

软关断技术在IGBT短路保护中的实现与应用

余 情 黄启钊

中车株洲电力机车研究所有限公司 湖南 株洲 412001

摘 要: 大功率IGBT短路时, 流过的短路电流可达其额定电流的4-10倍, 如果不采取有效的保护措施, IGBT会产生门锁失效或者直接炸裂失效, 因此现使用的大功率IGBT驱动器中都集成短路保护功能, 能够确保在IGBT发生退饱和后10us内将其关断; 但在关断瞬间, 会形成极大的 di/dt , 由此而产生的关断过电压有时足以击穿IGBT。抑制关断过电压, 除降低回路中的寄生电感外, 降低 di/dt 是最直接有效的实现手段; 本文介绍了一种软关断技术, 可以通过降低IGBT的关断速度来降低 di/dt , 从而达到抑制关断过电压的目的, 并且以某风电变流器用单相功率组件搭建短路实验平台, 进行了软关断和硬关断的对比实验, 实验结果表明软关断较硬关断的关断过电压降低了128V, 同时短路损耗也降低了32%。

关键词: 软关断; IGBT短路保护; 关断过电压

引言

大功率IGBT已经广泛应用于轨道交通、航空航天、新能源发电、工业传动和智能电网等大功率变流领域, 其优良的特性使其快速成为大功率变流器的核心, 其可靠性也已成为变流器稳定高效运行的前提条件, 因此如何保障IGBT运行的安全可靠已成为变流器设计的核心问题。保障IGBT的安全可靠性就必须保证其在最恶劣的工况下也不会损坏失效, 对于IGBT而言, 短路直通是其面临的最恶劣工况之一。大功率IGBT短路时, 流过IGBT的短路电流可以达到其额定电流的4-10倍, 同时IGBT也会因自身退饱和现象, 使得其C、E两端直接承受母线电压, 如果不采取有效的保护措施, IGBT会产生门锁失效或者直接炸裂失效。因此现使用的大功率IGBT驱动器中都集成短路保护功能, 能够确保在IGBT发生退饱和后10us内将其关断, 但在关断瞬间, 会形成极大的 di/dt , 由此而产生的关断过电压有时足以击穿IGBT, 这将极大的影响变流器的可靠性^[1-2]。关断过电压可以由式(1)表达:

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

式中L为回路中的杂散电感, di/dt 为电流变化率, 由式可知, 降低关断过电压可以通过降低电流变化率和杂散电感两种途径实现。工程上, 抑制关断过电压的手段有多种, 常用的如降低杂散电感、增加功率吸收电路等, 其中降低杂散电感主要通过优化功率模块的结构和使用低感母排, 但该措施会增加工作难度和物料成本, 而加吸收电容不仅会增加成本, 而且会带来直流侧电压的振荡, 相比之下, 通过降低电流变化率更为简单有效。本文基于此点, 介绍了一种软关断技术, 可以通过降低IGBT关断速度来降低 di/dt , 达到降低关断过电压的

目的, 并最终通过实验验证了其有效性。

1 IGBT 短路保护

短路直通是IGBT面临的最恶劣的工况之一, 为了在发生短路时, 对IGBT进行有效的保护, 一般将短路保护电路集成于IGBT驱动器中。其实现原理主要通过 V_{CE} 监测电路对 V_{CE} 进行检测, 然后将该值与设定的短路保护阈值通过比较器进行比较, 当IGBT发生退饱和现象, V_{CE} 的值将大于短路阈值, 比较器输出故障信号, 经过延时后, 与驱动信号进行逻辑运算, 最终输出关断信号, 使得驱动器关断IGBT, 从而达到短路保护的目的, 同时为了确保IGBT的安全, 必须保障短路响应时间不得大于厂家建议的10us。

2 IGBT 软关断技术

2.1 IGBT软关断原理

如图1所示, 短路时, IGBT等效于三个电容和一个受控电流源的组合, 处于短路状态, 短路电流可以等效于受门极电压控制的电流源。

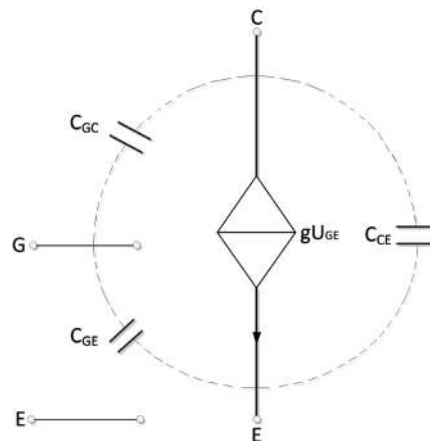


图1 短路时IGBT的等效电路

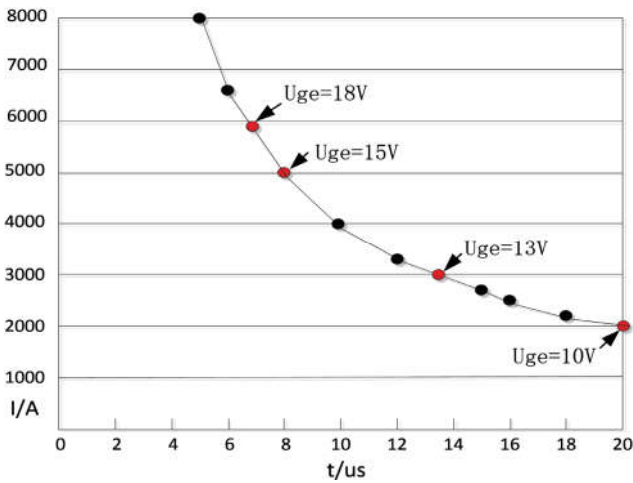


图2 短路电流、耐受时间和门极电压的关系曲线

发生短路时，会在短时间内释放大量的能量，一旦释放的能量大于IGBT承受的极限，则会发生爆炸现象，导致IGBT失效，厂家一般都会给出测试条件和推荐的短路保护响应时间，根据厂家提供的数据和测试结果，图2给出了FF1000R17IE4短路电流、耐受短路时间和门极电压三者之间关系曲线，该IGBT的额定电流为1000A，短路测试电压为1000V，由曲线可知门极电压由15V降低到13V时，短路电流从5000A左右降低到3000A左右，效果非常明显，同时当短路电流降低时，IGBT能够耐受的短

路时间也从8us提升至13us。因此在关断IGBT时，如能对 V_{ge} 进行控制，就可有效地控制短路电流，从而降低关断时刻的电流变化率，达到抑制关断过电压的目的。虽然降低电流变化率会增加短路响应时间，但IGBT能耐受的短路时间也相应的增加，可以抵消增加短路响应时间所带来的影响，软关断即是基于此原理提出来的。

2.2 IGBT软关断的实现

软关断技术主要在关断IGBT时，缓慢地降低门极电压，从而达到降低过电压的目的。图3为实现IGBT短路软关断的电路方案图，该电路主要通过控制驱动级的输出电压 V_0 来控制门极电压。实现过程为：首先，驱动器输出高电平，开通IGBT，同时关断 V_3 ，电容 C_a 通过 R_a 充电到一定值（小于 V_{ref} ），当IGBT发生短路时，流过IGBT的短路电流迅速增大，IGBT开始退饱和， V_{ce} 升高，从而抬升电容 C_a 的电压，使其超过 V_{ref} ，比较器输出高电平的故障信号，从而导通 V_3 ，通过 R_5 给 C_1 放电，从而将 V_0 电压降下来，其下降速度由电容 C_1 的放电速度决定，其放电时间计算如下：

$$V_t = E * \exp(-t / R_5 * C_1) \quad (2)$$

$$t = R_5 * C_1 * \ln(E / V_t) \quad (3)$$

式中E为 $2 * V_{CC}$ ， V_t 为t时刻电压值，由上式可知，可以通过调节电阻和电容的大小从而调节 V_0 的下降速度。

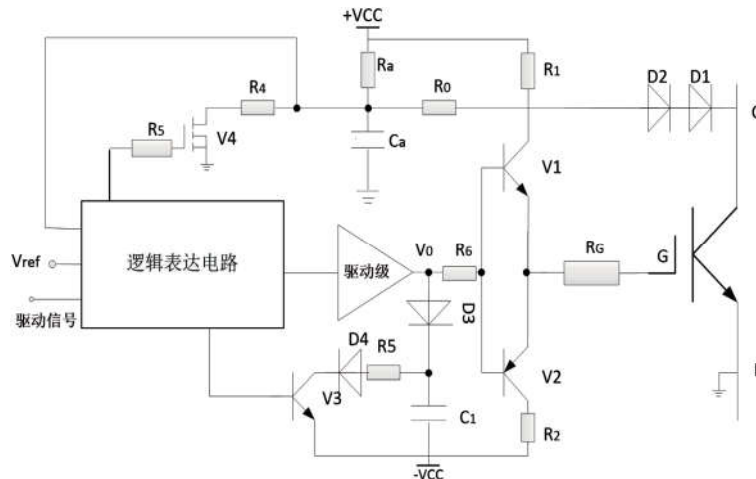


图3 IGBT短路软关断电路方案

正常工作时，推挽电路中的三极管只发挥其开关特性，即只工作于截止区与饱和区，开通时直接由截止区快速进入饱和区，关断时则相反。本电路的软关断发挥了三极管放大区的工作特性，当IGBT处于开通状态时，V1处于导通状态，检测到IGBT发生短路故障后， V_0 缓慢下降，使得V1进入放大区，此时流过 R_G 的电流为：

$$I_c \approx I_e = \frac{V_0 - V_{BE} - V_{ge}}{R_G} \quad (4)$$

$$V_{ce} = V_{CC} - I_c (R_1 + R_2) - V_{ge} \quad (5)$$

由式可知，当 V_0 下降时，流过门极电阻的电流减小，推挽电路的输出电压降低，则IGBT的寄生电容通过门极电阻放电，其放电的快慢除了与自身的放电系数有关外，还取决于 V_0 下降的速度，而 V_0 的下降速度则由软关断电路中的 R_5 和 C_1 决定，从过程即可等效于软关断电路对门极电压的控制效果，而一旦关断时刻的门极电压得到控制，由图2曲线可知，关断电流的变化率也得到相应

的控制,进而达到缓慢关断IGBT的目的,最终抑制住关断过电压。

3 实验结果

在某风电变流器用单相功率组件中,通过改进其驱动器电路,使其具有软关断功能,并搭建了短路实验平台,短路实验平台所用IGBT器件型号为FF1000R17IE4,将其下管用粗短铜线短接,给其上管发送开关信号,该开关信号为双脉冲信号,其时序为20 μ s、10 μ s和20 μ s,其中10 μ s为关断信号。

在验证驱动信号的正常后,给该风电模块上高压,进行短路实验,直流母线电压为1100V,开关信号保持不变,测试点分别为上管门极信号 V_{ge} 、上管端电压 V_{ce} 和上管集电极电流 I_c ,为了验证软关断的有效性,分别进行了将硬关断与软关断的对比实验,其实验结果分别如图4和图5所示。

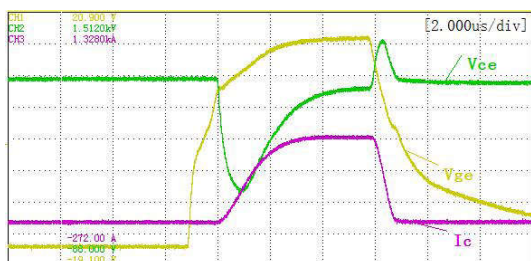


图4 硬关断短路实验波形

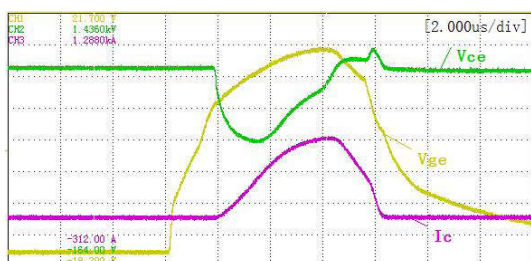


图5 软关断短路实验波形

由上两图可知,硬关断关断时,门极信号在关断之前存在一段平稳期,在该段时间内,集电极电流和端电压都维持在高位,瞬时功率较大,较为危险,而采用软关断技术则没有此平稳期,门极电压达到高位后,会启动软关断将其缓慢拉低,经过2 μ s左右后,软关断结束,进入正常关断期,大大减小关断时的瞬时电流变化率。两者的关键参数如表1所示:

表1 测试结果汇总表

测试项点	硬关断	软关断
集电极电流 (A)	5410	5540
关断di/dt (A/us)	7592	2172
关断过电压 (V)	246	118
短路时间 (μ s)	6.68	6.22

由表1可知,采用软关断,关断时刻的电流变化率由7592A/us降低到2172A/us,关断过电压降低了128V,抑制效果十分明显,且不会引起其他参数的明显改变。

发生短路时,瞬间会产生大量的热量,如果超出IGBT能够承受的极限,则会损坏IGBT,故短路损耗也是一个需要考虑的问题,图6和图7给出了硬关断和采用软关断时的短路损耗积分曲线(橙色曲线),整个短路过程中,硬关断短路期间共产生25J的损耗,采用软关断短路期间共产生17J的损耗,较前者降低了32%的热量损耗,故采用软关断技术能降低IGBT因热失效的风险。

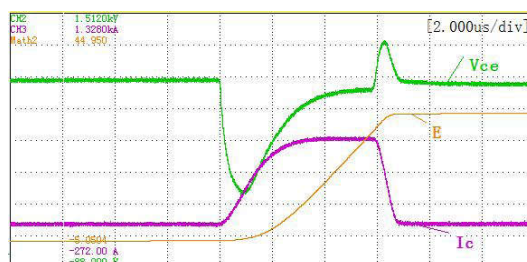


图6 IGBT短路硬关断短路损耗曲线图

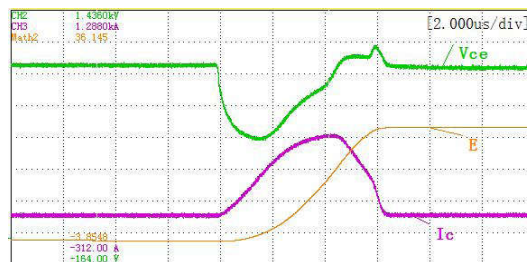


图7 IGBT短路软关断短路损耗曲线图

4 结论

IGBT短路时,流过的短路电流可达其额定电流的4~10倍,在关断瞬间,会产生极大的电流变化率,由此引起的过电压有时足以损坏IGBT。本文提出的软关断技术能够有效的降低关断时刻的电流变化率,从而抑制关断过电压;在以某风电变流器用单相功率组件搭建短路的实验平台上,对比了软关断和硬关断的短路实验结果,证明软关断较硬关断的关断过电压降低了128V,同时短路损耗也降低了32%。

参考文献

- [1] Yanick Lobsiger and Johann W Kolar. Closed-Loop di/dt and dv/dt IGBT Gate Driver[J]. IEEE Trans. on Power Electronics,2015,30(6):3402-3417.
- [2] B Wittig and F W Fuchs. Analysis and comparison of turn-off active gate control methods for low-voltage power MOSFETs with high current ratings[J]. IEEE Trans. Power Electron, 2012,27(3):1632-1640.