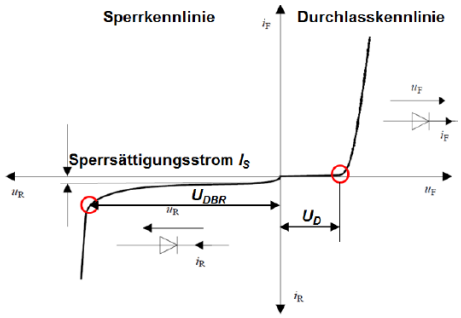
Spannungsquelle ist an den pn-Übergang in **Sperrrichtung** angeschaltet. Die Spannung U vergrössert die Breite der Raumladungszone. Der Strom kann nicht über den pn-Übergang fliessen.

2 Halbleiter

2.1 Halbleiter Übersicht

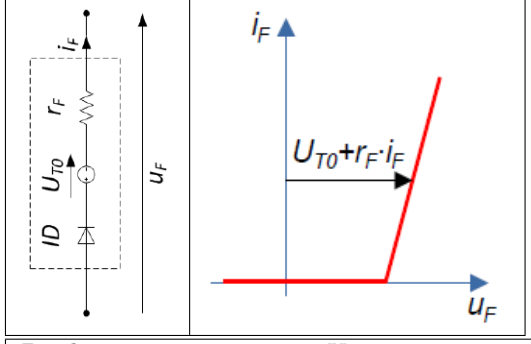


2.1.1 Diode



U_D	Diffusionsspannung ($U_D = 0.7V$ bei Silicium)
U_F	Flussspannung (Forward Voltage)
U_R	Sperrspannung (Reverse Voltage)
i_F	Diffusionsstrom (Strom in Durchlassrichtung)
i_R	Leckstrom (Strom in Sperrrichtung)

Diodenapproximation



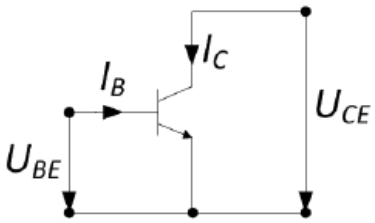
Diodenspannung $\rightarrow u_F = U_{T0} + r_F \cdot i_F$

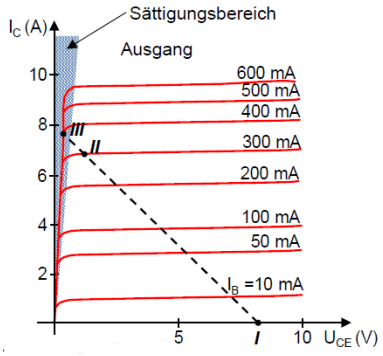
Momentanleistung $\rightarrow p(t) = u_F(t) \cdot i_F(t)$

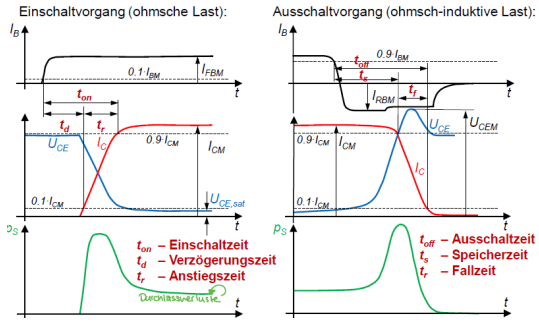
Verlustleistung $P_V = \frac{1}{T}\int_0^T u_F(t) i_F(t) dt = U_{T0}\frac{1}{T}\int_0^T i_F(t) dt + r_F \cdot \frac{1}{T}\int_0^T i_F^2(t) dt$

$$P_V = U_{T0} \cdot I_{FAV} + r_F \cdot I_{FRMS}^2$$

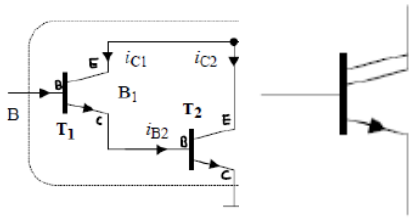
2.2 Bipolarer Transistor







2.3 Darlington Transistoren

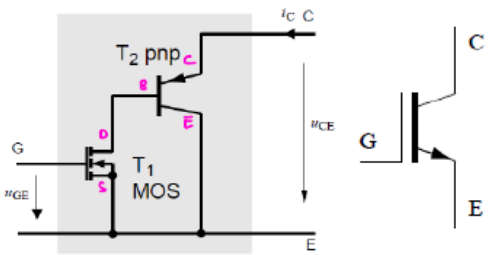


2.3.1 Verstärkungsfaktor

$\beta_1 = \frac{i_{C1}}{i_{B1}} \Leftrightarrow \beta_2 = \frac{i_{C2}}{i_B 1} \Leftrightarrow i_{E1} = i_{C1} + i_{B1} = i_{B1}(1 + \beta_1) = i_{B2}$
$i_{C1} = \beta_2 i_B 2 = \beta_2 i_{E1} = \beta_2 \cdot i_{B1} \cdot (1 + \beta_1) = \beta_{tot} i_{B1}$

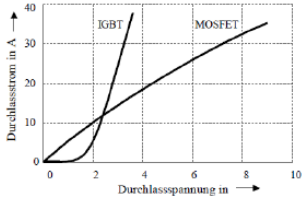
$$\beta_{tot} = \beta_2(1 + \beta_1) \approx \beta_1\beta_2$$

2.4 IG Bipolar Transistor (IGBT)

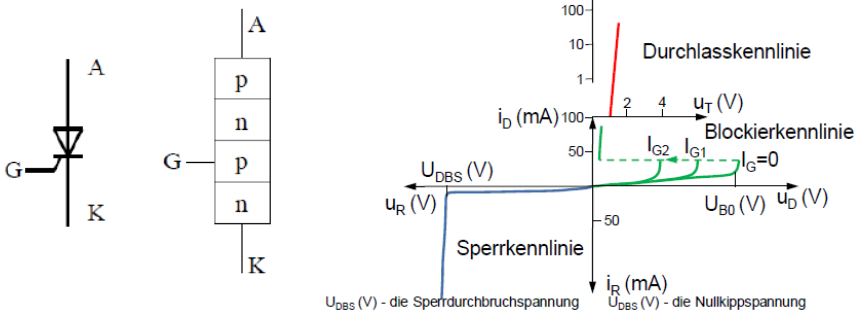


Ein IGBT setzt sich aus einem Bipolartransistor und einem MOSFET zusammen.

2.4.1 Vergleich IGBT Darlington

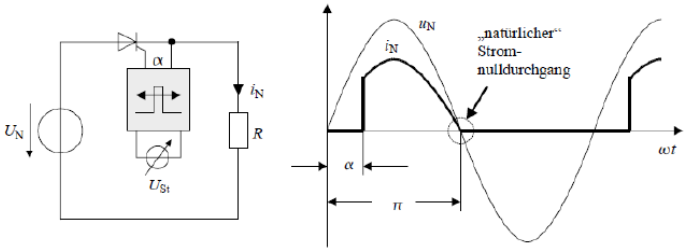


2.5 Thyristoren

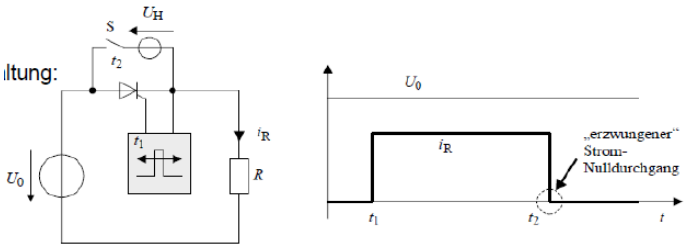


- Thyristoren sind einschaltbare Elemente, welche Hautsächlich in Netzanwendungen gebraucht werden.
- Thyristoren bestehen aus vier dünnen dotierten Halbleiterstreifen, also aus drei pn Übergängen

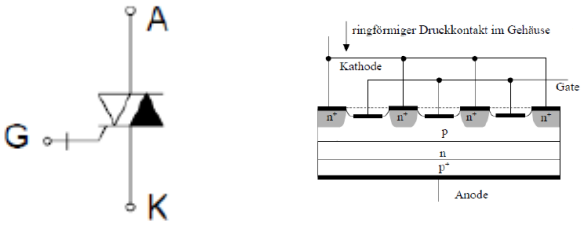
2.5.1 Thyristor Netzgeführte Schaltung



2.5.2 Thyristor Selbstgeführte Schaltung

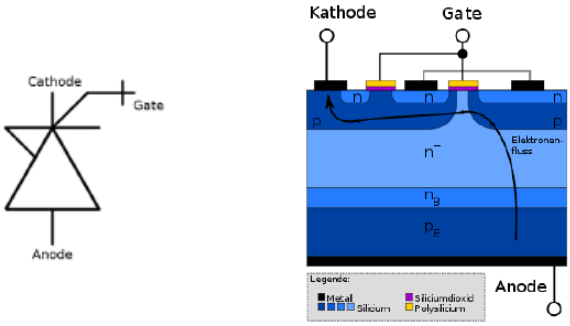


2.6 Abschaltbarer Thyristor



- GTO Schaltet aus, wenn ein ausreichend hoher negativer Gate-Strom fliesst
- Amplitude des Gate-Stromes muss 20% bis 30% des abzuschaltenden GTO-Stromes betragen

2.7 Integrated Gate Commuted Thyristor



- ICGT stellt hinsichtlich der Schaltleistung und Geschwindigkeit eine Weiterentwicklung des GTO dar.
- Wird hauptsächlich für Mittelspannungsumrichter eingesetzt

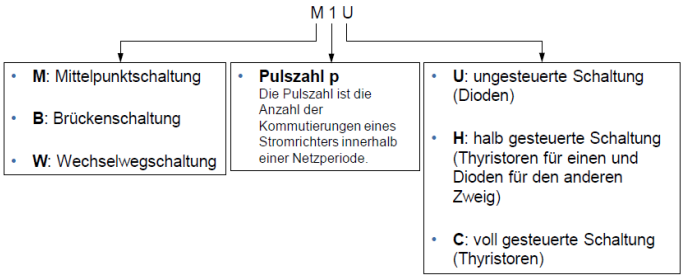
3 Stromrichter Schaltungen

3.1 Gruppierung nach Führung

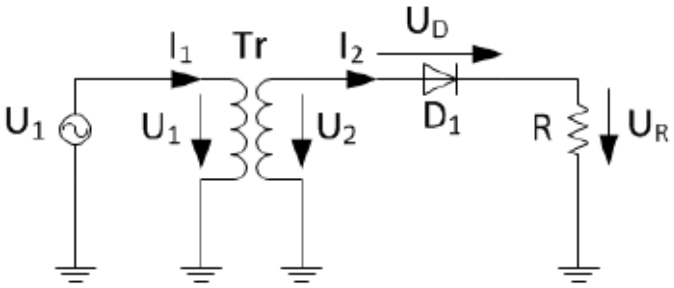
Mit der Führung ist die Herkunft der Kommutierspannung gemeint. Die Kommutierspannung ist der Wechsel des Stromflusses von einen Halbleiter Ventil auf ein Anderes.

- **Netzgeführte Schaltungen**
  ➲ Kommutierspannung des Stromrichters wird aus dem Netzwerk erzeugt
- **Latgeführte Schaltungen**
  ➲ Kommutierspannung wird vom Lastkreiss erstellt
- **Selbstgeführte Schaltungen**
  ➲ Eigene Schaltmittel des Stromrichters erzeugen die Kommutierspannung

3.1.1 Kennzeichnung



3.2 Ungesteuerter Gleichrichter M1U



- U_1 ist die sinusförmige Wechselspannung des Netzes
- T_r ist der Transformator zur Spannungsanpassung und Potenzialtrennung (galvanische Trennung)
- R ist die ohmsche Last des Gleichrichters
- D_1 ist eine ideale Diode (nicht steuerbares Ventil)

3.2.1 Kennwerte M1U

Sekundärspannung	$U_2 = U_D + U_R$
Lastspannung	$U_R = I_2 \cdot R$
Gleichanteil	$U_{RAV} = \frac{1}{T}\int_0^T u_R(t)dt \overset{\alpha=\omega t}{=} \frac{1}{2\pi}\int_0^\pi U_{2m}sin(\alpha)d\alpha = -\frac{U_{2m}}{2\pi}(cos(\pi) - cos(0)) = \frac{U_{2m}}{\pi}$
Effektivwert	$U_{Rrms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u_R^2(t)dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U_{2m}^2 sin^2(\alpha)d\alpha} \overset{\alpha=\omega t}{=} \sqrt{\frac{U_{2m}^2}{2\pi}\int_0^\pi sin^2(\alpha)d\alpha} = \sqrt{\frac{U_{2m}^2}{2\pi}\cdot\frac{\pi}{2}} = \frac{U_{2m}}{2}$
Fourierreihe	$u_R(\alpha) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k cos(\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k sin(\omega t)$ mit $\alpha = \omega t$
Fourierkoeff.	$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} u_R(\alpha)d\alpha$ mit $a_k = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} u_R(\alpha)cos(k\alpha)d\alpha$ und $b_k = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} u_R(\alpha)sin(k\alpha)d\alpha$
Scheinleistung Transformator	$S_2 = U_2 \cdot I_2 = U_2 \cdot I_{Rrms}$
Grundschwingungs-blindleistung	$Q_2 = U_2 \cdot \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{2k}^2} = \sqrt{S_2^2 - P_2^2}$
Leistungsfaktor	$\lambda = \frac{P_2}{S_2}$

3.2.2 Freilaufdiode am M1U

Muss des M1U eine Induktive Last treiben, so sollte eine Freilaufdiode eingestzt werden. Diese Freilaufdiode wird **paralell zur Last** geschalten. Die Freilaufdiode wird dafür gebraucht, dass wenn die Induktive Last geladen ist und der Stromkreis unterbrochen wird, kann sich die Induktivität entladen und kann hohe Spannungsspitzen erreichen, wodurch der Gleichrichter und Transformator beschädigt werden können. Mit einer Freilaufdiode ist der Laststromkreis immer geschlossen.

3.2.3 Fourieranalyse M1U

Allgemein kann eine beliebige periodische Spannung als Fourierreihe geschrieben werden. Die Fourierreihe lautet dabei:

$$f(\alpha) \overset{\alpha=\omega t}{=} \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot cos(k\alpha) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k sin(k\alpha) = \underbrace{F_{AV}}_{\text{Wechselanteil}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot sin(k\alpha + \varphi_k)}_{\text{Wechselanteil}} \begin{cases} A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ \varphi_k = arctan\left(\frac{a_k}{b_k}\right) \end{cases}$$

Berechnung des Gleichanteiles:

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T u(t)dt = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} u(\alpha)d\alpha = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} U_{2m}sin(\alpha)d\alpha = \frac{U_{2m}}{\pi}\Big[-cos(\alpha)\Big]_0^{\pi} = \frac{2\cdot U_{2m}}{\pi}$$

Berechnen der Fourierkoeffizienten a_k:

$$a_k = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} u(\alpha)d\alpha = \frac{U_{2m}}{\pi}\int_0^{\pi} sin(\alpha)cos(k\alpha)d\alpha = \frac{U_{2m}}{\pi}\int_0^{\pi}\frac{1}{2}\big(sin(\alpha(1+k)) + sin(\alpha(1-k))\big)d\alpha$$

$$= \frac{U_{2m}}{2\pi}\cdot\frac{1}{1+k}\Big[-cos(\alpha(1+k))\Big]_0^{\pi} + \frac{U_{2m}}{2\pi}\cdot\frac{1}{1-k}\Big[-cos(\alpha(1-k))\Big]_0^{\pi} = \frac{U_{2m}}{2\pi}\cdot\frac{1}{1+k}\big(1-cos(\pi(k+1))\big) - \frac{U_{2m}}{2\pi}\cdot\frac{1}{k-1}\big(1-cos(\pi(k-1))\big)$$

$$a_k = \begin{cases} 0 & k = 2n-1 \quad \text{Ungerade Zahl} \\ \frac{U_{2m}}{\pi}\left(\frac{1}{k+1} - \frac{1}{k-1}\right) & k = 2n \quad \text{gerade Zahl} \end{cases}$$

Berechnen der Fourierkoeffizienten b_k:

$$b_k = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u(\alpha)d\alpha = \frac{U_{2m}}{\pi}\int_0^{\pi} sin(\alpha)sin(k\alpha)d\alpha = \frac{U_{2m}}{\pi}\int_0^{\pi}\frac{1}{2}\big(cos(\alpha(k-1)) - cos(\alpha(k+1))\big)d\alpha$$

$$= \frac{U_{2m}}{2\pi}\cdot\frac{1}{k-1}\Big[sin(\alpha(k-1))\Big]_0^{\pi}\ \frac{U_{2m}}{2\pi}\cdot\frac{1}{k+1}\Big[sin(\alpha(k+1))\Big]_0^{\pi}$$

$$b_k = \begin{cases} 0 & k > 1 \\ b_1 = \frac{U_{2m}}{2\pi}\int_0^{\pi} d\alpha = \frac{U_{2m}}{2} & k = 1 \end{cases}$$

Leistungsberechnung:

$$P = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u_R(t)i_R(t)dt = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{u_R(\alpha)^2}{R}d\alpha = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{U_{2m}^2}{R}sin^2(\alpha)d\alpha = \frac{U_{2m}^2}{2\pi R}\int_0^{\pi}\frac{1-cos(\alpha)}{2}d\alpha = \frac{U_{2m}^2}{2\pi R}\cdot\frac{\pi}{2} = \frac{U_{2m}^2}{4R} \overset{!}{=} U\cdot I_1\cdot cos(\varphi)$$

Grundschwingungsblindleistung:

$$Q_1 = u\cdot I_1\cdot sin(\varphi_1) = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}}\frac{U_{2m}}{2R\sqrt{2}}\cdot sin(0) = 0$$

Verzerrungsblindleistung:

$$Q_V = U\cdot\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}}\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty}\left(\frac{U_{2m}}{\pi R}\left(\frac{1}{2k-1} - \frac{1}{2k-3}\right)\right)^2}$$

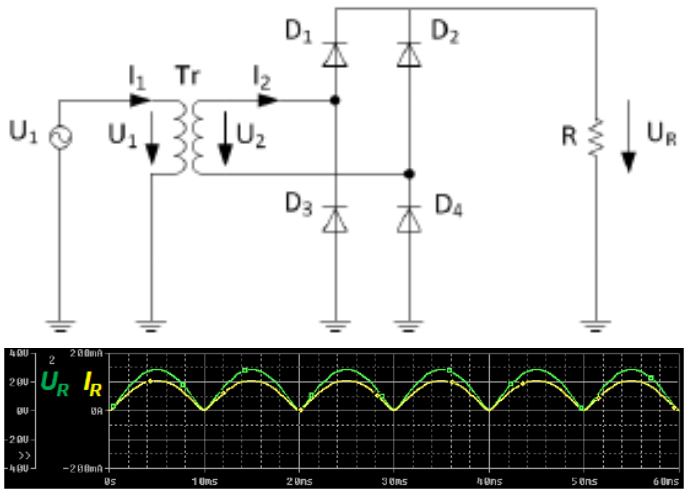
Gesamte Blindleistung:

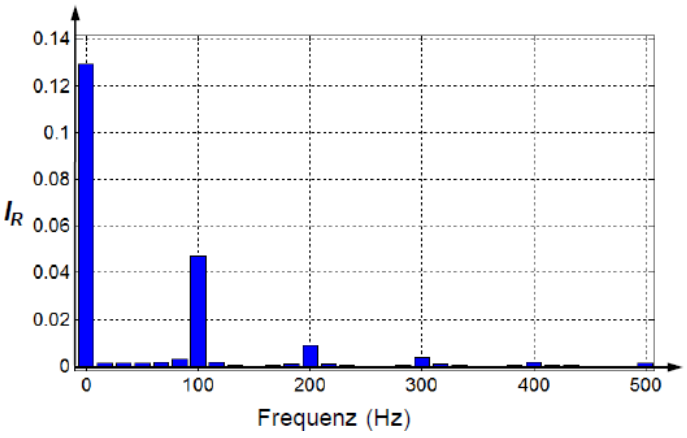
$$Q_{tot} = \sqrt{Q_1^2 + Q_v^2}$$

Gesamte Scheinleistung:

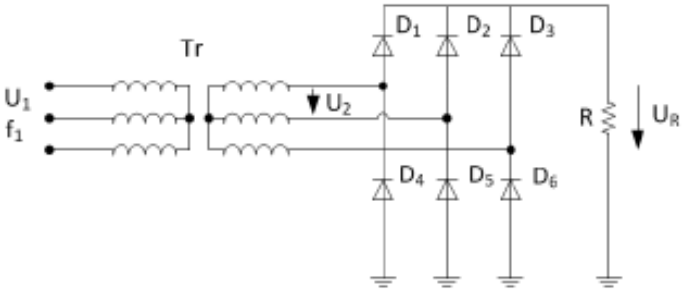
$$S_{tot} = U\cdot I_{rms} = \sqrt{P^2+Q^2} = \sqrt{P^2+Q_1^2+Q_V^2}$$

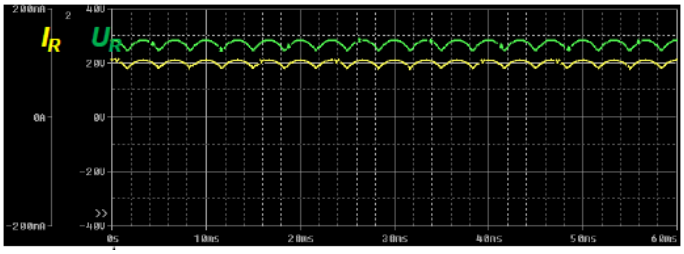
3.3 Ungesteuerter Gleichrichter B2U

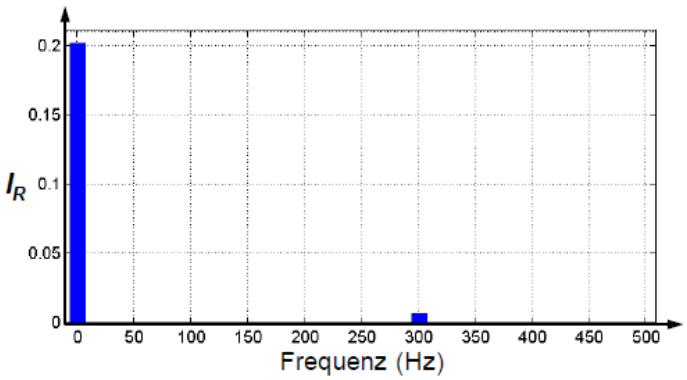




3.4 Ungesteuerter Gleichrichter B6U

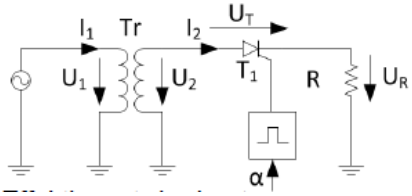


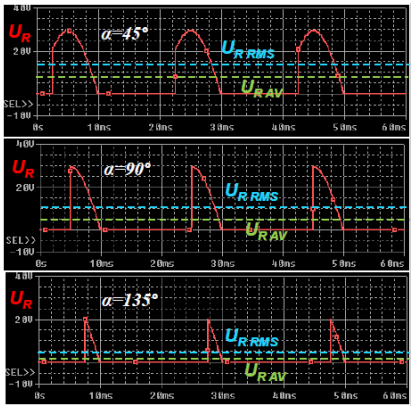


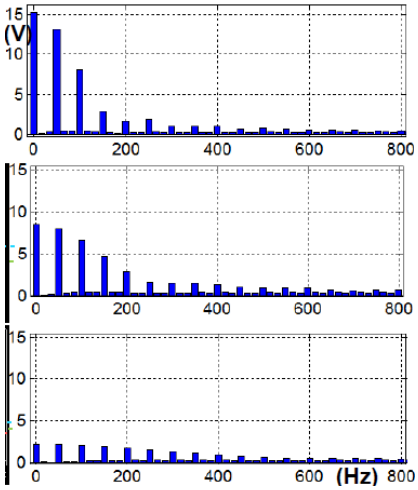


3.5 Gesteuerte Gleichrichter M1C

3.5.1 Gesteuerter Gleichrichter M1C





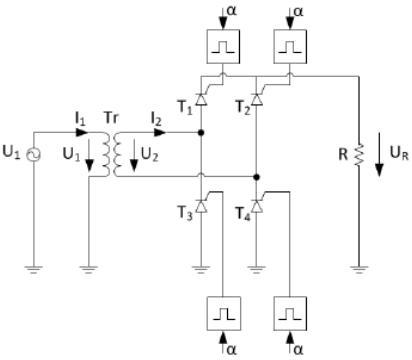


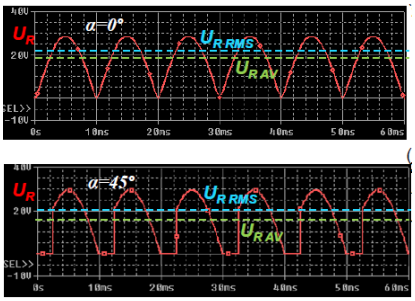
Steuerwinkel: $\alpha \in [0;\pi]$

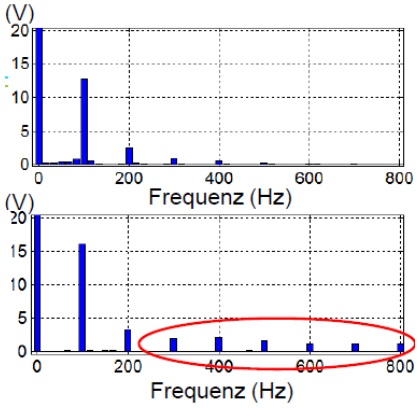
Mittelwert : $U_{Rav} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} U_{2m}sin(\beta)d\beta \overset{\beta=\omega t}{=} \frac{U_{2m}}{2\pi}(1+cos(\alpha))$

Effektivwert: $U_{Rrms} = \sqrt{\frac{U_{2m}^2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} sin^2(\beta)d\beta} = U_{2m}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{4\pi}+\frac{sin(2\alpha)}{8\pi}}$ $\left(\int_{\alpha}^{\pi} sin^2(\beta)d\beta = \frac{\pi-\alpha}{2}-\frac{sin(2\alpha)}{8\pi}\right)$

3.5.2 Gesteuerte Gleichrichter B2C





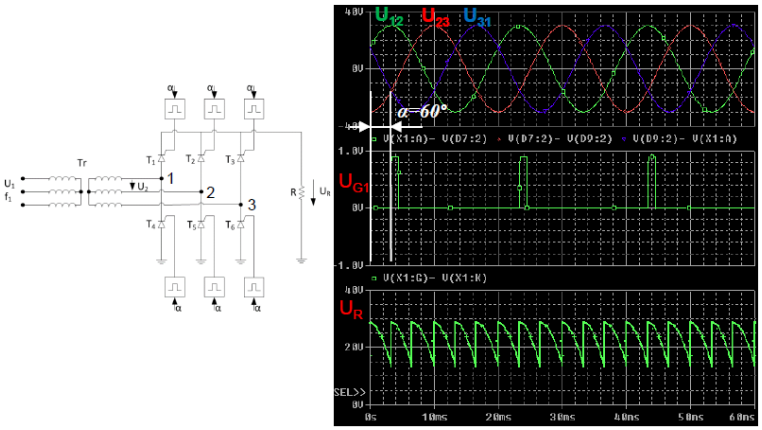


Steuerwinkel: $\alpha \in [0;\pi]$

Mittelwert : $U_{Rav} = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} U_{2m}sin(\beta)d\beta \overset{\beta=\omega t}{=} \frac{U_{2m}}{\pi}(1+cos(\alpha))$

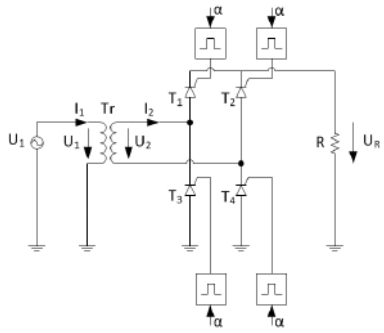
Effektivwert: $U_{Rrms} = \sqrt{\frac{U_{2m}^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} sin^2(\beta) d\beta} \overset{\beta=\omega t}{=} U_{2m} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{sin(2\alpha)}{4\pi}}$

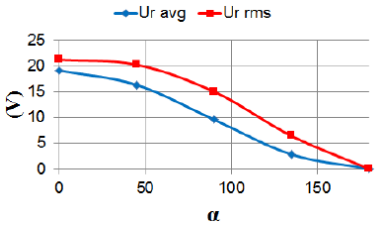
3.5.3 Gesteuerte Gleichrichter B6C

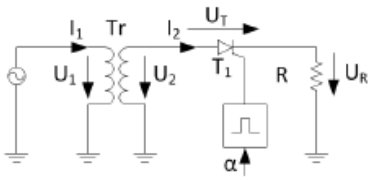


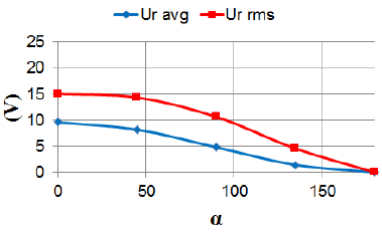
3.6 Vergleiche

3.6.1 Vergleich B2C und M1C

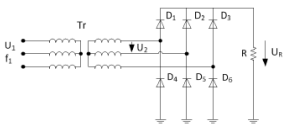


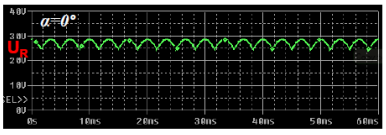


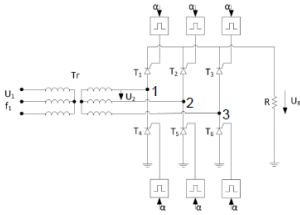


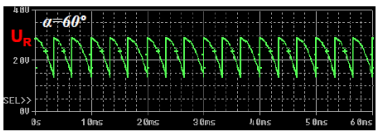


3.6.2 Vergleich B6U und B6C





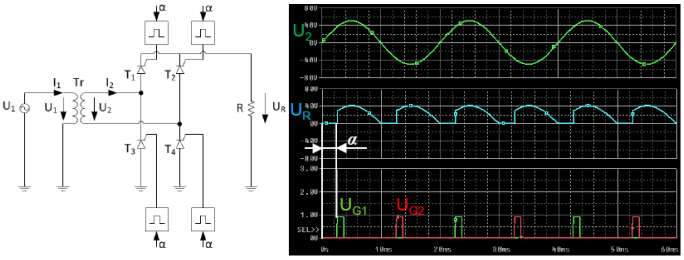




4 Schaltverluste und Kühlung

4.1 Schaltverluste B2C

4.1.1 Verluste der Transistoren



Allgemeine Angaben der Schaltung:

$u_2(t) = 50 \cdot sin(2\pi ft)$; $R = 4\sigma$; $\alpha = 45^o$; $I_{Rm} = \frac{U_{2m}}{R}$

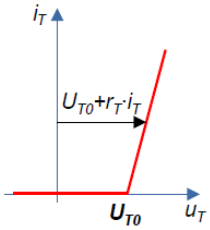
Strom durch die Transistoren:

$$I_{Tav} \overset{\beta=\omega t}{=} \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_{Rm} sin(\beta) d\beta = \frac{I_{Rm}}{2\pi}(1 + cos(\alpha)) = 3.396A$$

$$I_{Trms} \overset{\beta=\omega t}{=} \sqrt{\frac{I_{Trms}^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} sin^2(\beta) d\beta} = \frac{I_{Rm}}{2} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

$I_{Trms} = 5.959A$

Mathematisches Modell der Transistoren:



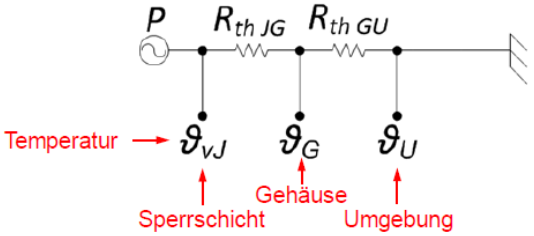
$u_T = U_{T0} + i_T + r_t$ mit $r_T = \frac{du_t}{di_t}$

Verlustleistung:

$P_T = U_{T0} I_{Tav} + r_T I_{Trms}^2$

4.1.2 Kühlung

Thyristor ohne Kühlung:



$\vartheta_{vJ} - \vartheta_U = P \cdot (R_{thJG} + R_{thGU}) \Leftrightarrow \vartheta_{vJ} = P \cdot (R_{thJG} R_{thGU}) + \vartheta_U$

Temperatur Berechnen:

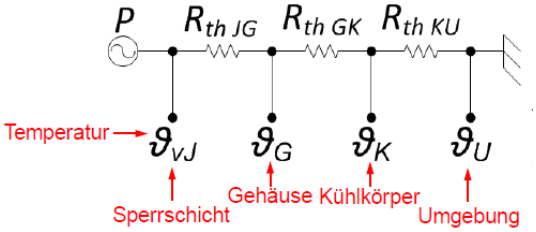
$P = 5.607W; \vartheta_U = 20^oC; R_{thJG} = 1.3^oC/W$

$R_{thGU} = 60.7^oC/W$

$\vartheta_{vJ} = P \cdot (R_{thJG} + R_{thGU}) + \vartheta_U = 367.634^oC$

$\vartheta_G = P \cdot R_{thGU} + \vartheta_U = 360.345^oC$

Thyristor mit Kühlkörper:



$\vartheta_{vJ} = P(R_{thJG} + R_{thGK} + R_{thKU}) + \vartheta_U$

$P = 5.607W; \vartheta_U = 20^oC; R_{thJG} = 1.3^oC/W$

$R_{thGK} = 0.5^oC/W; R_{thKU} = 8.571^o/C$

Temperatur Berechnen:

$\vartheta_{vJ} = P(R_{thJG} + R_{thGU} + R_{thKU}) + \vartheta_U = 78.15^o/C$

$\vartheta_K = 68.057^o/C; \vartheta_G = 70.861^o/C$

4.1.3 Kühlarten

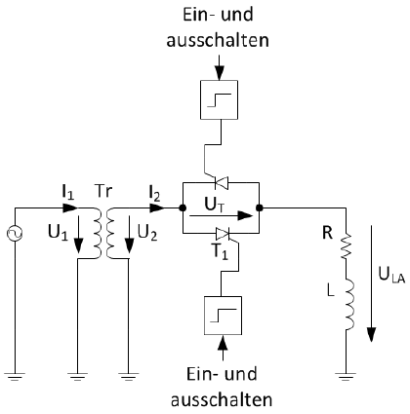
- Wärmeübertragung in ein System
  - ➲ Wärmeleitung
  - ➲ Konvektion
  - ➲ Strahlung
- Kühlarten
  - ➲ Natürliche Kühlung(Verlustwärme durch Luftzug)
  - ➲ Verstärkte Kühlung(Fremdlüftung und Wasserkühlung)
  - ➲ Siedekühlung oder Verdampfungskühlung (heat-pipe, Wärmetauscher)

4.1.4 Halbleiterschutz

- Überspannungsschutz
  - ➲ Schutz durch Überspannungsableiter, Überspannungsbegrenzer
- Überstromschutz
  - ➲ Schutz durch Schmelzsicherungen, Schnellschalter, Leistungsschalter

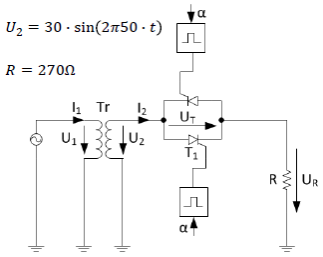
5 Wechselstromsteller

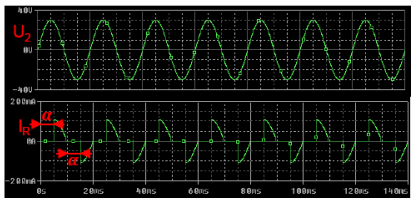
5.1 Funktionsweise

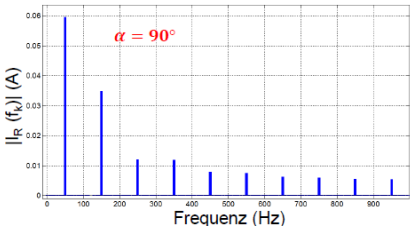


- Da die beiden Halbperioden des Wechselstroms geführt werden sollten, muss der Halbleiterschalter für die Stromführung in beiden Richtungen (i.e. für den Polaritätswechsel) ausgelegt werden.
- Wegen dem Polaritätswechsel besteht unserer Wechselstromschalter aus zwei antiparallelen Thyristoren, die die Stromhalbschwingungen abwechselnd führen.
- Im Vergleich mit dem präsentierten Wechselstrom-Schalter, welcher einmaliges Ein- und Ausschalten von Wechselstromkreisen ermöglicht, erlaubt der Wechselstrom-Steller in jeder Halbperiode wiederholtes Einschalten, wobei der Strom vom Zündzeitpunkt bis zum Nulldurchgang fliesst.

5.1.1 Leistungsberechnung







$$U_{Rrms} = \sqrt{\frac{U_{2m}^2}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} sin^2(\beta)d\beta} = U_{2m}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{2\pi} + \frac{sin(2\alpha)}{4\pi}}$$

$$I_{Rrms} = \frac{U_{2m}}{R}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{2\pi} + \frac{sin(2\alpha)}{4\pi}}$$

$$P = \frac{U_{Rrms}^2}{R} = \frac{U_{2m}^2}{R}\left(\frac{\pi-\alpha}{2\pi} + \frac{sin(2\alpha)}{4\pi}\right) = UI_1cos(\varphi_1)$$

Grundschwingungsblindleistung: $Q_1 = UI_1sin(\varphi_1)$

Verzerrungsblindleistung : $Q_V = U\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}$ Gesamte Blindleistung : $Q_{tot} = \sqrt{Q_1^1 + Q_v^2}$

5.1.2 Steuerwinkel $\alpha = 45^o$

- $I_{Reff} = \frac{U_{2m}}{R}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{2\pi} + \frac{sin(2\alpha)}{4\pi}} = 73mA$
- $P_R = R \cdot I_{Reff}^2 = 1.44W$
- $S_{50} = U_{50} \cdot I_{50}^* = 1.44W + j0.29VAr$

5.1.3 Steuerwinkel $\alpha = 90^o$

- $I_{Reff} = \frac{U_{2m}}{R}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{2\pi} + \frac{sin(2\alpha)}{4\pi}} = 54mA$
- $P_R = R \cdot I_{Reff}^2 = 0.78$
- $S_{50} = U_{50} \cdot I_{50}^* = 0.74W + j0.51VAr$

6 Gleichstromumrichter

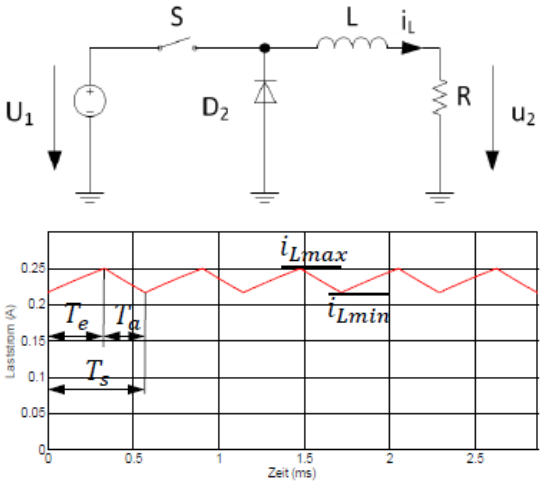
Ein Gleichstromumrichter ermöglicht die elektrische Verbindung zwischen zwei Gleichspannungssystemen mit verschiedenen Spannungen. Mit einem gleichstromumrichter können folgenden Systemgrössen umgeandelt werden.

- Polarität
- Spannung
- Strom

Nach dem Verhältnis von Ausgangsspannung U_a und Eingangsspannung U_e werden die Gleichtromumrichter in drei Gruppen aufgeteilt:

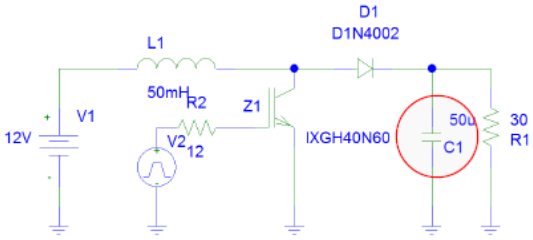
- Tiefsetzsteller (Buck Converter) $U_a < U_e$
- Hochsetzsteller (Boost Converter) $U_a > U_e$
- Inverswandler (Buck Boost Converter) $U_a = -U_e$

6.1 Buck Converter

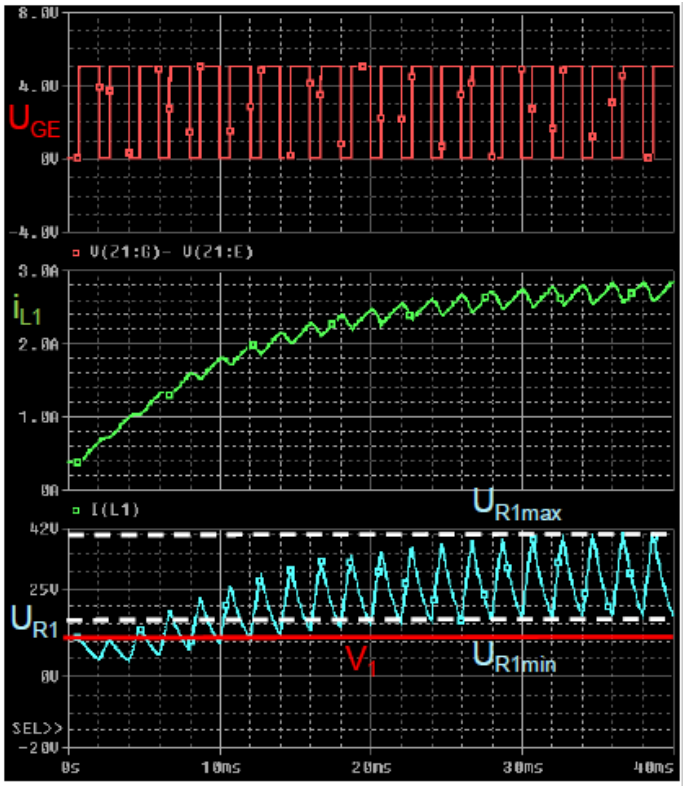


- Grundgleichungen
  - ① $V_1 = i_L R_1 + L_1 \frac{di_L}{dt}$ für $t \in [0; T_e]$
  - ② $0 = i_l R_1 + L_1 \frac{di_L}{dt}$ für $tin[T_e; T_s]$
- Lösungen der Grundgleichungen
  - ① $i_L = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_1}{R_1} \frac{exp(\frac{-T_a}{\tau}) - 1}{1 - exp(\frac{-T_s}{\tau})}$ für $t \in [0; T_e]$ mit $\tau = \frac{L_1}{R_1}$
  - ② $i_L = \frac{V_1}{R_1} \frac{1 - exp(\frac{-T_e}{\tau})}{1 - exp(\frac{-T_s}{\tau})} exp(\frac{t - T_e}{\tau})$ für $tin[T_e; T_s]$ mit $\tau = \frac{L_1}{R_1}$
- Auflösen nach Ein-/Ausschaltzeiten
  - ① $T_a = -\tau ln(\frac{i_{Lmin}}{i_{Lmax}}) = \frac{-L_1}{R_1} ln(\frac{i_{Lmin}}{i_{Lmax}})$
  - ② $T_e = -\tau ln\left(\frac{\frac{V_1}{R_1 i_{Lmax}} - 1}{\frac{V_1}{R_1 I_{lmax}} - exp(\frac{-T_a}{\tau})}\right)$ mit $T_s = T_a + T_e$

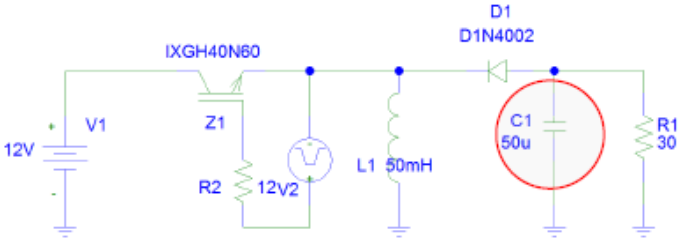
6.2 Boost Converter

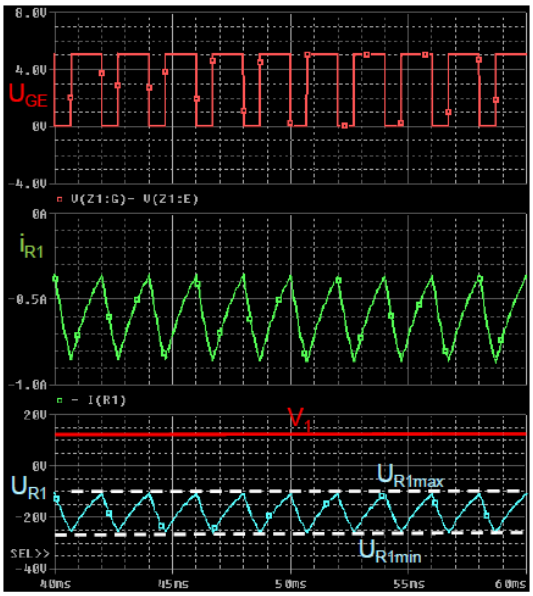


Um den kontinuierlichen Laststrom zu erzeugen wird ein Kondensator Paralell zur Last geschalten
Im stationären Betrieb bleibt die Spannung zwischen den zulässigen Grenzen
$U_{R1min} < u_{R1}(t) < U_{R1max}$



6.3 Buck Boost Converter

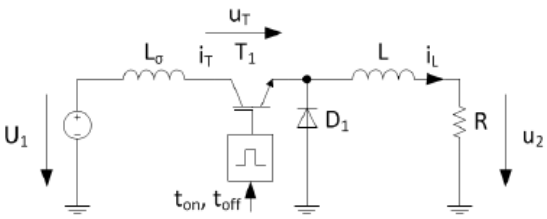


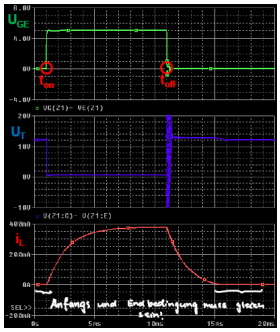


um die Polarität der Lastspannung umzukehren ist die Last über eine Diode direkt an die Induktivität angeschlossen. Um einen kontinuierlichen Laststrom zu erzeugen, wird ein Kondensator in Paralellschaltung mit der Last eingesetzt. Im stationären Betrieb bleibt die Spannung zwischen den zulässigen Grenzen.
$U_{R1min} < u_{R1}(t) < U_{R1max}$

7 Gleichstromschalter und Gleichstromschalter

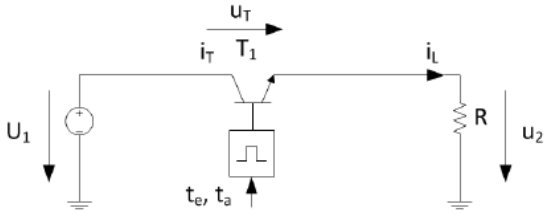
7.1 Gleichstromschalter

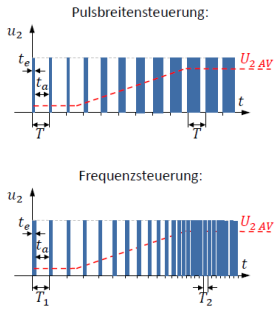




- Differentialgleichung des Kreises:
  $(L+L_\sigma)\frac{di_L}{dt}+i_L R = U_1$ für $t_{on} \leq t \leq t_{off}$
  $L\frac{di_L}{dt}+i_L R = 0$ für $t_{off} \leq t$
- Lösung der Differentialgleichung:
  $i_L(t) = \frac{U_1}{R}\left(1-e^{-\frac{t-t_{on}}{\tau}}\right)$ für $t_{on} \leq t \leq t_{off}$
  $I_L(t) = \frac{U_1}{R}e^{\frac{t-t_{off}}{\tau}}$ für $t_{off} \leq t$

7.2 Gleichstromsteller





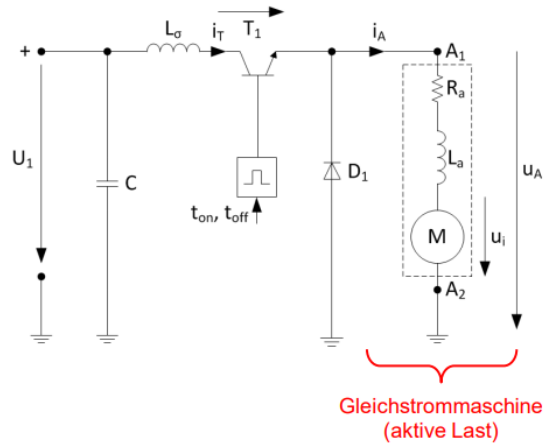
- Einschaltzeit $(= t_e)$
- Ausschaltzeit $(= t_a)$
- Mittelwert der Lastspannung

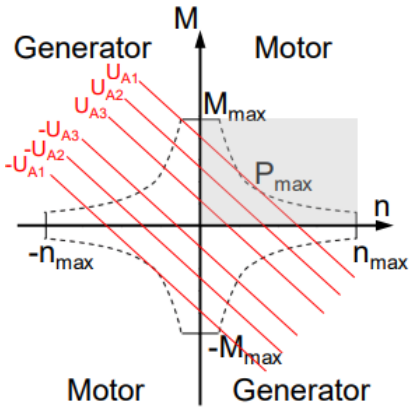
$$U_{2AV} = \frac{1}{T}\int_0^T u_2(t)dt$$

$$U_{2AV} = \frac{1}{t_e+t_a}\int_0^{t_e} U_1 dt$$

$$U_{2AV} = \frac{t_e}{t_e+t_a}U_1 = \frac{t_e}{T}U_1$$

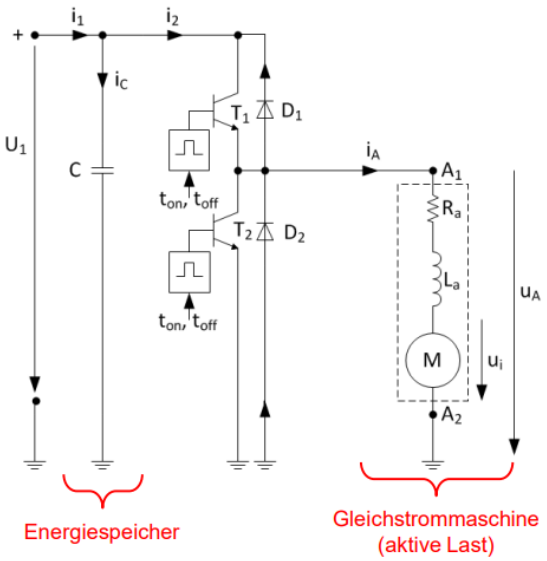
7.2.1 Gleichstromsteller 1-Quadrantenbetrieb

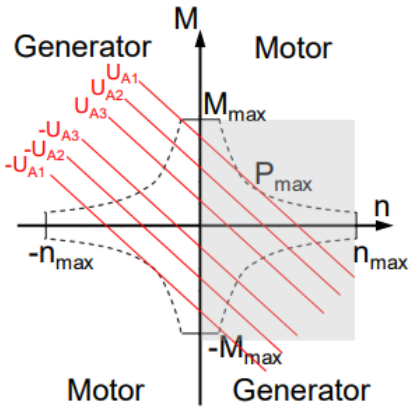




- Durch Erhöhen der Spannung U_1 geht die Kurve z.B. von U_{A2} zu U_{A1}

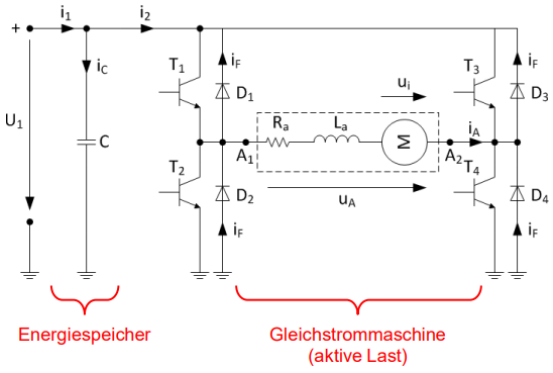
7.2.2 Gleichstromsteller 2-Quadrantenbetrieb

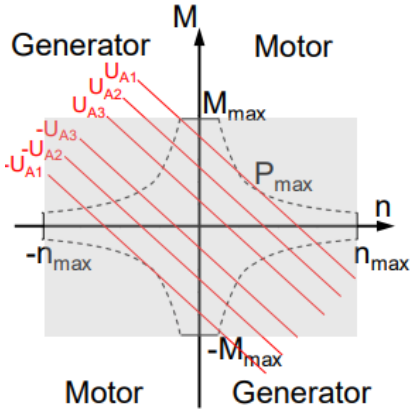




- Gleichstrommaschine kann nur Beschleunigen oder Bremsen.
- Kann nur eine Drehrichtung haben.

7.2.3 Gleichstromsteller 4-Quadrantenbetrieb



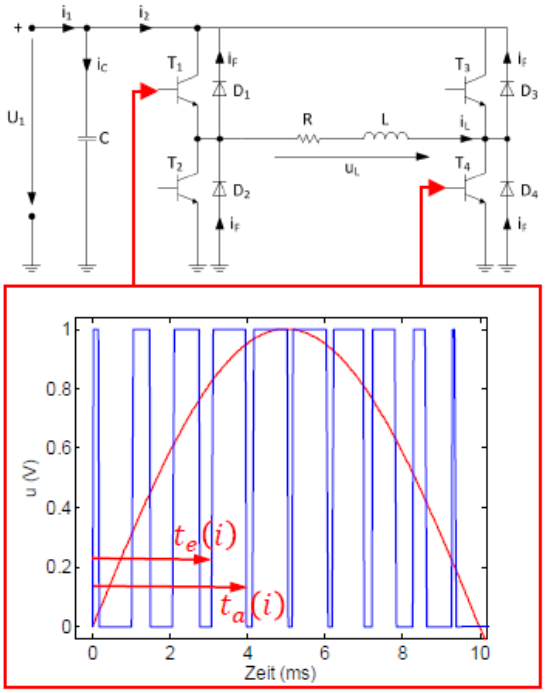


- Gleichstrommaschine kann in Bremsen und Beschleunigen
- Kann in beide Richtungen drehen
- Kurve von $-U_{A2}$ zu $-U_{A1}$ sind T_1 und T_4 aktiv
- Kurve von U_{A2} zu U_{A1} sind T_3 und T_2 aktiv
- Beim Bremsen sind T_2 und T_4 aktiv (=Kurzschluss)

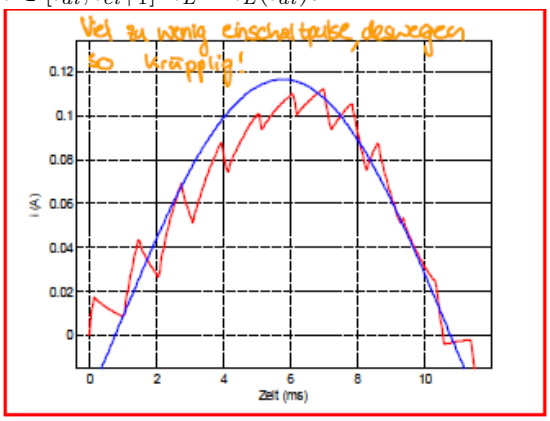
8 Wechselrichter

8.1 Einphasiger Wechselrichter

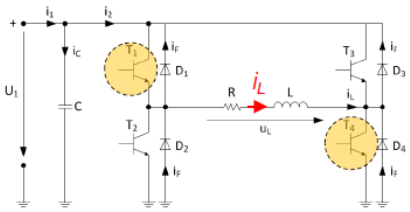
8.1.1 Steuerungspulsmuster

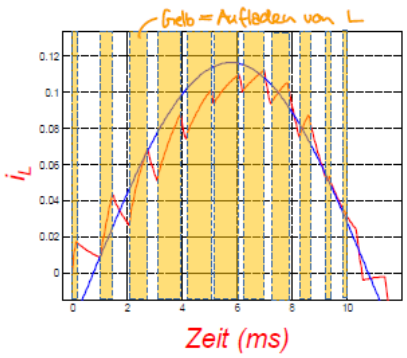


Steuerungspulsmuster des Wechselrichters:
$T = \frac{1}{f}$ $dt = \frac{T}{N-1}$
$t_e(i) = (i-1)dt$ und $t_a(i) = t_e(i) + k \cdot dt \cdot |sin(\omega t_e(i))|$
Grundgleichungen der induktiven Last:
$t \in [t_{ei}; t_{ai}]$: $i_L(t) = \frac{U_1}{R}\left(1 - e^{\frac{t_{ei}-t}{\tau}}\right) + i_L(t_e i)e^{\frac{t_{ei}-t}{\tau}}$
$t \in [t_{ai}; t_{ei+1}]$: $i_L = i_L(t_{ai})e^{\frac{t_{ai}-t}{\tau}}$



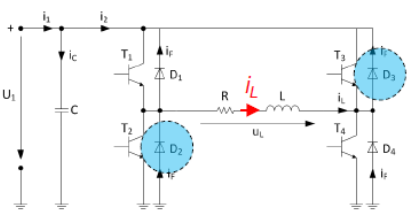
8.1.2 Aufladen der Lastinduktivität

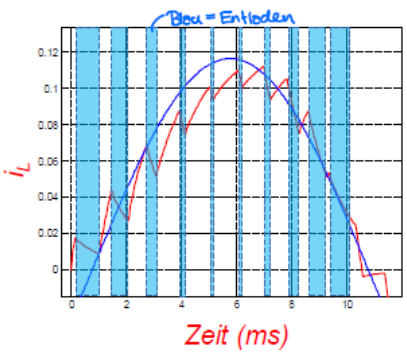




- Blaue Kurve zeigt die gewünschte Form des Laststromes
- Rote Kurve ist die wahre Form des Laststromes
- Beim Aufladen der Lastinduktivität leiten die Transistoren T_1 und T_4
- Beim Entladen der Lastinduktivität leiten die Dioden D_2 und D_3

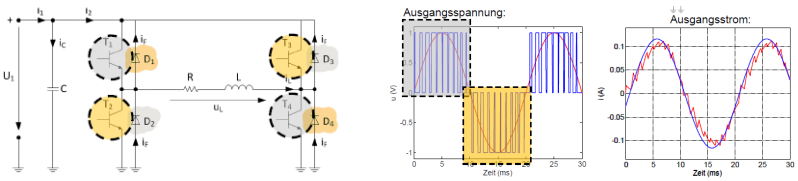
8.1.3 Entladen der Lastinduktivität





- Blaue Kurve zeigt die gewünschte Form des Laststromes
- Rote Kurve ist die wahre Form des Laststromes
- Beim Aufladen der Lastinduktivität leiten die Transistoren T_1 und T_4
- Beim Entladen der Lastinduktivität leiten die Dioden D_2 und D_3

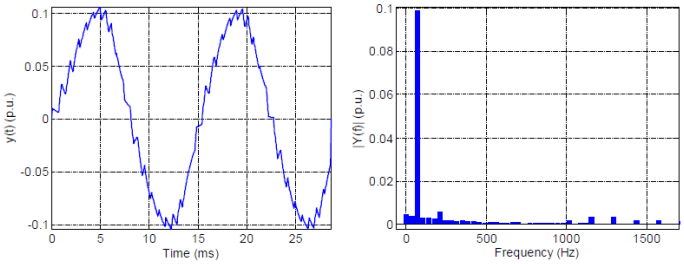
8.1.4 Spannungs- und Stromverlauf



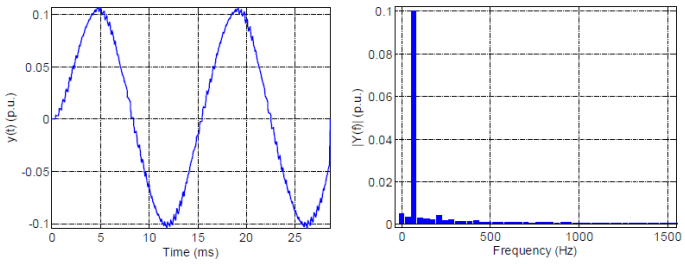
8.1.5 Höhere Harmonische und höhere Auflösung

Mit der Auflösung N werden $\frac{N}{2}$ Zeitschritte pro Halbperiode gemacht.

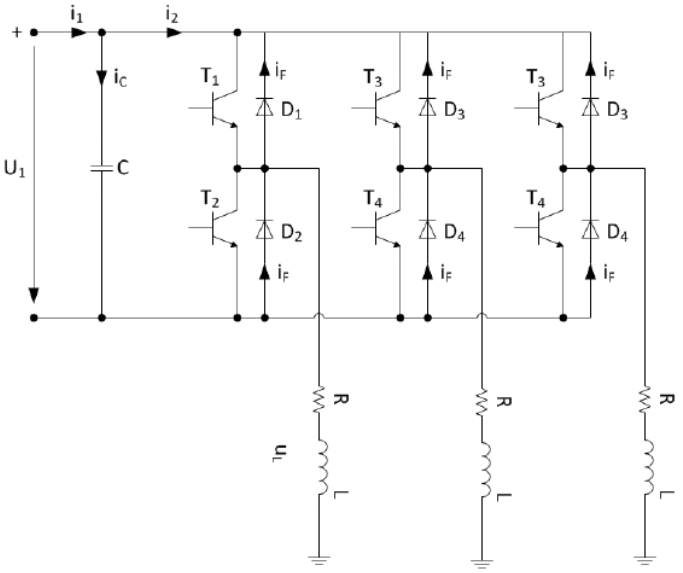
Auflösung N=40



Auflösung N=90



8.2 Dreiphasiger Wechselrichter

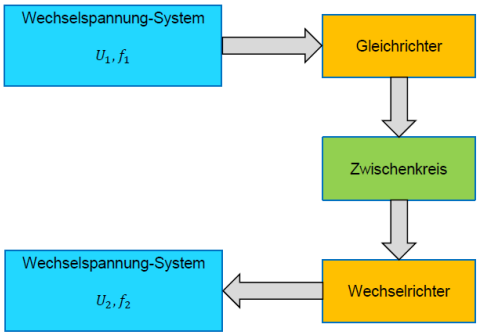


- Wichtige Anwendungen von Dreiphasigen Wechselrichtern
  - ➲ Photovoltaik (Solarwechselrichter)
  - ➲ Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)
  - ➲ Wechselrichter in Kraftfahrzeugen
  - ➲ Beleuchtung

9 Frequenzumrichter

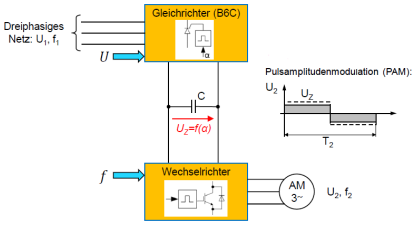
Umrichtbare Systemgrössen
- Spannung
- Frequenz
- Phasenzahl
- Phasenfolge

Aufteilung der Wechselstromrichter:
- Zwischenkreis-Umrichter $P_{Motor} < 100kW$
  - ➲ Kombination aus Gleichrichter und Wechselrichter
- Direkt-Umrichter $P_{Motor} > 100kW$
  - ➲ Wechselstromsteller

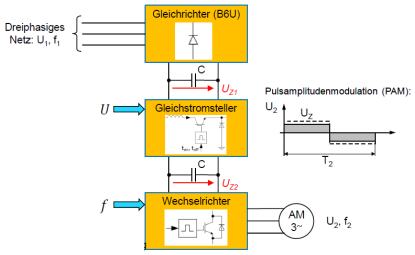


9.1 Gleichspannung Zwischenkreis

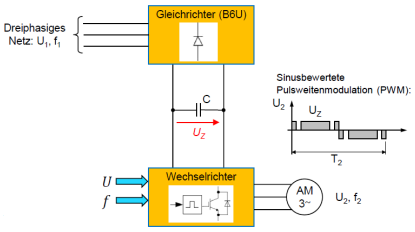
9.1.1 Variante 1 Variable Zwischenkreisspannung



9.1.2 Variante 2 Variable Zwischenkreisspannung

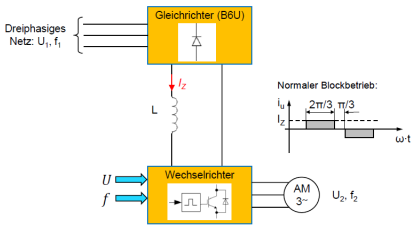


9.1.3 Variante 3 Konstante Zwischenkreisspannung

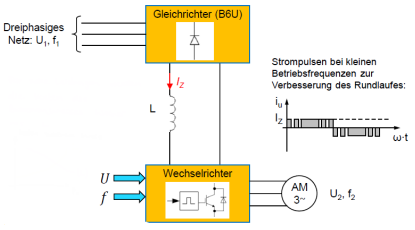


9.2 Gleichstrom Zwischenkreis

9.2.1 Variante 1 Normaler Blockbetrieb

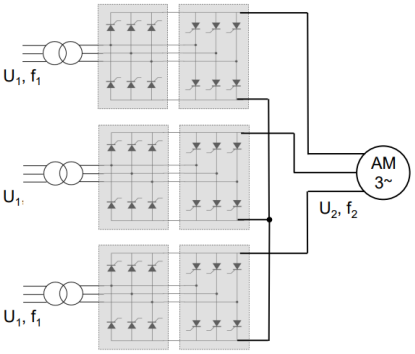


9.2.2 Variante 1 Normaler Blockbetrieb

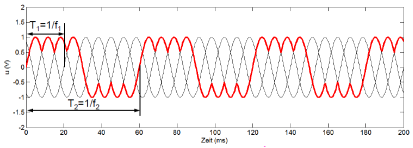


9.3 Direktumrichter

9.3.1 Cycloconverter



9.3.2 Trapezumrichter

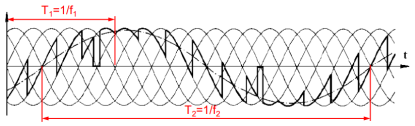


Die Ausgangsspannung einer Phase des Umrichters (=rote Kurve) und alle drei Eingangsspannungen (=schwarze Kurve) sind dargestellt.

- Geringe Blindleistung
- Starre Frequenzen, nur Frequenzen von

$$\supset f = \frac{f_{in}}{n} n \in \mathbb{N}$$

9.3.3 Steuerumrichter



Die Ausgangsspannung einer Phase des Umrichters (=dicke Kurve) und alle drei Eingangsspannungen (=dünne Kurven) sind dargestellt

- Variable Frequenz
- Sinusförmige Ausgangsspannung
- Viel Blindleistung

10 Analysis Trickkiste

sin, cos, tan																
Grad	0°	30°	45°	60°	90°	120°	135°	150°	180°	210°	225°	240°	270°	300°	315°	330°
rad	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{6}$	π	$\frac{7\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{4}$	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{7\pi}{4}$	$\frac{11\pi}{6}$
sin	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{1}{2}$
cos	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
tan	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	$undef$	$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	$undef$	$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$

Produkte Trigonometrischer Funktionen

$sin(\alpha)sin(\beta) =$	$\frac{1}{2} \cdot (cos(\alpha-\beta) - cos(\alpha+\beta))$
$sin(\alpha)cos(\beta) =$	$\frac{1}{2} \cdot (sin(\alpha-\beta) + sin(\alpha+\beta))$
$cos(\alpha)cos(\beta) =$	$\frac{1}{2} \cdot (cos(\alpha-\beta) + cos(\alpha+\beta))$
$sin(\alpha)sin(\beta)sin(\gamma) =$	$\frac{1}{4} \cdot (sin(\alpha+\beta-\gamma) + sin(\beta+\gamma-\alpha) + sin(\gamma+\alpha-\beta) - sin(\alpha+\beta+\gamma))$
$sin(\alpha)cos(\beta)cos(\gamma) =$	$\frac{1}{4} \cdot (sin(\alpha+\beta-\gamma) - sin(\beta+\gamma-\alpha) + sin(\gamma+\alpha-\beta) + sin(\alpha+\beta+\gamma))$
$cos(\alpha-\beta) =$	$cos(\alpha)cos(\beta) + sin(\alpha)sin(\beta)$

Additionstheoreme

$sin(2\alpha) = 2sin(\alpha)cos(\alpha)$
$cos(2\alpha)$ $= cos^2(\alpha) - sin^2(\alpha)$ $= 2cos^2(\alpha) - 1$ $= 1 - sin^2(\alpha)$
$cosh^2(x) - sinh^2(x) = 1$
$sin(3\alpha) = 3sin(\alpha) - 4sin^3(\alpha)$
$cos(3\alpha) = 4cos^3(\alpha) - 3cos(\alpha)$
$tan(x) = \frac{sin(x)}{cos(x)}$

Potenzen Trigonometrischer Funktionen

$sin^2(\alpha) = \frac{1}{2}(1 - cos(2\alpha))$	$cos^2(\alpha) = \frac{1}{2}(1 + cos(2\alpha))$
$sin^3(\alpha) = \frac{1}{4}(3sin(\alpha) - sin(3\alpha))$	$cos^3(\alpha) = \frac{1}{4}(cos(3\alpha) + 3cos(\alpha))$
$sin^4(\alpha) = \frac{1}{8}(cos(4\alpha) - 2cos(2\alpha) + 3)$	$cos^4(\alpha) = \frac{1}{8}(cos(4\alpha) + 4cos(2\alpha) + 3)$

Limits Trigonometrie

$\lim_{x \to \frac{\pi}{2}^-} tan(x) = \infty$	$\lim_{x \to \infty} sinh(x) = \infty$
$\lim_{x \to \frac{3\pi}{2}^-} tan(x) = \infty$	$\lim_{x \to -\infty} sinh(x) = -\infty$
$\lim_{x \to \frac{\pi}{2}^+} tan(x) = -\infty$	$\lim_{x \to \infty} cosh(x) = \infty$
$\lim_{x \to \frac{3\pi}{2}^+} tan(x) = -\infty$	$\lim_{x \to -\infty} cosh(x) = -\infty$
$\lim_{x \to \frac{\pi}{2}} arctan(x) = \infty$	$\lim_{x \to -\infty} ln(x) = 0^+$
$\lim_{x \to \frac{-\pi}{2}} arctan(x) = -\infty$	$\lim_{x \to \infty} ln(x) = \infty$
$\lim_{x \to -\infty} e^x = 0$	$\lim_{x \to \infty} e^x = \infty$

Trigonometrische Formeln für halbe Winkel

$sin(\frac{\alpha}{2}) = \sqrt{\frac{1}{2}(a - cos(\alpha))}$	$tan(\frac{\alpha}{2}) = \sqrt{(\frac{1-cos(\alpha)}{1+cos(\alpha)})} = \frac{1-cos(\alpha)}{sin(\alpha)} = \frac{sin(\alpha)}{1+cos(\alpha)}$
$cos(\frac{\alpha}{2}) = \sqrt{\frac{1}{2}(1 + cos(\alpha))}$	$cot(\frac{\alpha}{2}) = \sqrt{(\frac{1+cos(\alpha)}{1-cos(\alpha)})} = \frac{1+cos(\alpha)}{sin(\alpha)} = \frac{sin(\alpha)}{1-cos(\alpha)}$

Ableitungen

$(\frac{u}{v})' = \frac{u' \cdot v - u \cdot v'}{v^2}$	$(ln(x))' = \frac{1}{x}$	$(tan(x))' = 1 + tan^2(x)$
$(x^n)' = n \cdot x^{n-1}$	$(sinh(x))' = cosh(x)$	$(cosh(x))' = sinh(x)$
$(cot(x))' = -(1 + cot^2(x))$	$(sin(x))' = cos(x)$	$(cos(x))' = -sin(x)$
$(arctan(x))' = \frac{1}{x^2+1}$	$(ln(f(x)))' = \frac{f'(x)}{f(x)}$	$(u \cdot v)' = u' \cdot v + u \cdot v'$
$(tan(x))' = \frac{1}{cos^2(x)}$	$(arcsin(x))' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	$(\lvert x \rvert)' = sgn(x) = \frac{\lvert x \rvert}{x}$

Heul leise Formeln

$\sin(x) = \frac{1}{2j} \cdot (e^{jx} - e^{-jx})$	$cos(x) = \frac{1}{2} \cdot (e^{jx} + e^{-jx})$

Partialbruchzerlegung

Nennerpolynom einer echt gebrochen rationale Funktion f habe folgende Form
$q_n(x) = b_n \cdot (x - x_1)^{k_1} ... (x - x_s)^{k_s} \cdot (x^2 + p_1 x + q_1)^{j_1} ... (x^2 + p_t x + q_t)^{j_t}$
wobei die $x_i (i = 1...s)$ die reellen k_i-fachen Nullstellen con q_n sind. Dann lässt sich f auf genau eine Weise als Summe von Teilbrüchen der folgenden Form darstellen

$$f(x) = \frac{A_{11}}{x-x_1} + .. + \frac{A_{1k_1}}{(x-x_1)^{k_1}} + .. + \frac{A_{s1}}{(x-x_s)} + .. + \frac{A_{sk_s}}{(x-x_s)^{k_s}} + .. + \frac{B_{11}x+C_{11}}{x^2+p_1x+q_1} + .. + \frac{B_{1j_1}x+C_{1j_1}}{(x^2+p_1x+q_1)^{j_1}} + .. + \frac{B_{t1}x+C_{t1}}{x^2+p_tx+q_t} + .. + \frac{B_{1j_t}x+C_{1j_t}}{(x^2+p_tx+q_t)^{j_t}}$$

Partielle Integration

$$\int_a^b u'(x) \cdot v(x)dx = \Big[u(x)\ v(x)\Big]_a^b - \int_a^b u(x)v'(x)dx$$

$$\int_a^b t \cdot e^{-jwt}dt = \frac{-1}{j\omega}\Big[te^{-jwt}\Big]_a^b - \frac{-1}{jw}\int_a^b e^{-jwt}dt$$

Arcus Funktionen

$arcsin(0) = 0$	$arccos(0) = \frac{\pi}{2}$	$arctan(0) = 0$
$arcsin(1) = \frac{\pi}{2}$	$arccos(1) = 0$	$arctan(1) = \frac{\pi}{4}$
$arcsin(\text{-}1) = \text{-}\frac{\pi}{2}$	$arccos(\text{-}1) = \pi$	$arctan(\text{-}1) = \frac{\pi}{4}$

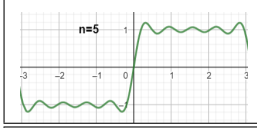
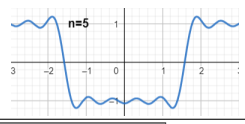
Hyperbolische Funktionen

$sinh(0) = 0$	$cosh(0) = 1$
$\lim_{x \to \infty} sinh(x) = \infty$	$\lim_{x \to \infty} cosh(x) = \infty$
$\lim_{x \to -\infty} sinh(x) = -\infty$	$\lim_{x \to -\infty} cosh(x) = -\infty$

Fourierreihe und Spektren

$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T f(x)dx$	$a_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(x)cos(k\frac{2\pi}{T}x)dx$	$b_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(x)sin(k\frac{2\pi}{T}x)dx$
Ampl.spektrum	**Phasendiagramm ϕ_k**	**Kompl. Koeff.**
$d_0 = \frac{a_0}{2}$; $d_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$	$arg(c_k) = -arctan(\frac{b_k}{a_k} + k\pi)$	$c_k = \frac{1}{T}\int_0^T f(x)e^{-jwx}dx$

Rechtecksignale

Punktymmetrisch	Achensymmetrisch
$\frac{4}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sin\left((2k-1)t\right)}{2k-1}$	$\frac{4}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sin\left((2k-1)\cdot(t-\frac{\pi}{2})\right)}{2k-1}$
	

Gerade Funktion	Ungerade Funktion
$(f(t) = f(-t))$ z.B. $cos(x)$	$(f(-t) = -f(t))$ z.B. $sin(x)$
$b_n = 0$ und $a_n = \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} f(t)cos(n\omega t)$	$a_n = 0$ und $b_n = \frac{4}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} f(t)cos(n\omega t)$

Allgemeine Form

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}\Big(a_k \cdot cos(n\omega t) + b_k \cdot sin(k\omega t)\Big) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{jk\omega t}$$

Kennwerte Zeitsignale

Mittelwert	$X_{AV} = \frac{1}{T}\int_0^T x(t)dt$	**Gleichwert**	$\lvert\bar{X}\rvert = \frac{1}{T}\int_0^T \lvert x(t)\rvert dt$
	Effektivwert	$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)dt}$	

Orthogonalitätsbeziehungen

$$\int_0^T cos(n\omega t)cos(m\omega t)dt = \begin{cases} T & n = m = 0 \\ \frac{T}{2} & n = m > 0 \\ 0 & n \neq m \end{cases}$$

$$\int_0^T sin(n\omega t)sin(m\omega t)dt = \begin{cases} \frac{T}{2} & n = m \\ 0 & n \neq m \end{cases}$$

$$\int_0^T cos(n\omega t)sin(n\omega t) = 0$$

11 Trickkiste der Elektroingenieure

Grundelemente

Kapazität C		Induktivität L	
Kapazität:	$C = \frac{Q}{U}$	**Induktivität:**	$L = \frac{\Phi_v}{I} = \frac{N \cdot \Phi}{I}$
Impedanz:	$\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C}$	**Impedanz:**	$\underline{Z}_L = j\omega L$
Bauteilgl. $u(t)$**:**	$u(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i(\tilde{t})d\tilde{t}$	**Bauteilgl.** $u(t)$**:**	$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$
Bauteilgl. $i(t)$**:**	$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}$	**Bauteilgl.** $i(t)$**:**	$i(t) = \frac{1}{L}\int_0^t u(\tilde{t})d\tilde{t}$
Zeitkonstante:	$\tau = RC$	**Zeitkonstante:**	$\tau = \frac{L}{R}$
Ladekurve:	$u_c(t) = u_c(0) + [U_{stat} - u_c(0)] \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$	**Ladekurve:**	$i_L(t) = i_L(0) + [I_{stat} - i_L(0)] \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$
Entladekurve:	$u_c(t) = u_c(\infty) + u_c(0) \cdot e^{-t/\tau}$	**Entladekurve:**	$i_L(t) = i_L(\infty) + i_L(0) \cdot e^{-t/\tau}$
gesp. Energie:	$E_C = \frac{1}{2}C \cdot u_c^2$	**gesp. Energie:**	$E_L = \frac{1}{2}L \cdot i_l^2$
Plattenkondesator:	$C \approx \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{d}$	**Zylinderspule:**	$L \approx \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A \cdot N^2}{l}$
Zyl. Kondensator:	$C \approx \frac{2\pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$	**Toroidspule:**	$L \approx \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A \cdot N^2}{2\pi r_m}$
	U **springt nicht!**		I **springt nicht!**

Kreisgüte

$$Q = \frac{1}{B_{rel}} = \frac{\omega_m W}{P} \Rightarrow Q_s = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}},\ Q_P = \frac{1}{G}\sqrt{\frac{C}{L}}$$

Duty Cycle

$$d_{cyc} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Quantisierung

Intervallbreite	$q = \frac{V_{ref_p} - V_{ref_n}}{2^n}$

Konstanten

Boltzmann Konstante	$k = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$
El. Feldkonstante	$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$
Mag. Feldkonstante	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$
Spez. Widerstand Kupfer	$\rho_{cu} = 1.78 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

Werte auf Log Skala

$y = x \cdot \log(z)$	$z = 10^{\frac{y}{x}}$
y:	Länge für gewünschten Wert
x:	Länge der Verzehnfachung auf Skala
z:	Wert auf Skala

ppm (Parts per Million) (Prozent Angabe)

Bsp.: $200\frac{ppm}{K}$, $\Delta T = 40\,K$
$\Rightarrow 200 \cdot 10^{-6}\frac{1}{K} \cdot 40\,K = 0.08 = 0.8\%$

12 Formeln ElMasch

Hans-Dieters Formeln

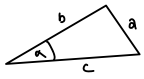
- Drehmoment: $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$
- Durchfl.satz: $\Theta = N \cdot I = \oint_c \vec{H} d\vec{l}$
- Magn. Fluss: $\Phi = \int_A \vec{B} d\vec{s}$
- Verket. Fluss: $\Phi_v = N \cdot \Phi$
- El. Spannung: $U = \int \vec{E} d\vec{l}$
- Lorenz Kraft: $\vec{F_L} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$
- Ampere Kraft: $\vec{F_A} = q\vec{v} \times \vec{B} = I\vec{l} \times \vec{B}$
- Mag. Energie: $W_m = \frac{1}{2} \int \vec{B} \cdot \vec{H} dv$
- Max. Zugkraft: $\vec{F} = \frac{\vec{B}^2 \cdot A \cdot \hat{n}}{\mu_0}$
- Induktivität: $L = \Phi_{tot} / I$
- Hopkinson: $V_m = \Phi \cdot R_m$; $\mu = \frac{B}{H}$
- Mag. Widerst: $R_m = \frac{V_m}{\Phi} = \frac{Hl}{BA} = \frac{l}{\mu A}$

Signalkennwerte

- Schwingbreite: $I_{pp} = I_{max} - I_{min}$
- Gleichwert: $I_{av} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t)\,dt$
- Gleichrichtwert: $|I|_{av} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |i(t)|\,dt$
- Effektivwert: $I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (i(t))^2 dt}$
- Scheitel (Crest): I_{peak} / I_{rms}
- Formfaktor: $I_{rms} / |I_{av}|$

Cosinussatz

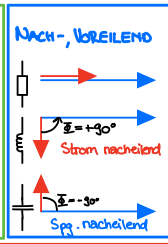
$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\cos(\alpha)$



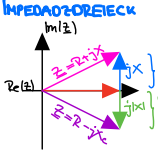
Leistungen

- Schein: $S = U \cdot I^*$!!!!
- Wirk: $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = Re(\underline{S})$
- Blind: $Q = UI\sin(\varphi) = Im(\underline{S})$
- |Schein|: $|S| = U \cdot I = U^2/R = I^2 R$
- Leistungsf.: $\cos(\varphi) = P/S = R/X = R$

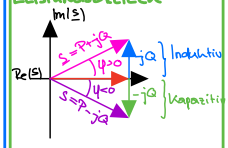
Nach-, Voreilend



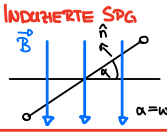
Impedanzdreieck



Leistungsdreieck



Induzierte Spg



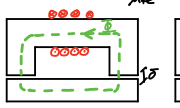
$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{d\int \vec{B}d\vec{A}}{dt} = -N\frac{dB \cdot A \cdot \cos(\alpha)}{dt}$$

$$= -NBA\frac{d\cos(\omega t)}{dt} = NBA \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$$

Magnetkreis

Nicht Gesättigt: $H_\delta = \frac{N \cdot I}{2\delta}$; $W_m = 2 \cdot \frac{1}{2} B_\delta H_\delta V_\delta = \frac{1}{2\mu_0} B_\delta^2 V_\delta$; $W_m = 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\mu_0 \frac{I^2 N^2}{4\delta^2} A\right)$

Gesättigt: $H_\delta = \frac{I \cdot N}{\frac{\mu_0}{\mu_{Fe}} \cdot l_{Fe} + 2\delta}$ | Fluss kont.: $B_{Fe} = B_\delta$ | Umlaufspg: $\hat{V}_m = H_{Fe} l_{Fe} + 2\delta H_\delta = N \cdot I$



Felder Leiter (Länge = l)

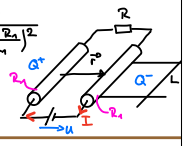
Coulomb: $\vec{F_C} = \vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{Q}{r} \cdot \vec{r_0} \left[\frac{N}{m}\right]$

Ampere: $\vec{F_m} = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{r} \vec{r_0} \hat{=} \mu I_1 \vec{l_2} \times \vec{H}$ $\left[\frac{N}{m}\right]$

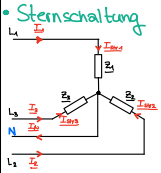
$\vec{H} = \frac{I_2}{2\pi} \frac{\vec{l_2} \times \vec{r_0}}{r}$ $\left[\frac{A}{m}\right]$

Kräfte 2 parallele Leiter

- Elektrisch: $F_e = \frac{l \cdot \varepsilon_0 U^2}{2 \cdot r \cdot \ln\left(\frac{r - r_0}{r_0}\right)^2}$
- Magnetisch: $F_m = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi r}$



Sternschaltung

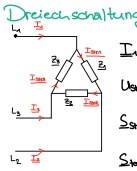


$I_{Strx} = I_x$

$\underline{S}_{Strx} = P_{Strx} + jQ_{Strx} = U_x \cdot \underline{I}_x^*$

$\underline{S}_{tot} = \underline{S}_{Str1} + \underline{S}_{Str2} + \underline{S}_{Str3}$

Dreieckschaltung



$I_L = \sqrt{3} \cdot I_{Str1} = I_{Str1} - I_{Str2}$

$U_{Str1} = U_{12}$; $I_{Str1} = \frac{U_{Str1}}{Z_1}$

$\underline{S}_{Str1} = P_{Str1} + jQ_{Str1} = U_{Str1} \cdot \underline{I}_{Str1}^*$

$\underline{S}_{tot} = \underline{S}_{Str1} + \underline{S}_{Str2} + \underline{S}_{Str3}$

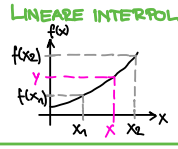
Spannung

$U_1 = |U_1| \angle 0° = |U_1| e^{j0°}$

$U_2 = |U_2| \angle -120° = |U_2| e^{-j120°}$

$U_3 = |U_3| \angle -240° = |U_3| e^{-j240°}$

Lineare Interpolation



$$y = f(x_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \cdot (f(x_2) - f(x_1))$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$

$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$

Fremderregte GSM (permanent erregt)

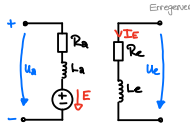
$U_e = R_e I_e + L_e \frac{dI_e(t)}{dt}$

$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E$

Ind. Spg: $E = \omega \Psi$

$P_{el} = U_e I_e + U_a I_a = R_e I_e^2 + R_a I_a^2 + \omega \Psi I_a$

(2. sche. Erregerwl. / 2. sche. Ankerwl. / Mechanische Leistung)



$\omega = 2\pi n / 60$

Ankerspannung U_a wird verweinert

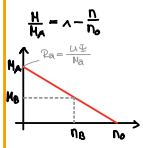
	grösser	gleich	kleiner
Hauptfluss Φ	o	x	o
Ankerstrom I_a	o	x	o
Drehzahl n	o	o	x
Leistung P	o	o	x

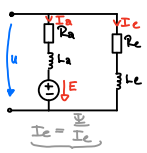
Nebenschluss (regelbare Antriebe)

$U = U_a = R_a I_a + 2\pi n \Psi$

$M = I_a \Psi = \frac{U\Psi}{R_a} - \frac{2\pi\Psi^2}{R_a} \cdot n$

- Anlaufmoment: $n = 0$ $M_A = \frac{U\Psi}{R_a}$
- Leerlaufdrehzahl: $M = 0$ $n_0 = \frac{U}{2\pi\Psi}$





$P = \omega M = 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot M$

$I_{Anlauf} = U/(R_a + R_v)$

Anlaufstrom begrenzen auf $2 \cdot I_{Betrieb}$ mit R_v

$I_{an} = \frac{U_{Betrieb}}{\Psi} \Rightarrow R_v = \frac{U}{2I_{an}} - R_a$

Reihenschl./Universalmotor

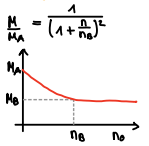
$U = (R_a + R_e)I + 2\pi n \Psi$

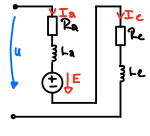
$\Psi = L_e I$

$M = I\Psi = L_e \left(\frac{U}{R_a + R_e + 2\pi n L_e}\right)^2$

$n = \frac{U - (R_a + R_e)I}{C_{mesch} \cdot \Phi}$ ⚠ $M \to 0 \hat{=} n \to \infty$ ⚠

- Anlaufmoment: $n = 0$ $M_A = \frac{L_e U^2}{(R_a + R_e)^2}$
- Bezugsdrehzahl: $M = 0$ $n_B = \frac{R_a + R_e}{2\pi L_e}$





Allgemein GSM

$P = \omega M = 2\pi n M$

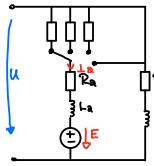
$M(n) = \frac{P_{max}}{2\pi} \cdot \frac{1}{n}$

- Ind. Spg: $E = \omega \cdot \Phi$

$U_e = R_e I_e + L_e \frac{dI_e(t)}{dt}$

$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E$

- Drehzahlstellung $n = \frac{U_a}{C_{mesch} \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_{mesch} \cdot \Phi^2} \cdot M$
- Anlaufstrombegrenzung



Feldschwächebetrieb

$n \uparrow$ wenn (U_e oder I_e) $\downarrow$

$U_{effa} = U_a - E$

$E \downarrow \Rightarrow U_{effa} \uparrow \Rightarrow E \downarrow \Rightarrow \ldots$

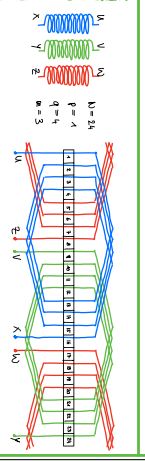
Drehfeldmaschinen

- Wirbelstromverl.: $P_v \sim f^2 B^2 d^3$
- Synchrone Drehz.: $n_0 = \frac{60\frac{1}{min} \cdot f}{P}$
- Wicklungsschema: $q = \frac{N}{2 \cdot p \cdot m}$
- Wicklungsschema: $n_m = N/m$



q = Statornutzzahl pro Phasenband
N = Statornutzzahl
m = Statorstrangzahl (Anz. Phasen)
p = Polpaarzahl
n_m = Nutzzahl pro Phase
n_0 = Synchrone Drehzahl
f = Frequenz
d = Dicke
ρ = spez. Widerst

Wicklungsschema



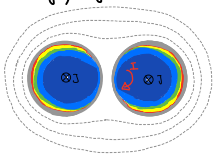
Skin-Eff

$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f \mu_0 \mu_r}}$

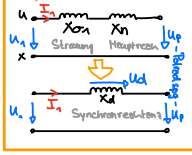


Proxinity-Eff

- Stromdichte im Leiter ist nicht homogen, wegen induzierter Ströme



Synchronmaschine



$U_1 = U_d + U_p$

$U_d = jX_d \cdot I_1$

$X_d = X_{\sigma 1} + X_h = \omega L_d$

$= \frac{U_1}{I_{1n}} = \frac{U_n}{I_{1n}} = \frac{U}{I}$

$I_{1n} = \frac{U_p}{X_{\sigma 1} + X_h} = \frac{U_p}{X_d}$

$I_{1n0} = \frac{U_{N1}}{X_d}$ (Leerl. erregt)

$P_a = 3U_{1rms} \cdot I_{1rms} \cos(\varphi)$

$P_y = \sqrt{3} U_{1rms} \cdot I_{1rms} \cos(\varphi)$

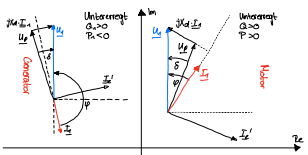
$P(\delta) = P_{mech} \pm P_v = \frac{U}{p} H \pm P_v$

$= 3 \cdot \frac{U_{prms} \cdot U_{1rms}}{X_d} \sin(\delta) = \frac{U_{ppeak} \cdot U_{1peak}}{X_d} \cdot \sin(\delta)$

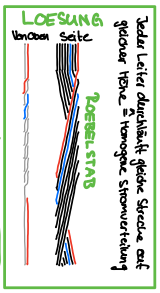
[+ für Motor ; - für Generator]

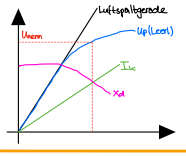
$(X_d I_1)^2 = U_1^2 + U_p^2 - 2U_1 U_p \cos(\delta)$

Alles mit rms Werten oder nur Peaks!



Loesung





Asynchronmaschine

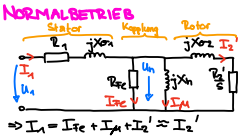
Funktionsweise:

- Magn. Drehfeld des Stators durchdringt Rotor
- Spannung wird induziert, Strom fliesst im Käfigläufer
- Fliessender Strom erzeugt Magnetfeld
- Magnetische Kräfte $\Rightarrow$ Rotor dreht
- Lamellierte Bleche um Verluste zu minimieren
- Schlupf: $s = \frac{n_s - n_R}{n_s}$; $f_s = s \cdot f_R$
- Leerlauf: $s = 0$ und $f_s = f_e$
- Anlauf/Stillst: $s = 1$ und $f_R = 0$

- Mech. Drehmom: $\vec{M} = \vec{r}_2 \times \vec{F}_2$
- Mech. Leistung (Wirkleistung): $P_m = 2\pi n_N M$
- Drehfeldleistung: $P_D = 2\pi n_s M = q P_{2s} \cdot I_2^2$
- Drehmoment.: $M = \frac{1}{2\pi n_s} \frac{P_{DM}}{s}$; $M = \frac{q}{2\pi n_s} \cdot \frac{U_{i20}^2}{(R_2/s)^2 + X_{20}^2} \cdot \frac{R_2}{s}$
- Klossche: $\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$
- Kippmoment: $M_k = \frac{q}{4\pi n_{Synchron}} \cdot \frac{U_1^2}{X_{20}}$
- Kippschlupf: $s_k = \frac{R_2'}{X_{20}'}$
- Stator Drehf: $B(t) = B_{max} \sin(2\pi (f_s \cdot t)$
- Ind. Spannung: $U_i = 2\pi f_s \Sigma N \Phi$ (Wichtl Feuler)
  $U_{irms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_s \Sigma N \Phi$

- Amperesche Kraft: $\vec{F}_2 = I_2 \vec{\ell}_2 \times \vec{B}_1$
- Induz. Strom.: $I_A = \frac{U_{i20}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_{20}^2}}$ (Wirkstrom)

Normalbetrieb



$\Rightarrow I_1 = I_{Fe} + I_M + I_2' \approx I_2'$

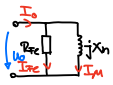
$\Rightarrow U_1 = I_1 \sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1})^2}$

$\Rightarrow U_1 = I_1 (R_1 + jX_{\sigma 1}) + U_h \quad [U_h = \omega BA]$

$\Rightarrow \ddot{u} = \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{N_2 \cdot k_{w2}}$; $I_2' = I_2 \cdot \ddot{u}$; $R_2' = R_2 \cdot \ddot{u}^2$

Wicklungsfaktor $\hat{=}$ kw

Leerlauf (Keine Last, bestimmen der Eisenverluste)



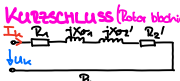
$R_1 \ll R_{Fe}$ und $X_{\sigma 1} \ll X_h$

$I_0 = I_{Fe} + I_M$

$\cos(\varphi) = \frac{P_0}{U_0 I_0}$

$R_{Fe} = \frac{U_0}{I_{Fe}} = \frac{U_0}{I_0 \cos(\varphi)}$; $X_h = \frac{U_0}{I_M} = \frac{U_0}{I_0 \sin(\varphi)}$

Kurzschluss (Rotor blockiert, bestimmen der Imped.)



$R_1 \ll R_{Fe}$; $X_{\sigma 1} \ll X_h$

$\cos(\varphi_k) = \frac{P_k}{U_{1k} I_k}$; $R_1 + R_2' = \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_{1k} \cos(\varphi_k)}{I_k}$

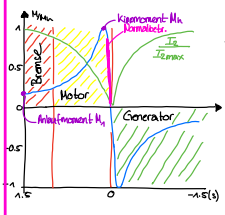
$X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}' = \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_{1k} \sin(\varphi_k)}{I_k}$

Anlaufstrom $I_{Anlauf} = \frac{U_1^2}{\sqrt{(R_2')^2 + (X_{\sigma 2}')^2}}$

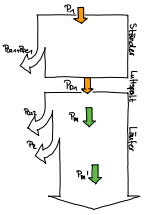
Bei konstanten Lastmoment wird versorger Spg kleiner

		grösser	gleich	kleiner
Schlupf	s	X	o	o
Kippschlupf	s_k	o	X	o
Drehzahl	n	o	o	X
Drehmoment	M	o	X	o
Strangstrom	I_1	X	o	o

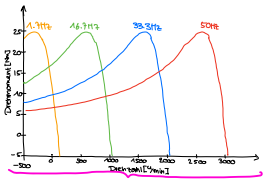
Kennlinien



Verluste



Drehzahlsteuerung

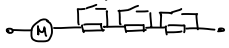


- Käfig: Polumschaltung, Frequenzsteuerung
- Schleifringläufer: Ändern der Rotorbeschaltung

Anlaufstrombegrenzung

- Direktes Einschalten: $P_N = \frac{\varepsilon}{I_N (1 - \varepsilon)} P_N \quad [\varepsilon = \frac{\Delta U}{U_N}]$
- Stern/Dreieck Umsch: $U_A = U_N / \sqrt{3}$; $i_A = i_N / \sqrt{3}$

  Stern = $\frac{1}{3}$ Leistung und $\frac{1}{3}$ Drehmoment
- Zusatzwiderstände: im Läuferkreis



- Mag. Feld entsteht durch bewegte Ladung
- 3 Schleifringe $\hat{=}$ Läufer ASM
- 2 Schleifringe $\hat{=}$ Läufer SM oder GSM

Vollpolsynchronmotor

Verändern der Polradspannung, $\cos(\varphi) = 0.8$ kapazitiv erreichen

$\varphi = -\arccos(0.8) \Rightarrow$ Spannungsgleichung $\Rightarrow U_1 = jX_d I_1 + U_p$

Aufteilen in $Re(U)$ und $Im(U) \Rightarrow 0 + jU_1 = jX_d (I_{1r} + jI_{1i}) + (U_{pr} + jU_{pi})$

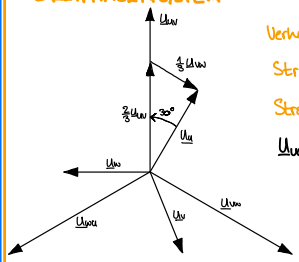
Es ergeben sich zwei Gleich $\Rightarrow$ (I) $0 = -X_d I_{1i} + U_{pr}$ (II) $U_1 = X_d I_{1r} + U_{pi}$

Mit φ und δ aufteilen (I) $0 = -X_d I_1 \cos(\varphi) + U_p \sin(\delta)$

(II) $U_1 = X_d I_1 \sin(\varphi) + U_p \cos(\delta)$

$\rightarrow I_1 = \frac{U_p \sin(\delta)}{X_d \cos(\varphi)}$ und $U_p = \frac{U_1}{\frac{\sin(\delta)}{\cos(\varphi)} \sin(\varphi) + \cos(\delta)} = \frac{U_1}{\sin(\delta)\tan(\varphi) + \cos(\delta)}$

Dreiphasensystem



Verkettete Spannungen $\Rightarrow U_{UV}, U_{VW}, U_{WU}$ $(U_L = U_{UV} = 400V)$

Strangspannungen $\Rightarrow U_U, U_V, U_W$

Strangspannung herleiten:

$U_{UV} + U_{VW} + U_{WU} = 0 \Leftrightarrow U_U = \frac{-U_{UV} - U_{WU} + 2U_{UV}}{3}$

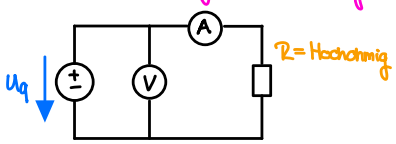
$U_U = \frac{U_{UV} - U_{WU}}{3}$

$U_U = \frac{U_L}{3} \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) + 2\right)$

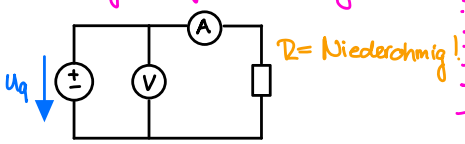
13 Formeln WsDsT

Formelsammlung WsDst

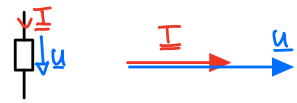
- Stromrichtige Messung



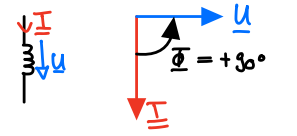
- Spannungsrichtige Messung



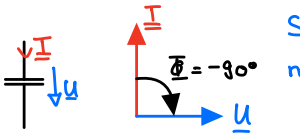
- Widerstand



- Induktivität

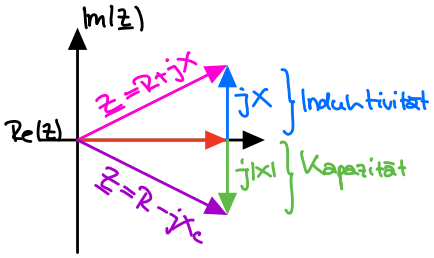


- Kapazität

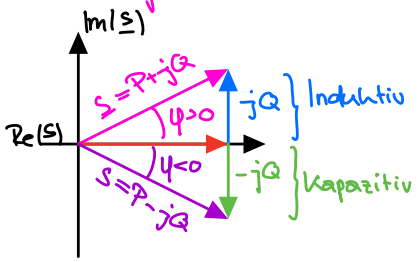


- Impedanz Ind. $\underline{Z_L} = j\omega L$
- Imped. Kapazität $\underline{X_C} = \frac{1}{j\omega C}$
- Leitwert Ind. $\underline{Y_L} = \frac{1}{j\omega L}$
- Leitwert Kapazi. $\underline{Y_C} = j\omega C$
- Impedanz Allg: $\underline{Z} = R + jX$ → R = Wirkwiderstand und X = Blindwiderstand (Realtenz)
- Admittanz Allg: $\underline{Y} = G + jB$ → G = Wirkleitwert und B = Blindleitwert (Suszeptenz)
- Kompl. Scheinleistung: $\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^*$! KONJUGIERT KOMPLEXER STROM !
- Scheinleistung: $S = |\underline{S}| = U \cdot I = {}^{U^2}/_{R} = I^2 R$
- Leistungsfaktor $\lambda = \cos(\varphi) = {}^{R}/_{X} = {}^{P}/_{S} = \frac{P}{U \cdot I}$
- Wirkleistung: $P = Re(\underline{S}) = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$
- Blindleistung: $\underline{Q} = Im(\underline{S}) = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$
- Schwingbreite: $I_{pp} = I_{max} - I_{min}$
- Scheitelwert $I_p = \max(|I_{max}|, |I_{min}|)$
- Gleichrichtwert $|I|_{av} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} |i(t)|\,dt$
- Gleichwert $I_{av} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} i(t)\,dt$
- Effektivwer $I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} (i(t))^2\,dt}$
- Wirkleistung $P = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} p(t)\,dt = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} u(t)\,i(t)\,dt$
- Scheitelfaktor (crest) $\frac{I_p}{I_{rms}}$
- Formfaktor (form) $\frac{I_{rms}}{|I_{av}|}$
- Wechselgrösse definieren $u(t) = \hat{u}\sin(\omega t + \varphi)$ → $\hat{u}$ = Scheitelwert, ω = Kreisfrequenz, φ = Nullphasenwinkel

- Impedanzdreieck



- Leistungsdreieck



- Zeigeraddition

$\hat{u}\sin(\omega t) = \hat{u}\cos(\omega t - 90°)$; $\hat{u}\cos(\omega t) = \hat{u}\sin(\omega t + 90°)$

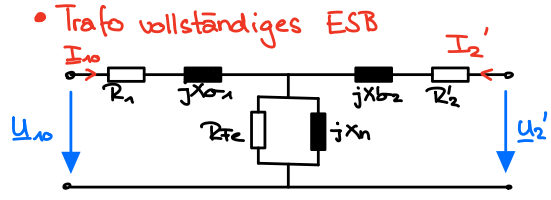
!!! IMMER MIT COSINUS RECHNEN !!!

$\hat{u}(\cos(\varphi_u) + j\sin(\varphi_u))$ ...

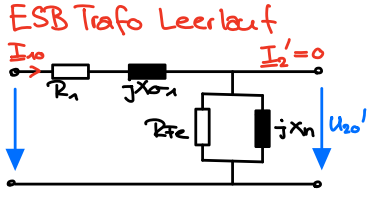
$\sin^2(\alpha) = \frac{1}{2}(1 - \cos(2\alpha))$

$\cos^2(\alpha) = \frac{1}{2}(1 + \cos(2\alpha))$

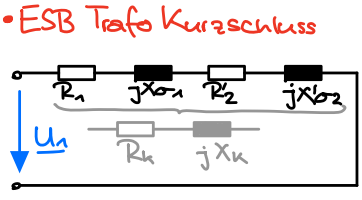
- Trafo vollständiges ESB



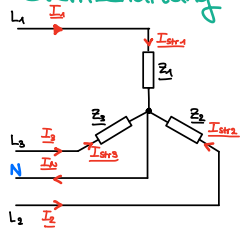
- ESB Trafo Leerlauf



- ESB Trafo Kurzschluss



• Sternschaltung ⟷ Symmetrisch ⟷ • Dreieckschaltung

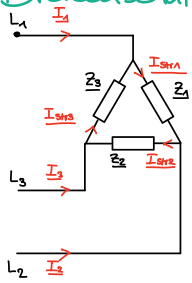


$I_{Strx} = I_x$

$S_{Strx} = P_{Strx} + jQ_{Strx} = U_x \cdot I_x^*$

$S_{tot} = S_{Str1} + S_{Str2} + S_{Str3}$

$P_\Delta = 3 \cdot P_Y$



$I_1 = \sqrt{3} \cdot I_{Str1} = I_{Str1} - I_{Str2}$

$U_{Str1} = U_{12}$; $I_{Str1} = \frac{U_{Str1}}{Z_1}$

$S_{Strx} = P_{Str1} + jQ_{Str1} = U_{Str1} \cdot I_{Str1}^*$

$S_{tot} = S_{Str1} + S_{Str2} + S_{Str3}$

• Sternschaltung ⟷ Unsymmetrisch ⟷ • Dreieckschaltung

$I_{Str1} = I_{LeiterL1} = \frac{U_1}{Z_1 \cdot \sqrt{3}}$

$S = U_{1N} I_{L1}^* + U_{2N} I_{2L}^* + U_{3N} I_{3L}^*$

$P = U_{1N} I_{L1} \cos(\varphi_1) + U_{2N} I_{2N} \cos(\varphi_2) + U_{3N} I_{3N} \cos(\varphi_3)$

$Q = U_{1N} I_{L1} \sin(\varphi_1) + U_{2N} I_{2N} \sin(\varphi_2) + U_{3N} I_{3N} \sin(\varphi_3)$

$I_{Str1} = \frac{I_{LeiterL1}}{\sqrt{3}} = \frac{U_{12}}{Z_1} = \frac{\sqrt{3}\, U_1}{Z_1}$

$S = U_{1N} I_{L1}^* + U_{2N} I_{2L}^* + U_{3N} I_{3L}^*$

$P = U_{1N} I_{L1} \cos(\varphi_1) + U_{2N} I_{2N} \cos(\varphi_2) + U_{3N} I_{3N} \cos(\varphi_3)$

$Q = U_{1N} I_{L1} \sin(\varphi_1) + U_{2N} I_{2N} \sin(\varphi_2) + U_{3N} I_{3N} \sin(\varphi_3)$

• Transformator Formeln

$U_1 = w \Phi N_1 = w \cdot B \cdot A_{Schenkel} \cdot N_1$

$U_2 = w \Phi N_2 = w \cdot B \cdot A_{Schenkel} N_2$

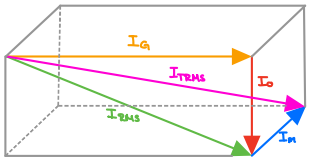
Wirkungsgrad im Nennbetrieb

$\eta = \frac{S_{tot} - P_{Verlust1} - P_{Verlust2} - P_{Leerlauf}}{S_{tot}}$

• Drehfeld Spannungen

$u_1 = |u_1| \angle 0° \; ; \; u_2 = |u_2| \angle -120° \; ; \; u_3 = |u_3| \angle -240°$

• Leistungsumsatz nichtsinusförmige periodische Grössen

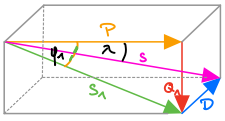


I_o:= Strom Oberwellen

I_{EFFS}= Echter Effektiv

I_G:= Strom Grundwelle

I_m:= Str. Mittelwert DC



S_1:= Scheinleist. Grundwelle

Q_1:= Steuerblindleistung

Q:= Blindleistung

D:= Distortion

Scheitelwert A	$\hat{I} = \sqrt{2} = 1.41$	$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{R}$
Mittelwert DC	$I_m = 0.45$	$I_m = \frac{\hat{I}}{\pi}$
Grundwelle	$I_G = 0.5$	$I_G = \frac{\hat{I}}{2\sqrt{2}}$
Oberwellen	$I_o = 0.2162$	$I_o = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{1}{(2k-1)(2k+1)}\right)^2}$
Effektivwert	$I_{EFFS} = 0.543$	$I_{EFFS} = \sqrt{I_G^2 + I_o^2}$
True Effektivwert	$I_{EFFS} = 0.707$	$I_{EFFS} = \sqrt{I_m^2 + I_G^2 + I_o^2}$

• Wechselstromrechnung Basics

Geg. $i(t) = 2.4A \cos(100t + 25°)$

$= 2.4A \sin(100t + 115°)$

Scheitelwert := 2.4A

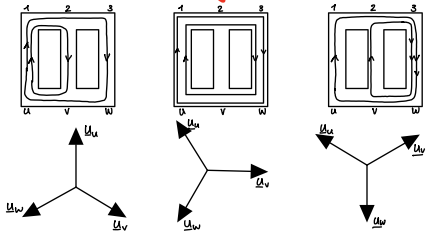
Effektivwert := $2.4/\sqrt{2}$ A

Phase := 115°

Kompl. Momentanwert := $2.4A \cdot e^{j(100t+115°)}$

Kompl. Amplitude := $2.4A \cdot e^{j115°}$

• Flussverteilung Dreischenkeltrafo



Schaltung Oberspannungswicklung	Unterspannungswicklung	Zeigerbild Oberspannungswicklung	Zeigerbild Unterspannungswicklung	Schaltgruppe	Hauptsächlicher Verwendungszweck	Übersetzung $U_1 : U_2$
1U 1V 1W	2U 2V 2W 2N	U V W	u w	Yyn0	Stern-Stern Transformatoren, die nicht zur Verteilung dienen	$\frac{N_1}{N_2}$
1U 1V 1W	2U 2V 2W 2N	U V W	w u v	Yzn5	Stern-Zickzack Kleine Verteilungstrafos mit senkrechter voll belastbarem Sternpunktleiter	$\frac{2 \cdot N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$
1U 1V 1W	2U 2V 2W	U V W	w u v	Dy5	Dreieck-Stern grosse Verteiltrafos mit senkrechter voll belastbarem Sternpunktleiter	$\frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot N_2}$
1U 1V 1W	2U 2V 2W	U V W	w u v	Yd5	Stern-Dreieck Maschinentrafos für Generatoren grosser Leistung	$\frac{\sqrt{3} \cdot N_1}{N_2}$

Scheitelfaktor	$\frac{\text{Scheitelwert}}{\text{Effektivwert}} = \frac{\hat{I}}{I_{eff}}$
Formfaktor	$\frac{\text{Effektivwert}}{\text{Gleichrichtwert}} = \frac{I_{rms}}{\lvert I_{av} \rvert}$
Schwinggehalt	$\frac{\text{Eff. Wert Wechselanteil}}{\text{Eff. Wert Mischgrösse}} = \frac{i(t) - I_{av}}{I_{eff}}$
Effekt. Welligkeit	$\frac{\text{Eff. Wert Wechselanteil}}{\text{Gleichwert Mischgrösse}} = \frac{i(t) - I_{av}}{I_{av}}$
Riffelfaktor	$\frac{\text{Scheitelwert Wechselanteil}}{\text{Gleichwert Mischgrösse}} = \frac{\lvert i(t) - I_{av} \rvert}{I_{av}}$

