

高温高湿环境下地铁列车辅助变流器 高故障率的设备优化方案

黄慧建 范溢峻 苏晗翀 黄行 蒲安会 何虹丽

(宁波市轨道交通集团有限公司运营分公司, 315101, 宁波)

摘要 [目的]地铁列车辅助供电系统运行环境的湿度过大,会导致 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)漏电流过高,进而可能引发辅助变流器故障。为此,有必要基于高温高湿环境,对辅助变流器箱内部环境进行优化,以降低 IGBT 的故障率。[方法]依托宁波轨道交通 4 号线列车辅助变流器的故障案例,调查了 IGBT 的故障原因,提出了 4 个设备优化方案,分别为降低辅助变流器冷却风机调速电压、调整内循环风机转向以降低 IGBT 周边湿度、提高柜体与外界密封性、优化冷却风扇控制逻辑。结合仿真及现场测试,验证了这 4 个优化方案的有效性和可操作性。[结果及结论] IGBT 故障原因为:宁波轨道交通 4 号线列车辅助变流器现场运营负载小,元器件的工作温度低,IGBT 内部湿气无法有效排出,且辅助变流器箱中气体交换速率较快,导致柜内湿度快速上升,进而导致 IGBT 模块的漏电流过高。4 个优化方案可以降低辅助变流器柜内的相对湿度,提高 IGBT 的运行可靠性。

关键词 地铁列车;绝缘栅双极型晶体管;辅助变流器;漏电流;气体交换速率

中图分类号 U270.38⁺¹

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.045

IGBT failure are investigated, and four equipment optimization schemes are proposed, including reducing the speed regulation voltage of the auxiliary converter cooling fan, adjusting the direction of internal circulation fan to reduce the humidity around IGBT, improving the sealing between cabinet and the external part, and optimizing the cooling fan control logic. Simulation and on-site tests verify that the four optimization schemes are effective and operable. [Result & Conclusion] IGBT failure causes are as follows: on Ningbo Metro Line 4, the low on-site operation load of the train auxiliary converter, the low operating temperature of the components, the undischarged moisture inside the IGBT, while the fast air exchange rate in the auxiliary converter box results in rapid increase of humidity in the cabinet, further leading to the over high leakage current of IGBT module. The four optimization schemes can reduce the relative humidity in the auxiliary converter cabinet and improve the reliability of the IGBT operation.

Key words metro train; IGBT; auxiliary converter; leakage current; air exchange rate

Equipment Optimization Scheme for High Failure Rate Auxiliary Converter of Metro Train in High Temperature and High Humidity Environment

HUANG Huijian, FAN Yijun, SU Hanchong, HUANG Xing, PU Anhui, HE Hongli

(Operation Branch of Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China)

Abstract [Objective] Over high humidity in the operating environment of metro train auxiliary power supply system will lead to high leakage current of IGBT (insulated gate bipolar transistor), which may further cause the auxiliary converter failure. Therefore, it is necessary to optimize the internal environment of the auxiliary converter box based on the high temperature and high humidity environment to reduce the failure rate of IGBT. [Method] Based on a case study of the train auxiliary converter failure on Ningbo Metro Line 4, causes of

辅助变流器是地铁列车十分重要的组成部件,为地铁列车提供绝大部分直流负载和部分交流负载。宁波市位于沿海地带,属亚热带季风气候,温和湿润,四季分明。该市的年平均气温为 16.4℃,年平均降水量为 1 502.86 mm,年平均蒸散量为 661.88 mm^[1]。其中,梅雨季节的相对湿度高达 80%,温度接近 30.0℃。这样的高温高湿环境对地铁列车辅助变流器的运行可靠性提出了更高的要求。

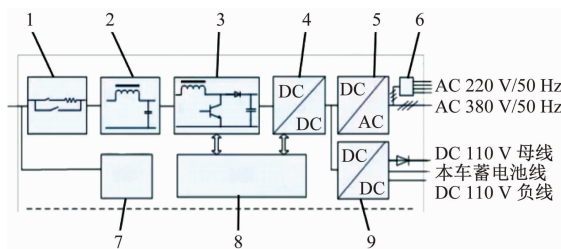
本文结合宁波轨道交通 4 号线(以下简称“4 号线”)列车辅助变流器典型故障案例,基于理论研究和实践分析,寻求 4 号线列车辅助变流器在高温高湿环境下高故障率的设备优化方案。

1 地铁列车辅助供电系统工作原理

1.1 辅助变流器工作原理

4 号线是地铁 B2 型 6 节编组列车,其车辆辅助

供电系统采用并网供电技术^[2]。辅助变流器分为交流负载回路和直流负载回路两部分,主要由辅助高压模块、高频 DC/DC 斩波器变换模块、高频逆变模块及高频充电机等组成^[3],其拓扑图如图 1 所示。



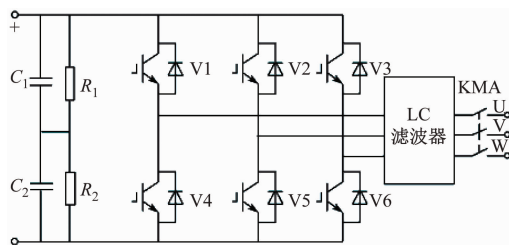
注:1—预充电电路;2—输入滤波电路;3—升压电路;4—谐振变换器;5—逆变电路;6—三相变压器;7—应急启动电源;8—控制单元;9—斩波电路。

图 1 地铁列车辅助变流器拓扑图

Fig. 1 Topology of the auxiliary converter of metro train

1.2 DC/AC 逆变模块工作原理

DC/AC 逆变模块主要由 3 组 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)组成,该逆变模块为两电平电压型逆变电路,采用输出电压闭环控制,通过精准控制 IGBT 门级的基极电流来调整 IGBT 的连通与断开。三相电压型逆变电路的导向方式为 180° 导电,即:每个桥臂导电角度为 180° ,同一相上下两臂交替导电,各相开始导电的角度差值为 120° 。将 DC 670 V 输入电压逆变成基波频率为 50 Hz 的 PWM(脉冲宽度调制)电压,经正弦波滤波器滤波后,可得到近似正弦波的三相 AC 380 V/50 Hz 电压输出。DC/AC 逆变模块结构如图 2 所示。



注: C_1 、 C_2 —中间电容; R_1 、 R_2 —放电电阻;V1 至 V6—IGBT 的编号;LC—电感电容;KMA—三相交流接触器;U、V、W—三相交流输出。

图 2 DC/AC 逆变模块结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of DC/AC inverter module structure

2 4 号线列车辅助变流器故障案例

2.1 故障概述

2022 年 6 月,4 号线 04028 车报“040281 车 A

机逆变模块 A 相桥臂故障”。故障发生后,辅助变流器封锁。重启辅助变流器控制单元后,故障仍无法恢复。故障发生时,天气为小雨,停车库内温度为 30.4°C ,相对湿度为 72.4%。后续 4 号线又出现了 7 次该类型故障,这些故障均集中爆发于夏季。

2.2 故障机理

辅助变流器逆变模块故障上报逻辑为:接收到来自逆变模块驱动板反馈的 A 相、B 相、C 相故障信号后,辅助变流器控制单元立即上报该故障,同时上报辅助变流器严重故障。此时辅助变流器逆变封锁,停止工作且不能复位。导致该故障的主要原因包括 IGBT 故障、信号线缆传输故障及辅助变流器控制单元故障等。

2.3 故障调查

下载辅助变流器故障数据并对数据进行分析。数据表明:列车升弓后辅助变流器中间电压上升,逆变模块正常启动,三相正常输出;43 min 后,辅助变流器控制单元上报 A 相桥臂故障,随后三相 U、V、W 逆变输出电流瞬间增大;约 200 ms 后,辅助变流器封锁逆变输出。

故障发生在模块正常启动后,基本排除负载原因导致故障。发生故障前,输入电压、电流等参数均正常,由此可判断为 IGBT 故障。检查逆变模块,其外观正常,无烧灼痕迹,无刺激性气味。更换逆变模块后,在停车库内实施高压试验,辅助变流器运行正常,故障消除。

进一步对拆下的故障模块进行静态测试,其 IGBT 阻值测试结果如表 1 所示。

表 1 故障模块的 IGBT 阻值测试结果

Tab. 1 IGBT resistance test results of the fault module

IGBT 编号	$R_{ge}/\text{k}\Omega$	$R_{ce}/\text{k}\Omega$
V1	∞	140
V2	0.64	154
V3	∞	58
V4	∞	136
V5	∞	57
V6	∞	157

注: R_{ge} —IGBT 门极和发射极阻值; R_{ce} —IGBT 集电极和发射极阻值。

由表 1 可知,编号为 V2 的 IGBT 的 R_{ge} 远小于其他编号 IGBT 的 R_{ge} ,由此判断出辅助变流器故障的原因为 V2 位置处的 IGBT 故障。

3 辅助变流器故障原因分析

IGBT 是变流器的核心器件。每个功率模块内,同时安装了多个 IGBT,模块的发热量大,且发热位置集中,加上 IGBT 对温度很敏感^[4],需对 IGBT 的故障原因进行深入分析。

3.1 IGBT 故障原因

对所有存在故障的逆变模块 IGBT 进行分析,发现故障现象可分为两类:一类故障可复位,IGBT 未完全故障;另一类为 IGBT 被击穿。

测量现场故障模块 IGBT 的漏电流 I_{ces} ,并将 I_{ces} 与出厂标准值进行比较,约有 70% 的故障模块的 IGBT 存在 I_{ces} 偏高的现象。对 R_{ge} 和 R_{ce} 进行测试,阻值出现故障的元器件只占 12%。由此可断定, I_{ces} 过高是引发 IGBT 故障的主要原因。

3.2 烘烤测试

对 I_{ces} 过高的 IGBT 进行烘烤测试,即在 125 °C 的环境下对 IGBT 烘烤 8 h。而后在 DC 1 200 V 电压下测量 I_{ces} , I_{ces} 符合要求。将 IGBT 放置 1 周后,再次测量 I_{ces} , I_{ces} 依旧符合要求。故可确定 IGBT 故障原因为湿气进入器件内部,导致 IGBT 的 I_{ces} 增加。

3.3 横向对比

将其他线路地铁列车(运营 2 年内均未发生过 IGBT 故障)辅助变流器柜内环境与 4 号线列车辅助变流器柜内环境进行对比,发现 4 号线列车辅助变流器柜内运行温度比其他线路列车低 7 °C ~ 9 °C,相对湿度比其他线路列车高 5% ~ 10%。

由此,针对湿气腐蚀 IGBT 原因,本文提出了 2 种假设:①现场运营负载小,器件的工作温度过低,导致 IGBT 内部湿气排出效率过低;②在列车不工作时,辅助变流器内外气体交换速率较快,导致柜内湿度偏高。

4 优化方案与测试

根据上述分析,为解决 4 号线列车辅助变流器内部湿气相对偏高的现状,针对列车工作与不工作 2 种场景,提出以下 4 个设备优化方案,并进行优化效果验证。

4.1 方案一

方案一为:将风机调速电压由原先的 6 V 调整为 2 V,减少低速挡的风量,提高模块 IGBT 内部 PN 结区域的工作温度(以下简称“结温”)和柜体内环

境温度。

根据方案一,将整柜置于试验平台上,分别基于常规工况、高湿工况 2 种工况对 I_{ces} 进行测量。其中:常规工况指测试时柜体内环境温度为 34 °C,设定的环境相对湿度为 40%,输出的三相电流为 50 A;高湿工况指测试时柜体内环境温度为 30 °C,设定的环境相对湿度为 85%,输出的三相电流为 50 A。

测试过程如下:在辅助变流器通电运行前,测量 6 个 IGBT 的起始 I_{ces} ,记为 $I_{ces,1}$;随后对辅助变流器开启持续 5 h 的通电运行,运行结束后测量各 IGBT 结温,并将柜体静置 12 h 后再次测量 I_{ces} (此时的测量值记为 $I_{ces,2}$)。

常规工况下 I_{ces} 的测试结果如表 2 所示。高湿工况下 I_{ces} 的测试结果如表 3 所示。

表 2 常规工况下方案一 IGBT 漏电流的测试结果

Tab.2 Test result of IGBT leakage current under normal working condition in Scheme 1

IGBT 编号	$I_{ces,1}/\mu A$	运行 5 h 后 IGBT 结温/°C	$I_{ces,2}/\mu A$
V1	1 100.0	42.7	944.0
V2	27.0	43.4	0.2
V3	14.0	48.2	0.3
V4	15.0	49.0	0.2
V5	153.0	53.3	0.2
V6	882.4	53.1	777.0

表 3 高湿工况下方案一 IGBT 漏电流的测试结果

Tab.3 Test result of IGBT leakage current under high humidity condition in Scheme 1

IGBT 编号	$I_{ces,1}/\mu A$	运行 5 h 后 IGBT 结温/°C	$I_{ces,2}/\mu A$
V1	374.0	49.2	65.0
V2	48.0	49.8	14.0
V3	172.0	53.8	0.3
V4	0.2	54.7	0.3
V5	966.0	58.2	450.0
V6	18.0	58.3	0.4

由表 2 可知,常规工况下减少低速挡的风速,提高器件结温,各 IGBT 的 I_{ces} 均有一定程度减少。其中 V2、V3、V4、V5 位置的 IGBT 经试验后,其 I_{ces} 均由 μA 级别降至 nA 级别(元器件出厂标准)。

由表 3 可知,高湿工况下减少低速挡的风速,提

高器件结温,各 IGBT 的 I_{ces} 均有一定程度减少。其中 V3、V4、V6 位置的 IGBT 经试验后,其 I_{ces} 均由 μA 级别降至 nA 级别。

由表 2、表 3 测试结果可知,辅助变流器正常工作时,IGBT 产生的结温能在一定程度上帮助元器件排出内部湿度,进而导致元器件 I_{ces} 减少。根据试验测试结果对比分析,方案一能在一定程度上提高 IGBT 工作结温,对元器件 I_{ces} 的减少有明显效果。

4.2 方案二

方案二为:将内循环风机方向调整 180° ,增大 IGBT 模块周边通风量,以降低模块周边湿度。

根据方案二,将整柜置于试验平台上,分别基于内循环风机方向对方案二实施前后进行测试。实施前后的环境温度均为 34°C ,环境相对湿度初始值均为 90%,柜体内湿度为环境湿度等于 90% 下的实测值。设定的输出三相电流均为 50 A。测试过程如下:整个测试持续 4 h,测试过程中按 1 次/h 的频率测量环境湿度及柜体内相对湿度。方案二实施前后柜体内相对湿度的对比结果如表 4 所示。

表 4 方案二实施前后柜体内相对湿度对比结果

Tab.4 Comparison results of the relative humidity in the cabinet before and after implementation of Scheme 2

辅助变流器 持续工作 时间/h	方案二实施前		方案二实施后	
	环境湿度/%	柜体内相对湿度/%	环境湿度/%	柜体内相对湿度/%
0	90	80	90	82
1	80	60	79	61
2	79	55	79	50
3	75	52	75	45
4	75	52	75	41

由表 4 可知,方案二实施后,辅助变流器柜体内相对湿度在单位时间内下降得比实施前更快,方案二对降低柜体内相对湿度效果较为显著。

4.3 方案三

方案三为:在辅助变流器内部各模块散热器安装缝隙处涂抹油泥灰,增加密封性,降低柜体内外空气湿度交换率。

根据方案三,对未实施方案三和已实施方案三的两个柜体内外的湿度进行对照测试。测试过程如下:在列车休眠情况下,按 1 次/h 的频率对两个柜体的内外湿度差进行对比,总测试时长为 4 h。方

案三实施前后柜体内外湿度差的对比结果如表 5 所示。由表 5 可知:方案三实施前,4 h 测试过程中柜体内外湿度差逐渐减少,最终趋于为 0;方案三实施后,4 h 测试过程中柜体内外湿度差基本保持在 20% 左右,体现了良好的密封性。由此可认为方案三可显著降低柜体内外湿气交换的速率。

表 5 方案三实施前后柜体内外湿度差的对比结果

Tab.5 Comparison result of humidity difference inside and outside the cabinet before and after implementation of Scheme 3

试验持续 时间/h	实施前柜体内外 湿度差/%	实施后柜体内外 湿度差/%
0	20	22
1	12	22
2	4	21
3	2	20
4	0	20

注:柜体内外湿度差 = 柜体外部湿度 - 柜体内部湿度。

4.4 方案四

方案四为:增加辅助变流器内循环风机模式切换条件,即:当 IGBT 模块温度超过 78°C 时,风机挡位由半速挡切换为全速挡,以避免外部负载处于高低速切换临界值时可能无法从低速挡切换至高速挡的问题。

根据方案四,将整柜置于试验平台上开展对照测试。测试过程如下:

1) 对方案四实施前的辅助变流器持续施加 2 h 的低负载,此过程柜体内部风机以低速挡运行。将结束低负载 2 h 后变流器内部各部件温升值定义为“实施前低负载下各部件温升”,记录该数值;随后加大外部负载(负载时间为 2 h),此过程柜体内部风机以高速挡运行,将结束高负载 2 h 后变流器内部各部件温升值定义为“实施前高负载下各部件温升”,记录该数值。

2) 在同一环境温度下,对方案四实施后的辅助变流器施加高负载(负载时间为 4 h),此时风机从低速挡启动,IGBT 模块温度超过 78°C 时风机自动切换为高速挡。将结束高负载 4 h 后变流器内部各部件温升值定义为“实施后高负载下各部件温升”,记录该数值。

方案四实施前后辅助变流器内部各部件的温升对比结果如表 6 所示。由表 6 可知,方案四实施

后,可降低高负载下辅助变流器内部各部件的温升,方案四具有可行性。

表6 方案四实施前后辅助变流器内部各部件温升对比结果
Tab.6 Comparison results of temperature rise devices inside the auxiliary converter before and after implementation of Scheme 4

测量位置	实施前 低负载下 各部件温 升/K	实施前 高负载下 各部件温 升/K	实施后 高负载下 各部件温 升/K	各部件 设计温升 限值/K
变压器 1	42.0	70.0	51.1	105.0
变压器 2	41.5	63.8	52.5	105.0
电抗器 1	45.6	78.3	58.8	135.0
电抗器 2	49.5	72.5	55.9	135.0
电抗器 3	51.8	68.8	51.8	135.0
DC/DC 模块散热器	22.2	39.6	39.2	45.0
充电机模块散热器	10.5	21.9	13.2	45.0
逆变模块散热器	9.6	23.1	17.2	45.0
模块腔室	5.3	25.1	14.7	45.0

5 结语

本文为解决高温高湿环境下地铁列车辅助变流器主要元器件 IGBT 故障率偏高的问题,提出了调整风机调速电压、调整内循环风机方向、提高柜体密封性、优化冷却风扇控制逻辑 4 个优化方案,并对 4 号线全线列车的辅助变流器进行优化。

2022 年 12 月,对 4 号线全部列车的优化工作全部完成。列车设备优化完成后至今已累计运行 1 年多,尚未有同类故障再次发生。试验台测试结果和现场实施跟踪效果表明:本文提出针对高温高湿环境下辅助变流器的优化方案具有有效性和可操

作性,建议予以推广应用。

参考文献

- [1] 窦攀烽,左舒翟,任引,等. 气候和土地利用/覆被变化对宁波地区生态系统产水服务的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2398.
DOU Panfeng, ZUO Shudi, REN Yin, et al. The impacts of climate and land use/land cover changes on water yield service in Ningbo Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2398.
- [2] 裴文超,杨树松,蒋晓东,等. 采用并网供电和高频变流技术的宁波轨道交通车辆辅助供电系统[J]. 机车电传动, 2020(3): 73.
QIU Wenchao, YANG Shusong, JIANG Xiaodong, et al. Auxiliary power supply system with grid connected power supply and high frequency converter technology of Ningbo rail transit vehicles [J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 73.
- [3] 于青松. 下一代地铁列车节能型牵引及辅助变流系统[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(5): 128.
YU Qingsong. Energy-saving traction converter system for next generation metro train [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(5): 128.
- [4] 刘博阳,刘伟志,杨宁. 地铁辅助变流器功率损耗与热仿真分析[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(4): 72.
LIU Boyang, LIU Weizhi, YANG Ning. Power loss and thermal simulation analysis of auxiliary converter for metro vehicle [J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(4): 72.

· 收稿日期:2023-12-18 修回日期:2024-02-19 出版日期:2024-09-10
Received:2023-12-18 Revised:2024-02-19 Published:2024-09-10
· 通信作者:黄慧建,高级工程师,171348912@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 254 页)

- SHAO Shuai, SHAO Shengjun, ZHU Dandan, et al. Microstructure evolution and macro-structural change law of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 64.
- [5] 薛晓辉,张军,宿钟鸣,等. 富水黄土隧道注浆加固机制及效果评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(4): 34.
XUE Xiaohui, ZHANG Jun, SU Zhongming, et al. Grouting pre-reinforcement mechanism and effect evaluation in water-rich loess tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sci-

ence), 2015, 34(4): 34.

· 收稿日期:2022-05-05 修回日期:2022-06-13 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-05 Revised:2022-06-13 Published:2024-09-10
· 第一作者:胡自全,高级工程师,287113131@qq.com
通信作者:沙鸣,高级工程师,38997629@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license