

### 1.3.1.3 关断特性

在二极管由导通进入截止状态的过程中，它内部所存储的电量必须被释放。这个过程导致了二极管的电流反方向流动。这一反向电流的波形可以用反向恢复特性来描述。

图 1.19 表示了一个最简单的测量线路。

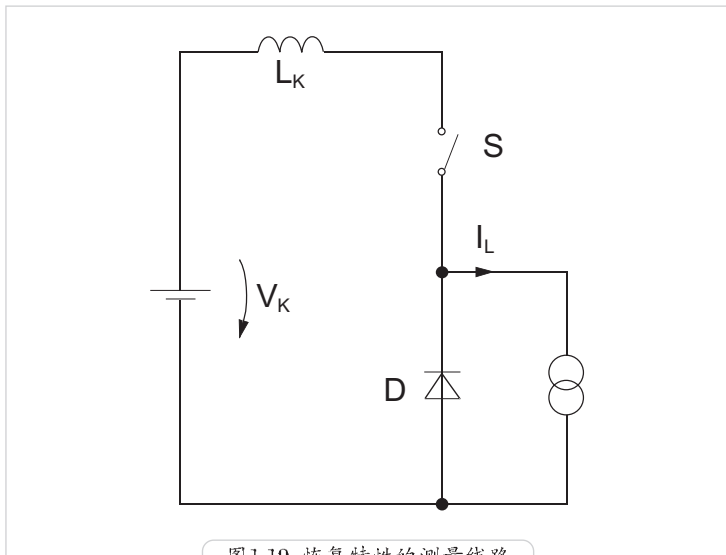


图 1.19 恢复特性的测量线路

$S$  代表了一个理想的开关， $I_L$  为一个电流源， $V_K$  是一个用于换流的电压源， $L_K$  是换流电路中的电感。

当合上开关  $S$  后，一个软恢复二极管的电流和电压曲线如图 1.20 所示。图 1.20 采用了一个具有软恢复特性的二极管做为例子。

图 1.21 则显示了两个具有刚性开关特性的二极管的电流曲线。首先，参考图 1.20，我们来解释其所采用的定义。

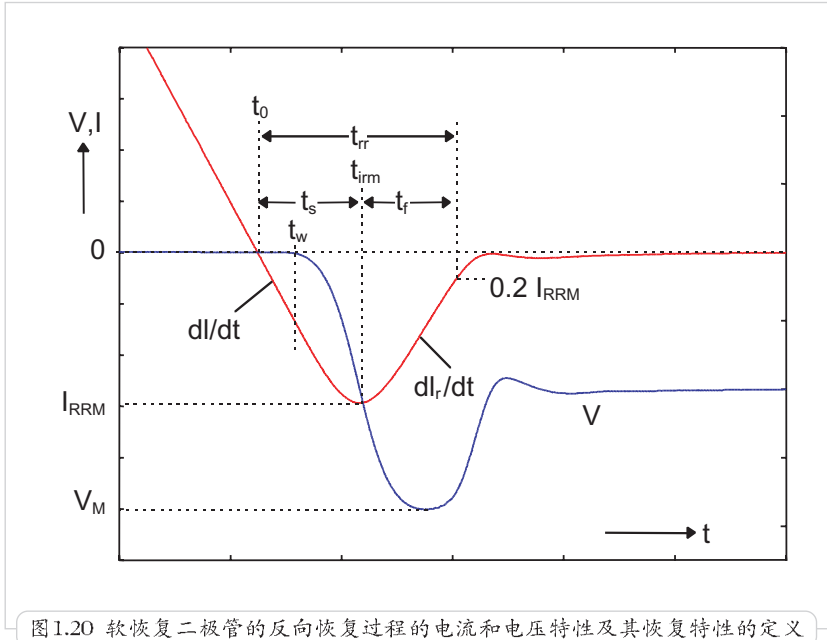


图 1.20 软恢复二极管的反向恢复过程的电流和电压特性及其恢复特性的定义

换流速度  $dI/dt$  是由电压和电感来决定的：

$$-\frac{dI}{dt} = \frac{V_K}{L_K} \quad (1.1)$$

在时刻  $t_0$  时，电流到达零点。在时刻  $t_w$  时，二极管开始承受反向电压。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。它的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，我们则称之为软性开关特性。

反向恢复时间  $t_{rr}$  被定义为，从  $t_0$  开始到电流衰减至  $I_{RRM}$  的 20% 时结束。如果将  $t_{rr}$  细分为  $t_f$  和  $t_s$ ，如图 1.20 所示，则我们可以得到一个用来定性描述二极管的反向恢复特性的系数：

$$\text{软性系数 } s = \frac{t_f}{t_s} \quad (1.2)$$

显然这个定义并不是十分恰当。例如根据这个定义，图 1.21a 所表示的特性会被称做刚性的，但图 1.21b 所表示的特性则会被称做软性的。实际上，尽管图 1.21b 中的  $t_f$  大于  $t_s$ ，但该曲线有一个很陡的刚性关断部分。

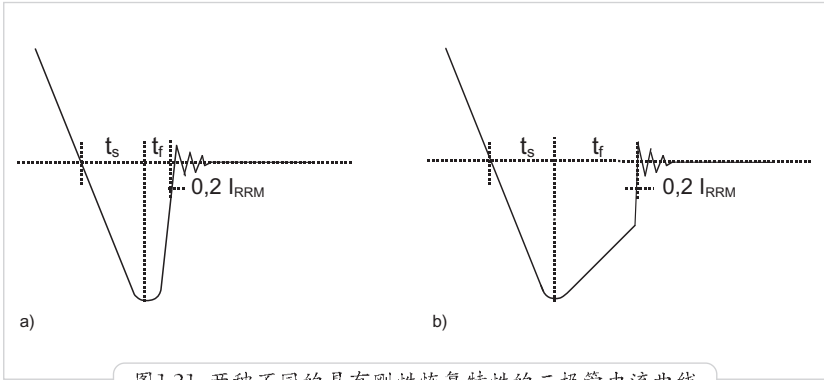


图1.21 两种不同的具有刚性恢复特性的二极管电流曲线

因此，下面的定义会更好一些：

$$\text{软性系数 } S = \frac{\left| -\frac{dI}{dt} \Big|_{I=0} \right|}{\left( \frac{dI}{dt} \right)_{\max}} \tag{1.3}$$

在这里，必须在电流小于给定值的 10% 和 200% 处进行测量。根据这一定义，如图 1.21b 所示的特性也会被归入刚性一类。

另外，这一定义还考虑到了小电流对反向恢复特性有着更大的危险性。

根据感应定律， $dI_r/dt$  决定了所出现的过电压

$$V_{\text{ind}} = -L_K \cdot \left( \frac{dI_r}{dt} \right)_{\max} \tag{1.4}$$

由此，人们也可以将在一定测量条件下出现的过电压或电压峰值  $V_M = V_K + V_{\text{ind}}$  作为衡量恢复特性的尺度。此时， $V_K$  和测量条件下的  $dI/dt$  需一并给出。

然而这个定义仍嫌不够好，因为它忽略了以下参数的作用：

1. 温度：大多数情况下，温度升高对恢复特性有不利的影响。当然某些快速二极管在室温或以下反而具有较差的恢复特性。
2. 外加电压：电压越高，则恢复特性越差。
3. 换流电流的上升率  $dI/dt$ 。对于不同制造商的二极管来说，其恢复特性对  $dI/dt$  依赖性的差别很大。其中某些型号的二极管随  $dI/dt$  的增加而变软，另外一些则变硬。

所有这些因素的影响很难用一个简单的、定量的定义来概括。图 1.19 所示的电路以及由式 (1.2) 或 (1.3) 所得到的定义只能用来解释单个的制造参数的影响。对于反向恢复特性的完整判断应该在接近于实际应用的条件下通过测量获得。图 1.22 显示了一个准实用的测量线路。

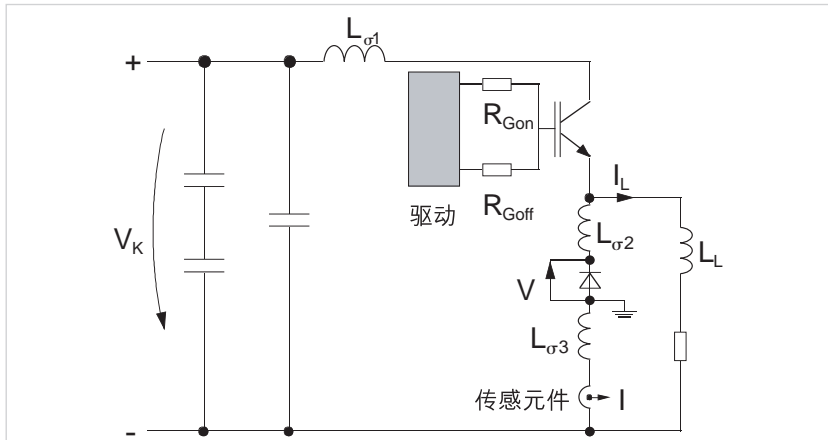


图1.22 用于降压变换器中测量反向恢复特性的准实用斩波电路(双脉冲运行)

换流速度  $di/dt$  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 和二极管之间的导线上存在寄生电感。图 1.23 显示了应用双脉冲情况下 IGBT 的驱动信号和 IGBT 以及二极管的电流曲线。当关断 IGBT 时，负载电流由 IGBT 切换至二极管，从而展示出二极管在该时期的恢复特性。而在开通 IGBT 时，IGBT 也接续续流二极管的反向恢复电流。图 1.24 用较高的时间分辨率显示了一个软恢复特性二极管的这一过程。图 1.24a 表示了 IGBT 的电流和电压曲线以及开通过程中的损耗，而图 1.24b 则显示了二极管的电流和电压曲线以及损耗。

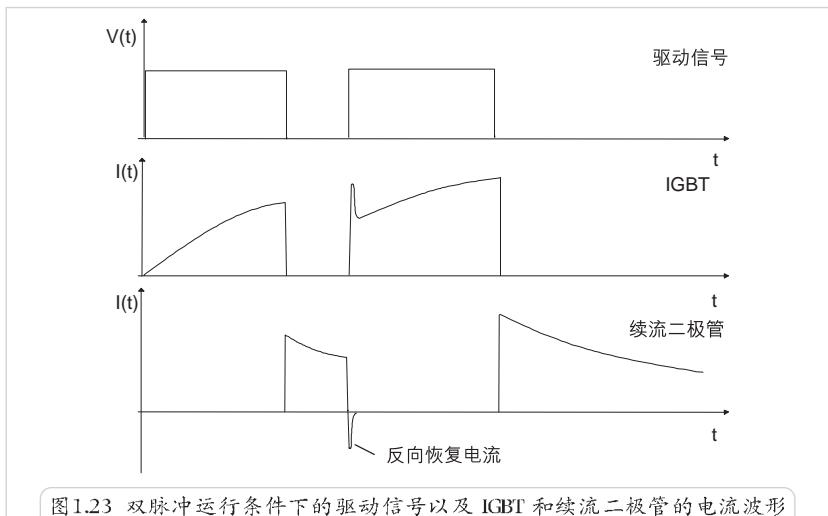


图1.23 双脉冲运行条件下的驱动信号以及 IGBT 和续流二极管的电流波形  
(电路见图 1.22)

当 IGBT 接续二极管的反向峰值电流时，它的电压还处于直流母线电压的水平上（在图 1.24a 中为 1200V）。此刻 IGBT 的开通损耗为最大值。

二极管的反向恢复特性可以进一步细分为两个部分：

1. 第一部分为电流上升至反向恢复电流的峰值阶段以及其后的按照  $dI_r/dt$  速率的下降过程。对于一个软恢复二极管来说， $dI_r/dt$  和  $dI/dt$  的值大致相当，而反向恢复电流的峰值  $I_{RRM}$  对开关元件的冲击则最大。

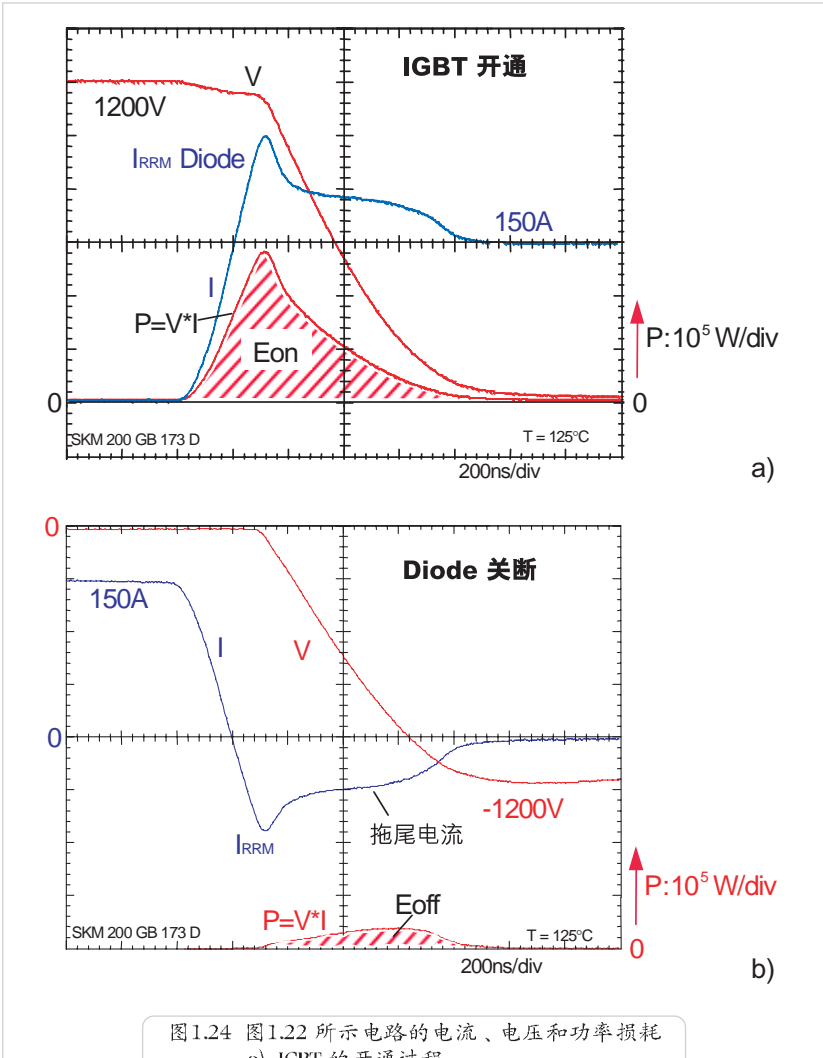


图 1.24 图 1.22 所示电路的电流、电压和功率损耗  
a) IGBT 的开通过程  
b) 续流二极管的关断过程

2. 第二部分为拖尾电流部分,即反向恢复电流缓慢衰减至零的过程。在此过程中,  $T_{rr}$  不再具有明显的意义。因为此时二极管上已具有电压,所以二极管内损耗的主要部分产生于拖尾过程。对于一个刚性的、不含拖尾电流的二极管来说,尽管它的开关损耗很低,可在实际中还是无法被应用。对于 IGBT 来说,因为它的电压在拖尾阶段已经降至很低,所以拖尾电流对 IGBT 的损耗影响并不大。

在实际应用中,与 IGBT 的开关损耗相比,二极管的损耗要低得多(在图 1.24b 中,采用了与图 1.24a 中 IGBT 损耗相同的尺度来显示二极管的损耗)。因此,若要使 IGBT 和二极管的损耗之和保持较小,则应尽量减小反向恢复电流的峰值,同时将大部分存储电荷保留至拖尾阶段再释放。这一设计理念的实现由二极管所能散发的最大开关损耗所限定。

所以就一个二极管对整体损耗的影响来说,它最重要的参数就是它的反向峰值恢复电流  $I_{RRM}$ 。它应当尽可能地小。

让我们来看一个典型的电力电子线路,例如置于一个模块内的直流斩波器。它的寄生电感  $L_{\sigma ges}$  约在 40nH 左右,起着降低过电压的作用。因为理想的开关并不存在,所以在二极管反向恢复期间,IGBT 的电压会有所降落。因此实际测得的电压值为

$$-V(t) = -V_K - L_{\sigma ges} \cdot \frac{dI_R}{dt} + V_{CE}(t) \quad (1.5)$$

在这里,  $V_{CE}(t)$  是加在 IGBT 上电压的瞬时值。对于一个典型的软恢复二极管来说,在电流上升速率不太高(至  $1500A/\mu s$ )以及寄生电感为最小的情况下,电压  $V(t)$  在任一时刻都小于  $V_K$ ,不存在电压尖峰。

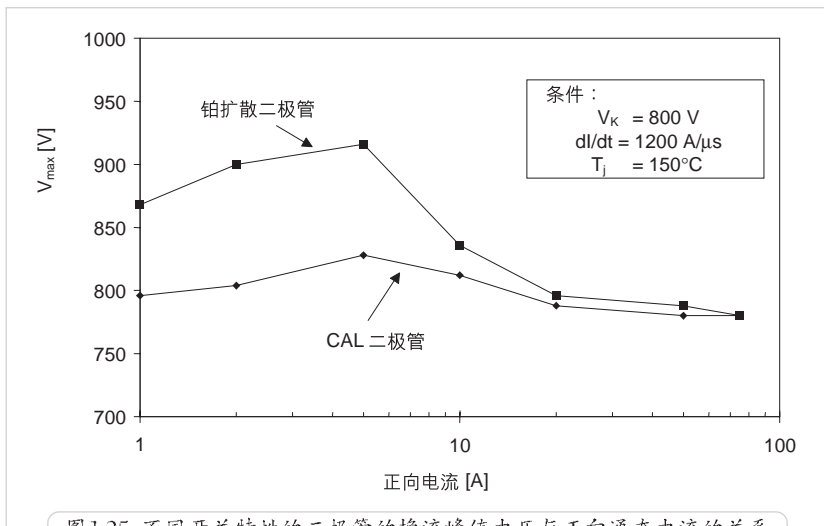


图 1.25 不同开关特性的二极管的换流峰值电压与正向通态电流的关系

图 1.25 显示了用这个方法描述恢复特性的一个例子。在图中所示的条件下,让我们来比较两种二极管的过电压。其中一种的载流子寿命是用铂扩散的工艺来调节,通过降低 p 发射极的效率来获得软恢复特性;另一种是 CAL 二极管。在额定电流时(75A),铂扩散的二极管同 CAL 二极管具有相同的软特性。但在电流较小时,由于前者的开关特性过于刚性,因而产生了过电压,其最大值在 10% 的额定电流时可能会大于 100V。在电流更小时,由于所应用的 IGBT 的开关更慢,过电压也再度减小。CAL 二极管则在所有这些情况下均不会出现明显的过电压。为了叙述的方便,我们在本书的下面章节中采用如下的定义:

如果采用一个准实用的电路,在所有接近实用的条件下,二极管的反向恢复电流都不会引起过电压,我们则称该二极管具有软恢复特性。

有关的条件是指所有的电流区域、所有在应用中可能出现的换流速率、以及从  $-50^{\circ}\text{C}$  到  $+150^{\circ}\text{C}$  的温度区域。只有在换流速率很高(大于  $6000\text{A}/\mu\text{s}$ )或寄生电感很高(大于  $50\text{nH}$ )的条件下,这一定义才不再适用。此时,即使是软恢复二极管也可能会引起取决于电路的过电压尖峰。

对于大于 100V 的续流二极管来说,在软开关特性之外,它的动态坚固性也具有同等重要的意义。从图 1.24b 中可以看到,二极管几乎可以承受全部的直流母线电压,而它同时还引导着一个相当大的尾电流。如果 IGBT 的开关过程很陡(栅极电阻很小),则反向恢复电流和拖尾电流都会增加,同时 IGBT 的电压会下降得更快,并以较高的  $dV/dt$  切换到二极管上。这时,承受电流的载流子(空穴)密度可能会高于原始扩散浓度,从而在半导体内形成不可避免的擎住现象,而此时的电压则远远低于其截止电压(动态擎住)。为描述这一运行状态,我们引入续流二极管的动态坚固性这个概念。动态坚固性的定义如下:

动态坚固性表征了二极管在高直流母线电压下承受高换流速率的能力。

如果一个二极管的动态坚固性欠佳,则制造商会限制 IGBT 的换流速率,或限制最大的二极管反向恢复电流峰值。这实际意味着接受较高的开关损耗。