

# 高速动车组牵引变流器功率模块故障的研究

吴楠 金文斌 张君颖

(中车长春轨道客车股份有限公司, 130113, 长春//第一作者, 工程师)

**摘要** 针对国产某型高速动车组牵引变流器功率模块故障频发的现象,对故障原因进行分析,并提出针对性的解决办法。经分析发现,非重叠时间过短和 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)元件门极突然启动都会使主电路发生短路,导致功率模块发生故障。相关试验结果表明:更改功率模块控制逻辑的非重叠时间能达到优化门极启动顺序的目的,有效解决功率模块故障频发的问题;控制元件质量,通过更换故障元件,能有效解决 IGBT 元件门极突然启动的问题。

**关键词** 高速动车组; 牵引变流器; 功率模块故障

**中图分类号** U266.235.5; TM46

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.12.022

## Research on Traction Converter Power Module Fault of High-speed EMU

WU Nan, JIN Wenbin, ZHANG Junying

**Abstract** Targeting the frequent fault of traction converter power module of a domestic type high-speed EMU, causes of the fault are analyzed, and specific solutions are put forward. Analysis reveals that both the too short non-overlapping time and the sudden initiation IGBT (insulate-gate bipolar transistor) gate can cause the short-circuit of the main power circuit, leading to power module fault. Relevant experimental results show that changing non-overlapping time of power module control logic can achieve the goal of optimizing gate initiation sequence, effectively solving the problem of power module frequent fault. By controlling component quality, replacing failure component, the IGBT gate sudden initiation problem can be effectively solved.

**Key words** high-speed EMU; traction converter; power module fault

**Author's address** CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130113, Changchun, China

运行于京沪客运专线及其支线的某高速动车组(以下称为“案例动车组”)自投入运营以来,经常发生牵引变流器功率模块故障,影响了列车的正常运行。为了解决这一问题,本文针对案例动车

组的牵引变流器功率模块(以下简为“功率模块”)故障进行研究,分析故障发生的原因,从而找到解决问题的办法。

## 1 功率模块故障的描述

发生功率模块故障时,案例动车组运行工况皆为正常工况,采用正常运行模式,且动车组运行速度为 300 km/h。

高速动车组功率模块包括整流模块与逆变模块,其主要用于对牵引用单相交流电的整流与逆变。首先,牵引变流器内部的 4QC(四象限整流器)将来自变压器的单相交流电转换成直流电;然后,由 PWM(电机变流器模块)将该直流电转换成电压幅值、频率可变的三相交流电,以供给三相交流异步牵引电机。牵引变流器通过对 4QC 和 PWM 的控制来实现列车的牵引、调速和制动<sup>[1]</sup>,通过对逆变器输出电流幅值及频率的控制来实现对电机转矩及转速的控制。

进一步分析可知,功率模块实质上是通过组装在整流模块与逆变模块的 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)元件门极控制,来实现对电流的整流逆变功能。高速动车组采用 IGBT 作为开关器件的调制器和高压电源,具有效率高、体积小、质量轻、可靠性高、易模块化设计等优点,其使用和维护费用也较低。但 IGBT 的驱动电路要求驱动能力强、保护迅速有效<sup>[2]</sup>,若功率模块发生故障,导致牵引变流器控制门极关闭,则牵引变流器停止工作,造成不能输出牵引故障。

## 2 功率模块的故障原因

### 2.1 功率模块的控制原理

如图 1 所示,故障阶段,功率模块的逻辑控制原理为:自 IGBT 元件上下桥臂门极指令信号关闭开始至上下桥臂门极指令信号接通的时间  $t_1$  固定为 10.0  $\mu\text{s}$ ,且上、下桥臂门极指令不能同时接通。

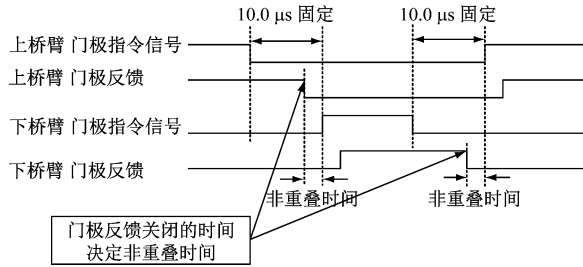


图1 故障阶段功率模块的逻辑控制原理

Fig.1 Principle of power module logic control at the fault stage

## 2.2 故障原因分析

### 2.2.1 非重叠时间过短

根据图1的情况:上桥臂门极反馈信号关闭并经过一定的非重叠时间后,下桥臂的门极指令信号接通,随后下桥臂门极启动;上桥臂门极启动同理。

目前, $t_1$  设定为  $10.0 \mu\text{s}$  的功率模块逻辑控制,虽能满足正常的桥臂门极启动要求,但一旦实际非重叠时间极短,就会发生逻辑判断失效。因此,非重叠时间过短可能是引起功率模块故障的原因之一。

根据这一推理,对案例动车组的故障数据进行分析发现,功率模块 IGBT 元件上下桥臂门极动作存在非重叠时间极短的现象。某次功率模块发生故障时的监控器数据如图2所示。

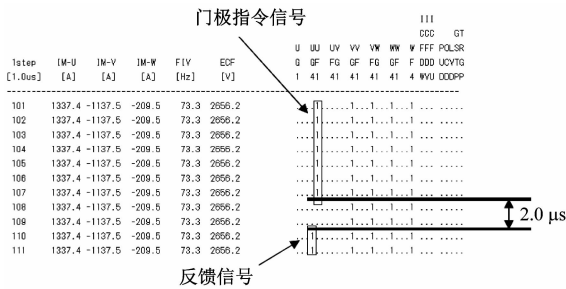


图2 某次功率模块发生故障时的监视器数据截图

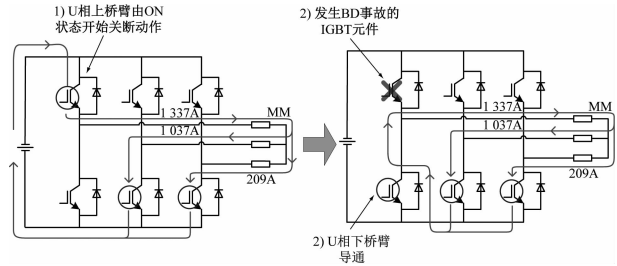
Fig.2 Screenshot of monitor data in the event of a power module fault

根据图2,当故障发生时,实际的非重叠时间仅为  $2.0 \mu\text{s}$ 。这虽不至于造成 IGBT 短路,但  $2.0 \mu\text{s}$  远小于原设想的  $5.0 \mu\text{s}$ 。因此,可能存在自身桥臂及上下桥臂主电路动作的状况。

基于数据分析,绘制功率模块故障发生时的主电路电流流过方向和 IGBT 开关状态如图3所示。

由图3分析 IGBT 元件关断动作失败的情况:

1) 逆变器U相上桥臂 IGBT 元件在 ON 动作



注:BD事故指 IGBT 被击穿。

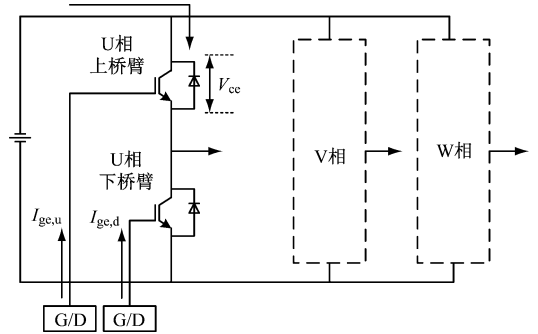
图3 功率模块故障发生时的主电路工作状态

Fig.3 Operating state of the main power circuit in the event of a power module failure

中,开始关断动作。

2) 在正常情况下,当上桥臂 IGBT 元件关断后(即 IGBT 元件反馈信号变为 OFF 状态后),下桥臂 IGBT 元件开始导通动作。而故障情况下,当下桥臂 IGBT 元件变为 ON 状态时(即 IGBT 元件反馈信号变为 ON 状态时),OFF 状态的上桥臂 IGBT 元件突然变为 ON 状态,发生主电路短路。

为了进一步分析功率模块发生故障时的 IGBT 元件关断动作,本研究特意测量了主电路电流及电压特性。测量位置见图4,测量结果见图5。



注: $V_{ce}$  为 IGBT 电压; $I_{ge}$  为门极驱动电流。

图4 测量位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the measurement location

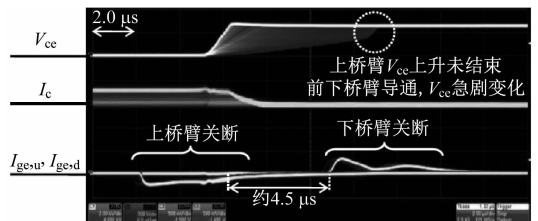


图5 测量结果截图

Fig.5 Screenshot of the measurement result

由图4及图5可见,从上下桥臂中的任一桥臂关断门极电流流出后到另一方桥臂导通门极电流流出前,时间间隔约为  $4.5 \mu\text{s}$ 。然而,从原理上讲,

IGBT 模块的遮断电流越小,集电极电压的上升及门极电流遮断需要的时间就越长。故由图 5 所示测量结果判定:在集电极电流遮断前,另一方的 IGBT 导通;其结果是关断动作中的 IGBT 集电极电压发生急剧变化。急剧变化的集电极电压对 IGBT 门极等造成不良影响,以至于影响了 IGBT 的门极耐压劣化和门极误动作等。

分析上述结果可知,IGBT 元件的关断失败极可能是由集电极电压急剧变化引起的门极误动作所导致,而集电极电压的急剧变化很有可能是非重叠时间过短导致。

2.2.2 IGBT 元件门极突然启动

通过对另外一起故障数据分析发现,当 IGBT 元件门极处于关断 (OFF) 状态且未得到接通指令时,IGBT 元件门极突然执行接通 (ON) 指令转为启动状态。IGBT 元件门极突然启动的信号变化情况如图 6 所示。

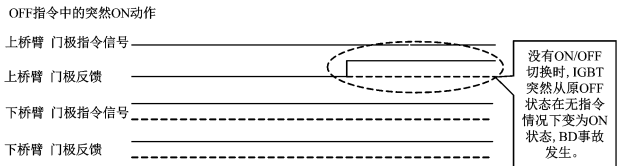


图 6 IGBT 元件门极突然启动时的信号变化情况  
Fig. 6 Signal change at IGBT gate sudden initiation

IGBT 元件门极突然启动时的主电路电流流过方向和 IGBT 开关状态如图 7 所示。

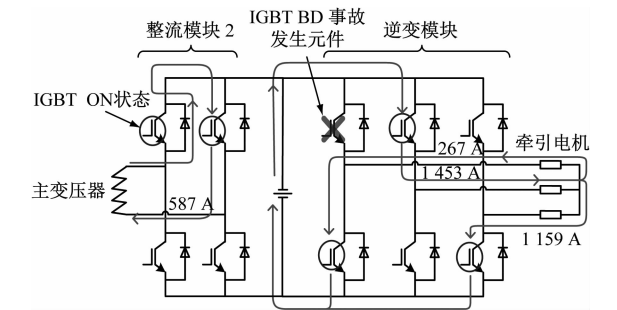


图 7 IGBT 元件门极突然启动示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of IGBT gate sudden initiation

由图 7 可见,逆变器 U 相上桥臂 IGBT 元件在 OFF 指令输入状态下突然变为 ON (启动) 状态,进而使主电路发生短路,引发功率模块故障。进一步分析故障发生过程如下:

1) 从事故数据看,当逆变器 U 相上桥臂 IGBT 元件突然变为 ON 时,故障的 IGBT 元件只有 OFF 指令的输入。

2) 其他相 (V 相及 W 相) 的上下桥臂没有开关切换。由此推测,不存在由其他相开关引起干扰导致的门极误动作或逻辑故障等。当故障发生后,更换的功率模块能运转正常。故本文推测,牵引变流器本体及逻辑不存在问题,故障的原因在于 IGBT 单体。

3) 进一步分析可知,在图 4 的状态中,故障 IGBT 元件的发射极-集电极间加载了和滤波电容器电压相同的电压 (约 2 600 V)。在此状态下,IGBT 芯片上有极少量的漏电电流流过。由此推测,IGBT 模块的漏电电流较大,使芯片局部发热,导致发生 IGBT 击穿。此较大的漏电电流是由难以避免的芯片制造误差所致。芯片组装到装置上后,其制造误差不会随装置运行时间增加而增加。

由运行时间与事故发生频度的关系推断,IGBT 元件门极突然启动现象,是由 IGBT 元件的初期良品率不佳造成的。

2.2.3 天气因素对故障的影响

统计故障数据可发现,高温天气期间 (7 月—10 月) 是功率模块的故障多发期。由此可以推断,较高的环境温度也可能是功率模块发生故障的原因。

根据对所有故障数据的分析发现,所有功率模块故障均为非重叠时间较短或 IGBT 元件门极突然启动导致,尚没有仅由高温导致的功率模块故障数据。综合考虑夏季运行的实际情况,当车内空调及车上散热风机高负荷运行时,牵引变流器更易发生非重叠时间较短与 IGBT 元件门极突然启动的情况。由此可以推断,高温天气条件只是导致功率模块故障的间接因素,而非根本性因素。

3 解决办法

3.1 通过软件更改非重叠时间

针对非重叠时间过短的情况,为确保集电极电流有充分的遮断时间,采取修改功率模块控制逻辑的方法。将控制逻辑中原来的“ $t_1$  固定为  $10.0\ \mu\text{s}$ ”更改为:门极反馈关闭开始经过  $5.0\ \mu\text{s}$  后,接通上下桥臂门极指令信号 (如图 8 所示)。

修改功率模块控制逻辑后,测量 IGBT 元件关断时的主电路电流及电压特性,结果如图 9 所示 (测量位置和图 5 相同)。从图 9 可见,关断动作中集电极电压急剧变化的现象已消失。

对比图 9 及图 5 可见,修改 IGBT 元件门极非重叠时间的逻辑控制,能有效防止 IGBT 的劣化及

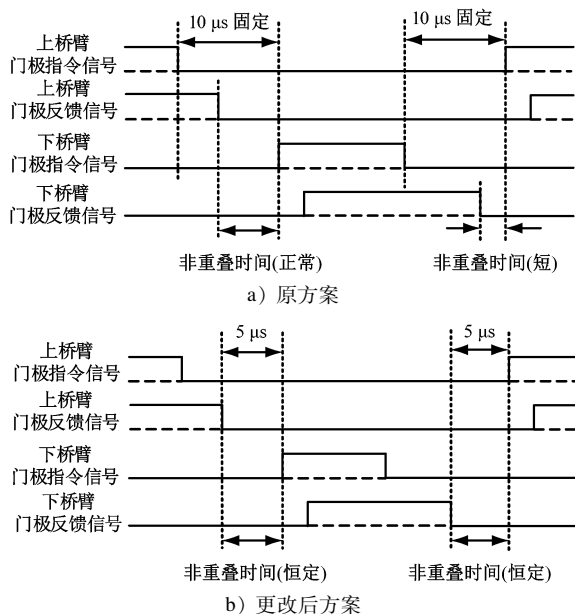


图8 功率模块的控制逻辑示意图

Fig. 8 Schematic diagram of power module control logic

$V_{ce}$  无急剧变化  
→上桥臂 IGBT 完全关断后,下桥臂导通

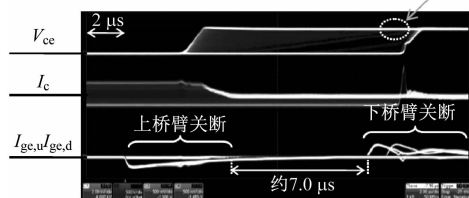


图9 软件更改后的测量结果

Fig. 9 Measurement results after software adaptation

门极误动作,去除 IGBT 关断动作失败引起的功率

模块故障事故。

### 3.2 更换出现问题的功率模块

针对 IGBT 元件门极突然启动故障,可通过更换出现问题的功率模块并剔除不良产品来解决。

## 4 结语

本文针对某型高速动车组频发的牵引变流器功率模块故障进行故障原因分析。对于因产品初期批次质量问题导致的模块故障,通过淘汰发生故障的功率模块来剔除不合格产品;对于由 IGBT 门极非重叠时间过短导致的功率模块故障,可通过变更逻辑控制的方法,有效防止 IGBT 的门极误操作,实现门极非重叠时间的合理控制,从而有效减少功率模块故障的发生。实践情况证明,变更逻辑控制的方法,既能有效减少故障功率模块的更换次数,大大节约检修成本,又降低了线路运行的故障率,对高速动车组的安全运营具有重大意义。

## 参考文献

- [1] 宋雷鸣. 动车组传动与控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009: 247.  
SONG Leiming. Transmission and control of EMU[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009: 247.
- [2] 何秀华, 杨景红. 大功率 IGBT 驱动电路的设计[J]. 电子工程师, 2008(9): 20.  
HE Xiuhua, YANG Jinghong. The design of high power IGBT driver circuit[J]. Electronic Engineer, 2008(9): 20.

(收稿日期: 2020-09-16)

## 合肥轨道交通 1 号线三期工程启动“加速”模式

11 月 14 日,在中国铁路上海局集团有限工商及其他相关单位的支持配合下,合肥轨道交通 1 号线三期工程瑶海公园站至合肥火车站区间右线盾构机恢复掘进,这意味着该区间盾构施工正式进入下穿合肥火车站股道、站房阶段。1 号线三期工程启动“加速”模式。1 号线三期工程瑶海公园站至合肥火车站区间右线全长 679 m,该区间盾构机下穿铁路节点工程为国内首次在无预留条件情况下,近距离正下方穿越铁路站房结构物,是合肥轨道建设历史上面对的最难考验。

为保障盾构机顺利掘进,合肥轨道交通集团有限工商充分调集管理和技术资源,完善硬件设施。在合肥站南广场修建临时过渡站房,乘客改由临时过渡站房进站。改建合肥站安全生产指挥中心,将施工区域相关人员、设备搬迁至此。同时,在施工现场建立了盾构调度指挥中心和应急物资库,确保硬件设施保障到位。

截至目前,1 号线三期 3 座车站已全部主体结构封顶,8 条盾构单线区间已有 6 条贯通,轨道铺设已完成 81%,机电安装及装饰装修已完成 99%。

(来源:2022 年 11 月 14 日《大皖新闻》)