

成都地铁8号线辅助供电系统中压并网供电方式的升级改造

杨帆 李林波 欧洲

(成都地铁运营有限公司, 610041, 成都//第一作者, 工程师)

摘要 基于地铁列车辅助供电系统,介绍了成都地铁8号线庞巴迪辅助供电系统的并网供电原理,以及接地短路故障的判断条件及逻辑。通过ACM(辅助变流器模块)故障评估列车的运行状态,并结合国内地铁运营过程中的典型故障,发现成都地铁8号线辅助供电系统中存在中压母线接地故障,并针对性地分析讨论了中压母线接触器因故障无法断开而导致的全列ACM停机的的问题。最终,提出采用在中压母线上新增中压母线隔离单元的方法,降低故障对列车运营所带来的影响,避免列车救援。

关键词 地铁列车; 辅助供电系统; 并网供电; 接地故障

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.09.038

Upgrading and Reconstruction of Medium-voltage Grid-connected Power Supply Mode in Chengdu Metro Line 8 Auxiliary Power Supply System

YANG Fan, LI Linbo, OU Zhou

Abstract Based on metro train auxiliary power supply system, the grid-connected power supply principle of Bombardier auxiliary power supply system of Chengdu Metro Line 8 as well as the judgment condition and logic of ground short circuit fault are introduced. By evaluating train operation state with ACM (auxiliary converter module) faults, and considering the typical faults in domestic metro operation, it is discovered that medium-voltage bus ground fault exists in the auxiliary power supply system of Chengdu Metro Line 8. The problem of medium-voltage bus contactor disconnection failure resulting into the shutdown of whole train ACM is specifically analyzed. Finally, it is proposed to add medium-voltage bus isolation unit on medium-voltage bus to reduce the impact of fault on train operation and to avoid train rescue.

Key words metro train; auxiliary power supply system; grid-connected power supply; ground fault

Author's address Chengdu Metro Operation Co., Ltd., 610041, Chengdu, China

如何保障司乘人员及车辆的安全性与舒适性,是地铁运营中必须重视的问题。辅助供电系统是列车正常运行中不可缺少的重要部分,用于给列车的通风设备、空调、照明、制动和控制单元提供电力保障,主要包括辅助供电系统和辅助用电设备。辅助用电设备包括中压用电设备(空调、制动电阻风机、空气压缩机、电抗器风机)和低压用电设备(照明、乘客信息显示系统、控制系统及其他辅助设备)。辅助供电系统分为由辅助逆变器提供电源的中压供电系统(AC 380 V)和由充电机提供电源的低压供电系统(DC 110 V)^[1]。其中,中压并网供电技术由于能够实现列车供电能力的合理分配,实现对剩余供电容量的最大化利用,保证了乘客的安全性和舒适性,使其在地铁列车中获得了广泛应用。为了提高中压并网供电技术的可靠性,各主机厂在电路中也设置有相应的接触器进行分段控制。本文主要针对在该接触器因故障无法断开时发生的母线接地情况进行分析讨论,提出针对性改造意见,降低上述故障发生后的一系列影响,为后续地铁列车辅助供电系统的电路设计提供参考。

1 成都地铁列车辅助供电系统

1.1 成都地铁主要线路列车的辅助供电方式

地铁列车辅助供电系统包括辅助变流器、充电机、蓄电池、高压母线、中压母线、低压母线及其他必须的辅助设备(继电器、接触器、控制开关、控制器等)。辅助供电系统主要有扩展供电(集中供电)、交叉供电和并网供电这3种方式^[2-3]。

目前,成都地铁已投入运营及在建的各条线路列车的辅助供电方式有扩展供电和并网供电两种方式,如表1所示。

表 1 成都地铁运行线路列车辅助供电系统

Tab.1 Train auxiliary power supply system for Chengdu Metro operating lines

地铁线路	辅助系统厂家	辅助系统简称	辅助供电方式	保护性逻辑
1 号线、2 号线	日本东洋	SIV	扩展供电	故障后启动
3 号线、4 号线	阿尔斯通	CVS	扩展供电	故障后启动
5 号线	阿尔斯通	CVS	并网供电	故障后断开 (有冗余设计)
6 号线、7 号线、 8 号线、10 号线	庞巴迪	ACM	并网供电	故障后断开

注：SIV——静止逆变器；CVS——辅助逆变器；ACM——辅助变流器模块。

由表 1 可知,除了地铁 1~4 号线牵引辅助系统的辅助供电方式为扩展供电外,其余各条地铁线路均采用的是并网供电方式。由此可见,成都地铁列车的辅助供电系统以并网供电方式为主。

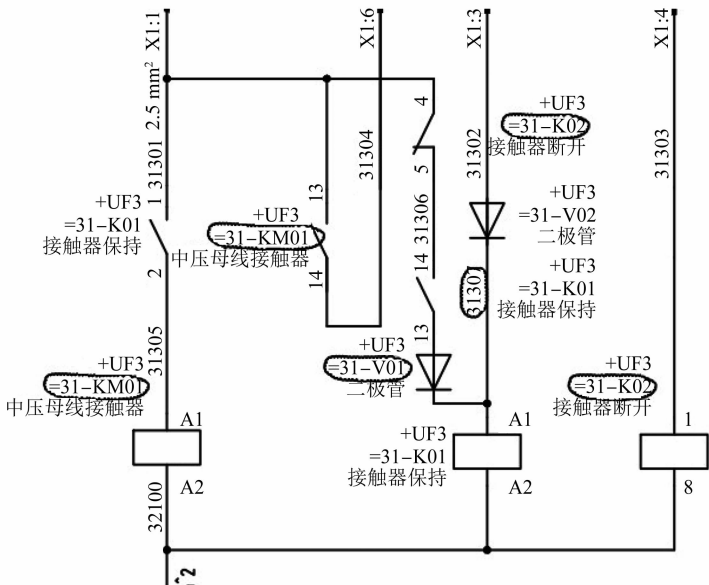
1.2 两种辅助供电方式比较

扩展供电方式的优点为使用设备数量少,缺点为在故障时的供电能力损失较多。而并网供电方式供电能力互补性强、冗余度高、供电能力损失少、系统抗负载电流冲击能力强,但其控制较为复杂,对逆变器之间的同步控制相位、频率和电压波形控制要求较高。总的来说,与扩展供电相比,并网供电在列车供电故障状态下的运行能力和负载分配是现有扩展供电所无法比拟的。近年来,各大车辆

生产厂家对列车中压交流并网供电技术开展了深入的研究和论证,并应用于地铁列车辅助供电系统。西门子首次在上海轨道交通 1 号线增扩编列车中使用中压交流并网技术,阿尔斯通在上海轨道交通 2 号线东延伸线中首次使用了中压交流并联技术,庞巴迪在上海轨道交通 12 号线中首次使用中压并网供电^[2]。庞巴迪公司所提供的牵引和辅助设备由于其集成度高,成都地铁 6 号线、7 号线、8 号线及 10 号线一期项目工程都采用的是庞巴迪中压并网供电系统。对于扩展供电方式而言,当地铁列车发生故障时,其保护性逻辑为故障后启动;而对于并网供电方式而言,其保护性逻辑有故障后启动和故障后断开两种。

1.3 庞巴迪中压交流并网供电原理

成都地铁 8 号线(以下简称“8 号线”)列车为 6 节编组,其中庞巴迪中压交流并网供电系统采用中压母线接触器“断/合”控制原理,中压母线接触器“断/合”的指令通过 TCMS(列车控制与管理系统)发出,TCMS 发出中压母线接触器闭合指令(线号 32102)后,接触器保持继电器得电,并完成自锁,中压母线接触器得电吸合,实现全车中压交流母线连通,开始并网供电。中压母线接触器“断/合”控制电路(截图)如图 1 所示。



注：UF3——元器件所处位置在 3 车车下；V01、V02——二极管编号；K01、K02、KM01——接触器编号；A1、A2——接触器点位；X1——端子排 1。

图 1 中压母线接触器“断/合”控制电路截图

Fig.1 Screenshot of medium-voltage bus contactor ‘on/off’ control circuit

2 辅助供电系统中压并网供电方式的升级改造

2.1 改造前的 8 号线并网供电方式

2.1.1 改造前的并网供电方案分析

在列车运行过程中,并网供电系统发生接地和短路故障是无可避免的。为减少该类故障对列车运行造成的影响,各大设计厂家均在交流母线中设计了母线接触器或其他保护开关,通过控制该接触器的断或合,将故障影响控制在某一故障单元内,而另一单元设备则可正常运行。

8 号线并网供电核心部件为中压母线接触器,该中压母线接触器的“断/合”由 TCMS 进行控制。当某一个或多个 ACM 故障时,可以通过并网供电系统对故障车设备进行供电,以保证列车的运行状态。但该方案断开并网供电的方式有且仅有通过 TCMS 来控制该接触器断开,当该接触器因故障无法断开且发生母线接地或短路故障时,并网供电就无法自动断开。

2.1.2 典型故障分析

针对辅助供电系统的接地故障,虽然在地铁运营过程中发生的几率并不算非常高,但在国内外也曾多次发生。2020 年 4 月 15 日,成都地铁 1 号线 10162 列锦江宾馆站上行车辆监控显示器上的 SIV 显示为红色。车辆监控显示器界面显示两端 SIV 故障,代码 FAIL(重故障),空调处于紧急通风状态,查看通信界面无异常,车辆监控显示器故障记录显示 6 车和 1 车均报 OUTOC(输出过电流)。检查车下 SIV、空压机、380 V 母线状态,均未见异常,使用 1 000 V 摇表测量各线路绝缘电阻均大于 500 MΩ,无接地现象。测量车上空调及照明电路,发现 4 车 1 位空调机组的 2 位压缩机的 380 V 线路接地,登顶进一步检查,发现压缩机内部短路接地。

故障产生逻辑:4 车 1 位空调机组的 2 位压缩机内部短路接地,压缩机控制接触器触头过电流粘连,6 车 SIV 检测到 380 V 总线瞬时过流,引起保护。6 车 SIV 保护后,TCMS 控制列车进行扩展供电,由于接地故障依然存在,进而导致 1 车 SIV 引起保护。

该故障可能导致的后果:

1) 全列中压供电系统均处于无电状态,空压机无法启动,列车由于风压过低,导致总风压过低,紧急制动无法缓解。

2) 全列客室仅剩应急照明,造成乘客恐慌,导致踩踏事件发生。

3) 清客 2 列,救援 1 列,造成全线运营严重晚点(10 min 及以上),对乘客出行带来极大的影响。

2.1.3 ACM 故障与列车运行状态评估

根据庞巴迪系统辅助负载计算以及实际测试,不同数量的 ACM 故障所造成的影响也不一样,如表 2 所示。

表 2 8 号线 ACM 故障与列车运行状态试验结果统计
Tab. 2 Statistics of Line 8 ACM fault and train operation state test results

故障 ACM 数量/个	列车运行状态
1	列车不切除任何负载,运行正常
2	列车空调压缩机减半,其他设备运行正常
3	列车执行通风状态,其他设备运行正常
4	列车执行紧急通风状态、客室仅有应急照明、空压机停机,列车无法运行

ACM 针对短路也设计有内、外部短路检测,具体逻辑如下:

1) ACM 内部进行短路检测,若内部存在短路,断开该 ACM 内部接触器。

2) 内部短路检测完成,没有报短路故障,ACM 三相母线输出接触器尝试闭合;若闭合后依然存在故障,DCU/A(辅助变压器驱动控制单元)向 TCMS 发送“外部短路”信号,此时 TCMS 断开中压母线接触器,并禁止发生外部短路的中压母线上连接的所有 ACM 启动。

针对该类故障,充分分析 8 号线的并网供电设计原理,当 8 号线发生母线接地情况时,TCMS 将会发送中压母线接触器断开指令,断开一个单元的 ACM,而另一单元的设备则可正常运行。但如果短路瞬间电流过大,导致该接触器触点烧熔而无法断开,或因 TCMS 故障无法及时发送中压母线接触器断开指令时,并网供电就无法中断,此时全列 ACM 会因过电流而产生保护性封锁,导致全列中压供电系统无电。空压机、空调、客室正常照明均无法使用,列车执行紧急通风状态,客室仅有应急照明。由于 ACM 和 MCM(电机变流器模块)内部存在过温保护逻辑,仅通过 AB(辅助及蓄电池)箱、PA(牵引及辅助)箱或 PH(牵引及高压)箱内部的全列中压供电系统所控制的外部风机进行散热,当温度过高时会保护性封锁。由于全列 ACM 均停机,用于散热的外部风机也无法运行,MCM 牵引逆变器也无法正常工作,列车无法牵引只能等待救援。

2.2 改造后的 8 号线并网供电方式

2.2.1 改造后的并网供电方式分析

为避免出现中压母线接触器无法自动断开的情况,通过分析与模拟,在中压母线上设置一个中压母线隔离单元,其中包括大容量三相空气开关和

抗电磁干扰屏蔽装置等设备。设置该隔离单元可实现对并网供电状态的双重保护,确保当并网供电无法自动中断时,可以通过中压母线隔离单元人工中断并网供电。改造后的 8 号线并网供电结构拓扑图如图 2 所示。

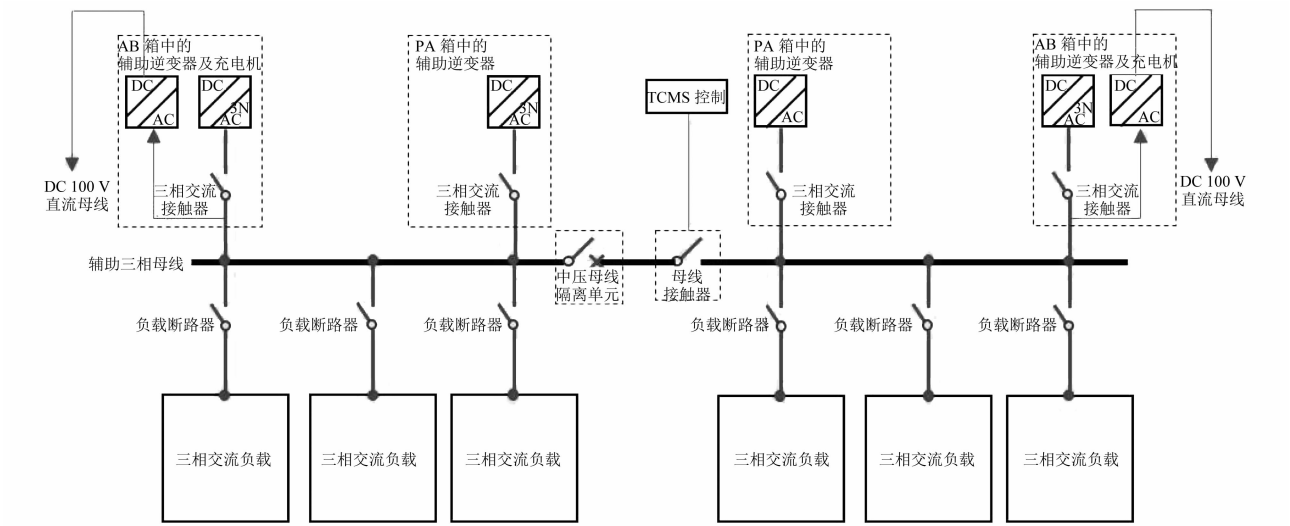


图 2 改造后的 8 号线并网供电结构拓扑图

Fig. 2 Topology diagram of improved grid-connected power supply structure of Line 8

2.2.2 改造后的优势

改造后的方案保护了整个中压母线,当中压母线接触器因故障(如过流导致触点烧熔)导致无法断开,或 TCMS 故障无法发出断开指令时,可以通过断开空气开关后,人工中断并网供电。当出现短路或接地产生过电流时,也可以通过人工断开此空气开关,终止并网供电。因 ACM 过流保护为保护性封锁,可以通过操作车辆监控显示器对 ACM 进行复位,至少可以恢复一个单元的 ACM,确保一个单元的列车牵引和供电正常,极大地降低了故障对列车运行的影响。

在应用过程中,三相空气开关选型尤为重要,需要充分考虑地铁列车在全负载工况以及初上电时的中压母线瞬时电流,避免在正常运行情况下该空气开关跳闸而导致列车无法正常并网供电的故障发生。

3 结语

成都地铁 8 号线的中压母线经过上述改进后,可以有效避免在辅助供电系统中存在的中压母线接地故障,或中压母线接触器因故障无法断开,而导致的全列 ACM 停机问题,从而提高了地铁运行

的稳定性与安全性。在极端情况下,增加此中压母线隔离单元可以迅速将接地故障影响控制在一个单元内部,而另一个单元列车供电负载不会受到任何影响。因此,在中压母线上增加中压母线隔离单元对并网供电进行双重保护是可行的,将此隔离单元设计在司机室内,可以极大程度地缩短故障时的司机应急处置时间。

参考文献

[1] 李张群. 地铁车辆中压交流并网供电接地故障策略研究[J]. 工业控制计算机, 2018(4): 141.
LI Zhangqun. Study on strategy of grounding fault of metro vehicle's medium voltage parallel-operated power supply[J]. Industrial Control Computer, 2018(4): 141.
[2] 李铁斌. 中压交流并网供电技术在地铁列车上的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2012(6): 121.
LI Yibin. Application of medium voltage parallel-operated power supply on metro trains[J]. Urban Mass Transit, 2012(6): 121.
[3] 宋君君, 杜苗苗, 郭文勇, 等. 城市轨道列车辅助供电并网控制方案[J]. 机车电传动, 2019(4): 98.
SONG Junjun, DU Miaomiao, GUO Wenyong, et al. Parallel network control method on auxiliary power supply system of subway train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(4): 98.

(收稿日期: 2020-07-27)