

续流和吸收二极管

1. 对续流和吸收二极管的要求

随着电力电子技术的发展，功率器件的开关速度越来越快，因此，现代的快速开关元件要求采用快速的二极管作为续流二极管。在开关的每一次开通过程中，续流二极管有导通状态变为截止状态。而这一过程要求二极管具有软的恢复特性。然而，让我们难以相信的是在很长一段时间里，我们忽视了快速二极管的作用。因而续流二极管限制了开关元件的功能—限制了开关元件的开关速度。近些年由于对更高效率的追求，快速二极管的作用受到了高度的重视，通过不断改善它的反向恢复特性而使其性能得到了极大的改善。

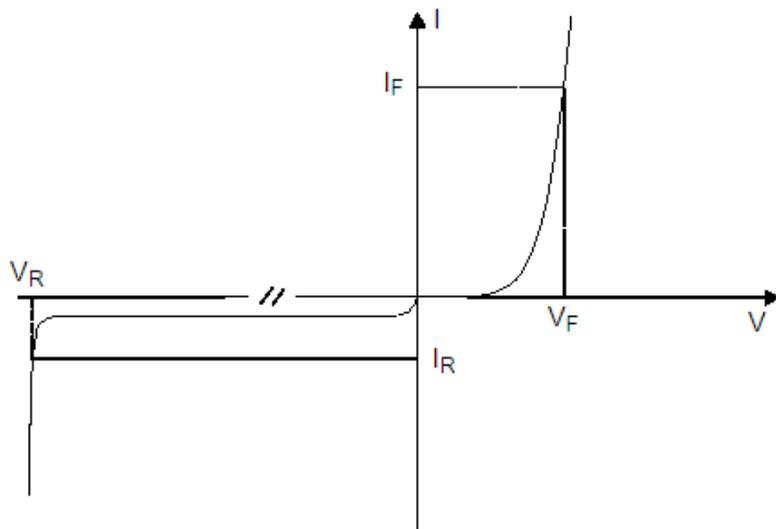


图 1 二极管反向电压和正向压降的定义

2. 反向阻断电压和正向峰值压降

由反向阻断电压 V_R 的定义我们可以知道，二极管或晶闸管在该电压下的漏电流不得大于临界值 I_R 。

在大多数的参数表中的器件参数都是温度等于 25°C 时的数值。当温度降低时反向阻断能力下降。也就是说如果当元件在低于室温的条件下运行时应引起特别的注意。

当温度高于室温时，在反向电压相应上升的同时，其漏电流也同时上升。因此我们在参数表中还会给出高温下的漏电流值(125°C)。

值得特别注意的是，对于采用了金扩散工艺的元素来说，在高温下它们的漏电流上升得特别快。

因此，如果系统由于元件的功率损坏而使其工作在环境下，将有可能是系统引发温升失衡而不能正常工作。

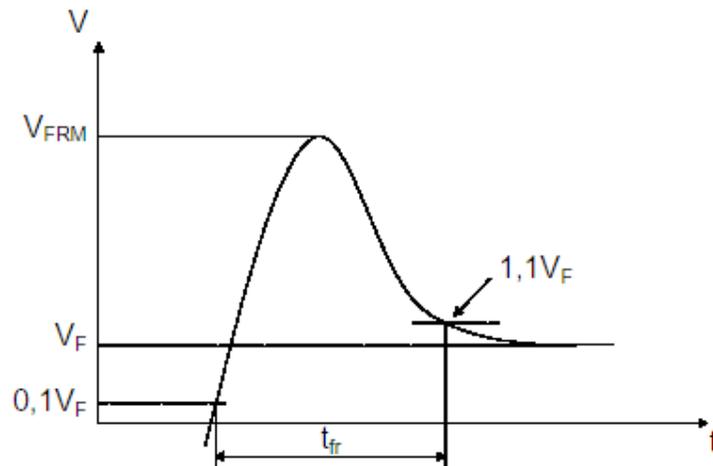


图 2 功率二极管的开通特性

正向通态压降 V_F 表示了给定电流下，二极管在导通状况下的电压降应小于某给定的临界值。一般来说，这个值是在室温下测得的。然而，系统中的元件又是工作在一定的温度下，因此我们必须对元件的高温正向通态压降进行考虑。

3. 开通特性

快速二极管在进入导通状态的过程中，电压首先升至 V_{FRM} ，即可重复的正向峰值电压，然后才降至正向通态压降的水平。图 给出了有关 V_{FRM} 和开通时间 t_{tr} 的定义。

然而对于像用在 GTO 和 IGBT 中的续流二极管和吸收二极管来说，这个定义存在的问题，这是因为：

(1). 在这样的电路中，开通电流的上升率 di/dt 会很高，通常会达到 200V 到 300V，它将是 V_F 的 100 倍以上。这对于应用来说是一个非常棘手的事情。

(2). 实际应用过程中，二极管是由截止进入导通状态，由此产生的 V_{FRM} 要比由零电压进入导通状态高出许多。当我们对其设计时，必须予以特别关注。

对于吸收二极管来说，因为吸收电路只有在吸收二极管导通之后才能发挥作用，所以较低的 V_{FRM} 是它的重要指标之一。

对反向阻断电压大于 1200V 的续流二极管来说，这个可重复的正向峰值电压也由着作用的作用。因为在 GTO、IGBT 的关断过程中，线路的寄生电感会产生一个电压尖峰，它叠加在续流二极管的 V_{FRM} 上，二者之和可能导致过电压而造成元件损坏。

非常重要的是我们必须对电压进行测量，以确定由寄生电感所产生的电压和 V_{FRM} 的值。

4. 关断特性

再二极管由导通进入截止状态的过程中，它内部所存储的电荷必须被释放。这个过程将使二极管的电流反方向流动。内部载流子的复合过程我们可以用反向恢复特性来描述。

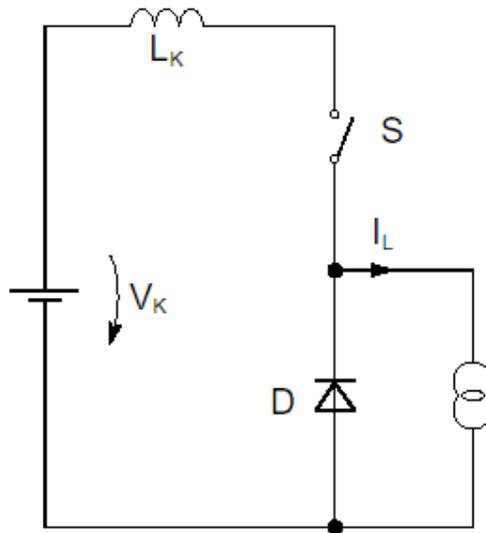


图 3 反向恢复特性测量电路

图中 S 代表一个理想的开关， I_L 为电流源， V_K 是换流电压源， L_K 是换流电感。

再开关 S 闭合后，软恢复二极管的电压和电流曲线如图 所示。而图 所示则是两个具有刚性开关特性的二极管电流特性曲线。

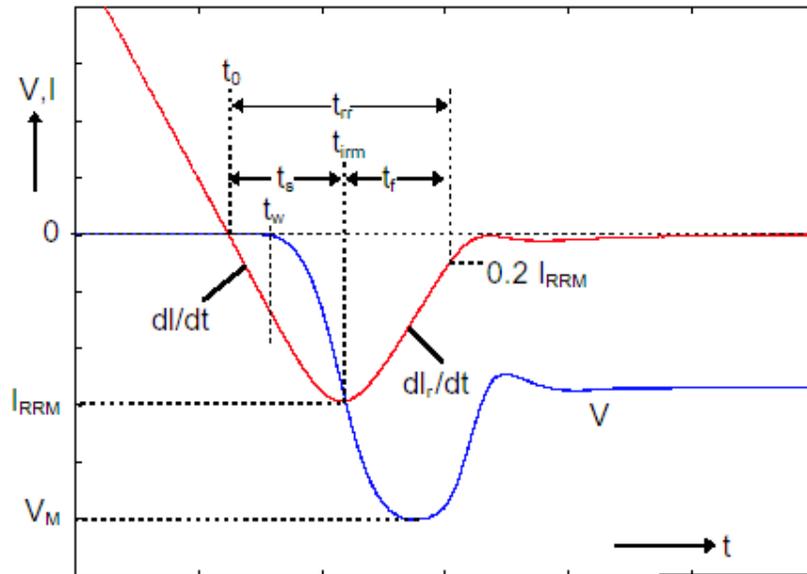


图 4 软恢复二极管的反向恢复过程的电流和电压特性和恢复特性定义

换流速度 di/dt 是由电压和电感来决定的

$$-di/dt = V_K / L_K \quad (1)$$

在时刻 t_0 ，电流达到零点，在时刻 t_w 时，如同经过开始承受反向电压。此刻，在二极管的 pn 结内，所有的载流子都得到清除。在时刻 t_{irm} 时，反向电流达到最大值 I_{RRM} 。

在 t_{irm} 之后，电流逐步衰减至其漏电流值。波形轨迹完全由二极管所决定。如果衰减的过程很陡，我们称之为刚性恢复特性；反之，如果衰减的过程很缓慢，我们则称之为软开关特性。

反向恢复时间是这样定义的：从 t_0 开始到电流衰减到 I_{RRM} 的 10% 时的时间。

$$\text{软度系数 } S = t_f / t_s \quad (2)$$

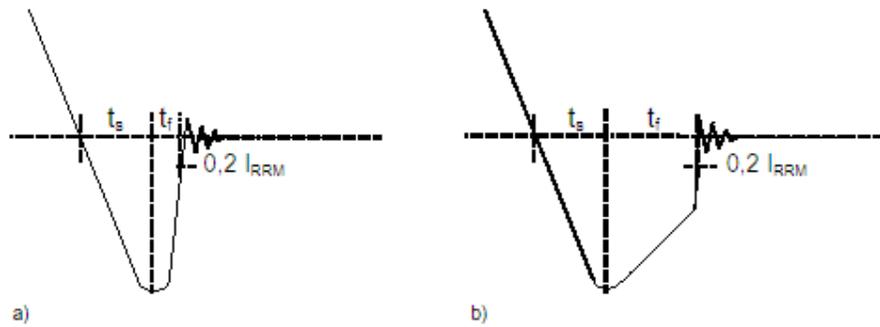


图 5 两种不同的具有刚性恢复特性的电流曲线

由于二极管具有不同的恢复特性，通常我们采用如下更为合理的软度：系数定义：

$$\text{软性系数 } S = \left| \frac{-\frac{di}{dt} \Big|_{i=0}}{\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max}} \right| \quad (3)$$

根据感应定律， di/dt 决定了所出现的过电压

$$V_{ind} = -L_K (di/dt)_{\max} \quad (4)$$

恢复特性受下列因素的影响：

- ①. 温度：二极管的恢复特性受温度的影响，在大多属地情况下，温度升高对恢复特性有不利的影响。但是有些快速二极管在室温或室温以下时其恢复特性反而较差。
- ②. 外加反向电压：外加反向电压越高，恢复特性越差。
- ③. 换向电流的上升率 di/dt ：换向电流的上升率 di/dt 对恢复特性的影响很大，但不同的二极管呈现出不同的影响，有的二极管随 di/dt 的增加而变硬，而另一些则变软。

以上所列的这些因素对二极管恢复特性的影响很难用一个简单的、定量的定义来概括。图 3 所示的电路和式 (2) 或 (3) 所得到的定义只能用来对单个的特性参数的影响进行解释。对反向恢复特性的完整判断应该在接近实际的条件下通过测量获得。图 6 是一个较适用的测量线路。

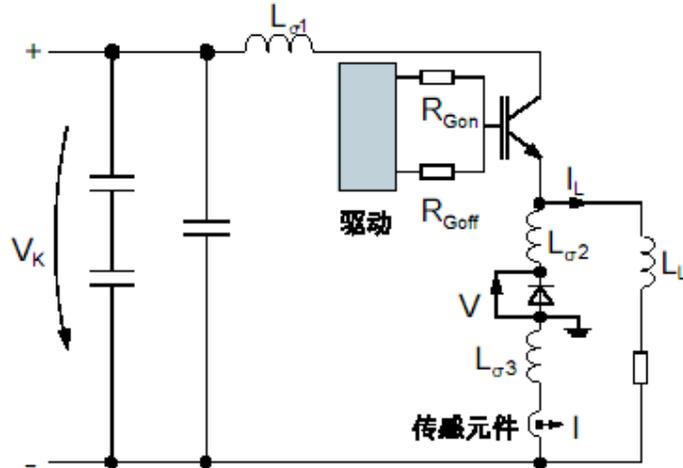


图6 用于测量恢复特性的斩波电路

换向电流的 di/dt 可由开关元件的栅极电阻来调节。 V_K 是直流母线电压，在电容、IGBT 和二极管之间的连接导线上存在寄生电感。当关断 IGBT 时负载电流有 IGBT 切换到二极管，其波形如图 7、图 8 所示。

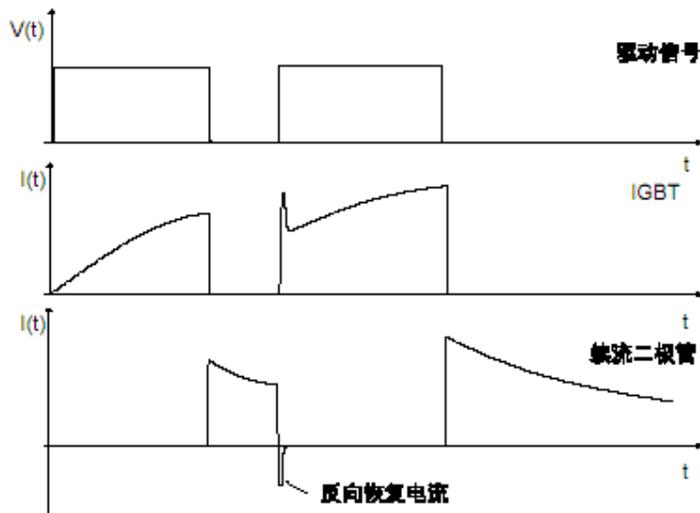


图7

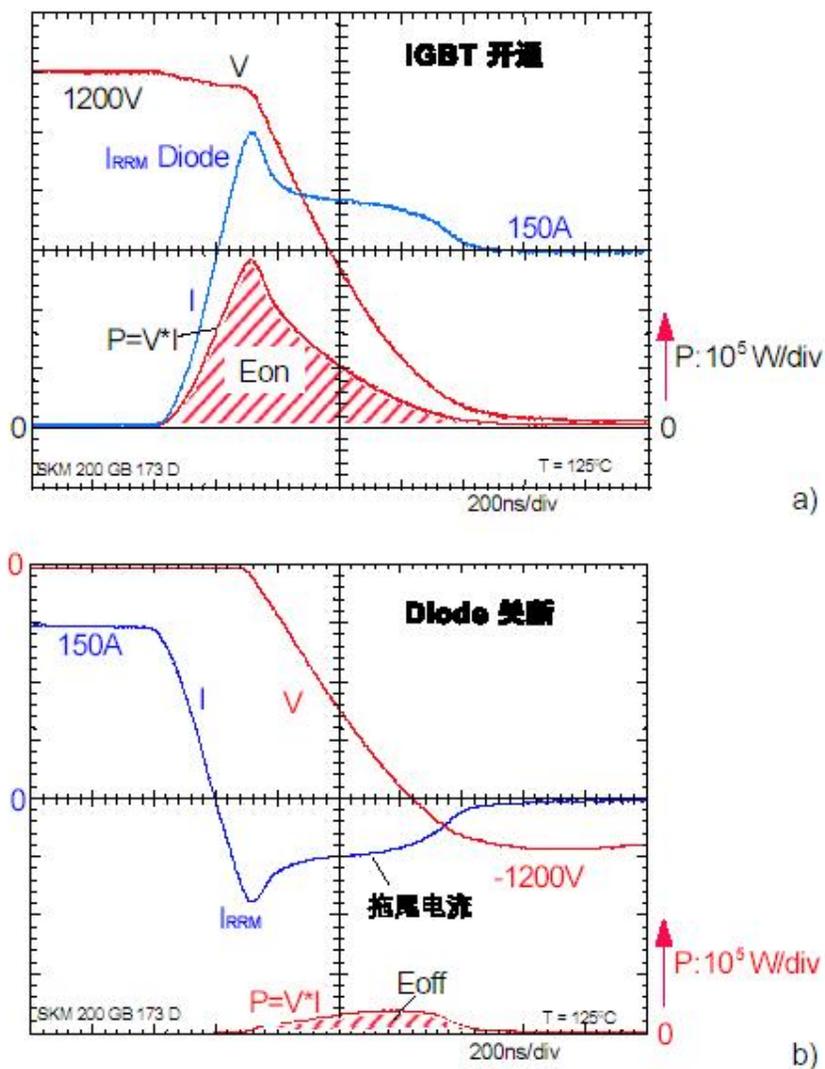


图 8

从图 8 我们可以看到，恢复电流在到达最大值 I_{RRM} 之后，缓慢的衰减到零，因此我们将二极管的反向恢复特性进一步的细分为二个部分：

- ①. 第一部分为电流上升至反向恢复电流的峰值阶段以及随后的按照 di/dt 的速率的下降过程。一般而言，软恢复二极管的 di/dt 值和 di/dt 值差不多，但值得注意的是反向恢复电流的峰值 I_{RRM} 对开关元件的冲击相当大。
- ②. 第二部分为拖尾电流部分，即 trr 时间区间以后的部分，在此期间反向恢复电流衰减至零， trr 不再具有明显的意义。因为此时二极管上已具有反向电压，所以二极管内损耗的主要部分产生与拖尾过程。不含拖尾电流的刚性二极管虽然它的开关损耗很低，但实际上它仍无法被应用。这是由于

它太大的 di/dt 不利于元件的实际应用。

就二极管对整体损耗的影响而言，最重要的参数就是它的反向峰值恢复电流 I_{RRM} 应当尽可能的小。

5. 快速二极管的串并联

5.1. 串联

器件在进行串联应用时，必须注意其静态均压和动态均压。

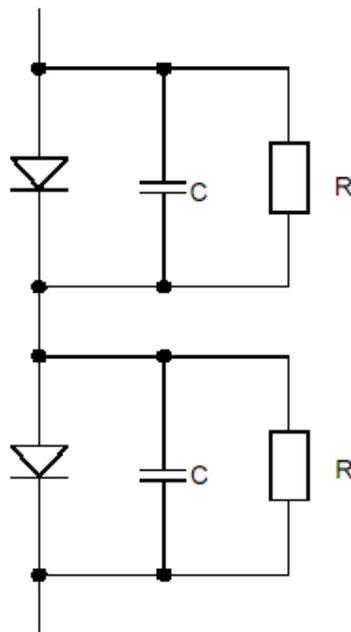


图 9 器件的串联应用

器件串联应用，在静态时，应用串联的各元件漏电流的不一致，从而使漏电流最小的元件承受最高的电压，甚至达到其额定极限值，因此必须对其进行并联均压电阻。

对于 n 个二极管的串联电路，我们可以得到一个简化的计算电阻的公式：

$$R < \frac{nV_r - V_m}{(n-1) \cdot \Delta I_r}$$

上式中： n —串联元件个数； V_r —二极管额定电压； V_m —串联电路中电压的最大值； ΔI_r —运行在最高工作温度时二极管的漏电流偏差值。

经验表明，动态均压问题的解决永不同于静态均压问题。如果一个二极管 pn 结的载流子消失得比另一个的快，在关断过程中它也更早的承受电压。

在 n 个给定电压值为 V_r 的二极管串联时，我们可以采用一个简化的公式来计算电容：

$$C > \frac{(n-1) \cdot \Delta Q_{RR}}{n \cdot V_r - V_m}$$

ΔQ_{RR} —串联元件间反向恢复电荷的最大偏差，当所使用的器件来自于同一个制造批号时，我们可以假设 $\Delta Q_{RR} = 0.3 Q_{RR}$ 。

器件在串联应用时，只有当各个器件的静态的动态均达到相当理想的对称均衡状态，才能最大限度地利用串联的各器件额定参数。

5.2. 并联

通常在功率器件的并联应用时，首先我们应当考虑均流。在没有特别的均流措施情况下，应使相互并联的器件通态电压的偏差尽量小。

器件通态电压对温度的依赖性，是衡量器件并联应用的一个重要参数。有些种类的器件通态电压呈正温度系数，二有些器件呈负温度系数。当一个器件呈正温度系数时，它更适合并联应用。但因为二极管总是存在一定的制造偏差，所以在二极管的并联应用中，一个较大的负温度系数（ $> 2\text{mV/K}$ ）则有可能使其运行温度失衡。进而使器件永久失效。

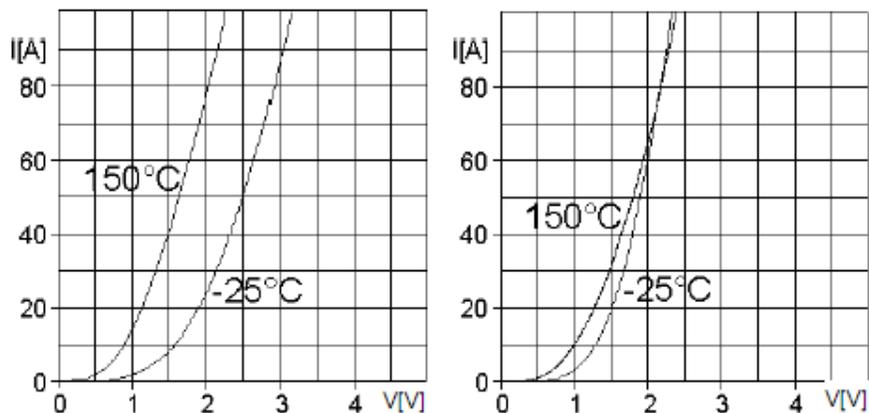


图 10 不同类型二极管对温度的依赖性

应用设计举例：

例 1：控制直流电机需要一个三相晶闸管整流桥，设线电压是 $V_{\text{line}} = 380\text{V(RMS)}$ ，50Hz，直流电流输出 $I_d=3600\text{A}$ ，晶闸管空气冷却，最高环境温度为 $T_A=40^\circ\text{C}$ ，希望的浪涌电流值为 $I_{\text{TSM}}=20\text{kA}$ 。选配元件与散热器。

1) 电压设计

额定线电压的峰值为：

$$V_{0(\text{max})} = \sqrt{2} \times V_{\text{line}} = \sqrt{2} \times 380 = 537\text{V}$$

考虑2.5的过冲系数，晶闸管的电压等级为：

$$V_{\text{DSM}} \geq 537\text{V} \times 2.5 = 1343\text{V} \rightarrow 1400\text{V}$$

选择 $V_{\text{DSM}} = V_{\text{RSM}} = 1400\text{V}$

2) 元件和散热器选择

现在我们必须所有1400V的器件中来选择最适合的，这些器件的主要差异是外形尺寸大小不一和电流等级的不同。

由于 $I_d=3600\text{A}$ ，那么每个器件的平均电流值为 $I_{\text{T(AV)}}=1200\text{A}$ 。

从《大功率半导体器件产品目录》上的“普通晶闸管”系列中查到有以下几种元件可能满足要

求，它们分别是： $KP_A1400-14$ 、 $KP_X1900-14$ 和 $KP_B3000-14$ 。

查《大功率半导体器件产品数据手册》，得到的数据如表1所示：

表 1:

	$KP_A1400-14$	$KP_X1900-14$	$KP_B3000-14$
门槛电压 (V_{T0})	1.05V	1.03V	1.05V
斜率电阻 (r_T)	0.298m Ω	0.211m Ω	0.121m Ω
结壳热阻 (R_{jC})	0.015 K/W	0.012 K/W	0.008 K/W
接触热阻 (R_{cS})	0.004 K/W	0.003 K/W	0.002 K/W
浪涌电流 (kA)	24	33	53

用以上数据计算元件的通态损耗，考虑到其他损耗的存在，取通态损耗值的 1.1 倍作为元件的总的功率损耗值，再用总的功率损耗值来计算所需散热器的热阻值，所得数据如表 2 所示：

表 2:

	$KP_A1400-14$	$KP_X1900-14$	$KP_B3000-14$
通态损耗 (W)	2316	1983	1689
总损耗 (W)	2548	2181	1858
散热器热阻 (R_{SA})	0.014 K/W	0.024 K/W	0.036 K/W

具体的计算式为：

$$\text{通态损耗: } P_{T(AV)} = I_{T(AV)} \times V_{T0} + 2.46 \times I_{T(AV)}^2 \times r_{T0}$$

$$\text{总损耗: } P_{tot} = 1.1 \times P_{T(AV)}$$

$$\text{散热器热阻: } R_{SA} = \frac{T_j - P_{tot} \times (R_{jc} + R_{cs}) - T_A}{P_{tot}}$$

由表 1 和表 2 的结果可以看出，器件承受浪涌电流的能力都没问题，而且都能承受 1200A 的通态平均电流，然而，如果选择 $KP_A1400-14$ 、 $KP_X1900-14$ 这两种器件中的一种，则需要配置散热效果非常好的散热器，热阻值分别为 0.014 K/W 和 0.024 K/W，从风冷散热器的列表中，我们找不到如此小的热阻的散热器，采用水冷结构又将增加系统成本和降低可靠性。因此，选择 $KP_B3000-14$ 晶闸管，然后选用通用风冷散热器中的 SF17 就可以满足系统运行的要求。

例 2:

电机软起动

电机功率 $P=220\text{kw}$

电机输入电压 $U=380V$

三相电源功率计算式 $P=1.732 * U * I * \cos \alpha$

U 和 I 的值是有效值

通常电机起动时取 $\cos \alpha = 0.8$

每相电流平均值 $I_T(AV) = 0.9 * I$

每只元件的电流平均值 $I_{T1}(AV) = 0.45 * I$

起动电流限定为 4 倍额定值

器件电压选择原则 $V_{DRM}/V_{RRM} = (2 \sim 3) * 1.414 * U$

获取电机正常工作和起动工作时的器件电流平均值

选择合适的器件，如 KP91200-16

查数据手册，知：门槛电压 $V_{T0} = 0.96V$;

斜率电阻 $r_{T0} = 0.26m \Omega$;

结壳热阻 $R_{thjc} = 0.023^\circ C/W$;

接触热阻 $R_{thch} = 0.005^\circ C/W$ 。

功耗计算公式： $P_T(AV) = V_{T0} I_T(AV) + F^2 r_{T0} I_T^2(AV)$

计算稳态时器件功耗

计算起动时器件功耗

壳温计算： $T_j - T_c = P_T(AV) R_{jc}$

计算器件稳态时最大壳温 T_{C1}

计算器件起动时最大壳温 T_{C2}

按壳温 T_{C1} 选择稳态时所需散热器

按壳温 T_{C2} 选择起动时所需散热器

结温留有 $20^\circ C$ 裕量要求，环温 $T_A = 40^\circ C$

计算 R_{thja}

折中选择散热器