

IGBT 的过电流及其保护

爱帕克公司高级顾问 西安交大教授 秦祖荫

在 IGBT 应用开发中，防止其过电流损坏是最令人关注的问题。而用 IGBT 构成的逆变器又往往是电压型的，一旦发生上下桥臂直通短路，直流滤波电容放电形成的短路电流迅即上升，极易损坏 IGBT。此外，模块内部有多条铝丝作为主电流的引线，当短路电流峰值很高时，这些铝丝常常先于芯片被烧断，于是断口处产生难以熄灭的直流电弧烧毁芯片，同时，其周围的绝缘材料受高温而迅速气化，形成压力而使模块炸裂。

1. 常见的过电流产生原因

电压型谐振式逆变器(如图 1)工作中所发生的过流或短路现象具有典型性，以此为例叙述。

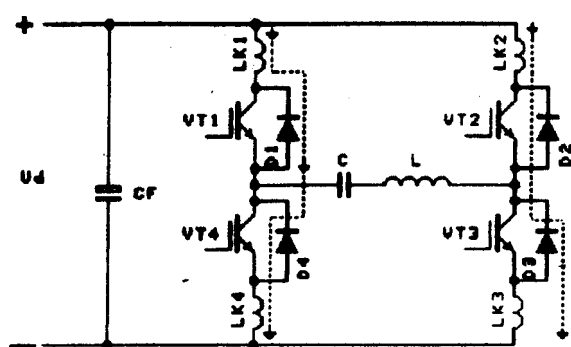


图 1 电压型谐振式逆变器

图 1 电路中当 1 和 3 桥臂导电时，负载电流(正弦波)的正半波从 VT1 和 VT3 流过，负半波则从反并联二极管 D1 和 D3 流通。换相时，D1 和 D3 的反向恢复电流一方面流过 VT4 和 VT2(如图中虚线所示)，造成 VT4 和 VT2 瞬时过流(电流波形过冲)，另一方面，反向恢复电流衰减的 di/dt 极高，它的主电路导线的寄生电感上会产生很

高的 $Lk di/dt$ ，表现在 VT1(和 VT3)两端电压波形的上升沿有很高的过冲尖峰。随后通常会振荡衰减。这无疑增大了 IGBT 承受的 dv/dt ，并且，这种过冲和 dv/dt 会在振荡衰减过程中连续多次出现，由此，会引发下述的过流或短路。

众所周知，IGBT 存在密勒电容 C_{cg} 和输入电容 C_{ge} ，IGBT 两端的电压过冲会通过 C_{cg} 耦合栅极，使栅极电压瞬时升高，当然，因为栅极负偏压和输入电容 C_{ge} ，这时栅极电压所达到的高度比集电极的过冲要低的多，但它还是可能超过阈值而使本应截止的管子导通，因此上下桥臂直通而过电流，如果由此引起的门极电压足以使管子进入饱和，则已不是直通而是短路了。在集电极电压过冲后的振荡衰减过程中这种过流或短路也会连续多次出题，实验证明这一现象确实存在。

2. 避免上述短路的方法

在上述引起过流或短路的诸多原因中，最根本的因素是主电路寄生电感，所以解决办法首先应减小主电路导线的寄生电感。

若以图 1 的水平中心线为，将电路的下半部折上去，使所有上下对称的主电路导线靠近，则所有邻近的两条导线电流都是等值而反向的，导线周围的磁通被相互抵消，其寄生电感也就近于零。然而：对于功率较大的装置；主电路导线很粗，用此方法也难减小寄生电感，因此可用两条宽而薄的母排，中间夹一层绝缘材料，相互紧叠在一起，构成低感母线，这种结构实际上已经应用于产品中，也有专门的生产厂家为装置配套制作无感母线。

用以上办法降低电压过冲和 dv/dt 意义不仅为了避免过流或短路，还在于减轻 RC 吸收的负担，减小其中 R 的功耗，这也是令人关注的一大问题。

适当提高栅极负偏压可以有效防止由上述 $Lk/di/dt$ 引起的误导通。

栅极串联电阻的阻值对阻尼 IGBT 集电极电压过冲后的振荡有影响，适当的阻值可以避免发生连续多次过流短路。但是，栅极电阻的阻值在顾及阻尼的同时，也应顾及栅极触发脉冲上升陡度，否则，IGBT 的开通损耗(温升)将会增大。

3. IGBT 的短路特性

美国 IR 公司的资料用两句话来概括 IGBT 短路特性：

通常 IGBT 的饱和压降越大，允许的短路时间越长，如图 2，

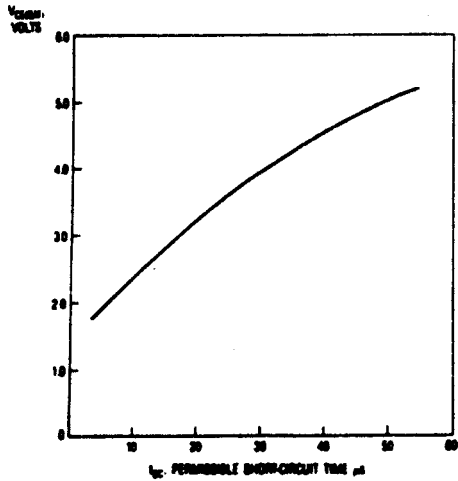


图 2 IGBT 的短路时间和饱和压降 $V_{CE(SAT)}$ 的典型关系

由图可知，饱和压降 $< 2V$ 的 IGBT，其允许的短路时间 $\ll 5\mu s$ ，饱和压降 $4-5V$ 的 IGBT，可允许 $30\mu s$ 短路时间。

短路电流越大，允许的短路时间越短。用 $100A$ 的 IGBT 作短路试验表明，可以经受 $1000A$ 的历时 $< 3\mu s$ 。

4. 短路保护

依据上述短路特性，可靠的短路保护应具备下列条件：

(1) 首先应限制短路电流峰值，以延长允许短路时间，为保护动作赢得时间。

(2) 保护切断短路电流应实施软关断。如果短路电流下降的 di/dt 太大，IGBT 的集电极电压极易产生很高的电压过冲和 dv/dt ，造成再次短路；过高的电压过冲还可能击穿 IGBT，从击穿点流过短路电流，保护已失效。

经试验表明 IR 公司推荐的短路保护是一种比较可靠的方案。这种保护的流程如图 3。

它首先检测 IGBT 通态压降，例如， $100A$ IGBT 正常通态压降为 $2.5V$ 至 $2.7V$ ，过流压降额定在 $4V$ ，则当 IGBT 通态压降达到 $4V$ 时，保护环节立即将栅压降至 $8V$ ，于是，IGBT 从正常工作的饱和状态转入放大区工作，其通态电阻增大，因此短路电流峰值受到抑制，与此同时，其放大区工作的管压降，及其导通损耗也大大增加，这种状况近乎绝热过程，至多只允许维持 $5\mu s$ ，所以保护设定在 $4\mu s$ 内连续检测管压降，若在此期间管压降恢复到正常值，则栅压也同时恢复正常，一切照常继续，若在 $4\mu s$ 后管压降仍未恢复，这表示短路依旧存在，于是栅压在 $4\mu s$ 之后缓降至阈值以下，或降至零，使集电极电流也缓降至零。

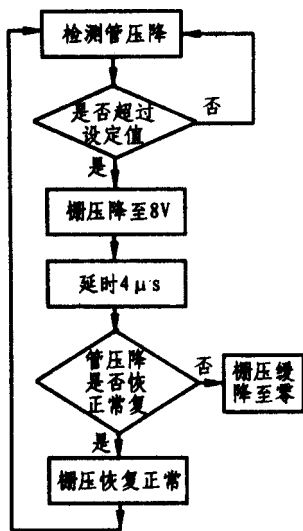


图 3

减小保护动作管压降的设定值，则短路电流被的峰值也相应减低，不仅使模块的损坏率降低，更使模块爆裂的可能性减少。

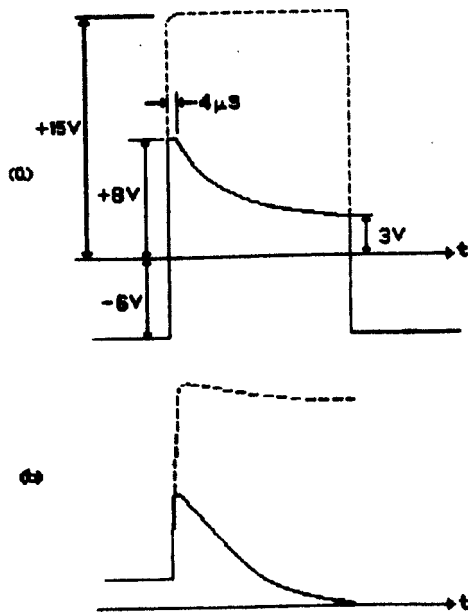


图 4 波形图

图 4(a)显示了 IGBT 正常工作的栅极电压波形,如图中虚线所示,脉冲幅值为 15V;以及保护动作时的栅极电压波形,如图中实线所示,是短路发生时栅压降至 8V,延时 4 μ s,此后缓降至低于门槛值,直至脉冲结束,栅压负偏 6V。

图 4(b)是短路电流波形,其中用虚线表示的是无短路保护时的预期短路电流波形,实线波形是降栅压短路保护的电流波形。显然,其短路电流幅值受到限制。

图 5 是无降栅压过程的短路保护栅极电压波形,当短路发生时,栅压直接从 +15V 缓降至负偏压值,这种保护的缺点是:

(1)不能像图 4 那样限制短路电流幅值;

(2)因为其栅压下降的起点高(+15V),终点低(负偏压值),所以栅压的下降不可能像图 4 那样缓慢,从图 5 可知,栅压从 +15V 降至门槛值(约 5V)的时间为 $<1\mu$ s,因此,IGBT 的集电极电流从峰值下降的 di/dt 很大,由此引起的 IGBT 集电极电压上升沿过冲 难免引起 IGBT 击穿,或过高 dv/dt 使 IGBT 误导通而形成上下桥臂直通短路。

5. 限制反并联二极管反向恢复引起的 IGBT 过电流

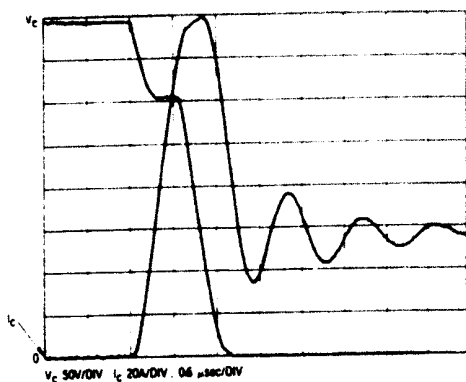


图 6 当 $V_{g(on)}=15V$ (IRGPC40F),开通时的集电极电压和电流

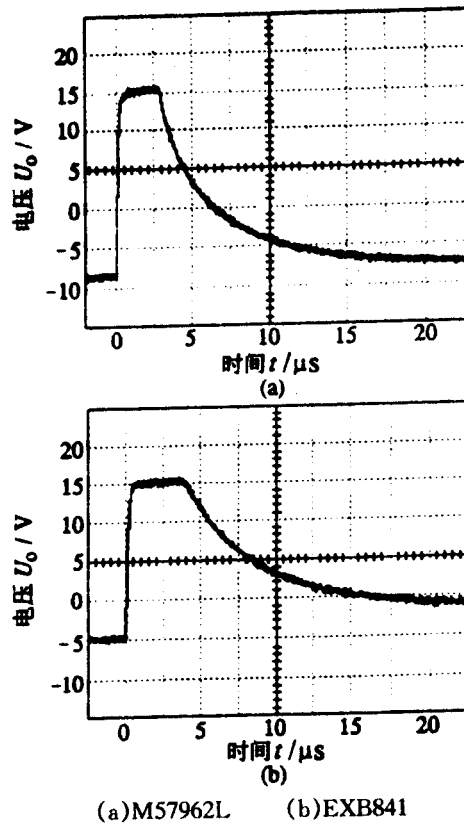


图 5 两种 IGBT 栅极驱动模块短路保护情况下的输出波形

图 5 是无降栅压过程的短路保护栅极电压波形,当短路发生时,栅压直接从 +15V 缓降至负偏压值,这种保护的缺点是:

图 7 当 $V_{g(on)}=10V$ (IRTPC40F),开通时的集电极电压和电流

图 6 是反并联二极管引起的 IGBT 电流过冲形，限制电流过冲的一种方法是反并联二极管反向恢复的最初 1—2 μ s 内将栅极电压限制在 10V，以增大 IGBT 的导通电阻来限制二极管反向恢复电流的幅值，此后，再将栅极电压上升到 +15V。图 7 即是 IGBT 电流过冲受到限制的波形。然而，这种方法带来的副作用是反并联二极管的反向恢复时间拖长，也即 IGBT 的开通时间和开通损耗也都增加。

参考文献

1. G. Castino, A. Dubashi, S. Clemente Proteting Designer's Manual IGBT Designer's Manual International Rectifier.
2. 王志 IGBT 在石油感应加热电源中的应用 电力电子技术 1999 第 2 期