Backmischungen für LE I/II

Peter Turczak

$Date: 2009/07/0605:22:38$

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeine Gleichungen

1.1 Wechselstromtechnik

- Effektivwert Leiter-Leiter-Spannung ($U_l = U_{12} = U_{13} = .. = U_{UV} = U_{VW} = ...$) Spannung zu Sternpunktspannung ($U_s = U_{1n} = ... = U_{UN}$) im 3-Phasensystem: $U_l = \sqrt{3} \cdot U_s$
- Spannungen im 3-Phasensystem (Bogenmaß!)

$$\begin{aligned} u_1 &= \hat{u} \cdot \sin(\omega t) \\ u_2 &= \hat{u} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_3 &= \hat{u} \cdot \sin\left(\omega t + 2 \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

- Die Leiter-Leiter-Spannung beträgt immer $\sqrt{3}$ mal Leiter-Sternpunktspg (U_S): $U_{12} = U_{23} = U_{31} = \sqrt{3} \cdot U_S$.
- Allgemeine Effektivwertgleichung

$$T = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 \cdot \mathrm{dt}}$$

- Bei sinusförmigen Spannungen Effektivwert U in Scheitelwert $\hat{U}$: $\hat{U} = U \cdot \sqrt(2)$. Gilt auch für Ströme $\hat{I}$: $\hat{I} = I \cdot \sqrt(2)$
- Bei rechteckörmigen Größen gilt

$$\begin{aligned} Y &= H\sqrt{a} \\ \text{mit } a &= \sum_{i=1}^{n} a_n \\ &= \frac{t_{\text{ein}}}{t_{\text{gesamt}}} \text{ wobei } t_{\text{ein}} \text{ gesamte Zeit in welcher } f \neq 0 \end{aligned}$$

  Wird nicht für Aufwärts/Abwärtssteller verwandt! Dort wird mit dem einfachen Mittelwert gerechnet! Bei rechteckförmigen Verläufen mit zwei oder mehr Blockhöhen kann mit

$$Y = \sqrt{H_1^2 \cdot a_1 + H_2^2 \cdot a_2}$$

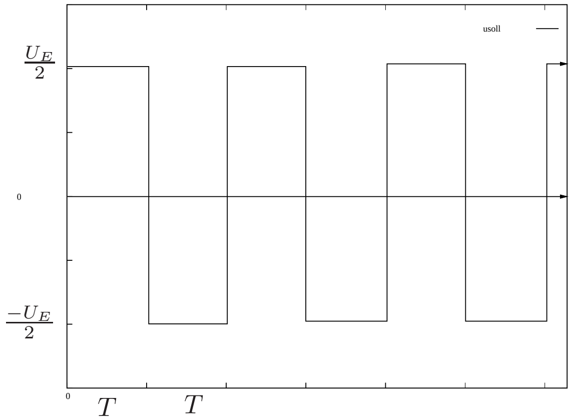
  gerechnet werden.

- Die Effektivwerte der Oberschwingungen eines Signals addieren sich geometrisch! Index ,,eff" wird manchmal der Lesbarkeit halber weggelassen.

$$U_{\text{eff,g}} = \sqrt{U^2_{\text{eff,1}} + U^2_{\text{eff,2}} + ... + U^2_{\text{eff,rest}}}$$

1.2 Fourier-Spektren

1.2.1 Blocktaktung



- Bei den folgenden Gleichungen wird $\hat{U} = \frac{U_E}{2}$ gesetzt. Bei $\hat{U} = U_E$, müssen die Glg. angepasst werden!
- Amplitude der Grundschwingung:

$$\hat{U}_{A1} = \frac{4}{\pi}\left(\frac{U_E}{2}\right)$$

- Effektivwert der GS:

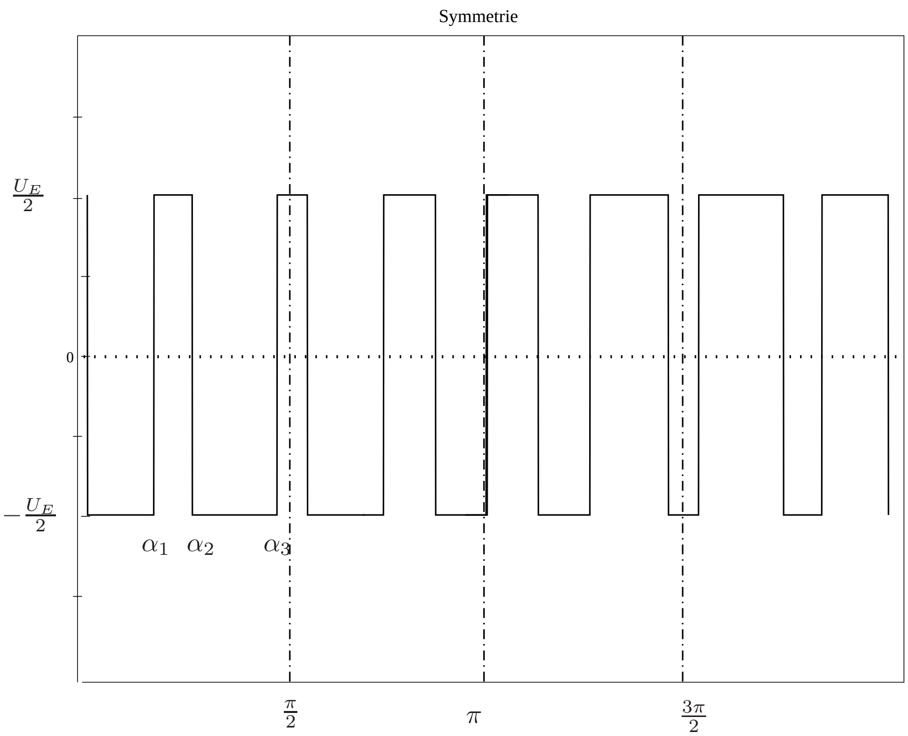
$$U_{A1,\text{eff}} = \frac{2\sqrt{2}}{2} \cdot \left(\frac{U_E}{2}\right)$$

- Es gibt nur die ungeraden Oberschwingungen $n = 3{,}5{,}7,\ldots$, für deren Amplituden/Effektivw. gilt:

$$\begin{aligned}\hat{U}_{An} &= \frac{1}{n}\hat{U}_{A1}\\ U_{An,\text{eff}} &= \frac{1}{n}U_{A1,\text{eff}}\\ f_n &= f_1 \cdot n = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \omega\end{aligned}$$

- Gerade Oberschwingungen ($n = 2{,}4{,}6,\ldots$) haben die Amplitude/Effektivwert 0.

1.2.2 sin-Ähnliche Pulsmuster



- Voraussetzung: Pulsmuster muss sin-Symmetrie aufweisen: Achensymmetrisch zu $\omega t = \pi/2 \widehat{=} 90°$, punktsymmetrisch zu $\omega t = \pi \widehat{=} 90°$
- Gleichung für die n-te Oberschwingung, Scheitelwert/Amplitude des Eingangssignals ist hier $\frac{U_E}{2}$!

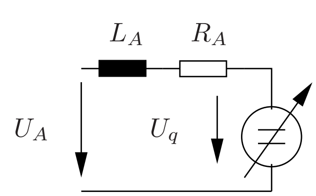
$$\hat{U}_{An} = \left| \frac{2}{\pi} U_E \cdot \frac{1}{n} \left[1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{k} (-1)^i \cdot \cos(n \cdot \alpha_i) \right] \right|$$

- Effektivwert:

$$U_{An,\text{eff}} = \hat{U}_{An} \sqrt{2}$$

- Mit: k-Anzahl der Schaltvorgänge in der ersten Viertelperiode, α_i Winkel des i-ten Schaltvorgangs

1.3 Elektrische Maschine



$$C\Phi = \frac{U_q}{\Omega}$$
$$C\Phi = \frac{M_{el}}{I_A}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow I_A &= \frac{M_{el} \cdot \Omega}{U_q} \\ \text{Mit} & \\ M_{el} &: \text{ Idealisiertes Drehmoment} \\ \Omega &= 2 \cdot \pi \cdot n \text{ Motor-Winkelgeschw. n in } \frac{1}{s} \text{ umrechnen!} \end{aligned}$$

- U_q und I_A in eine Richtung (gleiches VZ): Motorbetrieb. Ansonsten Generatorbetrieb
- U_q positiv: Rechtslauf, U_q negativ: Linkslauf
- Strom I_A direkt proportional dem Drehmoment.
- Spannung U_q direkt proportional der Drehzahl.

1.4 Raumzeiger

- RZ stellen Zustand eines Mehrphasensystems dar.
- Ähnliche Berechnung wie komplexe Größen
- Allgemeine Gleichung für 3-Phasigen Spannungs-Raumzeiger

$$\underline{u} = \frac{2}{3} \left(u_{us} \cdot e^{j0^\circ} + u_{vs} \cdot e^{j120^\circ} + u_{ws} \cdot e^{j240^\circ} \right)$$

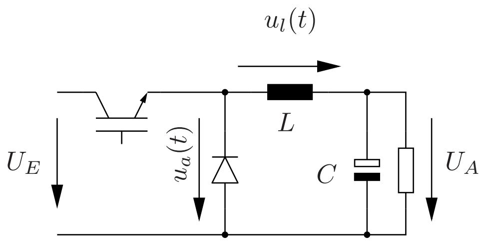
- Vorgehen zur Konstruktion eines Mittelwert-RZ:
  1. Bestimme die RZ $\underline{u}_1 \dots \underline{u}_n$ in allen n Schaltzuständen:
     Spannungen Leiter-Sternpunkt-Spg aus dem Diagramm ablesen, einsetzen. Zeiten/Anteile berechnen.
  2. Rechne zeitlich gewichtetes Mittel:
     $$\underline{u} = \frac{\underline{u}_1 \cdot t_1 + \underline{u}_2 \cdot t_2 + ... + \underline{u}_n \cdot t_n}{n}$$
  3. Fertig.

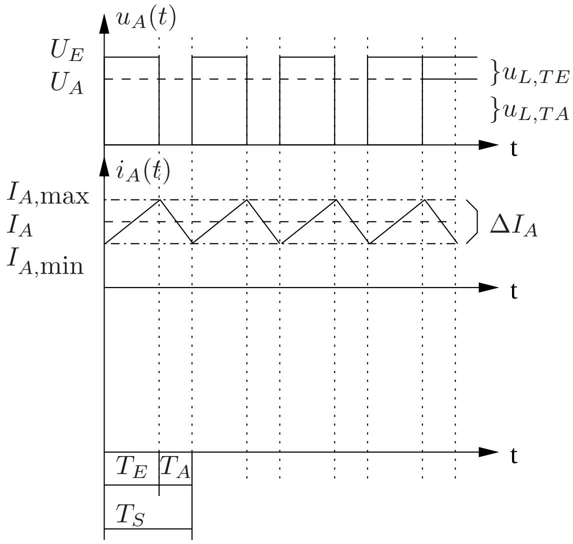
2 DC-DC Wandler, Steller

2.1 Allgemeines

- Schaltzeit T_S und Schaltfrequenz f_s
  $$T_S = \frac{1}{f_s}$$
- Tastverhältnis:
  $$\begin{aligned} a &= \frac{T_E}{T_S} \\ &= \frac{T_S - T_A}{T_S} \end{aligned}$$
- Ein-/Ausschaltzeit:
  $$\begin{aligned} T_E &= T_S \cdot a \\ T_A &= T_S \cdot (1 - a) \\ T_S &= T_E + T_S \end{aligned}$$
- Leistungsbetrachtung im verlustfreien Falle:
  $$\begin{aligned} P_{\text{ein}} &= P_{\text{aus}} \\ U_{\text{ein}} \cdot I_{\text{ein}} &= U_{\text{aus}} \cdot I_{\text{aus}} \end{aligned}$$

2.2 Abwärtsteller





- Spannungs-Steuergesetz:

$$U_A = U_E \cdot \frac{T_E}{T_S} = U_E \cdot a$$

- Strom-Steuergesetz:

$$I_A = I_E \cdot \frac{T_S}{T_E} = \frac{I_E}{a}$$

- Stromrippel: Ansatz:

$$i_A(t) = \frac{1}{L} \int u_L(t) \mathrm{dt}$$

Da nur die Steigung interessiert wird die Konstante (Gleichanteil des Stroms) weggelassen:

$$\begin{aligned}
\text{Einschalt-Intervall } T_E : \Delta i_{Ae}(t) &= \frac{1}{L}(U_E - U_A) \cdot t \\
\text{Ausschalt-Intervall } T_A : \Delta i_{Aa}(t) &= \frac{1}{L}(-U_A) \cdot t \\
\text{Im Stationären Betrieb gilt } \Delta i_{Ae}(T_E) &= -\Delta i_{Aa}(T_A) \\
\rightarrow \Delta i_A &= \frac{1}{L}(U_E - U_A) \cdot T_E
\end{aligned}$$

Bei Veränderter Eingangsspannung U_E ändern sich auch $a \Rightarrow T_E, T_A$!

-

2.3 Eintakt-Flusswandler

- Funktioniert wie ein Abwärtssteller, nur mit Potentialtrennung
- Spannungssteuergesetz:

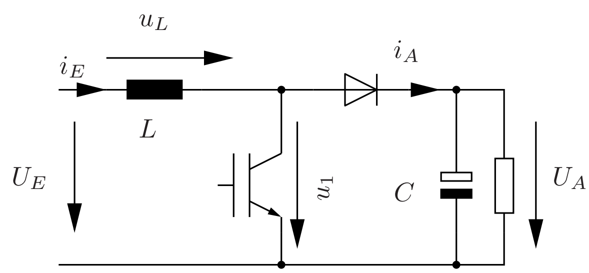
$$U_A = U_E \cdot \ddot{u} \cdot \frac{T_E}{T_S} = U_E \cdot \ddot{u} \cdot a$$

- Stromsteuergesetz:

$$I_A = I_E \frac{1}{\ddot{u} \cdot a}$$

- Wegen Abmagnetisierungszeit muss $a < a_{\max}$ sein. $a_{\max} \approx 0{,}5 - 0{,}8$

2.4 Aufwärtssteller



- Spannungssteuergesetz:

$$U_A = \frac{1}{1-a}$$

- Stromsteuergesetz:

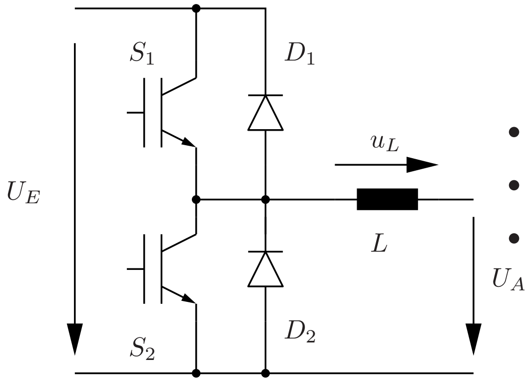
$$I_A = I_E \cdot (1-a)$$

- Stromrippel

$$\begin{aligned}
u_L &= \begin{cases} \text{Einschaltzeit} & : U_{L,TE} = U_E \\ \text{Ausschaltzeit} & : U_{L,TA} = U_E - U_A \end{cases} \\
i_L &= \frac{1}{L}\int u_L(t)\mathrm{dt} \\
\Rightarrow \Delta i_{L,TE} &= \frac{1}{L} U_E \cdot T_E \\
\Delta i_{L,TA} &= \frac{1}{L}(U_E - U_A) \cdot T_A \\
\text{Stat. Gleichgewicht: } \Delta i_{L,TE} &= -\Delta i_{L,TA}
\end{aligned}$$

2.5 Regelung DC von Stellern

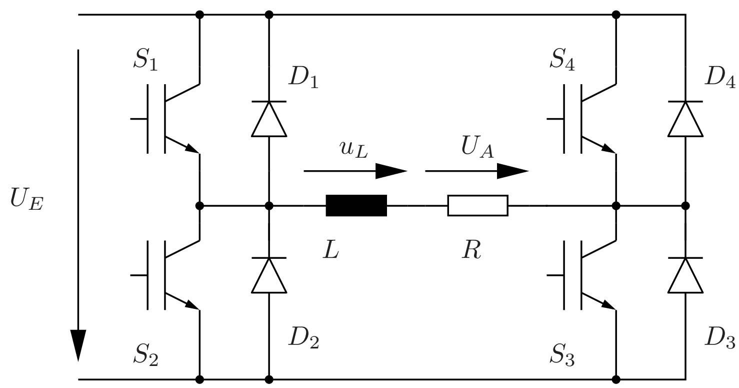
2.6 2-Quadrantensteller



- $i_A > 0$: Fahrbetrieb $\Rightarrow$ Abwärtssteller aus $S_1; D_2$
- $i_A < 0$: Bremsbetrieb $\Rightarrow$ Aufwärtssteller aus $S_2; D_1$
- Schaltregel: Wird im Gegentakt betrieben, $S_1 = \overline{S_2}$

2.7 4-Quadrantensteller

- Parallelschaltung von zwei 2-Quadrantensteller.



Mit Freilaufintervallen:

- Spannungs-Steuergesetz:

$$U_A = U_E(2 \cdot a - 1)$$

Ohne Freilaufintervalle:
Verhält sich wie eine Zusammenschaltung aus jeweils zwei Auf- bzw. Abwärtsstellern.

	Rechtslauf($U_L > 0$)	Linkslauf($U_L < 0$)
Treiben	S_1+D_2 $\Rightarrow$ Abwärtssteller $S_3 \Rightarrow$ Lastzweig	S_4+D_3 $\Rightarrow$ Abwärtssteller $S_2 \Rightarrow$ Lastzweig
Bremsen	S_2+D_1 $\Rightarrow$ Aufwärtssteller $S_3 \Rightarrow$ Lastzweig	S_2+D_4 $\Rightarrow$ Aufwärtssteller $S_2 \Rightarrow$ Lastzweig

3 Selbstgeführte Wechselrichter

3.1 Betriebsarten

3.1.1 Block/Grundfrequenztaktung

Hierbei wird die gewünschte Grundfrequenz als Rechteck-Signal an die Leistungselektronik übergeben, Details siehe folgende Schaltungen. Dieses Verfahren ist einfach, hat aber folgende Nachteile:

- Hoher Oberwellengehalt relativ niedriger Ordnung $n = 3{,}5{,}...$
- Ausgangsspannung ist nur über die Eingangsspannung regelbar

3.2 Pulsbreitenmodulation(PWM), Unterschwingverfahren

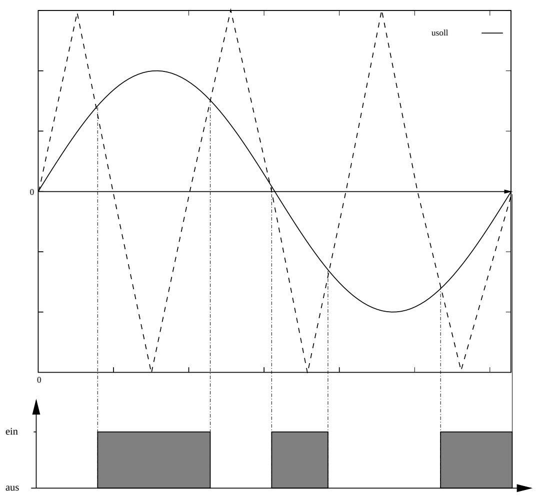


Abbildung 1: Unterschwingverfahren

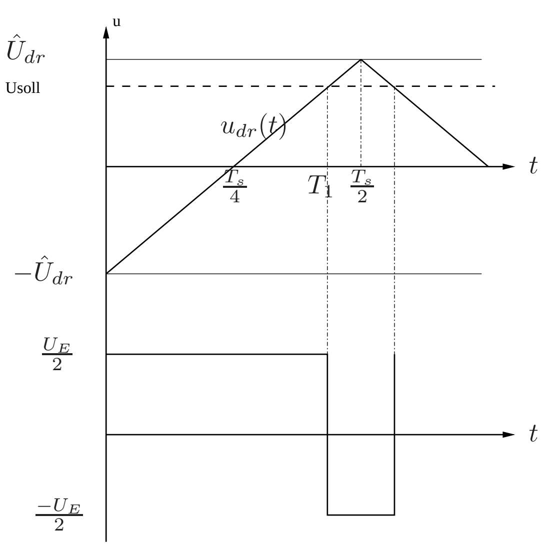


Abbildung 2: Pulsweitenmodulation

- Erzeugt Sin-Ähnliches Muster → Fourier-Spektrum siehe Abschnitt **??**.
- Schaltgesetz: Wenn Träger > Phasen-Soll-Spannung → Ausschalten (−)
- Schaltgesetz: Wenn Träger < Phasen-Soll-Spannung → Einschalten (+)
- Check: Träger muss mit jeder Phase mindestens einen gemeinsamen Nulldurchgang haben.
- Trägerfrequenz muss ungerades Vielfaches der zu modulierenden Frq. sein! $3, 5, ...$
- Ist die Trägerfrq wesentlich größer als die Phasenfrw., dann kann die Phasenspg als konstant angenommen werden.
- Ausgangsspannung:

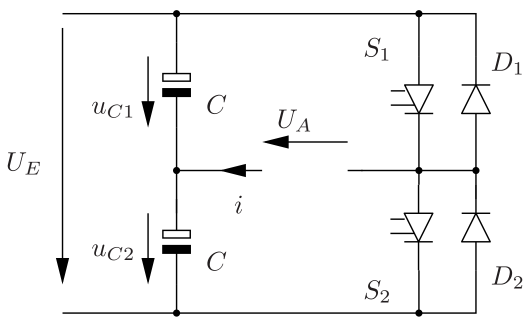
$$U_{TS} = \frac{U_E}{2\hat{U}_{dr}} \cdot U_{soll}$$

$$T_1 = \frac{T_s}{4} \cdot \left(\frac{U_{soll}}{\hat{U}_{dr}} + 1 \right)$$

3.3 Raumzeigermodulation (3-Phasig)

Es wird ein drehender Raumzeiger aus den Schaltzuständen „zusammengebaut". Siehe Abschnitt Raumzeiger **??**.

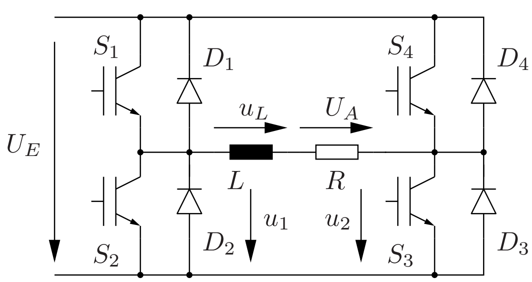
3.4 Halbbrückenwechselrichter



- Nur kleine Leistungen
- Spannungsschwankung am Kondensatormittelpunkt:

$$\begin{aligned}
C_1 &= C_2 = C \text{ Annahme, Allgemein} \\
i &= C_1 \cdot \frac{\mathrm{d}u_{C1}}{\mathrm{dt}} + C_2 \cdot \frac{\mathrm{d}u_{C1}}{\mathrm{dt}} \\
\Rightarrow i_{C1} &= i_{C2} = \frac{i}{2} \\
\Rightarrow \Delta U_A &= \int_0^{T_E} \frac{1}{2}\mathrm{dt} \cdot \frac{1}{C} \\
\Delta U_A &= \frac{T}{2}\frac{i}{2} \cdot \frac{1}{C} \text{ ACHTUNG: Nur für Blocktaktung}
\end{aligned}$$

3.5 Vollbrückenwechselrichter



- Wenn im Gegentaktbetrieb gefahren $\Rightarrow$ 1-Phasiges Ausgangssystem mit $\hat{U_A} = U_E$.

$$u_A(t) = u_1(t) - u_2(t)$$

$$U_{A,\text{eff}} = U_E$$

- Kann auch über 2-Phasige PWM gefahren werden (Zweimal Unterschwingverfahren mit 180° Versatz.

3.6 Drehstromwechselrichter

- Werden meist mit Unterschwingverfahren getaktet.
- Wenn ein Pulsmuster gegeben: U→V mit 120° (1/3 Periode) verschieben, usw.

4 Gleichrichter

- Anzahl der Phasen m
- Effektivwert der speisenden Wechselspannung U_s
- Pulszahl: Mittelpunktschaltung: $p = m$; Brückenschaltung: $p = 2 \cdot m$.
- Ideale Gleichspannung **Mittelpunktschaltung**:

$$U_{di,M} = \frac{m}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \cdot \sqrt{2}U_s$$

	2	3	6	
$\frac{Udi}{Us}$	0,9003	1,1695	1,3505	Mittelpunktschaltung
$\frac{Udi}{Us}$	1,8006	2,3391	2,701	Brückenschaltung

Tabelle 1: Zusammenfassung wichtiger idealer Gleichspannugsverhältnisse

- Ideale Gleichspannung **Brückenschaltung**:

$$U_{di,B} = 2\frac{\dot{m}}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \cdot \sqrt{2}U_s$$

- Welligkeit der ungeglätteten Gleichspannung:

$$\Delta ud = \hat{U} \cos\left(1 - \frac{\pi}{p}\right)$$

- Spektrum der ungeglätteten Gleichspannung beim ungesteuerten Gleichrichter: Es kann nur Oberschwingungen der Ordnungszahlen $n = p \cdot i$ mit $i = [1..\infty]$ geben.
  Die Effektivwerte dieser Oberschwingungen sind

$$U_{dn} = \frac{\sqrt{2}}{n^2 - 1} \cdot U_{di}$$

  Die relative Größe der Oberschwingungen hängt nicht von der Schaltung ab!

- Netzströme von Gleichrichtern:
  Da bei Stromglättung ein nahezu konstanter Strom fließt und immer nur einer Diode/Thyristor den Strom in einer Richtung tragen kann, muß dieses Bauelement immer den gesamten Gleichstrom tragen.
  Konstruktion: Eine Phase im Spannungsdiagramm auswählen, auschließlich deren Verlauf wird betrachtet. Immer wenn auf dieser Phase eine Diode/Thyristor leitet, wird der Strom $\pm I_d$.

  - Mittelpunktschaltung, 3-Phasig:

  - Brückenschaltung, 3-Phasig:

- Effektivwerte der Netzströme:
  Bei ungesteuertem Gleichrichter gilt bei **3-Phasigen** Gleichrichtern:

$$I_{Netz} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot Id$$

- Oberschwingungsspektren
  - Ungesteuerte 3phasige Mittelpunktschaltung: Nicht vorhandene Oberwellen: $n = 3 * i = 3{,}6{,}9{,}...$

$$I_1 = \frac{\hat{I}_1}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \cdot 1{,}5 = 0{,}675 \cdot I_d = 0{,}827 \cdot I_{L1}$$

$$I_{\neq n} = I_1 \cdot \frac{1}{n}$$

  - Ungesteuerte 3phasige Brückenschaltung: Vorhandene Oberwellen $n = 6\dot{i} \pm 1 = 3{,}6{,}9{,}...$

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \left(+\sqrt{3}\right) = 0{,}78 \cdot I_d = 0{,}955 \cdot I_{L1}$$

$$I_n = I_1 \cdot \frac{1}{n}$$

4.1 1/2-Phasig

4.1.1 Mittelpunktschaltung

4.1.2 Brückenschaltung

4.2 3-Phasig

4.2.1 Mittelpunktschaltung

4.2.2 Brückenschaltung

5 Gesteuerte Stromrichter

5.1 Allgemeine Leistungen

- Die Wirkleistung aus dem Netz ist immer gleich der Gleichspannungsleistung am Verbraucher

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

- Die Scheinleistung aus dem Netz errechnet sich aus

$$S = 3 \cdot U_s \cdot I_{L1}$$

  mit U_s aus den Gleichungen des Abschnitts 4, Seite 11.

5.2 Vollgesteuert

- Bei einem Vollgesteuerten Stromrichter gilt für die Ideelle Gleichspannung $U_{di,\alpha}$

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

- Die Welligkeit der ungeglätten Gleichspannung ist für $n = i \cdot p$. Bei $\alpha = 90°$

$$U_{d,n;max} = n \cdot \frac{\sqrt{2}U_{di}}{n^2 - 1}$$

  Bei $\alpha = 0°$:

$$U_{d,n;min} = \frac{\sqrt{2}U_{di}}{n^2 - 1}$$

- Steuerblindleistung:
  - Die Scheinleistung ist unabhängig von α.

$$S_{ges} = I_N \cdot U_N \cdot m$$

  - Die Grundschwingungsblindleistung ist

$$S_1 = \frac{P}{\cos\alpha}$$

  - Die Grundschwingungs-Steuerblindleistung ergibt sich bei vollgesteuerter Brücke zu:

$$Q_1 = m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \sin\alpha = \frac{U_{di,\alpha} \cdot I_{d,\alpha}}{\cos\alpha} = P \cdot \tan(\alpha)$$

  - Bei Steuerwinkeln von $\alpha > 0$ vermindert die Phasenverschiebung der Netzströme zur Netzspannung um α die Wirkleistung gemäß:

$$P = m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\alpha = U_{di,\alpha} \cdot I_d$$

5.3 Folgegesteuert

- Es werden die K- und A-Gruppen getrennt voneinander mit den Steuerwinkeln α_1 und α_2 gesteuert.

$$U_{di,r} = \frac{U_{di}}{2} \cdot (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2)$$

- Soll die Spannung reduziert werden, so wird zunaechst z.B. α_1 bis $\alpha_1 = 180° - \gamma$ eingestellt und $\alpha_2 = 0$ gehalten. Reicht dies nicht aus, so kann auch „folgend" α_2 bis $\alpha_1 = 180° - \gamma$ gesetzt werden.
- Schon bei $\alpha_1 = 180° - \gamma, \alpha_2 = 0$ ergibt sich eine $U_{di,r}$ nahe 0V.

5.4 Halbgesteuert

- Kommt mit $U_{di,\alpha}$ nahe an 0V heran.

$$U_{di,a} = \frac{U_{di}}{2} \cdot (1 + \cos\alpha)$$

- Nur die Hälfte an steuerbaren Halbleitern
- Schonzeit beachten!
- Spart Blindleistung, der Phasenwinkel des aufgenommenen Stromes ist

$$\varphi_1 = \frac{\alpha}{2}$$

- Mehr Oberwellen

5.5 Reale Bedingungen

- Mittlerer Gleichspannungsverlust

$$U_x = \frac{p \cdot L_s}{T} \cdot I_d$$

  oder

$$U_x = R_{ix} \cdot I_d \text{ mit } R_{ix} = \frac{p \cdot L_s}{T} = \frac{p \cdot X_s}{2\pi} = p \cdot f \cdot L_s$$

- Überlappungswinkel bei Mittelpunktschaltung und Drehstrombrücke:

$$u = \arccos\left(\cos\alpha - \frac{2 \cdot R_{ix} \cdot I_d}{U_{di}}\right) - \alpha$$

- Maximaler Steuerwinkel vor dem Kippen, unter berücksichtigung der Freiwerdezeit (t_q):

$$\alpha_{max} = \pi - u - \omega \cdot t_q$$

6 Wechselstromsteller

6.1 Allgemeine ohmsch- induktive Last

- Im Bereich $\alpha < \varphi_z$ ist der Strom $i(t) = 0$
- Der Strom ist allgemein im Bereich $\alpha \geq \varphi_z \leq 180°$ (ACHTUNG: Bogenmaß!)

$$i(t) = \frac{\hat{U}_N}{Z}\left(\sin(\omega \cdot t - \varphi_Z) - \sin(\alpha - \varphi_z) \cdot e^{-\frac{R}{X}\cdot(\omega \cdot t - \alpha)}\right)$$

  mit $X = \omega \cdot L; Z = \sqrt{R^2 + L^2}; \varphi_z = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$

-

6.2 Rein ohmsche Last ($\varphi_l = 0$)

- Die Spannung an der Last $u(t)$ ist bei einem Steuerwinkel α. ACHTUNG: Bogenmaß!

$$u(\omega \cdot t) = \begin{cases} \omega \cdot t < \alpha & : \quad 0 \\ \omega \cdot t \geq \alpha & : \quad \hat{U} \cdot sin(\omega \cdot t) \end{cases}$$

$$u(\cdot t) = \begin{cases} t < \frac{\alpha}{\omega} & : \quad 0 \\ t \geq \frac{\alpha}{\omega} & : \quad \hat{U} \cdot sin(\omega \cdot t) \end{cases}$$

- Der Effektivwert der Spannung ist:

$$U_{Last}(\alpha) = \frac{\hat{U}}{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot sin(2\alpha)}$$

- Da die Last rein reel ist gilt : $i(t) = \frac{u(t)}{R}$
- Die Leistung an der Last ist (ACHTUNG: Bogenmaß!):

$$P(\alpha) = \frac{\hat{U}^2}{2 \cdot R} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\dot{\alpha})\right)$$

6.3 Rein induktive Last ($\varphi_Z > 90°$)

- ACHTUNG: Der Steuerbereicht beginnt erst bei $\alpha = 90° = \frac{\pi}{2}$!
- Der Spannungsverlauf bei induktiver Last ist ein Sinus mit einem ,,Loch in der Mitte" (symmetrisch zu $\omega \cdot = 2\pi - \alpha$).
- Bei $\alpha = 90° = \frac{\pi}{2}$ ist das ,,Loch" komplett weg und der Strom ist einfach $i(t) = \frac{u(t - \frac{\pi}{2\omega}}{X})$.
- Bei allen Steuerwinkeln mit $90° < \alpha \leq 180°$ ergibt sich für die Positive Halbwelle der Strom

$$i(t) = \frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot (-\cos(\omega t) + \cos\alpha)$$

  und in der negativen Halbwelle

$$i(t) = \frac{\hat{U}_N}{\omega \cdot L} \cdot (-\cos(\omega t) - \cos\alpha)$$

  jeweils bei $\omega t \geq \alpha$

- Gedankenstütze : $X = \omega \cdot L$!
- Der Effektivwert der Spannung ist (ACHTUNG: Bogenmaß!):

$$U_{Last}(\alpha) = \frac{\hat{U}}{\cdot} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot sin(2\alpha)}$$

6.4 3-Punkt-Wechselrichter

Bestimmung der Spannung U_{Uk} bei symmetrischer in Stern geschalteter Last aus den 3 Spannungen U_{U0}, U_{V0} und U_{W0}:

U_{U0}	U_{V0}	U_{W0}	U_{Uk}	U_{Vk}	U_{Wk}	Erklärung
0	0	0	0	0	0	Alle Phasen auf einem Potential
+	+	+	0	0	0	Alle Phasen auf einem Potential
-	-	-	0	0	0	Alle Phasen auf einem Potential
+	0	0	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	Nur Phase U auf +
0	+	0	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	Nur Phase V auf +
0	0	+	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	Nur Phase W auf +
-	0	0	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	Nur Phase U auf -
0	-	0	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	Nur Phase V auf -
0	0	-	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	Nur Phase W auf -
0	+	+	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	Phase V und W auf +
+	+	0	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	Phase U und V auf +
+	0	+	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	$+\frac{1}{6}U_{k0}$	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	Phase U und W auf +
0	-	-	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	Phase V und W auf -
-	-	0	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	Phase U und V auf -
-	0	-	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	$-\frac{1}{6}U_{k0}$	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	Phase U und W auf -
0	+	-	0	$+\frac{3}{6}U_{k0}$	$-\frac{3}{6}U_{k0}$	Unterschiedliche Potentiale
0	-	+	0	$-\frac{3}{6}U_{k0}$	$+\frac{3}{6}U_{k0}$	Unterschiedliche Potentiale
+	0	-	$+\frac{3}{6}U_{k0}$	0	$-\frac{3}{6}U_{k0}$	Unterschiedliche Potentiale
-	0	+	$-\frac{3}{6}U_{k0}$	0	$+\frac{3}{6}U_{k0}$	Unterschiedliche Potentiale
+	-	0	$+\frac{3}{6}U_{k0}$	$-\frac{3}{6}U_{k0}$	0	Unterschiedliche Potentiale
-	+	0	$-\frac{3}{6}U_{k0}$	$+\frac{3}{6}U_{k0}$	0	Unterschiedliche Potentiale
-	+	+	$-\frac{4}{6}U_{k0}$	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	2 Phasen auf +, 1 Phase auf -
+	+	-	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	$-\frac{4}{6}U_{k0}$	2 Phasen auf +, 1 Phase auf -
+	-	+	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	$-\frac{4}{6}U_{k0}$	$+\frac{2}{6}U_{k0}$	2 Phasen auf +, 1 Phase auf -
+	-	-	$+\frac{4}{6}U_{k0}$	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	2 Phasen auf -, 1 Phase auf +
-	-	+	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	$+\frac{4}{6}U_{k0}$	2 Phasen auf -, 1 Phase auf +
-	+	-	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	$+\frac{4}{6}U_{k0}$	$-\frac{2}{6}U_{k0}$	2 Phasen auf -, 1 Phase auf +