

Schutzbeschaltung elektronischer Bauelemente

Kapitel aus “Elektrische Antriebe 4: Leistungselektronische Schaltungen“:

7.3 Gleichstromsteller mit abschaltbaren Bauelementen

7.3.1 Gleichstromsteller–Grundschtaltung mit GTO

7.3.2 Gleichstromsteller mit GTO, Reihendrossel L und RCD–Beschaltung

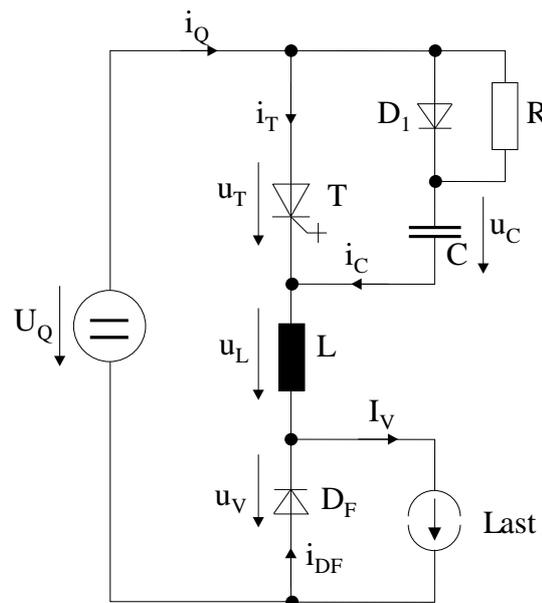
Anlagendaten: $I_V = 2000 \text{ A}$
 $U_Q = 3000 \text{ V}$

GTO–Daten: $di_T/dt = 500 \text{ A}/\mu\text{s}$
 $du_T/dt = 1000 \text{ V}/\mu\text{s}$

1. Welche Aufgaben erfüllen Beschaltungen leistungselektronischer Bauelemente?

- Bedämpfung von Überspannungen (TSE–Beschaltung mit R und C).
- Begrenzung der:
 - Stromsteilheit di_T/dt am Bauelement beim Einschalten.
 - Spannungssteilheit du_T/dt am Bauelement beim Ausschalten.
- Verminderung der Schaltverluste in den elektronischen Bauteilen.

2. Zeichnen Sie die RCD–Beschaltung für den GTO.



3. Welchem Zweck dienen die einzelnen Bauteile der Beschaltung?

- L: Begrenzung der Stromsteilheit di/dt beim **Einschalten**. Oft reichen schon die Zuleitungsinduktivitäten in der Schaltung aus, so daß keine zusätzliche Spule eingebaut werden muß.
- C: Begrenzung der Spannungssteilheit du/dt beim **Ausschalten**.
- R: Begrenzung des Überstroms beim **Einschalten**.
- D_1 : Kurzschluß des Widerstands R beim **Ausschalten**.

Der Beschaltungszweig mit R, C und D_1 wird auch als *Snubber*–Beschaltung bezeichnet, die Bauteile erhalten dann den Index “S“, also R_S , C_S und D_S . In Datenblättern werden oft schon Werte für die einzelnen Beschaltungselemente bei bestimmten Betriebsfällen angegeben.

4. Zeichnen Sie die Zeitverläufe von Strom und Spannung am GTO und am Kondensator und beschreiben Sie kurz die einzelnen Phasen (ideales Schalten). Welche Vernachlässigungen wurden getroffen?

Ausschalten:

- ① Der GTO ist eingeschaltet: $i_T = I_V, u_T = 0 \text{ V}$ (stationäres Verhältnisse)
- t_1 : Der GTO wird abgeschaltet.
- ② Der Strom I_V kommutiert ideal aus dem GTO-Zweig in den Beschaltungszweig. Durch den konstanten Strom $i_C(t) = I_V$ wird der Kondensator C linear aufgeladen. Aus der Strom-Spannungs-Gleichung $i_C(t) = C \cdot \dot{u}_C$ ergibt sich die Bemessungsgleichung für den Kondensator:

$$C = \frac{i_C(t)}{\frac{du_C(t)}{dt}} = \frac{I_V}{\frac{du_T}{dt}} \quad (1)$$

- t_2 : Die Spannung $u_C(t)$ am Kondensator erreicht U_Q , die Spannung an der Last ist Null. Dadurch wird die Freilaufdiode D_F leitend und es bildet sich ein LC-Schwingkreis über U_Q, D_F, L, C, D_1 und U_Q aus.
- ③ Der Strom $i_C(t)$ wird über den ungedämpften LC-Schwingkreis mit einer Cosinus-Viertelschwingung von I_V auf Null abgebaut, die Spannung am GTO und am Kondensator wird mit der Zeitkonstante LC weiter aufgebaut.

LC-Schwingkreis:
$$\frac{d^2 i_C(t)}{dt^2} + \frac{1}{LC} \cdot i_C(t) = 0$$

Anfangswerte:
$$i_C(t_2) = I_V, \quad u_C(t_2) = U_Q$$

Lösung:
$$i_C(t) = I_V \cdot \cos \omega_r(t - t_2) \quad \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$u_C(t) = U_Q + I_V \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sin \omega_r(t - t_2)$$

- t_3 : Der Strom $i_C(t)$ ist auf Null abgebaut, der Laststrom I_V fließt nun vollständig über die Freilaufdiode. Die Spannung am Kondensator und GTO erreicht ihren Scheitelpunkt mit dem Maximalwert

$$u_C(t_3) = \hat{U}_C = U_Q + I_V \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

- ④ Die Spannung am Kondensator klingt nun über den stark bedämpften Schwingkreis (R statt der Diode D_1) auf U_Q ab. Der Abschaltvorgang ist hiermit abgeschlossen.
- ⑤ Der GTO ist ausgeschaltet: $i_T = 0, u_T = U_Q$ (stationäre Verhältnisse)

Einschalten:

■ t_4 : Der GTO wird eingeschaltet.

- ⑥ Die Spannung $u_L(t)$ an der Induktivität L ist bis zum Zeitpunkt t_5 konstant ($u_L(t) = U_Q$), der Strom $i_L(t) = i_Q(t)$ wird somit linear aufgebaut, der Strom in der Freilaufdiode $i_{DF} = I_V - i_Q(t)$ nimmt entsprechend ab. Hieraus ergibt sich mit $u_L(t) = L \cdot di_L/dt$ die Bemessungsvorschrift für die Spule L zu:

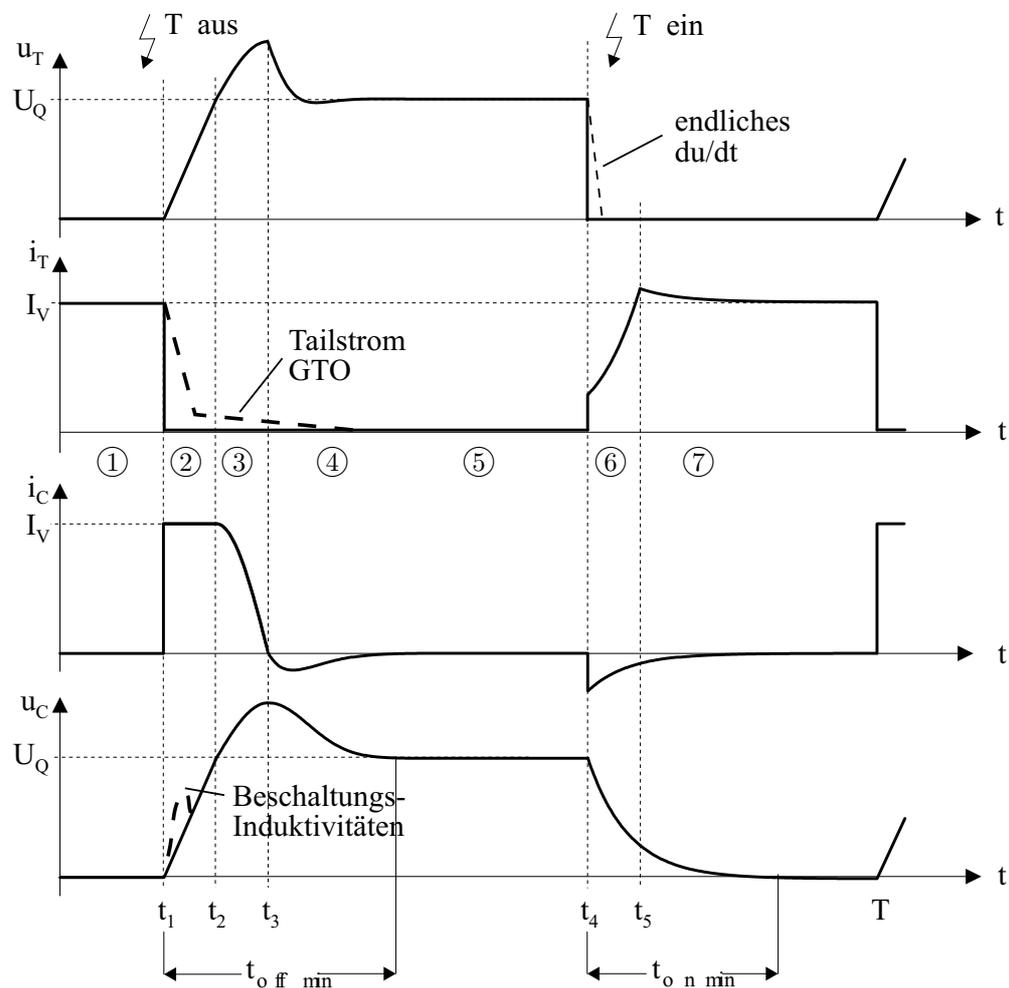
$$L = \frac{u_L(t)}{\frac{di_L(t)}{dt}} = \frac{U_Q}{\frac{di_T}{dt}} \quad (3)$$

Gleichzeitig werden R und C kurzgeschlossen, so daß ein zusätzlicher Strom über den GTO entsteht, der mit der Zeitkonstante RC abnimmt. Der Stromsprung beim Einschalten ergibt sich zu:

$$\Delta i_T = I_{C\text{ein}} = \frac{u_C(t_4)}{R} = \frac{U_Q}{R} \quad (4)$$

■ t_5 : Der Laststrom ist vollständig von der Freilaufdiode in den Hauptkreis kommutiert, an der Last liegt die Spannung U_Q .

- ⑦ Der Kondensator wird mit der Zeitkonstante RC entladen, bis u_C auf 0 abgesunken ist. Ab $t_{on\ min} \approx 3 \cdot RC$ kann dieser Vorgang als abgeschlossen betrachtet werden.



5. Bestimmen Sie L und C für die gegebenen GTO-Daten.

$$\text{Induktivität L aus Gl. (3): } U_Q = L \cdot \frac{di}{dt} \quad \Rightarrow \quad L = \frac{U_Q}{\frac{di_T}{dt}} = \frac{3000 \text{ V}}{500 \text{ A}} \mu\text{s} = \underline{\underline{6 \mu\text{H}}}$$

$$\text{Kapazität C aus Gl. (1): } I_V = C \cdot \frac{du_T}{dt} \quad \Rightarrow \quad C = \frac{I_V}{\frac{du_T}{dt}} = \frac{2000 \text{ A}}{1000 \text{ V}} \mu\text{s} = \underline{\underline{2 \mu\text{F}}}$$

6. Für welche maximale Blockierspannung U_{Tmax} muß der GTO ausgelegt sein?

Nach Gleichung (2) ergibt sich die maximale Blockierspannung zu:

$$U_{Tmax} = U_Q + I_V \sqrt{\frac{L}{C}} = 3000 \text{ V} + 2000 \text{ A} \cdot \sqrt{\frac{6 \mu\text{H}}{2 \mu\text{F}}} = 3000 \text{ V} + 3464 \text{ V} = \underline{\underline{6464 \text{ V}}}$$

$$U_{Tmax} = 2,15 \cdot U_Q \quad (\text{Viel zu hoch!})$$

Durch Beschaltung der Induktivität mit einer Diode und einer Spannungsquelle kann die Spannung am Bauelement zusätzlich begrenzt werden (s.a. Kapitel 7.3.3 der Vorlesung).

7. Welchen Wert muß der Widerstand R haben, damit der Stromsprung beim Einschalten höchstens 10 % des Laststroms I_V beträgt?

Zum Zeitpunkt des Einschaltens ($t = t_4$) ist der Kondensator auf die Spannung $u_C = U_Q$ aufgeladen. Diese wird durch das Einschalten des GTOs an den Widerstand R gelegt. Daraus resultiert nach Gl. (4) ein Stromsprung von

$$\Delta i_T = I_{Cein} \stackrel{!}{=} 0,10 \cdot I_V = 200 \text{ A}$$

Der Widerstand R berechnet sich also zu:

$$R = \frac{U_Q}{I_{Cein}} = \frac{3000 \text{ V}}{200 \text{ A}} = \underline{\underline{15 \Omega}}$$

8. Wie groß ist dann die minimale Einschaltzeit t_{onmin} ? Bestimmen Sie hierzu die Zeitkonstante des RC-Schwingkreises.

Durch das Einschalten des GTOs bei $t = t_4$ wird der Kondensator C und der Widerstand R kurzgeschlossen, es bildet sich ein RC-Schwingkreis mit der Zeitkonstante RC . Nach $3 \cdot RC$ ist die Spannung $u_C(t)$ auf 5 % ihres Anfangswertes U_V abgeklungen ($e^{-3} \approx 0,05$).

$$t_{onmin} = 3 \cdot RC = 3 \cdot 15 \Omega \cdot 2 \mu\text{F} = 3 \cdot 30 \mu\text{s} = \underline{\underline{90 \mu\text{s}}}$$

9. Welche Verluste entstehen in der Beschaltung während eines Schaltzyklus?

Während eines Schaltzyklus wird sowohl die Induktivität als auch der Kondensator einmal gelad und entladen, d. h. die im Widerstand entstehenden Verluste setzen sich zusammen aus den Energien, die in der Induktivität L und dem Kondensator C gespeichert sind.

$$\text{Induktivität L: } E_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_V^2 = \frac{1}{2} \cdot 6 \mu\text{H} \cdot (2000 \text{ A})^2 = \underline{\underline{18 \text{ Ws}}}$$

$$\text{Kondensator C: } E_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_Q^2 = \frac{1}{2} \cdot 2 \mu\text{F} \cdot (3000 \text{ V})^2 = \underline{\underline{9 \text{ Ws}}}$$

$$\Rightarrow E_R = E_L + E_C = 18 \text{ Ws} + 9 \text{ Ws} = \underline{\underline{27 \text{ Ws}}}$$