

地铁车辆辅助系统充电机驱动板直通故障复位机制研究

包 虹

(苏州市轨道交通集团有限公司, 215004, 苏州//助理工程师)

摘 要 地铁车辆辅助系统充电机模块为全车提供低压供电, 为确保其在受干扰后能够迅速恢复至工作状态, 需在控制软件中加入故障复位机制。以苏州轨道交通 4 号线车辆辅助系统充电机模块为研究对象, 分析了充电机驱动板直通故障原因, 提出了在车辆辅助系统控制软件中增加故障复位机制的解决对策。基于可靠性试验, 对该故障复位机制进行了优化。试验验证表明, 优化后的故障复位机制可有效解决充电机驱动板直通故障。

关键词 地铁车辆; 辅助系统; 充电机; 驱动板直通

中图分类号 U270.38⁺¹

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.05.030

Research on Fault Reset Mechanism of Metro Vehicle Auxiliary System Charger Driver Board Straight Through Problem

BAO Hong

Abstract Metro vehicle auxiliary system charger module provides low-voltage power supply for the whole vehicle. To ensure that the vehicle can quickly return to the working state after being disturbed, fault reset mechanism needs to be added to the control software. Taking the auxiliary system of Suzhou Rail Transit Line 4 as the object, the reason of charger driver board straight through fault is analyzed, and the solution of adding fault reset mechanism in vehicle auxiliary system control software is proposed. Based on reliability experiment, optimization of fault reset mechanism is carried out. The experiment proves that the optimized fault reset mechanism can solve the driver board straight through problem effectively.

Key words metro vehicle; auxiliary system; charger; driver board straight through

Author's address Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215004, Suzhou, China

苏州轨道交通 4 号线自开通运营以来, 已发生多起列车辅助系统充电机模块输出过流故障, 对车辆 DC 110 V 负载造成冲击, 也对正线正常运行造

成了较大影响。

鉴于 4 号线车辆辅助系统已完成设计并投入使用多年, 而且控制电路设计更改及元器件选型变更难度较大, 因此本文针对出现的充电机模块输出过流问题, 主要从降低故障影响和避免类似故障再次发生的角度寻求解决措施, 并要求供应商在后续项目中优化其设计, 以从根本上解决该问题。

1 充电机驱动板直通故障原因分析及解决对策

1.1 充电机模块控制回路

苏州轨道交通 4 号线车辆辅助系统充电机模块从辅逆系统的四相逆变器的第四相处受电, 通过 Buck 斩波电路(降压电路)降压整流后得到 DC 110 V 电, 向整车低压负载及蓄电池供电。Buck 电路利用功率开关 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)控制电路的工作状态。充电机模块控制回路包括 Buck 电路、控制电路、驱动及保护电路。控制器产生 Buck 电路所需的控制信号并发送至驱动板, 再由驱动板转换成开通或关断 IGBT 的驱动信号, 从而控制 Buck 电路工作^[1]。4 号线车辆辅助系统充电机模块控制回路如图 1 所示。

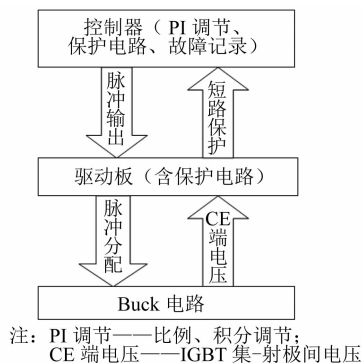


图 1 地铁车辆辅助系统充电机控制逻辑

Fig. 1 Control logic of metro vehicle auxiliary system charger

1.2 充电机驱动板直通故障原因

通过排查确定充电机输出过流故障原因为:充电机模块 IGBT 驱动板卡在工作时易受 EMC(电磁兼容性)干扰导致输入的 PWM(脉宽调制)信号无法关断,副边门极输出电压平常高,导致 IGBT 桥臂长通,引起充电机输入输出电压接近相等;由于线路阻抗很小,导致充电机模块输出电流过大,进而影响母线电压,对其他挂载设备造成冲击。4 号线车辆辅助系统充电机电路如图 2 所示。

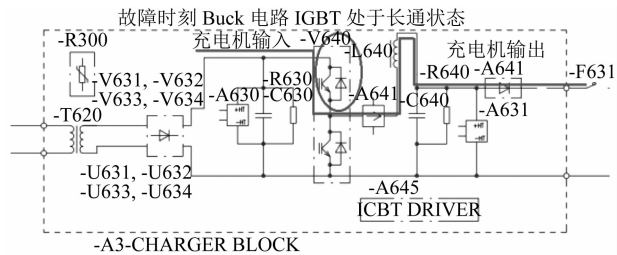


图 2 地铁车辆辅助系统充电机电路图
Fig. 2 Diagram of metro vehicle auxiliary system charger circuit

1.3 解决对策

该故障发生率较高,且极易造成 IGBT 驱动板烧毁,进而对运营安全造成影响。又因干扰源排查周期较长,无法短期内解决此问题。为尽快解决 IGBT 驱动板在受干扰后输出常高的问题,在现场可供选择的解决方案有限的情况下,经对 IGBT 驱动板工作原理进行分析,并根据充电机模块的控制方式,厂家提出升级列车辅助系统控制软件。该解决对策的基本方法是:在充电机工作前及工作中发生直通时,给充电机驱动板输入端发送几个 10 μ s 的窄脉冲,以此方式来解除充电机直通状态。新版车辆辅助系统控制软件关于充电机 IGBT 驱动板直通故障的复位逻辑如表 1 所示。

表 1 新版列车辅助系统控制软件应对充电机 IGBT 驱动板直通故障复位机制

Tab.1 New fault reset mechanism of train auxiliary system control software solving the IGBT driver board straight through problem

窄脉冲类型	窄脉冲发送时刻	加窄脉冲目的
类型 1	半桥谐振缓起完成,充电机未工作前发送 3~6 个窄脉冲	解决充电机工作前的直通
类型 2	充电机正常工作时发生直通(软件检测到充电机输出软、硬件过流),延迟 5 ms 发送 3~6 个窄脉冲	解决充电机工作中的直通
类型 3	发生充电机输出软硬件过流后 5 s 复位时发送 3~6 个窄脉冲	解决充电机工作前的直通

2 充电机驱动板直通故障复位机制分析及其可靠性测试

2.1 分析评估充电机驱动板直通故障复位机制

为验证新版列车辅助系统控制软件复位机制的可行性,结合 IGBT 的工作特性及 4 号线列车辅助系统充电机电路,对该复位机制进行分析评估。

1) 由图 2 可知,充电机的输入电压从前级逆变器的第四相处获得,输出电压接车辆 DC 110 V 负载及蓄电池,所以在以上 3 种不同工况下(即表 1 中的 3 种类型),充电机 IGBT 电感两端的压差不同(平台电压),IGBT 电流较大,可能有过流风险。

2) 由于线路和器件内部分布有杂散电感,IGBT 在关断时会产生电压尖峰。电压尖峰的大小由关断时电流的变化率和杂散电感的大小共同决定^[2]。短时间内向驱动板发送 3~6 个窄脉冲,意味着短时间内多次对 IGBT 进行开通和关断,可能引起较大的电流变化率,增大电压尖峰。若在较恶劣条件下,平台电压叠加关断电压尖峰,产生加大的电压应力,会给 IGBT 带来过压风险。

2.2 验证充电机驱动板直通故障复位机制的可靠性

1) 试验 1:故障复位机制测试。对烧录了新版列车辅助系统控制软件的辅助箱反复上电测试,模拟不同的工况,并抓取窄脉冲发出时刻 IGBT 的输入输出电压和电流等相关数据。4 号线列车辅助系统充电机模块 IGBT 的额定工作电压为 600 V,额定工作电流为 300 A。相关试验数据如表 2 所示。由表 2 可知,在不同工况下,窄脉冲可解除充电机驱动板直通问题,但类型 1 及类型 3 窄脉冲施加后,IGBT 可能会有过压风险,但无过流风险。

2) 试验 2:窄脉冲个数测试。在试验 1 的测试过程中,发现 IGBT 电感电流 I_L 和集-射电压 V_{ce} 变化较大,数值不稳定。这可能与窄脉冲个数有关。为进一步确认窄脉冲数量与 IGBT 电感电流及电压应力的关联性,对充电机的启动特性及故障重启复位特性进行测试,重点关注窄脉冲个数的影响。通过对充电机启动特性、故障重启复位特性的测试,并对重启复位过程中 IGBT 的电压及电流进行分析,发现:窄脉冲个数越多,复位时 I_L 就越大;当窄脉冲个数达到 5 个时, V_{ce} 已超过 IGBT 额定工作电压(V_{ce} 过压后,易导致内部失效)。因此推测:当窄脉冲个数达到 6 个时,电感很可能进入磁饱和状态,

表 2 新版列车辅助系统控制软件充电机驱动板直通故障复位机制测试结果

Tab.2 Test result of new fault reset mechanism of train auxiliary system control software charger driver board straight through problem

窄脉冲类型	BUCK 电路输入电压/V	BUCK 电路输出电压/V	IGBT 电感电流/A	IGBT 集-射电压/V	过流风险	过压风险
类型 1	350	0	540	611	无	有
类型 2	130	125	370	214	无	无
类型 3	350	110	600	650	无	有

注:表中数值选取多次测试结果中的最大值。

电感电流将急剧增加,产生较大的电流的变化率,造成 IGBT 过压失效。

3) 试验 3:IGBT 驱动板故障分析。在试验 2 的基础上,挑取 1 台辅助逆变器,反复触发充电机过流保护及复位解锁逻辑,直至充电机模块驱动故障锁死无法启动。开箱检查发现,充电机 IGBT 驱动板被烧蚀,且 IGBT 已失效。查看故障数据发现,IGBT 失效时刻正处于充电机输出软件过流故障第 5 s 复位时。对烧蚀的充电机驱动板进行检查发现,其失效模式均为驱动板副边 15 V 电源回路及驱动电阻大面积烧毁。使用万用表测量发现,IGBT 的 Cge(门-射电容)均为 0,而正常情况下 IGBT 的 Cge 为 42 nF 左右。对失效的充电机模块进行开盖检测,并对 IGBT 的状态进行观察,通过失效图案形态,可判断出 IGBT 失效模式为过电压应力失效,主要失效位置在绑线底部,且栅极存在过压痕迹。驱动板失效机理为:IGBT 发射极 E 与门极 G 短路后,高压串入门极,导致驱动板副边驱动电路过压,进而过流烧蚀。IGBT 失效模式与试验数据基本吻合,可确定失效原因由新版列车辅助系统控制软件所导致。

通过上述试验可知,新版列车辅助系统控制软件在特定工况下(第四相启动后,充电机缓启前以及充电机发生输出过流故障后 5 s 复位时)发出 5~6 个窄脉冲时,IGBT 在较大电流下关断,电压峰值

超过额定电压值,可能有过压失效的风险。

3 解决方案

为消除列车辅助系统控制软件中存在的过压风险,可通过以下 2 种措施进行缓解:

1) 减少各工况下的窄脉冲个数。在前期试验过程中发现,1 个解锁复位窄脉冲即可有效解除驱动板直通问题。由于 4 号线充电机 Buck 电路 IGBT 的开关频率为 20 kHz,车辆辅助系统控制单元对 Buck 电路的开关控制频率为 4 kHz,所以在单个控制周期内 IGBT 的开关周期为 5 个周期。考虑到 IGBT 的开关与电路开关控制周期重叠,最严苛情况下会发出 6 个脉冲。因窄脉冲个数无法固定,所以暂不考虑此措施。

2) 取消发送 2 种存在过压风险的窄脉冲。取消类型 1 的窄脉冲,无法改善充电机在工作前驱动板发生直通的情况;取消类型 3 的窄脉冲则无影响(由于 EMC 干扰发生直通后,延迟 5 ms 会发解锁脉冲,可有效使充电机恢复正常)。故考虑增加“充电机前级第四象限工作前,对驱动板复位并发送窄脉冲解除直通”的机制(亦可实现类型 1 窄脉冲的功能,在本文中定义为类型 4 窄脉冲),取消原类型 1 及类型 3 的窄脉冲。优化后列车辅助系统控制软件逻辑如表 3 所示。

表 3 新版列车辅助系统控制软件应对充电机 IGBT 驱动板直通故障优化前后复位机制

Tab.3 New fault reset mechanism of train auxiliary system control software solving charger IGBT driver board straight through problem before and after optimization

窄脉冲类型	触发条件	原软件复位机制	优化后的复位机制
类型 1	在第四相启动后,充电机缓启前	对驱动板复位,并发数个窄脉冲解除直通	取消此机制
类型 2	软件触发充电机输出过流软硬件任一保护时	延迟 5 ms 对驱动板复位,并发数个窄脉冲解除直通	保留此机制
类型 3	软件触发充电机输出过流软硬件任一保护,延迟 5 s 充电机复位时	对驱动板复位,并发数个窄脉冲解除直通	取消此机制
类型 4	充电机前级第四象限工作前	无此机制	对驱动板复位,并发数个窄脉冲解除直通

为确保优化后的复位机制有效可靠,需对其进行验证。在充电机前级第四象限工作前的工况下,谐振和降压电路暂未工作,降压电路输入电压最高值为上次正常工作电压 200 V;且输入输出电容都并联有自己的放电电阻,故输出电压最低值大于 0,此时电感两端压差小于 200 V。实际测试中,IGBT 电流小于 100 A,无应力风险。验证结果表明,新版列车辅助系统控制软件控制逻辑可有效避免 IGBT 过电压应力,有效解锁充电机直通过流现象,且复位解锁过程充电机电感电流不超过 100 A,能够保证充电机的正常使用。

4 结语

苏州轨道交通 4 号线车辆辅助逆变器已于 2021 年 4 月份全部更新为新版列车辅助系统控制软件。跟踪至 2021 年 12 月,未再发生充电机驱动板直通故障,辅助逆变器运行状态良好。但需明确的是,通过此方式使驱动板复位、避免过流情况发生非长久之计,仅在现场用车条件紧张、干扰源排查无实质性进展的情况下,可采用此方式作为临时措施,在一定程度上缓解用车压力。要从根本上解

决此问题,还需联合供应商对电路原理设计及元器件选型、驱动方式、线路屏蔽等方面重新进行优化。目前,苏州轨道交通 5 号线及后续线路的车辆辅助逆变器充电机模块不再采用与 4 号线同类型的驱动板,可从根本上有效避免上述故障的发生。5 号线已于 2021 年 6 月开通运营,运营半年以来,未发生车辆辅助系统充电机驱动板直通故障。此外,鉴于厂家提供的初版软件存在漏洞情况,笔者建议在进行软件升级或者变更前,应充分进行测试验证以保证能够全面覆盖装车应用的各种恶劣条件。

参考文献

- [1] 周维,林文彪,黄长强,等. 基于 Buck 斩波电路的充电机模块的设计[J]. 大功率变流技术,2012(4):52.
ZHOU Wei, LIN Wenbiao, HUANG Changqiang, et al. Design of a charger module based on buck chopper circuit[J]. High Power Converter Technology, 2012(4):52.
- [2] 汪波,胡安,陈明,等. IGBT 关断瞬态电压尖峰影响及抑制[J]. 半导体技术,2011(7):501.
WANG Bo, HU An, CHEN Ming, et al. Influence and suppression of voltage spike in turn-off transient of IGBT[J]. Semiconductor Technology, 2011(7):501.

(收稿日期:2021-12-10)

(上接第 125 页)

- [7] 谢雄耀,牛俊涛,杨国伟,等. 重叠隧道盾构施工对先建隧道影响模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013(10):2061.
XIE Xiongyao, NIU Juntao, YANG Guowei, et al. Model test for effects of construction of shield tunnelling in overlapping tunnels of existing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(10):2061.
- [8] 张玉龙,刘洁,龚磊,等. 小净距重叠盾构隧道下穿铁路线施工安全技术研究[J]. 铁道勘察,2019(5):59.
ZHANG Yulong, LIU Jie, GONG Lei, et al. Construction safety analysis of overlapping tunnels with small space under railway lines[J]. Railway Investigation and Surveying, 2019(5):59.

- [9] 刘维,唐晓武,甘鹏路,等. 富水地层中重叠隧道施工引起土体变形研究[J]. 岩土工程学报,2013(6):1055.
LIU Wei, TANG Xiaowu, GAN Penglu, et al. Soil deformation induced by overlapping tunneling in water-bearing strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(6):1055.
- [10] 魏纲,齐永洁,孙樵,等. 重叠隧道内支撑台车作用下既有隧道位移的计算方法[J]. 岩土力学,2020(增刊2):1.
WEI Gang, QI Yongjie, SUN Qiao, et al. Calculation method of existing tunnel displacement under action of supporting trolley in overlapping tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020(S2):1.

(收稿日期:2021-12-10)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728