

# 功率电子器件阻容二极管吸收电路元器件的选取

张保平

阻容二极管吸收电路是防止功率晶体管(BJT)、可关断晶闸管(GTO)等功率电子器件关断损坏的有效保护电路。本文通过分析,介绍正确选用功率电子器件阻容二极管吸收电路元器件的方法。

## 一、功率电子器件的关断损耗

GTO 常见的连接线路见图 5.1-1,其中  $I_L$  为 GTO 导通时流过负载的电流。当门极 G 施加瞬时负脉冲时,瞬时导通电流  $i_D$  由  $I_L$  值迅速下降为零,GTO 阳极与阴极间瞬时导通电压  $u$  由零值迅速上升到最大关断电压值  $V_{CB}$ (由电源电压  $V_{CC}$ 和续流二极管 VD1 的正向导通电压降  $V_1$  决定)。GTO 关断后,由于电感 L 中电流经负载和 VD1 续流,忽略  $V_1$  可得  $V_{CB} = V_{CC} + V_1 \approx V_{CC}$ 。在关断过程中,GTO 功率电子器件内部瞬时功率有一最大耗散值,对功率电子器件的关断损坏有极大影响。其分析如下:

设  $i_D$  线性下降, $u$  线性上升,即有

$$i_D = I_L(1 - t/t_f) \quad t \leq t_f$$

$$u = V_{CB} \cdot t/t_f \approx V_{CC} \cdot t/t_f$$

式中  $t_f$ ——GTO 所需关断时间;

$t$ —— $0 \sim t_f$  关断过程中任一瞬时时间值。

关断过程中电压、电流简化示意曲线见图 5.1-2。由  $i_D$  和  $u$  公式写出 GTO 关断过程的瞬

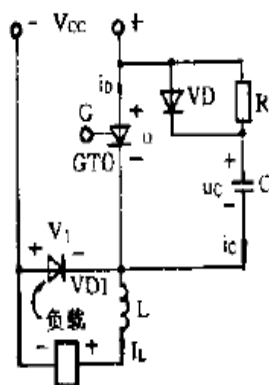


图 5.1-1

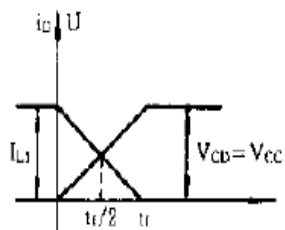


图 5.1-2

时功率表达式为

$$p = i_D \cdot u = I_L \cdot V_{CC}(1 - t/t_f) \cdot t/t_f$$

对  $p$  表达式求导数,并将  $t = t_f/2$  代入,得到关断过程的最大瞬时功耗为

$$p_m = 0.25 I_L \cdot V_{CC} \quad (1)$$

在  $t_f$  内,GTO 或 BJT 等功率电子器件内部的有效导通面积迅速减小,大量载流子汇集在

狭小的导通面积;若不对  $p_m$  采取限制措施,将极易出现功率电子器件的损坏。然而开通过程中,因器件内部有效导通面积迅速增大,一般不易出现瞬时过损耗。为分析方便起见,图5.1-1画出了图5.1-1电路中GTO门极电压  $u_G$  的一个开关周期  $T$  内的有关波形。

## 二、电容 $C$ 和二极管 $VD$ 吸收保护

GTO 两端并接的二极管  $VD$  和电容  $C$  在关断过程中导通,  $C$  的充电电流  $i_c$  的分流,使  $C$  有效地吸收  $C \cdot V_{dc}^2/2$  的能量,减少了关断过程中 GTO 所吸收的能量,从而有效地保护了 GTO 的安全。

关断过程中,只要  $i_D$  未降到零,  $C$  两端电压  $u_C$  经  $VD$  充电就迅速;只有当  $u_C = V_{CC}$  瞬间 ( $t = t_f$ ),  $i_D$  下降为零,充电进入稳态 ( $C$  充电结束),  $VD$  导通续流。  $t_f$  时刻之前 (见图 5.1-2)  $VD$  不续流,电感电流  $I_L$  保持常数,则

$$i_c = I_L - i_D = I_L \cdot t/t_f$$

$t_f$  时刻,  $C$  充电到最大关断电压  $V_{CO} = V_{CC} + V_1 \approx V_{CC}$  (忽略  $VD$  的续流压降  $V_1$ )。将  $V_{CC}$  代入,得

$$u_C = V_{CC} = \frac{1}{C} \int_0^{t_f} i_c dt$$

解得  $C = I_L \cdot t_f / 2V_{CC}$  (2)

$i_c$  在一个周期内的平均值是  $VD$  的额定电流  $I_{DF}$ 。

$$I_{DF} = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} i_c dt = 0.5 I_L \cdot t_f \cdot f \quad (3)$$

式中  $f = 1/T$  为  $u_G$  的频率 (即为 GTO 工作频率)。

$C$  充电和关断过程中的各电压电流波形见图 5.1-3。

**例 1:** 取  $V_{CC} = 100 \text{ V}$ ,  $I_L = 10 \text{ A}$ ,  $t_f = 2 \mu\text{s}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$  (目前, GTO 的开关频率低于  $3 \text{ kHz}$ )。由式 (2)、(3) 可得

$$C = 10 \times 2 \times 10^{-6} / 2 \times 100 = 0.1 \mu\text{F}$$

$$I_{DF} = 0.5 \times 10 \times 2 \times 10^{-6} \times 10^3 = 0.01 \text{ A}$$

$C$  一般选取无感电容,且连接导线到 GTO 或 BJT 等功率电子器件的距离应尽量缩短,以减小导线的电感。  $VD$  最好选用软恢复特性的高频整流二极管,不要选用硬恢复特性的开关管。因为硬开通性能的开关二极管极易激发电路的高频自激振荡,过大的  $di/dt$  变化又引起大的  $du/dt$ , 导致被保护管的损坏。

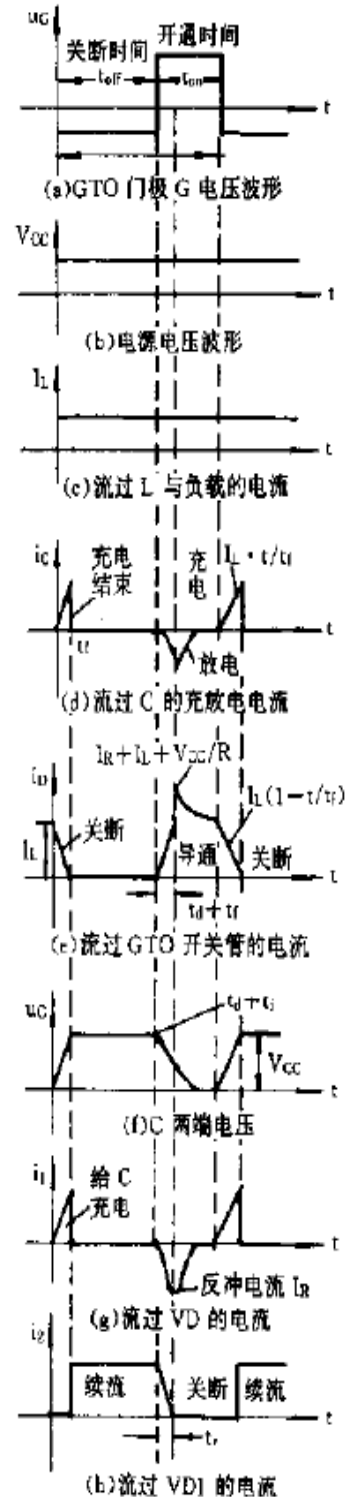


图 5.1-3

### 三、RC 放电分析及器件选择

功率电子器件控制极施加  $t_{on}$  (正脉冲) 时, GTO 的  $i_D$  在上升时间  $t_r$  内由零增至  $I_L$  值。另外, 还有  $i_c = V_{CC}/R$  的放电电流峰值和 VD 的反冲关断电流也要流入刚才导通的 GTO (见图 5.1-3)。必须对上述电流加以限制, 以防止开通电流超限, 即应满足:

$$I_L + i_{cm} + I_R < I_M$$

式中  $I_R$ ——VD 的反冲关断电流;

$I_M$ ——GTO 或 BJT 允许的额定电流;

$i_{cm}$ ——C 放电电流峰值。

将  $i_{cm} = V_{CC}/R$  代入得到 R 的下限

$$R > V_{CC}/(I_M - I_L - I_R) \quad (4)$$

$I_R$  一般可按经验选为  $0.2 I_L$ 。

RC 时间常数的选取决定 R 的上限, 一般应保证  $t_{on}$  (导通时间) -  $t_d$  (导通电流延迟时间) -  $t_r$  (导通电流上升时间) 时间内 C 放电完毕。之所以减去  $t_d$  和  $t_r$ , 是因正脉冲加到 GTO 控制极时, 经  $t_d + t_r$  时间, GTO 才能充分导通; 在  $t_d$  和  $t_r$  内, C 不能有效放电。 $t_{on}$  取最小导通时间  $t_{onmin}$  时应满足下式:

$$4RC < (t_{onmin} - t_d - t_r)$$

解 R 上限

$$R < (t_{onmin} - t_d - t_r)/4C \quad (5)$$

综合式(4)和(5)得

$$V_{CC}/(I_M - I_L - I_R) < R < (t_{onmin} - t_d - t_r)/4C \quad (6)$$

读者应注意: 此处的  $t_{on}$  是 GTO 控制极的正脉冲宽度, 而不是手册中的开启时间  $t_{on} = (t_d + t_r)$ ; 两者符号在许多资料中相同, 应注意区别。通常  $t_{onmin}/T < 1/2$  占空比时, 经 GTO 传输到负载的电源功率, 比占空比  $t_{onmin}/T > 1/2$  时减小, 功率晶闸管不易出现过热损坏; 故可人为限定  $t_{onmin}$  为小于  $T/2$  的取值, 这样, C 放电在 GTO 吸收较小功率的时间内进行。当  $t_{on} > t_{onmin}$  时 (吸收功率增大), C 已放电完毕 (C 放电和开通过程的各电压电流波形见图 5.1-3)。

**例 2:**  $V_{CC} = 100 \text{ V}$ ,  $t_d + t_r = 2 \mu\text{s}$ ,  $t_{onmin} = 15 \mu\text{s}$ ,  $I_M = 20 \text{ A}$ ,  $I_L = 10 \text{ A}$ ,  $C = 0.1 \mu\text{F}$ 。计算时取  $I_R = 0.2 I_L = 2 \text{ A}$ ,  $I_L$  在所有计算公式中均取最大占空比时的负载电流。由式(6)可得

$$100/(20 - 10 - 2) < R < (15 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-6})/(4 \times 0.1 \times 10^{-6})$$

即  $12.5(\Omega) < R < 32.5(\Omega)$

对 BJT, 取 R 为  $20 \Omega$  较大值可限制放电电流峰值  $i_{cm} = V_{CC}/R$ ; 对 GTO, 取  $R = 15 \Omega$  较小值更有利于使 GTO 的导通电流达到大于掣住电流的取值。R 经常使用大功率实心电阻器, R 的功耗  $P_R$  是 C 吸收储能值与开关调期 (工作频率 f) 的比值。

$$P_R = 0.5C \cdot V_{CC}^2/T = 0.5C \cdot V_{CC}^2 \cdot f \quad (7)$$

取前面例 1 算得的  $C = 0.1 \mu\text{F}$ , 并将  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $V_{CC} = 100 \text{ V}$  代入式(7)得

$$P_R = 0.5 \times 0.1 \times 10^{-6} \times 100^2 \times 10^3 = 0.5 \text{ W}$$

由式(7)知, 阻容二极管吸收保护是纯耗能保护, C 与 f 都不宜取太大值。尤其是 C 不能取太大; f 增大有利于减小电感 L, 有时可适当取大些。

#### 四、阻容二极管器件选择计算实例

常用的脉宽调制(PWM)控制直流电机调速系统原理电路见图 5.1-4。

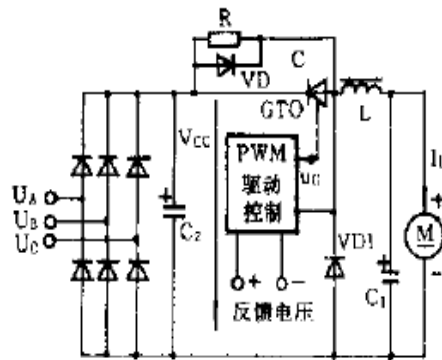


图 5.1-4

(1) 电源电压  $V_{CC}$ :由三相交流电压经桥式整流滤波在电容  $C_2$  两端得到,其值:

$$V_{CC} = 2.34 U_P$$

式中,  $U_P = U_A = U_B = U_C$  为三相交流相电压有效值。

此例取  $U_A = U_B = U_C = U_P = 110 \text{ V}$ , 得

$$V_{CC} = 2.34 \times 110 = 257 \text{ V}$$

(2) 负载电流  $I_L$ :由直流电动机负载的额定电流确定。

设电机型号为 Z2-52(它励), 额定电流由电工手册或电机铭牌标志可知(额定电压 230 V, 额定功率 6 kW)  $I_L = 26.1 \text{ A}$ 。

(3) GTO 关断时间  $t_f$ :由功率半导体器件手册查知为  $10 \mu\text{s}$ (国产 50 A 的 GTO)。

(4) GTO 门极控制电压  $U_G$  的频率  $f$ :由 PWM 驱动控制器的内部电路在调试时确定,使用时都给出确定值。GTO 和 BJT 器件可取  $1 \sim 2 \text{ kHz}$ , 此处取  $1 \text{ kHz}$ 。

(5) 将  $V_{CC} = 257 \text{ V}$ ,  $I_L = 26.1 \text{ A}$ ,  $t_f = 10 \mu\text{s}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$  分别代入式(2)和式(3), 吸收电容

$$C = 26.1 \times 10 \times 10^{-6} / (2 \times 257) = 0.5 \mu\text{F}$$

$$I_D = 0.5 \times 26.1 \times 10 \times 10^{-6} \times 10^3 = 130.5 \text{ mA}$$

(6) GTO 允许电流  $I_M$  和  $t_d + t_r$ :本例选国产 50A 的 GTO 器件时,由功率半导体器件手册查知  $I_M = 50 \text{ A}$ ,  $(t_d + t_r) = 6 \mu\text{s}$ 。

(7) 将  $V_{CC} = 257 \text{ V}$ ,  $I_L = 26.1 \text{ A}$ ,  $I_R = 0.2 I_L = 5.22 \text{ A}$ ,  $I_M = 50 \text{ A}$  代入式(4)得 R 下限值为

$$R > 257 / (50 - 26.1 - 5.22) = 14 \Omega$$

(8) 将  $t_{onmin} = T/2 = 1/2f = 0.0005 \text{ s}$ ,  $(t_d + t_r) = 6 \mu\text{s}$ ,  $C = 0.5 \mu\text{F}$  代入式(5)得

$$R < (500 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-6}) / (4 \times 0.5 \times 10^{-6}) = 248 \Omega$$

(9) 将  $C = 0.5 \mu\text{F}$ ,  $V_{CC} = 257 \text{ V}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ , 代入式(7)得 R 消耗功率

$$P_R = 0.5 \times 0.5 \times 10^{-6} \times 257^2 \times 10^3 = 16.5 \text{ W}$$

综合式(7)、式(8)、式(9)可选择  $R = 100 \Omega$  阻值,并用两个大瓦数  $200 \Omega$  电阻并联实现。

C 与二极管 VD 的耐压均取  $1.5 V_{CC} = 386 \text{ V}$  以上的器件,考虑电源电压的波动,取  $500 \text{ V}$  耐压的器件即可。