

大功率 IGBT 短路能量的分析研究

杨 璐, 王 雷, 李守蓉

(中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710016)

摘 要: 针对大功率 IGBT 短路保护技术, 详细介绍了 IGBT 短路及其保护原理, 通过不同工作电压下短路试验波形验证了 IGBT 短路时间与其工作电压密切相关, 得出了 IGBT 工作电压越高短路时间越短的反比关系, 最后通过短路试验数据拟合曲线分析证明了不同工作电压下 IGBT 的短路能量相同。

关键词: 短路保护; IGBT 退饱和; 驱动器; 短路时间; IGBT 短路能量; 高速动车组

中图分类号: TN32

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.02.011

Analysis and Research of High-power IGBT Short-circuit Energy

YANG Lu, WANG Lei, LI Shourong

(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China)

Abstract: In view of the high-power IGBT short-circuit protection technology, the IGBT short-circuit reason and protective principle was introduced. The short circuit time of IGBT was verified to be closely related to its working voltage by short circuit test waveforms under different working voltages. The inverse relationship between IGBT short circuit time and IGBT working voltage was obtained. It was proved by data fitting curve of short-circuit test that the short-circuit energy of IGBT was the same under different working voltages.

Keywords: short-circuit protection; IGBT desaturation; driver; short-circuit time; IGBT short-circuit energy; high-speed EMUs

0 引言

随着中国铁路高速动车组技术和重载技术的飞速发展, 电力电子技术的进步, 功率单元作为整个变流器的核心部件, 正朝着高频、小型化、智能化、高可靠性的方向发展。大功率 IGBT 作为功率单元的核心器件, 采用高频大功率 IGBT 作为高速动车组和电力机车变流器开关元件的应用日益广泛, 系统对其可靠性要求也越来越高^[1]。在大功率交流传动电力机车环境中, 作为直接控制保护大功率 IGBT 开通和关断的驱动单元, 可靠稳定地对 IGBT 进行控制和保护是至关重要的。

本文对大功率 IGBT 进行高低压短路试验测试与研究分析, 得出有关结论, 供大功率 IGBT 应用设计参考。

1 短路保护功能简介

以短路回路的杂散电感量为依据, 可以将短路

故障工况分为 I 类短路和 II 类短路 2 种: I 类短路为 IGBT 从阻断状态直接进入短路状态; II 类短路为 IGBT 从阻断状态首先进入导通状态, 然后进入短路状态^[2]。

这 2 种短路共同点是 IGBT 均会出现“退饱和现象”, 其标志是 IGBT 集电极和发射极之间的电压会迅速上升至直流母线电压。

当 IGBT 处于短路状态工作时, 其损耗会急剧上升, 结温随之迅速上升, 若不加保护电路或保护响应不及时, 将导致 IGBT 失效。因此驱动装置需配备保护电路并设置合理的短路保护时间。

1.1 短路保护原理

IGBT 短路保护电路的基本工作原理如图 1 所示, 其中 VISO 为 +15 V, COM 为 -10 V, VE 为参考地 0 V, 150 μ A 恒流源用来设定比较器反向输入端参考电压:

① 当 IGBT 处于关断状态时, 驱动器内部 MOSFET 开通, Cx 上电压被拉至 -10 V, 此时比较器不动作;

收稿日期: 2017-07-03; 修回日期: 2018-07-13

②当 IGBT 处于导通状态时, 驱动器芯片内部 MOSFET 关断, 如图 1 所示, A 点电位始终向 B 点充电, 最终 B 点电位与 A 点接近;

③当 IGBT 处于短路状态时, 其退出饱和区, 此时 A 点电位为母线电压, B 点被充电, 经过定时后比较器翻转。

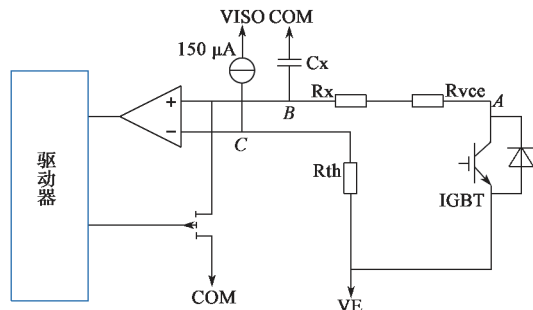


图 1 IGBT 短路保护电路

1.2 短路保护反馈信号

当发生 IGBT 短路故障时, IGBT 驱动保护电路检测到故障, 驱动器在设定响应时间内关断 IGBT, 对应的反馈状态输出端传送故障信号至控制单元, 控制单元封锁相对应的驱动脉冲对整个系统进行保护。

2 试验验证

I 类短路、II 类短路的主要区别在于短路回路中的电感值不同。I 类短路回路中的电感量小, 电流上升率大; II 类短路反之。本文选取最恶劣的 I 类短路进行说明。

2.1 短路试验简介

使用铜排短路, 模拟负载短路时开通 IGBT 实现保护的工况, 测试原理图如图 2 所示^[2]。具体的试验方法如下:

①试验过程中, 首先闭合接触器, 将母线电容电压充到试验所需中间母线电压, 然后再断开接触器;

②将上管 IGBT 的集电极 C 与发射极 E 通过粗短铜排进行短接, 且上管 IGBT 始终处于关断状态;

③通过高压试验台发出一个单脉冲信号, 控制下管 IGBT 开通和关断, 进行下管 IGBT 短路试验测试。

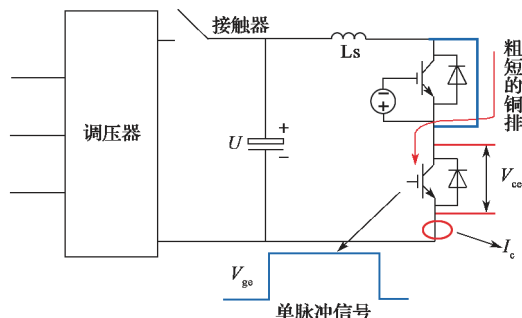


图 2 短路测试原理图

2.2 短路试验

2.2.1 低压短路试验 (I 类短路)

基于 6 500 V/750 A IGBT (FZ750R65KE3), 以

1SC0450V 驱动器为核心的驱动保护电路开展短路测试分析。

按照前述短路试验测试方法, 先将母线电容电压充到 DC 2 000 V 左右, 然后通过粗短铜排将上管 IGBT 进行短接, 对下管 IGBT 进行短路试验测试。试验波形如图 3 所示。图 3 中, 黄色波形表示门极脉冲电压 V_{ge} (5 V/格); 绿色波形表示 IGBT 集电极与发射极之间的电压 V_{ce} (1 000 V/格); 紫色波形表示 IGBT 集电极电流 I_c (500 mV/格, 且 500 mV 等效为 2 500 A); 红色波形表示 V_{ce} 与 I_c 的乘积; 蓝色波形表示状态反馈信号 (10 V/格)。

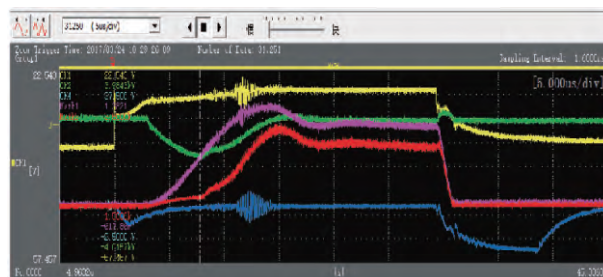


图 3 低压短路试验波形

从图 3 中可以看出, 当处于低压条件下系统电路发生短路时, IGBT 在额定母线电压 DC 2 000 V 下未饱和导通即进入短路, 短路电流 I_c 瞬时上升至 5 248 A, 快速进入退饱和状态, 该值为额定电流的 7 倍左右, 短路保护电路立即响应关断 IGBT。

一般情况下, 短路时间是由短路能量决定的, 短路能量可通过在短路时间内流过 IGBT 的短路电流和 IGBT 上的电压的乘积积分计算得到^[3]。

为计算出低压条件下 IGBT 的短路能量, 即从 IGBT 开始退饱和至 IGBT 被彻底关断保护阶段能量值, 将这一阶段 IGBT 的保护响应时间 t 和 IGBT 短路能量 ($V_{ce} \cdot I_c$) 的对应数据进行线性拟合, 得到 IGBT 的保护响应时间 t 和 IGBT 短路能量 ($V_{ce} \cdot I_c$) 对应的拟合曲线图, 如图 4 所示。

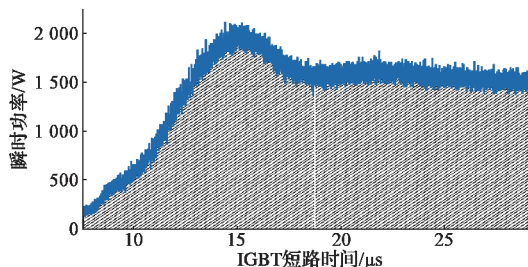


图 4 低压时 IGBT 短路能量曲线图

图 4 中, 横轴为从 IGBT 开始退饱和时间点 $t_1=7.566 4 \mu s$ 至 IGBT 被彻底关断保护时 $t_2=29.406 4 \mu s$ 阶段, 纵轴为 IGBT 短路功耗值 ($V_{ce} \cdot I_c$), 即从 IGBT 开始退饱和和电压为 314.375 V 至 IGBT 回到母线电压为 2 000 V 阶段。

应用 origin 绘图软件线性拟合试验数据, 从而得到了低压条件下 IGBT 保护响应时间 t 和 IGBT 功率损耗

($V_{ce} \cdot I_c$) 对应的拟合曲线图, 即 IGBT 短路能量曲线图。最后对曲线进行积分得出 DC 2 000 V 工况下 IGBT 短路能量值, 即对曲线围成的面积区域进行定积分运算, 计算结果如图 5 所示。

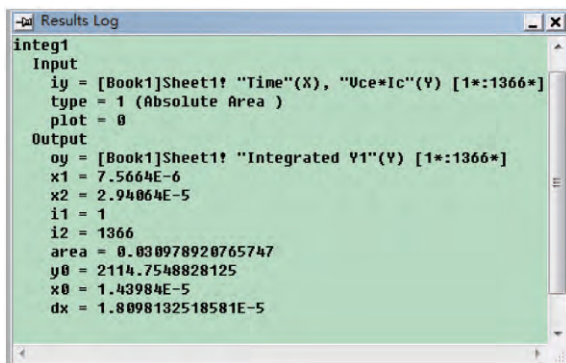


图 5 低压时 IGBT 短路能量计算图

从图 5 计算结果中可知, x_1 和 x_2 为 IGBT 开始退饱和至 IGBT 被彻底关断保护的时间段; i_2 为计算的数据点, 共 1 366 个; area 为曲线围成的区域面积, 约为 0.03 kJ, 即 IGBT 短路能量为 0.03 kJ。另外, 可以计算出从 IGBT 开始退饱和至被彻底关断保护大约需要 21.84 μ s。

2.2.2 高压短路试验 (I 类短路)

按照前面所述短路试验测试方法, 先将母线电容电压充到 DC 4 200 V 左右, 然后通过粗短铜排将上管 IGBT 进行短接, 对下管 IGBT 进行短路试验测试, 试验波形如图 6 所示。图 6 中, 绿色波形表示 IGBT 集电极与发射极之间的电压 V_{ce} (1 000 V/格); 紫色波形表示 IGBT 集电极电流 I_c (500 mV/格, 且 500 mV 等效为 2 500 A); 红色波形表示 V_{ce} 与 I_c 的乘积; 蓝色波形表示状态反馈信号 (10 V/格)。

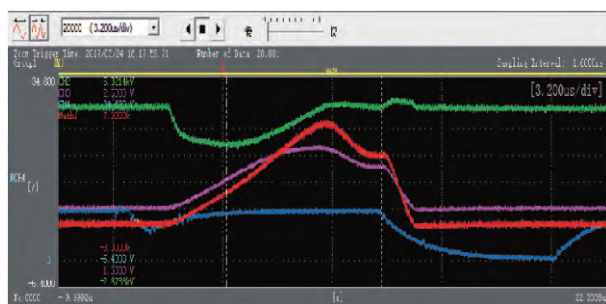


图 6 高压短路试验波形

从图 6 中可以看出, 当处于高压条件下系统电路发生短路时, IGBT 在额定母线电压 DC 4 200 V 下未饱和导通即进入短路, 短路电流 I_c 瞬时上升至 5 948 A, 快速进入退饱和状态, 该值为额定电流的 7.9 倍左右, 短路保护电路立即响应关断 IGBT。

为计算出高压条件下 IGBT 的短路能量, 即从 IGBT 开始退饱和至 IGBT 被彻底关断保护阶段的能量值, 将这一阶段 IGBT 的保护响应时间 t 和 IGBT 短路能量 ($V_{ce} \cdot I_c$) 的对应数据进行线性拟合, 得到 IGBT 的保护响应时间 t 和 IGBT 短路能量 ($V_{ce} \cdot I_c$) 对应的

拟合曲线图, 如图 7 所示。

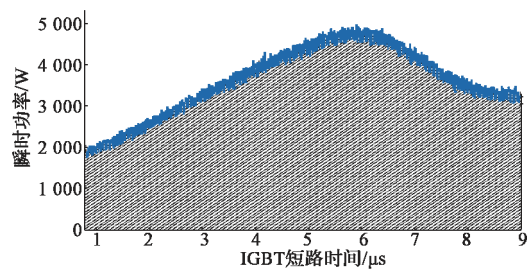


图 7 高压时 IGBT 短路能量曲线图

图 7 中, 横轴为从 IGBT 开始退饱和时间点 $t=0.7952 \mu$ s 至 IGBT 被彻底关断保护时间点 $t=9.0032 \mu$ s 阶段, 纵轴为 IGBT 短路功耗值 ($V_{ce} \cdot I_c$), 即从 IGBT 开始退饱和电压为 2 581.875 V 至 IGBT 回到母线电压为 4 200 V 阶段。

应用 origin 绘图软件线性拟合试验数据, 得到 IGBT 的保护响应时间 t 和 IGBT 功率损耗 ($V_{ce} \cdot I_c$) 对应的拟合曲线图, 即 IGBT 短路能量曲线图。最后对曲线进行积分得出 DC 4 200 V 工况下 IGBT 短路能量值, 即对曲线围成的面积区域进行定积分运算, 计算结果如图 8 所示。

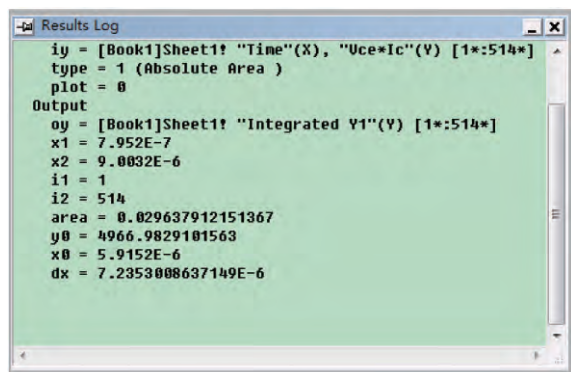


图 8 高压时 IGBT 退饱和和能量计算图

从图 8 可以看出, x_1 和 x_2 为 IGBT 退饱和和开始至 IGBT 被彻底关断保护的时间点, i_2 为计算的数据点, 共 514 个, area 为曲线围成的区域面积约, 为 0.029 kJ, 即 IGBT 短路能量为 0.029 kJ。另外, 可以计算出从 IGBT 开始退饱和和到被关断大约需要 8.208 μ s, 进一步验证了短路保护电路的可靠性。

2.3 高低压短路数据对比分析 (I 类短路)

通过将 2.1.1 节和 2.2.2 节试验结果和计算结果进行对比分析整理, 如表 1 所示。

表 1 高低压短路数据对比表

名称	母线电压 /V	短路电流 /A	短路时间 / μ s	短路能量 /kJ
低压	2 000	5 248	21.840	0.030
高压	4 200	5 948	8.208	0.029

从表 1 中可以看出, 在低压条件下, 短路时间会相对较长; 高压条件下, 短路时间仅有 8.208 μ s; 虽然低压较高压条件下短路保护时间长, 但不同工作电压下 IGBT 短路能量基本相同。 (下转第 61 页)

垂向振动加速度有效值。

表6 各轴不同转速下垂向振动加速度有效值 g

转速/($r \cdot \min^{-1}$)	空转	标准新轴	标准旧轴	专项修轴
1 000	0.076 1	0.107 1	0.311 6	0.412 6
1 500	0.195 3	0.332 0	0.801 7	-
2 000	0.436 1	0.505 7	1.370 0	-
2 200	0.513 7	0.396 9	1.213 4	1.454 8
2 500	0.577 9	0.765 0	2.152 5	-
2 700	0.707 0	0.856 1	2.446 2	3.588 0
3 000	0.697 7	0.898 1	2.705 5	-

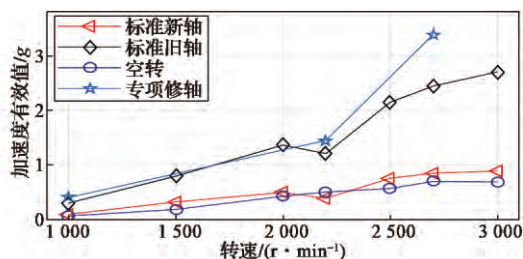


图7 不同转速下各轴齿轮箱端垂向振动加速度有效值

对表6和图7中数据进行分析可以得到,随着转速不断增加,加速度有效值总体呈现上升趋势。在不同转速下,标准旧轴振动加速度有效值约为标准新轴的2.8倍,验证了仿真结果的正确性。表6中,转速为2700 r/min时,即对应车速为195 km/h,专项修轴测试得到加速度有效值为3.588g,验证了表4中运行速度为200 km/h的时域预警值是正确的。

4 结论

本文的研究应用了统计学原理及大数据分析思想,

研究万向轴动不平衡检测的时域特征参数及其预警阈值的设置。时域预警参数摆脱了大量在线复杂算法的数值计算过程,这种基于大数据的统计学方法所分析得出的万向轴动不平衡的时域监测模型具有更好的鲁棒性,为列车万向轴动不平衡在线时域安全监测提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 李秋泽. CRH5型动车驱动系统万向轴失效机理及对策研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [2] 张红军, 姚远, 罗赟, 等. CRH5型动车万向轴传动系统技术特征分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(2): 115-119.
- [3] 姚远, 张红军, 罗赟, 等. CRH5型动车万向轴扭转振动分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(2): 82-86.
- [4] 铁道部运输局. CRH系列动车组故障处理汇编[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [5] 张旭永. CRH5型动车组牵引传动系统故障解析及维护保养[J]. 科教文汇, 2015(8): 178-179.
- [6] 丁建明, 林建辉, 赵洁. 高速列车万向轴动不平衡检测的EEMD-Hankel-SVD方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 143-151.
- [7] 丁建明, 林建辉, 王晗, 等. 万向轴动不平衡检测的二代小波变换奇异值方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 110-117.
- [8] 何刘, 林建辉, 刘新厂, 等. 万向轴动不平衡检测的改进DTCWT-SVD方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 142-151.

作者简介: 宋国良(1973—),男,高级工程师,主要从事铁道机车及车辆技术研究、运用管理。

(上接第56页)

另外,可以用同样的试验方法、分析方法去测试II类短路试验,只需调整短路回路中 L 值即可,验证了IGBT驱动器短路保护功能的可靠性和必要性。

3 结语

通过低压与高压条件下短路试验结果对比分析,证实了IGBT短路保护响应的触发条件为 I_c 达到退饱和电流,且同一驱动保护电路对不同工作电压下的短路均可实施保护;通过试验波形及数据的分析证明了IGBT短路时间与其工作电压成反比,但不同工作电压下IGBT短路能量基本相同,即不同工作电压等级的短路试验均影响IGBT的短路寿命。该试验分析结果对工

业及铁路牵引等领域大功率IGBT应用及其短路保护电路设计具有参考意义。

参考文献:

- [1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 29-32.
- [2] 王雷, 李锦, 李艳伟, 等. IGBT模块短路测试方法研究[J]. 铁道机车与动车, 2015(8): 27-29.
- [3] VOLKE Andreas, HORNKAMP Michael. IGBT模块: 技术、驱动和应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

作者简介: 杨 璐(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向为电传动系统及功率器件应用。