

地铁直流设备框架保护误动案例分析

沈赐奎

(厦门地铁运营有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要 直流设备在地铁供电系统中非常重要, 直接影响地铁的行车和运营。当直流母线发生碰壳故障时, 通过设置框架保护, 快速切断故障电流, 从而保障人身及设备安全。本文通过介绍框架保护的原理及作用, 结合实际误动案例, 探究保护优化方案, 以降低误动概率。

关键词: 直流设备; 框架保护; 误动; 钢轨电位

Case analysis of direct current equipment frame protection malfunction in subway

SHEN Cikai

(Xiamen Metro Operation Co., Ltd, Xiamen, Fujian 361000)

Abstract DC equipment is very important in power supply system of subway, which directly affects the driving and metro operation. When the DC bus encounters a shell collision fault, it can quickly cut off fault current by setting frame protection to ensure the safety of the person and the equipment. In this paper, by introducing the principle and function of frame protection, optimization solutions are explored to reduce the probability of malfunction through case studies.

Keywords: DC equipment; frame protection; malfunction; rail potential

0 引言

目前, 国内城市轨道交通的牵引供电制式主要采用 DC 1 500V 或 DC 750V, 通过牵引变电所和牵引网向列车提供电源。牵引变电所主要设备有中压开关柜、整流变压器、整流器、直流开关柜、负极柜、回馈变压器、再生电能吸收利用装置^[1-2]。为保障直流设备的安全、稳定运行, 通常将整流器、直流开关柜、负极柜、再生电能吸收利用装置等直流设备绝缘安装, 并设置直流框架保护。当设备发生正极碰壳接地短路时, 保护能快速切断故障电流。

1 直流框架保护

直流框架保护即直流接地保护。由于牵引供电系统的正、负极悬浮安装, 不接地, 当正极碰壳接地短路时, 接地短路电流受接地电阻影响, 不足以使直流开关保护动作, 因此专门设置框架保护^[3]。直流设备外壳与基础槽钢之间设硬质绝缘垫板, 设备固定采用绝缘安装方法, 金属外壳不与地直接电气连接, 而是通过电缆与直流框架泄漏保护检测元

件连接后再与地形成单点电气接地^[4]。框架保护主要分为电压框架保护和电流框架保护, 文献[5-6]详细介绍了其工作原理, 直流框架保护接线示意图如图 1 所示。在设备外壳和地之间设置电流检测元件, 构成电流测量回路, 当检测电流达到保护定值时, 保护动作, 切断故障电流。在负母线和地(即设备外壳)之间设置电压测量元件, 构成电压测量回路, 当检测电压达到保护定值时, 发出告警信号或动作跳闸。

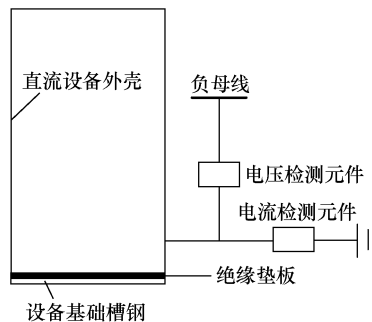


图 1 直流框架保护接线示意图

通过文献[7]可知, 框架保护的设置越来越合理, 根据不同设备发生框架保护动作时的影响范围,

通常在牵引变电所内设置多套直流框架保护装置，分别作用于不同设备，在保证安全的前提下尽量缩小停电范围，保障行车。如某地铁线路设置 3 套电流框架保护，配置情况见表 1。电压框架保护装置通过设置分段保护，可发出告警信号，严重时动作于跳闸，保护设备及人身安全。

表 1 电流框架保护配置情况

设备类型	保护配置	动作范围	故障复归
负极柜、整流器柜	电流框架保护 1	联跳本站 35kV 整流变柜、本站直流进线柜	就地复归
直流开关柜	电流框架保护 2	联跳本站 35kV 整流变柜、本站直流进出线柜、临站同一供电分区直流馈线柜	就地复归
再生电能吸收利用装置	电流框架保护 3	联跳本站 35kV 再生能馈柜、本站再生能馈装置对应的直流馈线柜	就地复归

2 误动案例分析

2.1 案例一

某线路在运行期间 B 站牵引变电所直流开关柜电流框架保护动作，钢轨电位限制装置Ⅲ段^[8]动作并闭锁，35kV 整流变、回馈变断路器跳闸，直流进出线 DC 1500V 断路器跳闸，全站整流机组、直流开关柜、再生电能吸收利用装置退出运行，同时联跳 A、B 临站同一供电分区直流馈线开关，导致上、下行 4 个接触网供电分区失电。案例一事故跳闸示意图如图 2 所示，方框内为本次跳闸的开关。

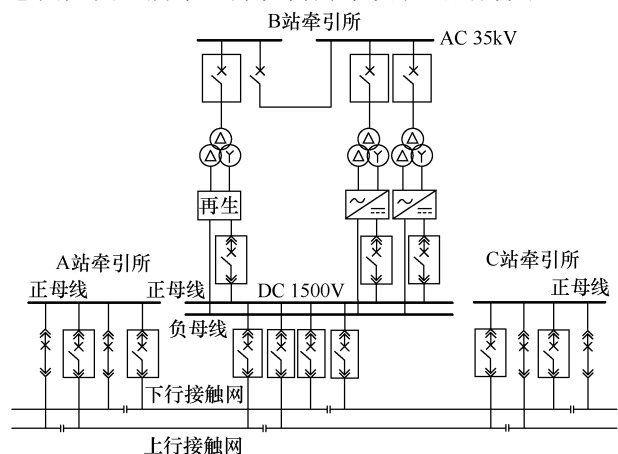


图 2 案例一事故跳闸示意图

经现场检查，设备未发生明显异常，直流开关柜外壳无放电痕迹。通过测量直流开关柜主母排对

设备外壳的绝缘电阻，1500V 测试电压下的绝缘阻值为 1.63MΩ，绝缘数据正常。排除设备因母线碰壳导致框架保护动作，初步判断为电流框架保护装置误动作。查看事件记录，框架保护动作时流过检测元件的电流达 81A，定值为 80A，延时 2ms，已达到保护定值。

现场对框架电流来源进行追溯，拆除直流开关柜框架保护接地电缆，利用万用表欧姆挡测试直流开关柜外壳对地电阻，为直接导通，标准值为大于 1MΩ^[9]，直流开关柜外壳对地绝缘数据不合格。拆除直流开关柜全部绝缘安装固定螺栓后，多次测试直流开关柜外壳与地均不导通。由此确定，直流开关柜外壳直接接地为固定螺栓引起，同时，钢轨电位限制装置Ⅲ段动作，接触器合闸并闭锁，故障发生时负极有大电流流向大地，是可能导致电流框架保护动作的原因。

经现场测试发现，在钢轨电位限制装置分闸状态下，无论是否有电客车经过（电客车从接触网取流），利用钳形电流表测量直流开关柜框架电流，数值接近为零。在钢轨电位限制装置合闸状态下，电客车经过时，直流开关柜框架电流数值最大可达约 40A。判断钢轨电位限制装置合闸状态下电流走向分为两个通路：①大部分电流走向为接触网→电客车→钢轨→负极→接地母排→地网；②少部分电流走向为接地母排→接地扁钢→槽钢→固定螺栓→直流开关柜外壳→框架电流检测元件→地网。电流来源于负极对地电流的部分分流，接地电流流通回路如图 3 所示。

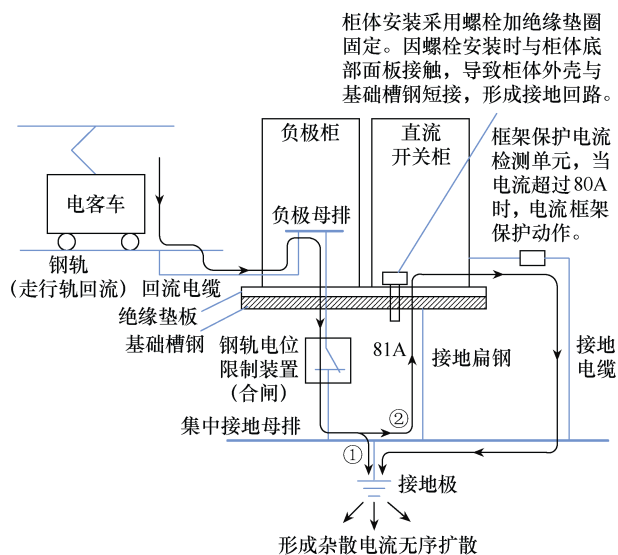


图 3 接地电流流通回路

经以上分析,判定本次电流框架保护误动作的原因为:①钢轨电位抬升引发钢轨电位限制装置Ⅲ段动作并合闸闭锁,负极对地存在较大电流;②因施工质量问题,导致直流开关柜外壳对地绝缘不合格,存在直接短接现象,对地电流流过框架电流测量元件并达到保护定值。

本次故障造成 B 站牵引变电所退出运行, A 站和 C 站牵引变电所对接触网进行大双边供电,导致多列车晚点。通过重新安装固定螺栓,测试框架对地绝缘合格后,恢复设备运行。

2.2 案例二

某线路主变电所进行解列演练恢复送电时,某站牵引变电所直流开关柜框架保护电压Ⅱ段动作、钢轨电位限制装置Ⅰ段动作,全站直流开关柜、整流机组及再生电能吸收利用装置退出运行,未联跳临站对应直流馈线开关,故障造成对应接触网供电分区单边供电。

现场排查故障时发现,直流框架电压达 148V,钢轨电位限制装置测量电压 126V。测量直流开关柜框架对地绝缘,电阻为 7.2MΩ,绝缘情况良好。现场实测负极母排对框架(钢轨对地)的实际电压最高可达 156V,现场确实存在钢轨对地异常电压。因演练恢复送电时,该供电区域有多车同时取流的情况,存在瞬时抬高钢轨对地电压的可能性。根据设计保护定值(见表 2),可初步判定钢轨电位限制装置Ⅰ段动作正常,直流框架保护电压Ⅱ段为误动作。

现场单独对钢轨电位限制装置和电压框架保护测量元件及定值进行校验。测试结果为:①测试电压达 126V 时,钢轨电位限制装置Ⅰ段动作,动作时间为 674.7ms;②测试电压达 157V 时,钢轨电位限制装置Ⅱ段动作,动作时间为 92.1ms;③测试电压达 128V 时,直流开关柜框架保护电压Ⅰ段动作,动作时间为 1 078.4ms;④测试电压达 148V 时,直流开关柜框架保护电压Ⅱ段动作,动作时间为 671.1ms。

根据保护定值单,钢轨电位限制装置Ⅱ段与框架保护电压Ⅱ段定值均为 150V,动作时间分别为 0ms 与 600ms,钢轨电位限制装置应先于框架保护动作。根据实际测试,钢轨电压在 157V 时钢轨电位限制装置Ⅱ段才动作,而框架保护电压Ⅱ段在钢轨电压为 148V 时即开始动作。当钢轨电压处于 148~157V 之间时,钢轨电位限制装置与电压框架保护的配合关系变成钢轨电位限制装置Ⅰ段与直流

表 2 保护定值

设备	保护类型	参数	定值	作用
钢轨 电位 限制 装置	Ⅰ段	整定值/V	120	接触器合闸
		时间/ms	600	
	Ⅱ段	整定值/V	150	接触器永久合闸
	Ⅲ段	整定值/V	500	晶闸管快速接通,在接触器永久合闸后打开
直流 开关柜 电压 框架 保护	电压报警	整定值/V	120	报警
		时间/ms	2 000	
	电压Ⅰ段	整定值/V	130	断路器跳闸
		时间/ms	1 000	
	电压Ⅱ段	整定值/V	150	
		时间/ms	600	
	电压Ⅲ段	整定值/V	200	
		时间/ms	300	
	电压Ⅳ段	整定值/V	300	
		时间/ms	150	
电压Ⅴ段	整定值/V	550		
	时间/ms	50		

开关柜框架保护电压Ⅱ段的互相配合。因钢轨电位限制装置Ⅰ段动作时间与直流开关柜框架保护电压Ⅱ段动作时间均为 600ms,钢轨电位限制装置与直流开关柜框架保护电压Ⅱ段的动作顺序存在不确定性。

经现场 20 次模拟测试,在此电压区间有 16 次直流开关柜框架保护电压Ⅱ段先于钢轨电位限制装置Ⅰ段动作,动作时间见表 3,测试电压为 148V。

综上所述,因多车同时取流,钢轨电位异常抬升,虽然钢轨电位限制装置和直流开关柜的框架电压测量回路原理相同,但是因测量回路的实际接线位置及元器件自身测量误差,造成电压框架保护和钢轨电位限制装置的启动值与设计定值产生偏差,保护配合关系出现异常,框架保护电压Ⅱ段先于钢轨电位限制装置动作,导致框架保护误动作。

本次故障造成本站牵引变电所退出运行,对应的接触网供电分区单边供电,未影响行车。通过修改钢轨电位限制装置Ⅰ段保护的延迟时间,由 600ms 调整为 500ms,保证两者之间的匹配关系,设备恢复运行。

表3 钢轨电位Ⅰ段与框架电压Ⅱ段动作时间

序号	钢轨电位Ⅰ段动作时间/ms	框架电压Ⅱ段动作时间/ms
1	678.3	671.0
2	674.7	671.1
3	675.7	671.0
4	709.2	672.0
5	722.8	700.8
6	721.7	697.2
7	678.0	698.9
8	734.4	694.7
9	724.8	692.6
10	722.4	692.6
11	695.5	697.8
12	723.0	694.6
13	722.8	691.1
14	698.9	693.9
15	706.6	691.1
16	698.3	701.2
17	699.8	697.3
18	698.8	698.5
19	695.2	696.8
20	701.5	697.8

3 优化提升

以上两起故障的诱因是钢轨对地电位的抬升。文献[10-11]研究了钢轨电位的影响因素和计算模型，钢轨电位数值偏高是国内多数地铁供电系统存在的共性问题，它的控制涉及供电系统设计、施工安装质量、现场运行环境等诸多因素，较难消除。现在越来越多城市通过设置专用回流轨来解决钢轨电位异常和杂散电流^[12]问题。

吸取案例一的教训，针对绝缘安装施工问题，除严格控制施工质量，加强绝缘水平测试外，还可通过优化安装工艺来加强绝缘的可靠性。现各设备生产厂商已优化设备绝缘安装方式，并在其他地铁线路实际运行中保持较好的绝缘水平。某厂商的绝缘安装优化方案如图4所示，保证固定螺栓不会与设备外壳接触，增加扣盖和填充垫块解决因积灰、潮气等导致的绝缘降低问题。此方案须前期与装修专业密切配合，预留好固定螺栓安装孔位。随着绝缘材料的发展，可采用整体绝缘安装方案，即绝缘

安装设备地基采用新型绝缘材料代替传统混凝土，也能取得很好的绝缘效果。但是，因造价太高，整体绝缘方案在现阶段尚无法实现大面积推广。

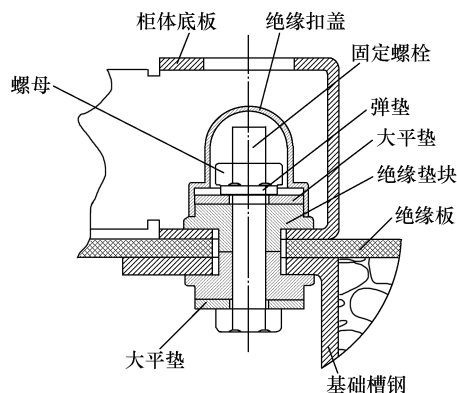


图4 绝缘安装优化方案

针对电压框架保护的设置，因其测量回路与钢轨电位限制装置的检测原理一致，最终均为测量负极对地电压，电压框架保护的整定值与钢轨电位限制装置的整定值应相互配合，充分考虑测量误差的影响，提高设备精度，合理设置启动值和时间值的级差，避免电压框架保护先于钢轨电位限制装置动作。因钢轨对地电压影响因素多且不可控，建议电压框架保护只报警不跳闸，电压框架保护功能由钢轨电位限制装置实现，可避免电压框架保护的误动。

随着设备运行时间的增长，设备外壳对地绝缘水平会下降，还可能出现因设备外壳框架对地绝缘不合格，导致故障接地电流反向流过测量回路的情况，因保护逻辑未设置方向判定，造成电流框架保护误动作。建议电流框架保护增加电流方向的判定，防止反向电流导致电流框架保护误动作。

4 结论

直流框架保护误动，将造成直流开关柜、整流机组等地铁牵引供电系统关键设备退出运行，对应接触网供电分区停电，甚至造成列车晚点、停运，直接影响地铁的安全、稳定运营。为降低直流框架保护的误动概率，应从设计源头对钢轨对地电位进行控制，优化直流设备绝缘安装方案，保证绝缘安装施工质量，合理设置电流框架保护和电压框架保护。同时，应在运营期间保证设备的良好运行环境，加强框架对地绝缘测试和框架保护校验等日常检修维护，及时处理对地绝缘不合格隐患，保障直流框架保护装置的正常可靠运行，这对地铁牵引供电系统的稳定运行至关重要。

参考文献

- [1] 刘炜, 娄颖, 张戩, 等. 计及城市轨道交通逆变回馈装置的交直流统一供电计算[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4381-4391.
- [2] 潘雷, 苟浩. 地铁再生制动回馈装置分站设置研究[J]. 电气技术, 2020, 21(10): 59-62.
- [3] 黄德胜, 张巍. 地下铁道供电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 于松伟, 杨兴山, 韩连祥, 等. 城市轨道交通供电系统设计原理与运用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [5] 李昕, 范庆平. 地铁牵引供电直流设备框架保护系统改进[J]. 铁道技术监督, 2023, 51(1): 50-54.
- [6] 刘建华. 一起牵引变电所框架保护跳闸事故的分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(4): 263-264.
- [7] 王小峰. 地铁直流框架泄漏保护的优化设计[J]. 电气化铁道, 2015(2): 31-34.
- [8] 陈民武, 赵鑫, 丁大鹏, 等. 城市轨道交通供电系统钢轨电位限制装置操作过电压研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 94-98.
- [9] 地下铁道工程施工质量验收标准: GB/T 50299—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [10] 张征, 杨少兵, 吴命利, 等. 一种用于钢轨电位评估的回归建模方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊 1): 31-39.
- [11] 刘炜, 杨龙, 李国玉, 等. 计及回流系统设备行为过程的钢轨电位动态仿真[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 1000-1009.
- [12] 金文辉. 地铁车辆段杂散电流分析与防护方案[J]. 电气技术, 2023, 24(2): 11-17.
-
- 收稿日期: 2024-11-21
修回日期: 2025-01-17
作者简介
沈赐奎(1985—), 男, 福建龙岩人, 本科, 主要从事轨道交通供电设备运维工作.
- (上接第6页)
- 障限流的并网逆变器下垂暂态控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 59-70.
- [10] JIANG Fei, CHENG Siju, TU Chunming, et al. Design consideration of a dual-functional bridge-type fault current limiter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3825-3834.
- [11] CHEN Junru, PRYSTUPCZUK F, O'DONNELL T. Use of voltage limits for current limitation in grid-forming converters[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(2): 259-269.
- [12] HUANG Linbin, XIN Huanhai, WANG Zhen, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [13] SAFFAR K G, DRISS S, AJAEI F B. Impacts of current limiting on the transient stability of the virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1509-1521.
- [14] LIU Teng, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. A current limiting method for single-loop voltage-magnitude controlled grid-forming converters during symmetrical faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4751-4763.
- [15] TAUL M G, WANG Xiongfei, DAVARI P, et al. Current limiting control with enhanced dynamics of grid-forming converters during fault conditions[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1062-1073.
- [16] SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. A two-stage simultaneous control scheme for the transient angle stability of VSG considering current limitation and voltage support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2137-2150.
- [17] 付熙坤, 黄萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型逆变器的暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2815-2825.
- [18] 张海. 基于扩展等面积法的电力系统暂态稳定分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
- [19] 葛平娟, 肖凡, 涂春明, 等. 考虑故障限流的下垂控制型逆变器暂态控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3676-3687.
-
- 收稿日期: 2024-11-25
修回日期: 2024-12-25
作者简介
孙东伟(2000—), 男, 福建省泉州市人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源与储能应用技术.