

# 超快恢复二极管在充电桩中的应用

得益于电动汽车的迅速普及，充电桩得以快速发展。2020年，充电桩成了“新基建”的重点建设方向。

作者：瑞能半导体应用工程师孙建春，应用经理胡爱斌

## 引言：

根据工信部《新能源汽车产业发展规划（2021-2035年征求意见稿）》预测：未来五年充电桩的数量将由2020年的175万台增长到480万台，直流充电桩的占比也由45%提升到55%<sup>[1]</sup>。为了有效降低充电时间，充电桩的充电功率也有显著提升，特斯拉V3充电桩的峰值充电功率已达250KW<sup>[2]</sup>。功率半导体在大功率充电桩应用中起着举足轻重的地位。在直流充电桩应用拓扑中，快恢复二极管是很受欢迎的功率器件，本文将就快恢复二极管在充电桩的应用进行研究，研究结果可为相关应用设计人员选择合适的快恢复二极管提供参考。

后面部分是DC/DC电路。PFC电路是充电桩的第一级电源转换电路，它将电网的380-415V交流电转换为800V左右的稳定的直流电。维也纳整流器（如图1所示）工作在连续工作模式（CCM），固有的三电平开关可以降低功率器件的电压应力也可以降低系统的总谐波失真，是目前最受欢迎的拓扑。DC/DC电路是第二级电源转换电路，它把高压直流母线电压转换为适合电池充电的直流电，以便为电池充电。为了提升功率密度、提高效率，谐振电路广泛应用于高频电源转换。LLC电路与移相全桥（PSFB）电路是最常用的DC/DC拓扑，LLC电路（图2）不但可以实现零电压开通（ZVS），也可以实现零电流关断（ZCS），具有更高的效率，在直流充电桩中使用的更广泛。

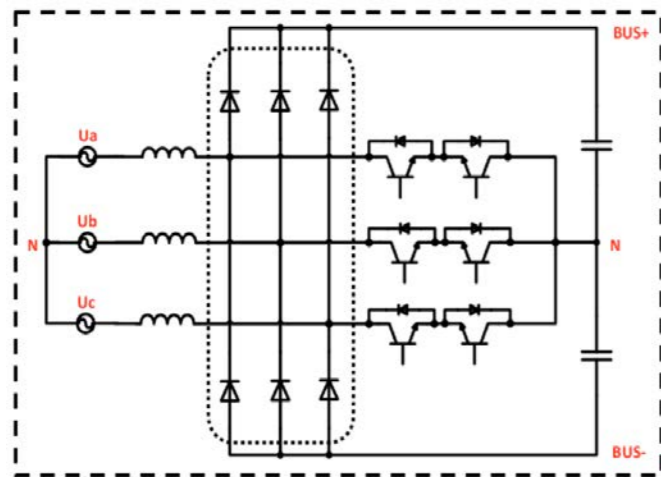


图1：维也纳PFC电路

## 直流充电桩拓扑：

直流充电桩把交流市电转化为直流高压电源，主要由两部分组成。前面部分是直接连接电网的AC/DC组成的PFC电路，

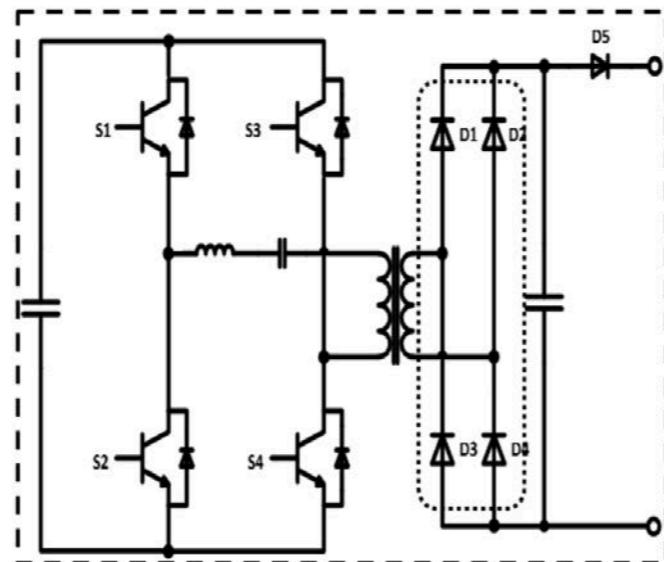


图2：DC/DC电路

## 二极管在维也纳PFC中的应用

大的充电桩是由多个小功率模块并联而成的，目前单一模块的功率已经达到40KW，维也纳PFC的开关频率也达到50K左右。在维也纳PFC中6颗二极管开关模式相同，要评估全部二极管的损耗，只需要计算一颗就可以。我们以图1中Ua工作于正半周期为例来分析二极管的损耗。当开关管（IGBT/MOS）导通时，BOOST电感储存能量，当开关管关断时，二极管开通，电感释放能量，完成升压过程。整个BOOST工作于CCM模式，二极管的电流与电压波形如图3所示。二极管的功率损耗主要分为两部分：导通损耗和二极管的导通压降成正比；关断损耗和二极管的反向恢复有关。在反向恢复过程中，从二极管中抽取的电荷越多，其关断损耗越大。反向恢复的电荷会流入到开关管中，从而增大其开通损耗。二极管的导通损耗计算公式如式1所示，关断损耗如式2所示，由于二极管的反向恢复导致的开关管（以MOSFET为例）的损耗如式3所示，具体公式推导过程可参考文献<sup>[3]</sup>。

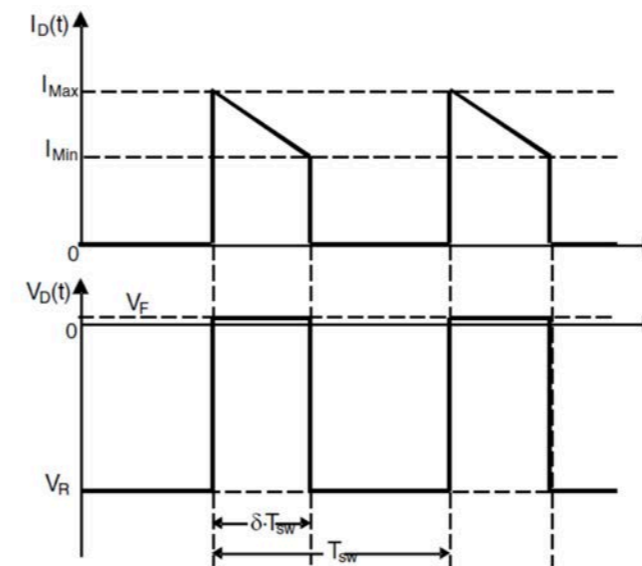


图3：二极管电流与电压波形

$$\frac{V_o^2}{V_i \cdot R_L} \cdot V_f \cdot \left(1 - \frac{V_i}{V_o}\right) \cdot T \quad \text{式1}$$

$$V_o \cdot Q_{rr} \quad \text{式2}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{V_o^4}{V_i \cdot R_L} \cdot \frac{C_{gd}}{I_{g\uparrow}} \quad \text{式3}$$

其中  $V_i$  是单相的交流输入电压， $V_o$  是一半的母线电压， $V_f$  是二极管的导通压降， $C_{gd}$  是MOSFET门极与漏极电容， $I_{g\uparrow}$  是门极电容充电电流， $R_L$  是等效负载， $Q_{rr}$  是二极管反向恢复时存储的电荷， $T$  是开关周期。

## 二极管在DC/DC中的应用

在LLC（或者交错式LLC）变换电路中，变换器的增益是开关桥的增益、谐振回路增益和变压器匝数的函数。输出电压通过改变开关频率实现调节。LLC变换器有三个工作区域：工作频率低于谐振频率、工作频率高于谐振频率和工作频率处于谐振频率。当LLC变换器的输入电压较低时，需要升压电路，工作频率低于谐振频率，开关周期长于谐振周期，当谐振半周期结束时，电感电流达到磁化电流，二次侧整流二极管可以实现ZCS，但是循环能量增加了一次侧的导通损耗。当LLC变换器的输入电压较高时，需要降压电路，工作频率高于谐振频率，开关损耗增加，二次侧的整流二极管关断时仍有电流（如图4，只是示意，时间不成比例），只能硬换相，导致二极管关断损耗增加，但是循环能量减小，导通损耗减小。当LLC变换器工作于接近谐振频率时，可以实现ZVS开通和ZCS关断，LLC变换器性能最佳。

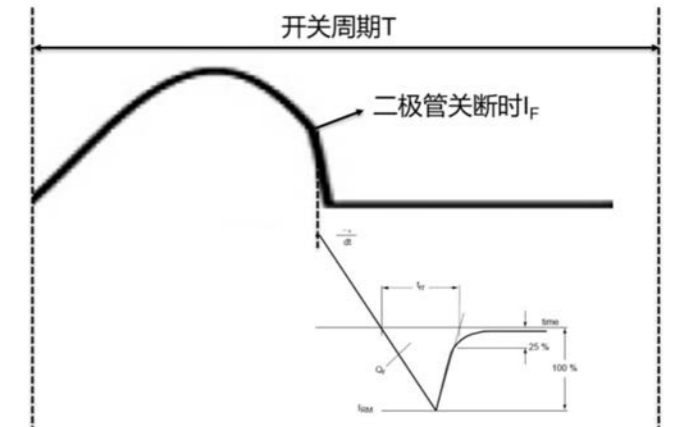


图4：LLC二极管电流（大于谐振频率）

## 快恢复二极管的特性参数

下面以充电桩中广泛使用的瑞能1200V二极管来说明快恢复二极管的参数特性。

在快恢复二极管应用中影响温升的主要是  $V_f$  和  $Q_{rr}$ 。  $V_f$  主要受  $I_f$  和温度影响，一般硅二极管的  $V_f$  曲线如图5所示，瑞能1200V系列最大单体电流可达100A，可以适用于大功率应用。

反向恢复主要受二极管关断时的电流大小、 $di/dt$ 、反向电压和结温影响。二极管在不同的关断电流下反向恢复电流曲线如图6所示，随着  $I_f$  电流的增大， $I_{RM}$ 、 $Q_{rr}$  先是显著增大，然后趋缓， $t_{rr}$  缓慢增大（图7）。二极管在不同的  $di/dt$  下的反向恢复电流如图8所示，随着  $di/dt$  的提高，它的反向恢复时间会减小， $I_{RM}$ 、 $Q_{rr}$  明显增大（图9）。二极管在不同的反向电压下的反向恢复电流如图10所示，随着反向电压的增大  $I_{RM}$  先是迅速增大，

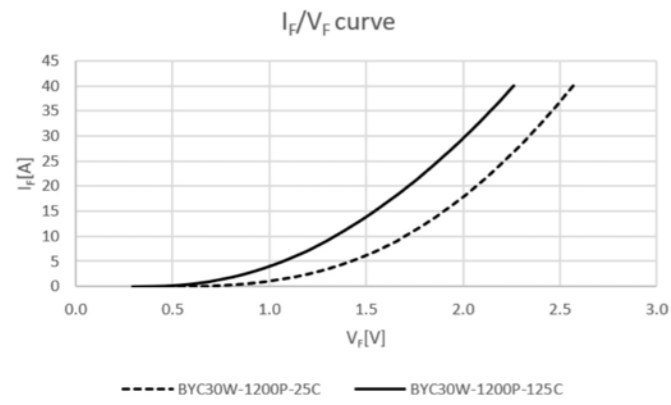


图 5: 快恢复二极管  $I_F/V_F$  曲线

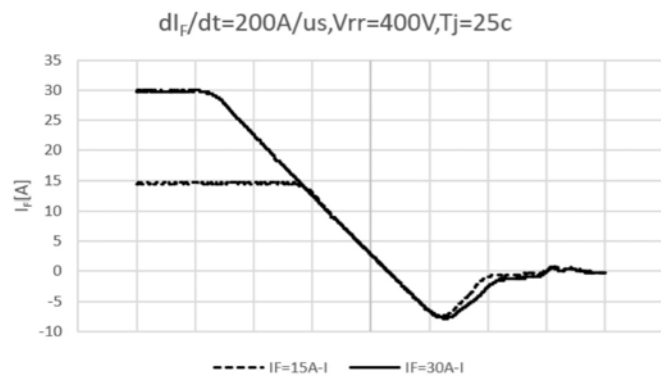


图 6: 不同  $I_F$  下的反向恢复电流

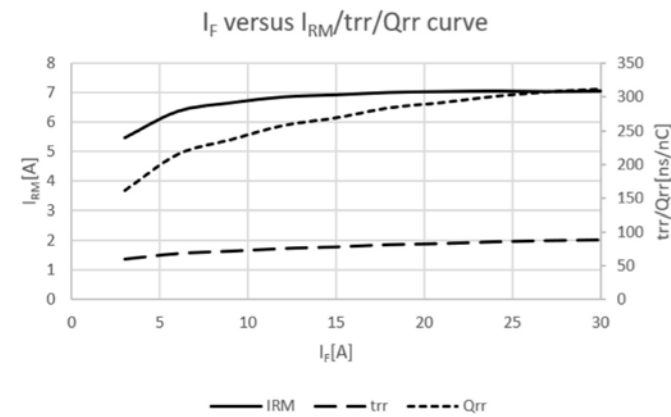


图 7: 不同  $I_F$  下的反向恢复数据

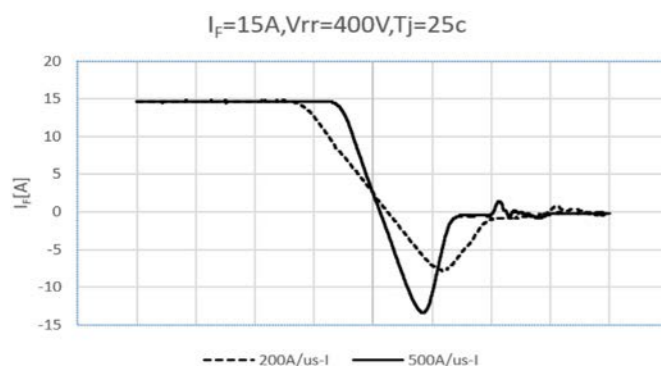


图 8: 不同  $di/dt$  下的反向恢复电流

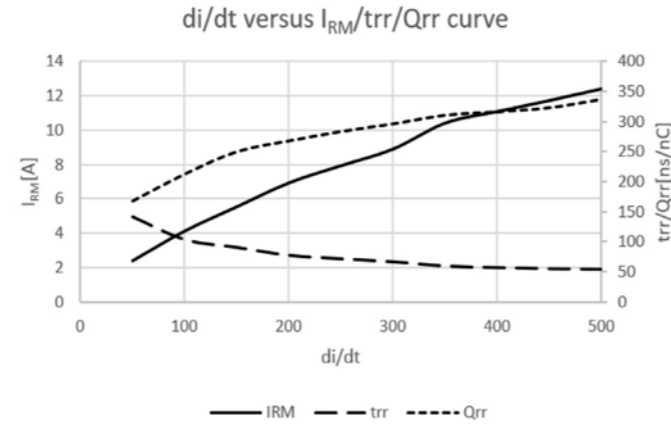


图 9: 不同  $di/dt$  下的反向恢复数据

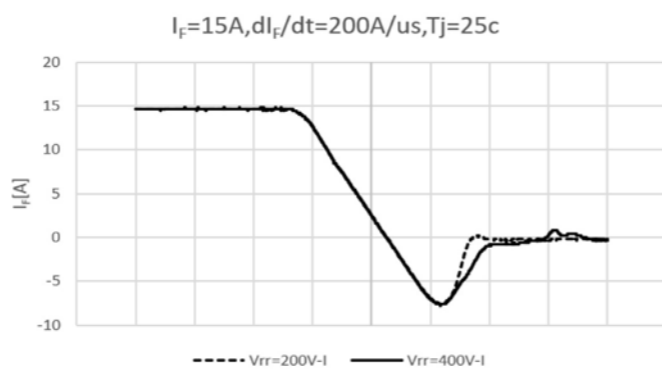


图 10: 不同  $V_{rr}$  下的反向恢复电流

然后保持恒定,  $trr/Q_{rr}$  随着反向电压的增大, 缓慢增大。

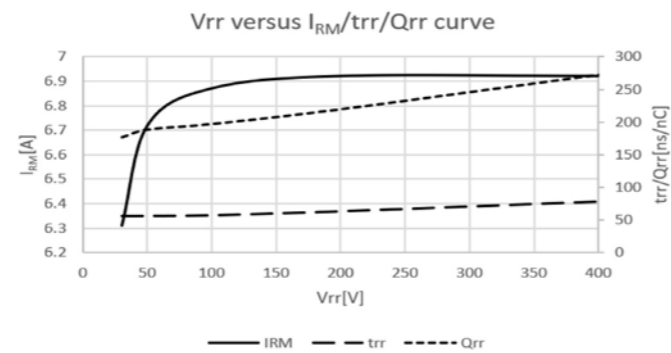


图 11: 不同  $V_{rr}$  下的反向恢复数据

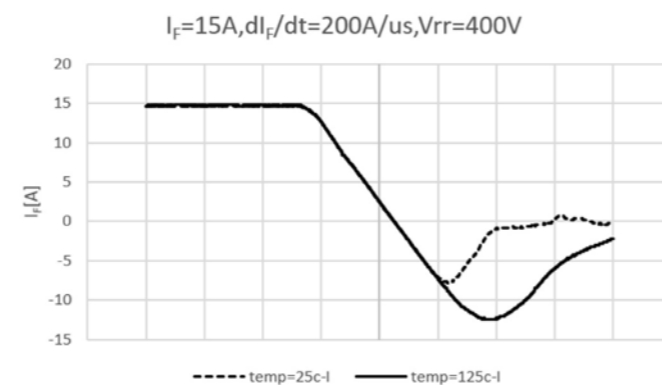


图 12: 不同温度下的反向恢复电流

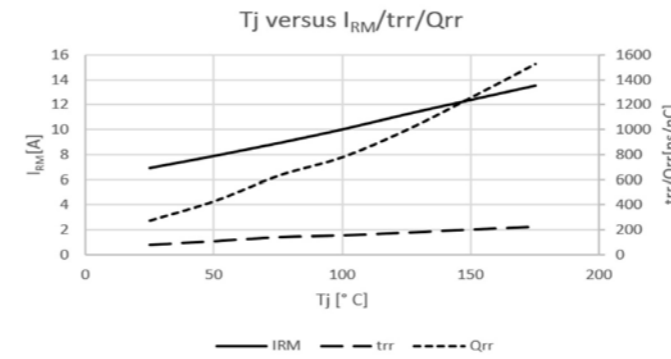


图 13: 不同温度下的反向恢复数据

二极管的温升对反向恢复影响最大, 图 12 是二极管在不同的结温下的反向恢复电流图, 随着温度升高  $I_{RM}$ ,  $Q_{rr}$  显著增大,  $t_{rr}$  缓慢增大 (图 13), 系统电磁环境变差, 导致 EMC 出现问题。

### 快恢复二极管的可靠性

在二极管应用中影响可靠性的主要是  $I_{FSM}$  和  $E_{AS}$ 。  $I_{FSM}$  是二极管所允许的最大非重复正弦半波浪涌电流;  $E_{AS}$  是二极管所能承受的单次雪崩能量。在实际应用中, 上电瞬间, 如果电路中有较大的电容, 会产生很大的浪涌电流, 这就需要快恢复二极管有较大的浪涌耐受能力 (或者并联 bypass 二极管)。厂商在数据表中都会给出 10ms 正弦波的正向浪涌电流, 用户可换算成  $I^2t$  来评估



图 14:  $I_{FSM}$  失效开封图

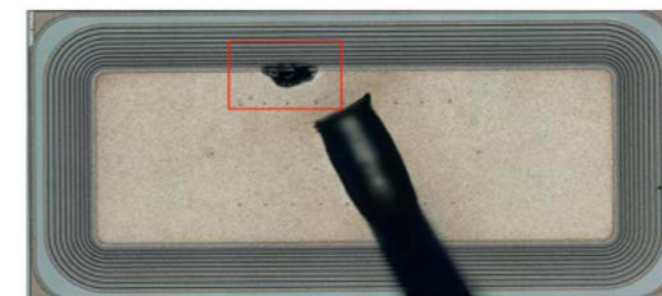


图 15:  $E_{AS}$  失效开封图

是否满足实际应用需求。  $I_{FSM}$  是负温度系数, 随着温度的上升, 二极管耐浪涌电流能力下降。浪涌失效是大电流失效, 整个有源区往往都会融化 (图 14)。在感性负载中, 导致失效效率较高的往往是较差的  $E_{AS}$ 。  $E_{AS}$  能力与二极管的耐压有关, 并且随着温度的升高略微增大。由于边缘处电场强度较大, 雪崩失效中边缘失效的现象较多 (图 15)。

### 市场上不同二极管的功能表现:

图 16 和图 17 是市场上比较主流的两颗 1200V/30A 快恢复二极管的  $V_F$  以及效率对比数据。从中可以看出两者  $V_F$  相近, 效率差别也很小, 基本在同一水平。

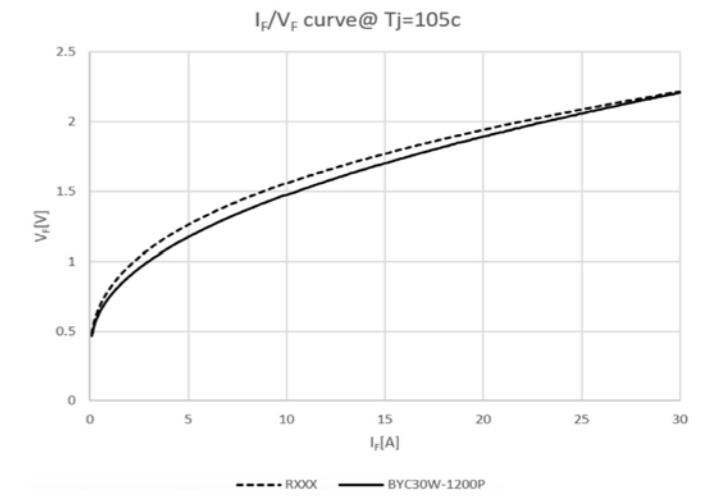


图 16: 1200V/30A 二极管  $V_F$  对比

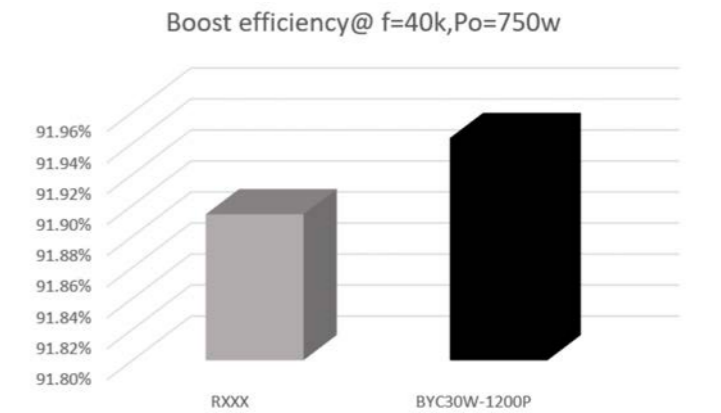


图 17: 1200V/30A 二极管效率对比

### 总结:

快恢复二极管以其优越的性价比在充电桩中广泛使用, 在使用时除了做好  $V_F/Q_{rr}$  等影响效率的参数外, 还要注重  $I_{FSM}$  和  $E_{AS}$  等器件耐受性参数, 以降低失效率。

### 参考文献:

- [1] 中皓股份, 新能源汽车发展势头强劲! 充电模块未来十年市场规模预计达三千亿, <http://www.zhonghaokjgf.com/>
- [2] 车家号, 特斯拉开始在中国部署 V3 超充桩 最高充电功率 250kW, <https://chejiahao.autohome.com.cn>, 2020-5-29
- [3] Nick Koper, Application specification diode design, Netherlands.