

第三轨地铁供电系统直流冲击特性 与继保配合

程晋然, 朱丽娇

(昆明地铁运营有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要: 介绍了常规 B1 型地铁牵引供电系统与车辆主电路的匹配形式。通过地铁直流供电系统 DDL 保护误动案例的梳理, 结合现场测试试验数据, 分析了实际可能导致 DDL 保护误动的原因与过去 DDL 保护整定或存在的一些误区。对直流冲击特性与系统保护之间的配合关系提出了一些建议。

关键词: 牵引供电系统; 直流供电系统; 直流冲击特性; DDL 保护; 地铁列车

中图分类号: U223.8⁺2; TM772

文献标识码: B

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.04.025

DC Impact Characteristics of Third Rail Metro Power Supply System and Its Relay Protection Coordination

CHENG Jinran, ZHU Lijiao

(Kunming Metro Operation Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: This paper introduced the matching form between the conventional B1 metro traction power supply system and the main circuit of the vehicle. Through sorting out the maloperation cases of DDL protection in metro DC power supply system and combining with the field test data, the causes of the maloperation of DDL protection in practice and some errors in setting or existing DDL protection in the past were analyzed. Some suggestions on the coordination between DC impact characteristics and system protection were put forward.

Keywords: traction power supply system; DC power supply system; DC impact characteristics; DDL protection; metro train

0 引言

直流牵引供电系统是地铁运行的能源保障, 直流牵引系统常采用电流上升率增量保护(DDL 保护)与其他保护形式配合的形式, 对直流系统短路故障进行快速识别与切除^[1]。但 DDL 保护定值的正确整定是比较困难的工作, 特别是第三轨供电的地铁系统, 数量繁多的接触轨断口(无电区)与列车受流器的配合, 在直流馈线处形成相当复杂的负荷曲线^[2]。在实际运营过程中, 即使进行了认真的整定计算工作, DDL 保

护误报警或误动作依然难以避免, 影响地铁的可靠运营, 困扰运营企业的技术人员。

笔者在运营管理工作中, 收集了大量 DDL 保护误报警和误动作的实例, 对此进行梳理统计, 结合供电系统与列车牵引特性, 对其中可能的成因进行分析。其中部分案例在现场成功重现, 得到了一些或有参考价值的结果。

1 现场设备情况

供电系统轨行区采用 DC 750 V 钢铝复合接触轨供电, 下部受流。接触轨端部弯头分为 2 种, 低速弯头采

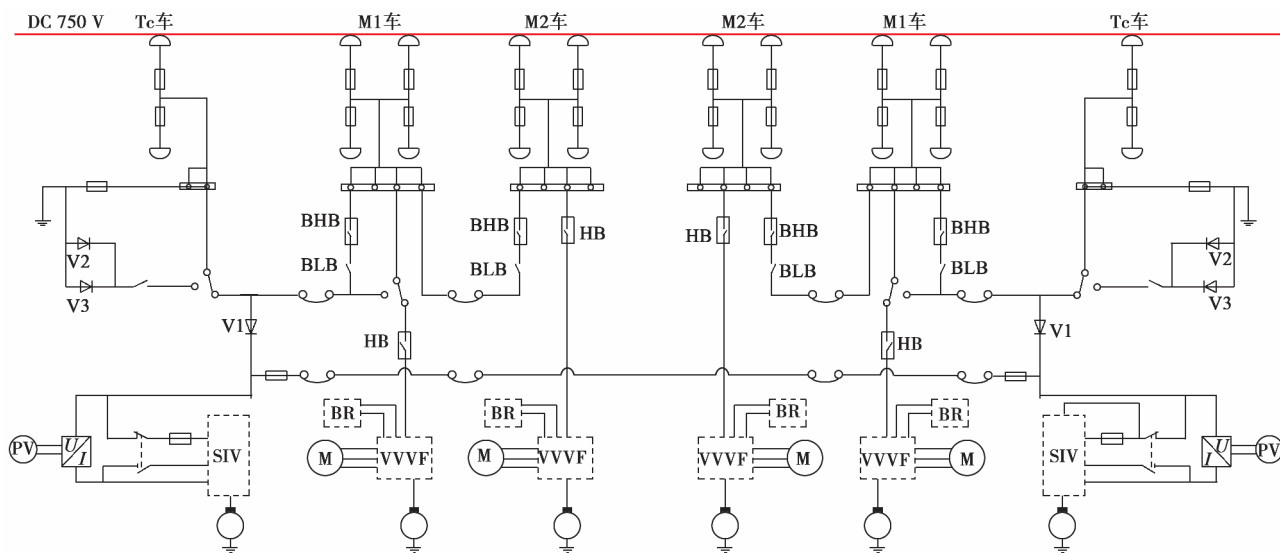
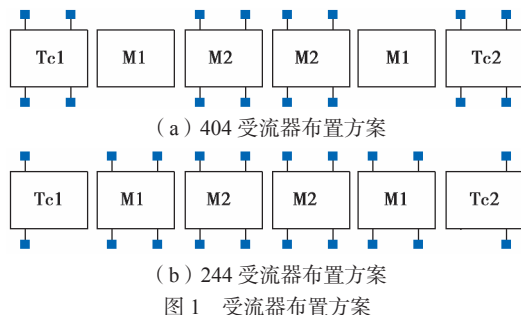
收稿日期: 2018-08-15; 修回日期: 2018-11-11

用 3.4 m 的规格, 高速弯头采用 5.95 m 的规格; 变电所采用 2 台牵引变压器和整流机组构成 24 脉波整流器供电, 其中场段的出入段线由车辆段混合所供电; 单台牵引变压器容量 1.8~2.2 MVA。

轨道方面, 正线区段采用 9 号单开道岔, 站后折返线和存车线路采用 9 号交叉渡线道岔, 车辆段内多采用 7 号单开道岔。

车辆方面, 采用标准 B1 型 (下部受流) 6 节编组, 编组形式为 Tc+M1+M2+M2+M1+Tc, 受流器布置有 404 方案与 244 方案 2 种, 如图 1 所示。列车高压母线通过母线设备箱 (BHB 与 BLB) 贯通每个单元 (Tc+M1+M2)。其中, 244 方案在 M1 车、M2 车之间以及 Tc 车、M1 车之间布置母线设备箱, 404 方案在 Tc 车与 M2 车之间布置母线设备箱。列车在速度低

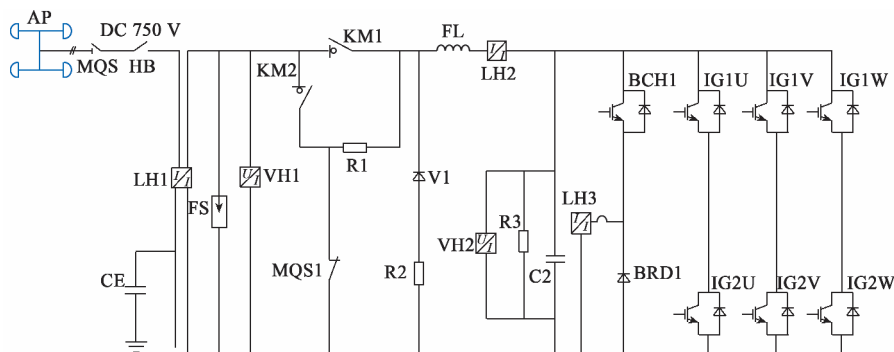
于 5 km/h 或网压小于 450 V 时 BLB 断开, 此时高压母线不再贯通整个单元。BHB 在运行中若通过电流大于设定值 (2 650 A) 将无延时跳闸。牵引电机由 VVVF 牵引逆变器供电, 其电压型逆变器中间支撑电容容量为 19 mF (9 500 $\mu\text{F} \times 2$)^[3], 244 方案的列车主电路详见图 2。



2 非短路故障的误动作或误报警

2.1 电容器充电冲击

现代交流传动列车, 普遍采用了 VVVF 牵引逆变器, 将牵引网取得的直流电逆变成交流电供给交流电机产生牵引力。对于电压型逆变器, 中间支撑电容根据逆变器的设计, 其容量配置通常在 10 000~20 000 μF ^[4]。典型的牵引系统局部电路图如图 3 所示。



为了避免中间直流电压突变 (列车闭合主断路器或接触轨重合闸) 对系统造成冲击, 牵引逆变器内设置了充电接触器 (KM2) 与短接接触器 (KM1), 正常运行情况下 KM2 处于分位, KM1 闭合向三相逆变桥供电。当网压丢失, 中间直流电压下降到保护阈值时 (对于 DC 750 V 系统通常为 500 V) KM1 断开, 隔离牵引网与三相逆变器^[5]。

当网压恢复后, 系统先闭合 KM2, 通过电阻 R1 向电容充电, 当电容电压上升至接近网压时, KM1 闭合, 而 KM2 断开, 充电结束, 逆变器开始正常工作。

在某些特定的工况条件下, 中间直流电压尚未下降至保护门槛电压, KM1 仍处于闭合状态, 而网压又突然恢复, 牵引网电压与支撑电容电压之间存在电位差。牵引网通过 KM1 直接向电容器充电, 此时充电冲击电流受到线路电抗器参数

和牵引网容量的制约,具有较高的上升率 di/dt ,容易引起上升率 di/dt 保护启动告警,但由于持续时间短(约 5 ms)一般不引起误动作。此类冲击在馈线断路器处的电流波形如图 4 所示。

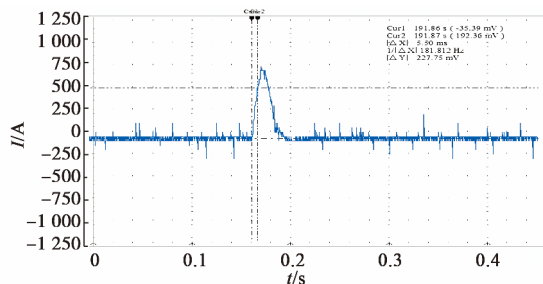


图 4 馈线断路器处的电流波形

在实际地铁运营过程中,因电容充电造成电流上升率 (di/dt) 误启动告警一般出现在以下 2 种情况下:

1) 列车扩展供电故障或人工切除扩展供电 (BLB)

在扩展供电接触器因故断开时(故障或驾驶员手动切除),当列车经过接触轨供电分段点,由于接触轨断口长度(14 m)大于同一节车受流器的间距(B 型车的间距为 12.6 m),位于断口内的牵引逆变器电源短时丢失后又恢复,就有可能在馈线断路器处因电流冲击引起 di/dt 启动告警形成事件记录。

2) 列车经过岔区整个供电单元丢失网压

在道岔区段,接触轨需要设置断口以满足列车通行的需要。以折返岔区为例,采用 9 号交叉渡线道岔构成的站后折返线路,典型接触轨布置如图 5 所示。当列车经某一组双动道岔反位进路运行时,该进路上的接触轨断口分布可导致列车一个单元短时失压。与上述情况 1) 类似,网压恢复时若 KM1 尚未断开,有时可引起 di/dt 启动告警,形成事件记录(侧向过岔进路无电区如图 6 所示)。



图 5 9 号道岔折返岔区接触轨平面示意图

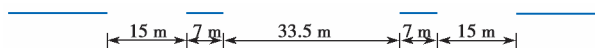


图 6 侧向过岔进路无电区示意

2.2 接触轨电分段负荷转移

列车不同车厢之间的扩展供电最大程度保证了供电的连续性,但同时处于列车经过接触轨电分段断口时,会造成不同供电区段接触轨之间的电气短接(桥接)。

在列车运行经过电分段时,由于受流器与直流母线的桥接作用,相邻供电臂之间的牵引电流由于回路阻抗的不同,发生负荷转移。转移的负荷可造成无故障情况下的 di/dt 误告警或跳闸。这种负荷转移过程与列车的受流器布置和高压主电路结构密切相关。以正线与出入段线处的情况为例,其接触轨与列车简化高压电路的关系如图 7 所示(以 244 布置为例)。

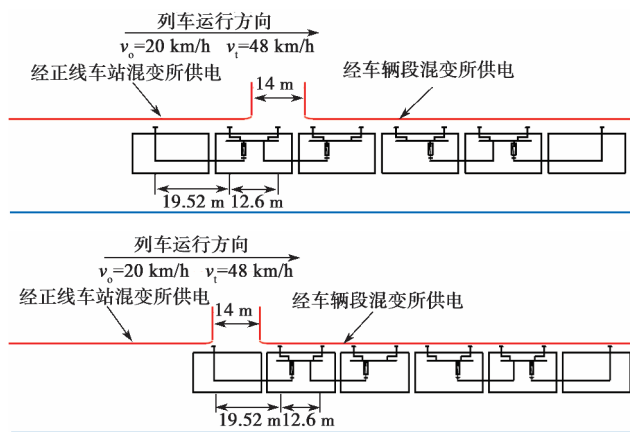


图 7 接触轨与列车简化高压电路关系图

在列车运行过程中,当处于图 7 所示位置时,相邻两侧接触轨通过列车高压回路形成电气连接,两侧接触轨以并联的关系向列车供电。而当列车继续向前行驶时,最后一只受流器从左侧接触轨上脱离,两侧接触轨并联向列车供电的关系消失,负荷转由右侧接触轨全部负担。此时右侧接触轨负荷电流激增,而且电流变化率取决于左侧接触轨与受流器之间电弧的熄灭速度。

若 BHB 设计动作值低于上述工况下馈线电流的变化量,则受流器从接触轨脱离前就将造成 BHB 过流跳闸。由于 BHB 具有较强的灭弧能力,其动作时可在对应变电所馈线断路器处形成高达 100~120 A/ms 的电流变化率。与受流器从接触轨上脱离类似,BHB 跳闸也将造成两侧供电分区的负荷转移,若 DI 值(电流增量)设定小于 BHB 动作值,则保护装置不能规避该电流变化,从而造成跳闸。

当接触轨电分段断口两侧供电电阻由于供电距离不同而导致差异较大时,更容易引起误动作。一个完整的负荷转移波形记录如图 8 所示。

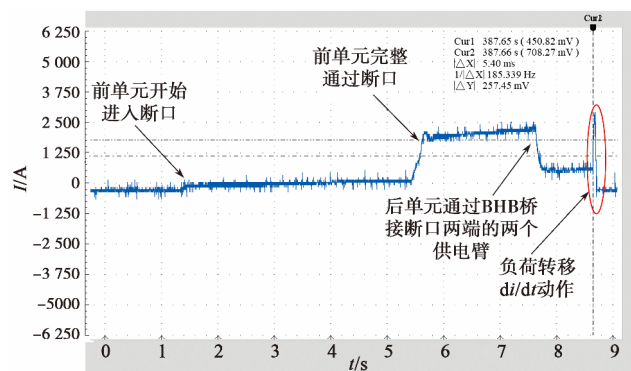


图 8 负荷转移波形记录

3 不需要考虑的因素

3.1 列车启动冲击

在相关文献中关于 di/dt 的初始定值整定,通常提到按照大于机车(车辆)启动时的最大电流变化率,同时小于越区供电时区间末端短路时刻的短路电流变化率进行整定。但实际上现代牵引系统多采用了

DC-AC 的电力传动方式, 利用 VVVF 实现牵引电机的调速, 实际不会在启动瞬间对牵引网形成电流冲击。列车启动加速过程中的输入电流特性如图 9 所示。

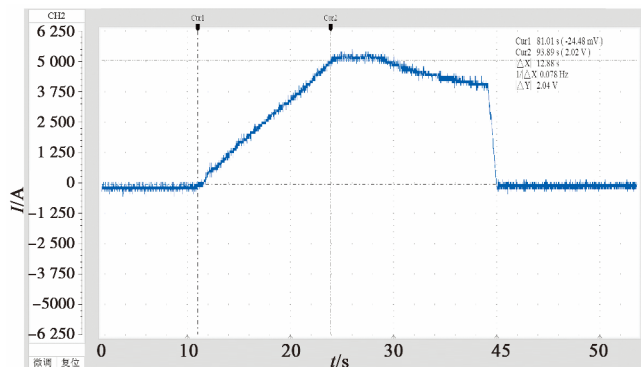


图9 列车启动后加速过程取流特性

列车恒转矩启动至恒功点的过程中, 牵引电流由 0 A 上升至最大牵引电流 5 200 A 历时 12~18 s, 其电流变化率仅为 0.4 A/ms, 与供电臂末端短路时最小电流变化率 60~100 A/ms (750 V 系统) 相比, 其值很小。因此在运用现代交流牵引技术的地铁中进行直流感触器 di/dt 初始启动值整定时, 可不考虑列车启动的冲击。

3.2 牵引级位变化冲击

牵引级位发生改变时, 列车输入电流也随之变化。但列车牵引控制系统为了保证乘客的舒适性, 牵引系统对牵引力变化速度进行了限制, 通常整列车加速度变化率 (也称为冲击率) 被控制在 $0.75\sim 1.2\text{ m/s}^3$ 。考虑最不利的情况, 列车在恒功速度范围运行, 当牵引级位由 0 突跳至 100%, 列车加速度将遵循冲击率的限制由 0 上升至当前速度下的最大加速度值, 牵引输入电流随加速度的变化增加至最大电流值。由于存在冲击率的限制 (按 1.0 m/s^3 计), 根据计算与现场模拟实测, 列车牵引级位突变导致的牵引电流变化率不会大于 6.5 A/ms , 因此牵引级位的变化不会对电流上升率保护造成影响。

3.3 受电弓离线导致冲击

在接触网供电系统中, 由于受电弓数量相对于接触轨受流器数量少, 在接触网硬点位置容易产生离线问题。受电弓离线导致牵引系统外电源短时中断, 当

弓网接触恢复后, 电容充电可能会导致牵引电流出现较高的上升率。

但在接触轨供电系统中, 通常情况下数个牵引逆变器由多个受流器并联供电 (分布在车体两侧)。由于列车高压母线的扩展供电作用, 多只受流器同时由接触轨取流, 并联向各牵引逆变器供电, 除特定断口的影响, 在实际运行过程中未检测到离线导致的电流突变。

4 结语

直流牵引网的 DDL 保护是系统重要的保护手段, 但正确、恰当地整定直流 DDL 保护是相对困难的。接触轨在岔区的断口分布、列车高压母线形式和受流器布置等因素可影响受流质量, 或导致 DDL 保护误报警。特别是通过列车内部高压母线形成不同供电分区的桥接, 在相邻供电臂阻抗差异较大时可能造成列车 BHB 电流过大跳闸, 从而引起 DDL 误动作。运用现代交流传动技术的地铁列车启动时不形成显著的电流冲击; 运行过程中由于冲击率的限制, 其牵引电流的变化率不会造成 DDL 误动作或误报警。

参考文献:

- [1] 高云霞. 直流牵引供电系统继电保护整定计算方法 [J]. 电气化铁道, 2011, 22(4): 40-42.
- [2] 崔天翔. DC 1.5 kV 地铁牵引供电系统馈线保护研究 [J]. 电气化铁道, 2017(2): 55-58.
- [3] 程永谊, 钮海彦. 无锡地铁 1 号线列车母线高压电路设计与探讨 [J]. 现代城市轨道交通, 2013(1): 14-17.
- [4] 林浩, 陈文光, 曹俊. 昆明地铁首期工程项目车辆电传动系统 [J]. 机车电传动, 2013(5): 69-74.
- [5] 林浩, 程永谊, 曹俊. 第三轨供电列车高压母线电路拓扑结构设计探讨 [J]. 机车电传动, 2013(2): 91-94.

作者简介: 程晋然 (1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为城市轨道交通设备系统运行优化与维修策略。

(上接第 83 页)

- [3] 江亚男, 张卫华, 邹栋, 等. 考虑风载的高速列车受电弓静强度分析 [J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(1): 120-125.
- [4] 贾潞. 基于风险管理的动车组受电弓故障树分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [5] 王伟俊, 洪跃. 受电弓故障模式分析与维护策略 [J]. 沿海企业与科技, 2015(5): 27-30.
- [6] 邵延峰, 薛红军. 故障树分析法在系统故障诊断中的应用 [J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(1): 72-74.
- [7] DAI C Q, ZHAO Z H. Fuzzy comprehensive evaluation model for construction risk analysis in urban subway [J]. International

Journal of Modeling Simulation and Scientific Computing, 2015, 6(3): 1550024. DOI: 10.1142/S1793962315500245.

- [8] DONGIOVANNI D N, IESMANTAS T. Failure rate modeling using fault tree analysis and Bayesian network: DEMO pulsed operation turbine study case [J]. Fusion Engineering and Design: Part A, 2016(109/110/111): 613-617.

作者简介: 王远霏 (1979—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为轨道车辆健康管理技术、关键部件智能诊断及故障预测研究。