

# Leistungselektronik Cheat Sheet

## 1. Allgemeines

## Allgemeines

Tastverhältnis:  $D = \frac{\tau_i}{T}$ 

Funktion einer Sinusspannung:  $u(t) = \hat{U}_s \cdot \sin(\omega t)$ 

#### Physikalische Größen

- Un: Gleichspannung
- û: Scheitelwert
- u(t): zeitabhängige Spannung
- T: Periodendauer
- $t_i$ : Impulszeit
- $\overline{U}$ : Arithmetischer Mittelwert

#### 2. Mathematische Verfahren

#### 2.1. Mittel- & Effektivwert

Arith. Mittelwert einer Mischspannung:  $\overline{u}_{di} = U_{di} = \frac{1}{T}\int\limits_{-T}^{T}u_{d}(t)\,dt$ Effektivwert:  $U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{0}^{T} u_d^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_{0}^{2\pi} u_d^2(\omega t) d\omega t}$ 

#### Effektivwert einer diskreten Spannung

- 1. Spannung in Spannungen mit gleichem  $\hat{U}$  aufteilen.
- 2. Effektivwerte der Einzelspannungen berechnen:  $U_{xRMS} = \sqrt{D}\hat{U}$ .
- 3. Quadratische Summe aller  $U_{xRMS}$  berechnen:  $U_{RMS} = \sqrt{U_{xRMs}^2 + U_{x+1RMs}^2}$ ...

### 2.2. Welligkeit, Klirr und Formfaktor

## Welligkeit (Ripple)

$$w_U = \frac{U_{RMS}}{U_d} = \sqrt{\frac{U_{RMS\,ges}^2}{U_d^2} - 1}$$
  
 $w_I = \frac{I_{RMS}}{I_d} = \sqrt{\frac{I_{RMS\,ges}^2}{I_2^2} - 1}$ 

Welligkeit reiner Gleichgrößen: w = 0. Welligkeit reiner Wechselgrößen: w = sehr groß.

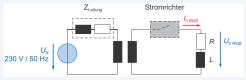
#### Klirrfaktor (THD)

$$K_U = \frac{U_{RMSOS}}{U_{RMS}}$$

## Formfaktor $F = \frac{U_{d RMS}}{U_{di}}$

## 3. Leistungsberechnung

## 3.1. Leistungsarten



 $S = U_{0RMS} \cdot I_{ORMS}$ 

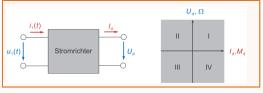
Für rein sinusförmige Verläufe gilt:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos \phi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

 $Q = \sin(\phi)$ 

## 3.2. Betriebsquadranten

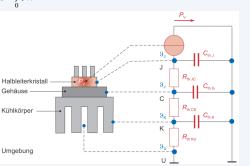


## 4. Wärmemanagement

#### 4.1. Verlustleistung

Thermische Energie: Q Momentanleistung am PN Übergang:  $p_v = u \cdot i$ 

$$Q = \int_{0}^{t} p(t) dt$$



Bauelement	Kennbuchstabe	Temperatur
Siliziumkristall - Junction	J	$\vartheta_J$
Gehäuse - case	С	$\vartheta_C$
Kühlkörper - heatsink	K	$\vartheta_K$
Kühlmedien - ambient	U / A	$\vartheta_A$

## 5. Mittelpunktschaltungen

#### 5.1. Nomenklatur

id ud: Zeitverläufe von Strom und Spannung

 $I_d U_d$ : In den Zeitverläufen von  $i_d$  und  $u_d$  enthaltene Mittelwerte

u<sub>T</sub>: Zeitlicher Verlauf der Spannung an einem Thyristor

us: Zeitlicher Verlauf der Netzspannung

 $U_S$ : Effektivwert der Netzspannung

 $U_N$ : Effektivwert der verketteten Spannung

d: Ausgangsgröße

T: Transistor

S: Strang

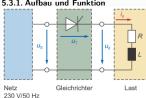
N: verkettet Größe

## 5.2. Welligkeit

$$v_U = \sqrt{\frac{U_{RMS}^2}{U_d^2} - 1}$$

## 5.3. Einphasige Mittelpunktschaltung M1

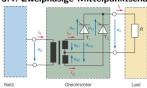
#### 5.3.1. Aufbau und Funktion



#### 5.3.2. Steuergesetz

Rein ohmsche Last:  $U_{di\alpha} = \frac{\hat{U}_{S}}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$ 

## 5.4. Zweiphasige Mittelpunktschaltung M2C

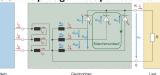


 $u_{s12} = u_{s1} - u_{s2} = u_N \cdot \frac{N_2}{N_1}$ 

5.4.2. Steuergesetz Bei nicht lückendem Betrieb ergibt sich für  $U_{dia}$ :

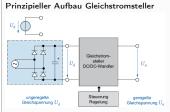
 $U_{di\alpha} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi + \alpha} u_d(\omega t) d(\omega t) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \hat{U}_S \cdot \cos \alpha$ 

## 5.5. Dreiphasige Mittelpunktschaltung M3C

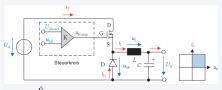


5.5.1. Steuergesetz  $U_{di\alpha} = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \hat{U_S}}{2\pi} \cdot \cos \alpha = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_S}{2\pi} \cdot \cos \alpha$ 

## 6. Gleichstromsteller im Einquadrantenbetrieb



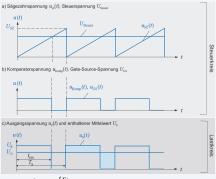
#### 6.1. Tiefsetzsteller



$$u_{SZ}(t) = \frac{U_{SZ}}{T_S} \cdot t = U_{Stee}$$

$$\frac{USZ}{T_S} \cdot t_{ein} = U_{Steue}$$

$$t_{ein} = \frac{U_{Steuer}}{\hat{U}_{SZ}} \cdot T_{S}$$



Tastgrad:  $D = \frac{t_{Ein}}{T_S}$ 

## Schaltbedingung:

 $u_{Komp} > 0 \Rightarrow MOSFET$  eingeschaltet  $u_0(t) = U_d$ 

 $u_{Komp} < 0 \Rightarrow MOSFET$  ausgeschaltet  $u_0(t) = 0$ 

Mittelwert der Ausgangsspannung:  $U_0 = \frac{t_{ein}}{T_G} \cdot U_d = D \cdot U_d$ 

$$T_{S} = \frac{1}{f_{S}}$$

$$t_{Ein} = \frac{U_{Steuer}}{\hat{U}_{SZ}} \cdot T_{S}$$

Resonanzfrequenz:  $f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$ 

L und C sind so zu wählen:  $f_C/f_S=0,01\Rightarrow \frac{1}{2\pi\sqrt{I\cdot C}}=0,01\cdot f_S$ 

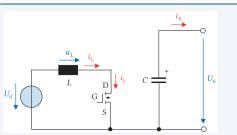
Stromwelligkeit:  $\Delta_{iL} = \frac{u_L}{I} \cdot t_{ein} = \frac{U_d - U_0}{I} \cdot t_{ein}$ 

## 6.1.1. Lückender Betrieb

$$\begin{split} I_{Lg} &= \frac{1}{2} \cdot i_{L \, peak} = \frac{t_{ein}}{2L} \cdot (U_d - U_0) = \frac{D \cdot T_S}{2L} \cdot (U_d - U_0) = I_{0g} \\ U_0 & D^2 & U_0 & \boxed{\frac{I_0}{T_{L \, emax}}} \end{split}$$

$$\frac{U_0}{U_D} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} \cdot \frac{I_0}{I_{L\,gmax}}} \qquad D = \frac{U_0}{U_d} \cdot \sqrt{\frac{\frac{I_0}{I_{L\,gmax}}}{\frac{I_0}{U_0}}}$$

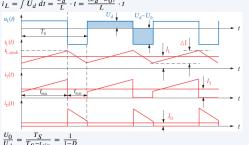
#### 6.2. Hochsetzsteller



Der Mittelwert der Ausgangsspannung  $U_0$  ist höher als der Mittelwert der Eingangsspannung  $U_d$ .

$$U_d = U_L = L \cdot \tfrac{di_L}{dt}$$

$$i_L = \int U_d dt = \frac{U_d}{L} \cdot t = \frac{(U_d - U_0)}{L} \cdot t$$

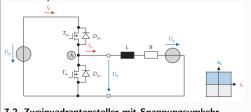


## 6.2.1. Lückender Betrieb

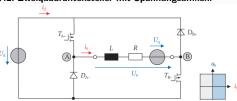
$$I_{Lg} = \frac{1}{2} \cdot i_{L\,peak} = \frac{t_{ein}}{2L} \cdot U_d = \frac{D}{2L} \cdot T_S \cdot U_d = \frac{T_S}{2L} \cdot D \cdot U_0 \cdot (1-D)^2$$

## 7. Gleichstromsteller im Zweiguadrantenbetrieb

## 7.1. Zweiguadrantensteller mit Stromumkehr



## 7.2. Zweiquadrantensteller mit Spannungsumkehr



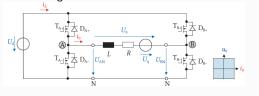
7.2.1. Steuergesetz

Nicht lückender Betrieb: 
$$\frac{U_0}{U_d} = 2 \cdot D_{TA+} - 1$$

$$\mbox{ Versetzte Taktung: } \frac{U_0}{U_d} = (D-1)$$

## 8. Gleichstromsteller im Vierquadrantenbetrieb

## 8.1. Grundlagen



Die Verriegelungszeit bezeichnet das Zeitintervall, in dem beide Schalter einer Halbbrücke gleichzeitig abgeschaltet sind.  $u_0(t) = u_{AN}(t) - u_{BN}(t)$ 

## 8.2. Pulsbreitenmodulation mit zwei Spannungsniveaus

Mittelwerte  $U_{AN}$  und  $U_{BN}$ 

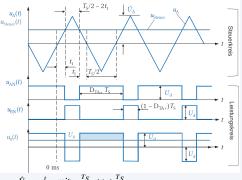
$$U_{AN} = \frac{U_d \cdot t_{ein} + 0 \cdot t_{aus}}{T_S} = U_d \cdot \frac{t_{ein}}{T_S} = U_d \cdot D_{TA} + 0$$

$$U_{BN} = \frac{U_d \cdot t_{ein} + 0 \cdot t_{aus}}{T_S} = U_d \cdot \frac{t_{ein}}{T_S} = U_d \cdot D_{TB+}$$

#### Schaltbedingungen

 $T_{A+}, T_{B-}$  ein wenn:  $u_{Steuer} > u_{\Delta}$ 

 $T_{A-}, T_{B+}$  ein wenn:  $u_{Steuer} \leq u_{\Delta}$ 



$$u_{\Delta} = \hat{U}_{\Delta} \cdot \frac{t}{T_S/4} \text{ mit } -\frac{T_S}{4} < t < \frac{T_S}{4}$$

$$t_1 = \frac{u_{Steuer}}{\hat{U}} \cdot \frac{T_S}{4}$$

$$D_{TA+} = \frac{t_{ein}}{T_S} = \frac{2 \cdot t_1 + \frac{T_S}{2}}{T_S} = 2 \cdot \frac{t_1}{T_S} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{u_{Steuer}}{\hat{U}_\Delta} \right)$$

$$T_{TR\perp} = 1 - D_{TA\perp}$$

$$U_0 = U_{AN} - U_{BN} = U_d \cdot D_{TA+} - U_d \cdot D_{TB+} = U_d \cdot \frac{U_{Steeuer}}{U_{\Delta}}$$

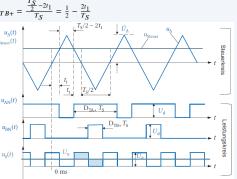
## 8.3. Pulsbreitenmodulation mit drei Spannungsniveaus (PWM3)

#### Schaltbedingungen

$$T_{A+}$$
 ein, wenn  $u_{Steuer} \ge u_{\Delta}$ ,  $T_{A-}$  ein, wenn  $u_{Steuer} < u_{\Delta}$ 

$$T_{B+}$$
 ein, wenn  $-u_{Steuer} \ge u_{\Delta}$ ,  $T_{B}$  ein, wenn  $-u_{Steuer} < u_{\Delta}$ 

$$D_{TB+} = \frac{\frac{TS}{2} - 2t_1}{T_S} = \frac{1}{2} - \frac{2t_1}{T_S}$$



## 9. Umrichter