

大功率逆变器组合式 IGBT 过流保护方案

现代功率变换器均采用大功率半导体开关器件，其所能承受的电流过载能力相对于旋转变流装置要低得多，如 IGBT 一般只能承受几十微秒甚至几微秒的过载电流，一旦发生短路就要求保护电路能在尽可能短的时间内关断开关器件，切断短路电流，使开关器件不致于因过流而损坏。但是，在短路情况下迅速关断开关器件，将导致负载电流下降过快而产生过大的 di/dt 。由于引线电感和漏感的存在，过大的 di/dt 将产生很高的过电压，使开关器件面临过压击穿的危险。对于 IGBT，过高的电压又可能导致器件内部产生锁定效应，从而使器件失控而损坏。因此，必须综合考虑和设计功率变换器的短路保护电路，以确保电流保护的有效性。

1. IGBT 的失效原因和保护方法

引起 IGBT 失效的原因有：

①过热损坏。集电极电流过大易引起瞬时过热，如器件散热不良会使器件持续过热，当温度超过允许值时 IGBT 器件将损坏。如果器件持续工作在外部负载短路状态下，大电流产生的功耗将引起温升，由于芯片的热容量小，其温度迅速上升。若芯片温度超过硅本征温度（约 250°C ），器件将失去阻断能力，栅极控制就无法保护，从而导致 IGBT 失效。实际运行时，一般最高允许 IGBT 器件的工作温度为 130 度左右。

②超出关断安全工作区引起锁定效应而损坏。锁定效应分静态锁定效应和动态锁定效应，IGBT 为 PNP 四层结构，体内存在一个寄生晶闸管，在 NPN 晶体管的基极与发射极之间并有一个体区扩展电阻 R_s ，P 型体内的横向空穴电流在 R_s 上会产生一定的电压降，对 NPN 基极来说相当于一个正向偏置电压。在规定的集电极电流范围内，这个正向偏置电压不大，对 NPN 晶体管不起任何作用。当集电极电流增大到一定程度时，该正向电压足以使 NPN 晶体管开通，进而使 NPN 和 PNP 晶体管处于饱和状态。于是，寄生晶闸管导通，栅极失去控制作用，形成自锁现象，这就是所谓的静态锁定效应。IGBT 发生锁定效应后，集电极电流增大，产生过高功耗，导致器件失效。动态锁定效应主要是在器件高速关断时电流下降太快， dU_{ce}/dt 很大，引起较大位移电流流过 R_s ，产生足以使 NPN 晶体管开通的正向偏置电压，造成寄生晶闸管自锁。

③瞬态过电流。IGBT 在运行过程中所承受的大幅值过电流除短路、直通等故障外，还有续流二极管的反向恢复电流、缓冲电容器的放电电流及噪声干扰造成的尖峰电流。这种瞬态过电流虽然持续时间较短，如果不采取措施，也可能会导致 IGBT 失效。

④过电压造成集电极与发射极击穿。

⑤过电压造成栅极与发射极击穿。

2. IGBT 的保护方法

当过流情况出现时, IGBT 必须维持在短路安全工作区(SCSOA)内。IGBT 承受短路的时间与电源电压、栅极驱动电压以及结温有密切关系。为了防止由于短路故障而造成 IGBT 损坏, 必须有完善的故障检测与保护环节。一般的检测方法分为电流传感器和 IGBT 欠饱和式保护。

(1) 过流信息检测

为了实现 IGBT 的短路保护, 必须进行过流检测。适用于过流检测的方法通常是采用霍尔电流传感器直接检测 IGBT 的集电极电流 I_c , 然后与设定的阈值进行比较, 采用比较器的输出去控制驱动信号的关断。也可以检测过流时 IGBT 的集电极-发射极间电压 U_{CE} , 因为管压降含有短路电流的信息, 过流时 U_{CE} 将增大, 且基本上与 k 成线性关系, 故检测过流时的 U_{CE} 并与设定的阈值进行比较, 采用比较器的输出控制驱动电路的关断, 也可完成过流保护。

(2) 封锁驱动信号

在逆变电源的负载过大或输出短路的情况下, 可通过逆变桥输入直流母线上的电流传感器进行检测。当检测电流值超过设定的阈值时, 保护动作封锁所有桥臂的驱动信号。这种保护方法最直接, 但吸收电路和钳位电路必须经特别设计, 使其适用于短路情况。这种方法的缺点是会造成 IGBT 关断时承受的应力过大, 特别是在关断感性大电流负载时, 必须采取相应的保护电路以避免 IGBT 的锁定效应发生。

(3) 减小栅压

IGBT 的短路电流和栅压有密切关系, 栅压越高, 短路时电流就越大。在短路或瞬态过流情况下若能在瞬间将 U_{GE} 分步减小或斜波减小, 短路电流便会减小下来, 当 IGBT 关断时 di/dt 也减小。集成驱动电路(如 EXB841 或 M579XX 系列)都有 U_{CE} 检测电路, 当发现欠饱和时, 将栅压钳位到 10V 左右, 增大 U_{CE} 限制过电流幅值, 延长允许过流时间。短路允许时间 t_{sc} 和短路电流 I_{sc} 同栅极电压 U_{CE} 的关系如图 5-50 所示。在短路电流出现时, 为了避免关断 IGBT 时 di/dt 过大形成过电压, 导致 IGBT 失控或过压而损坏, 通常采用降栅压的软关断综合保护技术, 即在检测到过流信号后首先是进行降栅压保护, 以降低故障电流的幅值, 延长 IGBT 承受过载电流的时间。在降栅压动作后, 设定一个固定延迟时间以判断故障电流的真实性。如在延迟时间内故障消失, 则栅压自动恢复; 如故障仍然存在, 则执行软关断, 使栅压降至 0V 以下, 最终关断 IGBT。采用降栅压软关断综合保护技术可使故障电流的幅值和下降率以及过电压都受到限制, 使 IGBT 的运行轨迹处于安全区内。

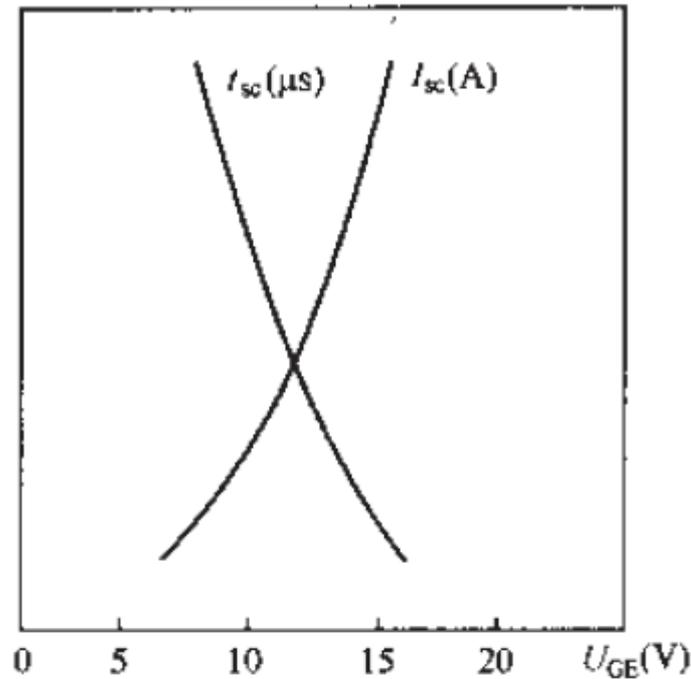


图 5-50 t_{sc} 和短路电流 I_{sc} 同栅极电压 U_{GE} 的关系

在设计降栅压软关断保护电路时，要正确选择降栅压的幅度和速度。如果降栅压的幅度较大（如 7.5V 以上），则降栅压的速度就不要太快，一般采用 2 μ s 左右的下降时间。由于降栅压幅度大，集电极电流已经较小，则封锁栅极可快些，不必采用软关断。如果降栅压幅度较小（比如 5V 以下），则降栅速度可快些，而封锁栅压的速度必须慢一些，即采用软关断，以避免产生过高的过电压。

(4) 降频“打嗝”保护

在大功率负载中，为了使电源在短时间的短路故障状态下不中断工作，而又能避免连续进行短路保护产生热积累而损坏 IGBT，可采用使工作频率降低的方法形成间歇“打嗝”保护，待故障消除后再恢复正常工作。在降频“打嗝”保护中并非每个保护电路都是必需的。

3. 组合保护方案

(1) 逆变部分保护

逆变器设计为半桥式结构，串联谐振负载，驱动电路采用 IR 公司的 IR2110 半桥驱动芯片。IR2110 电路简单，成本低，适用于中大功率 IGBT。IR2110 芯片有一个封锁两路驱动的 SD 输入端，当此引脚为高电平时，立刻封锁两路输出，如图 5-51 所示。电压型逆变器引起短路故障的原因有：

①直通短路。桥臂中某一个器件（包括反并二极管）损坏；或由于控制电路、驱动电路的故障，以及干扰引起驱动电路误触发，造成一个桥臂中两个 IGBT 同时

开通。

②负载电路短路。在某些升压变压器输出 场合，副边出现短路情况。

③逆变器输出直接短路。

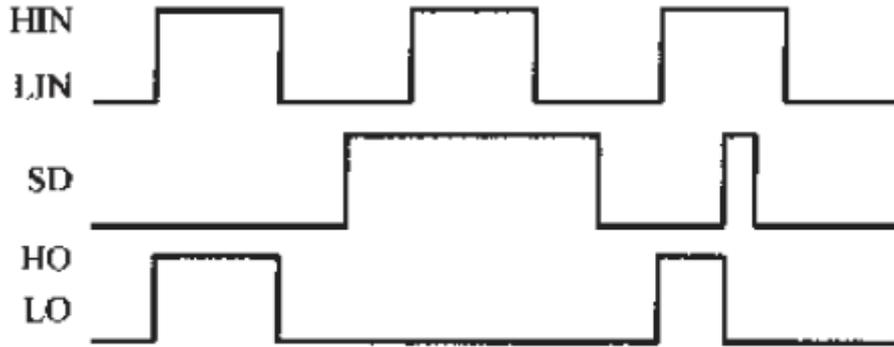


图 5-51 IR2110 保护时序图

图 5-52 给出了保护电路框图。逆变器直通保护电路必须有非常快的速度。在一般情况下，如果 IGBT 的额定参数选择合理，10us 之内的过流就不会损坏器件，所以必须在这段时间内关断 IGBT。母线电流检测用霍尔传感器，它的响应速度快，是短路保护检测的最佳选择。比较器用 LM319，将检测值与设定值比较，一旦超过设定值马上输出保护信号，封锁 IGBT 的驱动信号，同时用触发器构成记忆锁定保护电路，以避免保护电路在过流时频繁动作。另外，要设置外接的复位电路。

(2) 整流部分保护

对于大功率电压型逆变器，为了改善进线电流波形，一般在直流母线上串有滤波电感。由于电感的存在，当逆变电路一旦停止工作时，如果整流电路仍处在整流状态，则电感中的能量将向电容释放，在逆变保护动作瞬间电容将承受一个很高的过冲电压，若不采取措施，可能会直接导致电容过压损坏，尤其在负载电流很高、L 中储能很大时更加危险。

假设逆变关断时滤波电感中的电流全部从电容 C 中流过，同时整流器继续输出电压 U_d 图 5-53 给出了整流器在该工况时的等效电路，L 与 C 串联谐振，由于整流桥电流只能单向流通，所以振荡到 $T/4$ 时结束，电路的谐振方程为：

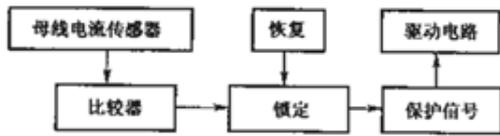


图 5-52 直通保护电路框图

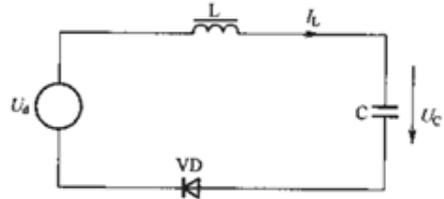


图 5-53 逆变关断时整流器部分等效电路

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} + U_C = U_d \\ i_L = C \frac{dU_C}{dt} \end{cases} \quad (5-57)$$

初始条件为

$$\begin{cases} U_C(0) = U_d \\ i_L(0) = I_d \end{cases}$$

解此方程，得

$$\begin{cases} i_L(\omega t) = I_d \cos \omega t \\ U_C(\omega t) = U_d + I_d Z_c \sin \omega t \end{cases}$$

可见在谐振到 1/4 周期时，电容上的电压达到最大值 U_{Cmax} 之后谐振停止。

$$U_{Cmax} = U_C\left(\frac{\pi}{2}\right) = U_d + I_d \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5-58)$$

电容上最后的电压与母线电流、电感及电容有关，对此在保护动作的同时将整流电路转换到逆变工作状态（触发角 α 拉到约 150 度），使滤波电感中的能量大部分回馈到电网。在实际应用中，可以采用单一的整流部分转逆变的保护方法，这种保护方法是将前级整流输入关断，故障时 IGBT 仍处于工作状态。这属于“软保护”，对 IGBT 没有应力冲击，同时也可以避免在大电流下瞬间关断可能导致 IGBT 超出关断安全工作区而处于锁定状态。