

基于跨坐式单轨系统构建接触网故障点位置模型

万江云

重庆市轨道交通(集团)有限公司

摘要: 基于重庆轨道交通跨坐式单轨系统, 分析了当前跨坐式单轨 64D 保护装置和 GR 接地装置领域研究成果, 以及精确查找接触网故障位置的研究方法, 在此基础上建立了供电系统接触网故障研究模型, 分析了接触网故障导致部分区段, 直至全线失电的原理, 论证了利用 64D 保护装置中漏电电流大小来锁定故障所在区间的科学性, 进一步证明了漏电电流大小跟故障点与牵引降压变电所之间的距离成反比关系。

关键词: 漏电电流; 电流比值; 接触网区间长度; 故障点位置

一、引言

2023 年因天气和设备老化等原因, 重庆轨道交通 2 号线、3 号线均发生过接触线网着火事件, 列车 GR 接地故障和牵引降压所 64D 保护动作, 导致部分区段运营受阻, 影响城市交通秩序, 造成严重不良影响。根据有关数据统计, 当跨坐式单轨牵引供电系统出现全线或部分区段 64D 接地漏电保护动作后, 影响运营时间一般在 30 min~60min^[1], 个别故障问题处理时间更长, 其中重庆轨道 3 号线发生的一处由于上网电缆受损造成高阻接地, 引发间歇性全线 64D 接地漏电保护动作, 此次故障处理, 投入了大量的人力、物力、财力, 累计花费近 48 小时^[2], 教训深刻。

二、当前研究成果分析

为了解决接触网系统故障排查, 确保乘客上下列车安全, 减少接触网失电对运营的影响。国内专家、学者对 GR 接地装置和接触网 64D 保护装置作了大量研究。比如张斌在“城市轨道交通直流牵引系统接地保护问题探讨”中详细分析了跨坐式单轨交通框架保护和 64D 的联合保护原理; 周才发在“跨座式单轨交通直流牵引系统接地保护设计”对 64D 接地漏电保护装置和列车 GR 作了详细的设计和研发; 谢红霞在“简析跨座式单轨交通接地漏电保护和列车 GR 故障的关系”中详细分析了牵引供电系统中接地漏电保护的原理及接触网失电后人工故障处理流程; 黄德勇在“跨座式单轨车 GR 故障发生在牵引主回路处理方案探讨”中对车辆 GR 故障做了系统分析和处理方法; 张坤在“悬挂式单轨牵引回流接地故障检测保护机制研究”中对悬挂式单轨车接地故障保护检测机制进行了分析。以上作者研究主要在说明 GR 接地装置和接触网 64D 保护装置的重要性和原理, 对出现故障后如果快速定位故障点研究却不多。梁焜在“城市轨道交通(单轨)接地漏电保护故障定位探析”对列车 GR 接地漏电保护和供电系统 64D 接地漏电保护装置故障定位进行了改进, 他提出的方法是将列车 GR 装置和供电系统 64D 接地漏电保护装置中电压原件改为电流原件, 有较为实用的优化意义。黄辉在城市轨道交通专用轨回流系统直流接地保护方案中对 64D 接地漏电保护装置作了进一步优化, 一是肯定了 64D 保护装置中将检测牵引网负极对地电压值调整为检测负极对地电流值; 二是提出了利用直流正极馈出电流 I_{s+} 与直流负极回流电流 I_{s-} 的差值大小确定故障位置所在区段, 上述两位作者对跨坐式单轨接触网故障位置点确定有较为深入的研究, 文章在此基础上继续探讨精确定位跨坐

式单轨接触网故障点。

三、直流供电系统电流模型

基于城市轨道交通接触网标称电压 1500V 的直流电路, 构建跨坐式单轨接触网故障研究模型。

如图 1 所示 C、B、A、B、C、D 为某城市轨道交通线路连续牵引降压变电所, 其它设施设备如图 1 所示。假设: 接触网正极侧在 a 点出现故障(漏电或者短接), A、B 所 64D 保护装置将最先检测到漏电电压和漏电电流, 当漏电电压达到设定值(200V), 64D 保护装置对正极侧直流馈线断路器发出跳闸命令, 从而切断故障回路。同时为了避免 B 至 C 供电臂, B 至 A 供电臂上的电压, 以运动的列车为导体, 传递到 A、B 停电故障供电臂区间, 在 A、B 牵降所正极侧直流馈线断路器跳闸的同时, B、C 牵降所对应的正极侧直流馈线断路器同时跳闸(简称联跳)。在每个牵降所 64D 保护装置中均设置延时命令, 通常为 0.3s, 若 B、C 牵降所正极侧直流馈线断路器跳闸后, 能自动重合闸成功, 该所 64D 保护装置不再向相邻牵降所发出连跳命令, 停电范围将不再扩大; 否则超过 0.3s, B、C 牵降所将分别向 C、D 牵降所发出联跳命令, C、D 牵降所对应的正极侧直流馈线断路器继续联跳, 导致接触网失电范围继续扩大, 以此类推, 若 C、D 牵降所正极侧直流馈线断路器跳闸后不能自动重合闸成功, 后续牵降所正极侧直流馈线断路器将继续联跳, 直至全线失电, 影响范围持续。

根据单轨供电系统设计, 为确保接触网电压稳定, 各牵引降压变电所提供的电动势 $E_A \approx E_B \approx E_C \approx E_D \approx \dots \approx 1500V$, 根据欧姆定律, 因各供电臂长度不同, 以及列车运行交路不同, 导致流经牵引降压变电所内阻的电流不同, 使得 E_A, E_B, E_C, E_D 略有差异。当 a 点出现故障(漏电或者短接), 进一步分析接触网系统电流变化情况(不考虑系统再生制动装置吸、放电流的影响)。

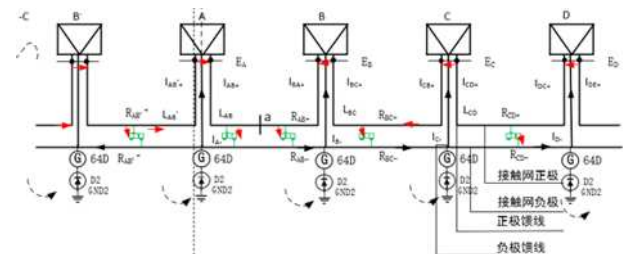


图 1 接触网故障后电流流动图

根据基尔霍夫电流定律建立各牵引降压变电所电流模型，如下：

$$\begin{cases} I_{AB+} + I_{B:A+} = I_{A-} + I_{A损} \\ I_{BA+} + I_{BC+} = I_{B-} + I_{B损} \\ I_{CB+} + I_{CD+} = I_{C-} + I_{C损} \\ I_{DC+} + I_{DE+} = I_{D-} + I_{D损} \\ \dots \end{cases}$$

其中：I₊为直流正极馈出电流；

I₋为直流负极回流电流；

I_损为损失电流，指通过地面 64D 保护装置流进牵引降压变电所直流负极的电流。

在供电系统正常情况下 I_损=0，在供电系统漏电情况下 I_损》0，损失电流的测定方法利用优化后的 64D 保护装置进行测量，装置如图 2^[9]所示。

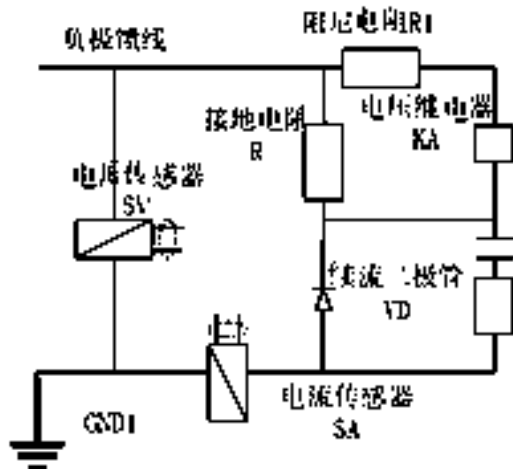


图 2 64D 保护装置图

在 a 点出现故障（漏电或者短接），A 牵降所检测到漏电电流经途径为 A 变电所、正极侧馈线、接触网正极、接触网正极 a 点、大地、64D 保护装置、负极侧馈线，回流至 A 变电所；变电所 B 检测到的漏电电流经途径为 B 变电所、正极侧馈线、接触网正极、接触网正极 a 点、大地、64D 保护装置、负极侧馈线，回流至 B 变电所；变电所 C 检测到的漏电电流经途径为 BC 供电臂、Ba 段接触网、变电所、正极侧馈线、接触网正极、接触网正极 a 点、大地、64D 保护装置、负极侧馈线，回流至 C 变电所；变电所 D 检测到的漏电电流经途径为 DC 供电臂、BC 供电臂、Ba 段接触网、变电所、正极侧馈线、接触网正极、接触网正极 a 点、大地、64D 保护装置、负极侧馈线，回流至 D 变电所。在变电所设施设备材质一致情况下，近似认为相同设备电阻值相同；大地等效于一个无穷大且电阻几乎为 0 的等效电容，而损失电流用于一次电流设备（接触网、馈线、变压器等）发热，而变压器内阻远小于接触网、馈线电阻值，因此，近似认为损失电流只与接触网正极相关，根据欧姆定律有：

$$I_{B损} = \frac{1500V - U_a}{L_{aB} S \rho}$$

$$I_{A损} = \frac{1500V - U_a}{L_{Aa} S \rho}$$

$$I_{C损} = \frac{1500V - U_a}{(L_{aB} + L_{CB}) S \rho}$$

$$I_{D损} = \frac{1500V - U_a}{(L_{aB} + L_{CD} + L_{CB}) S \rho}$$

由上式可以得，距离故障点位置越近的变电所损失电流越大，距离故障点位置越远的变电所损失电流越小。同时也证明了黄辉提出的利用损失电流大小判断故障点位置所在区间是合理的。在确定故障点位置所在大区间（供电臂区间）后，利用故障点相邻变电所损失电流之比与故障点与相邻变电所之间的距离成反比关系，进一步精确确定故障点所在位置。

$$\frac{I_{A损}}{I_{B损}} = \frac{L_{aB}}{L_{Aa}}$$

根据上述分析，跨站式单轨系统出现接触网故障后，应先根据各牵引降压所 64D 保护装置中检测到的失电流大小，判断故障点所在大区间（供电臂区间），再根据相邻牵引降压所损失电流比值，精确确定故障点所在位置。

四、总结

根据重庆轨道交通跨站式单轨系统多年运营经验，在运营期间，出现接触网大面积失电后，首先要判断是接触网故障还是列车故障，再采取相应处置方式。而在判断是哪一方面故障的过程中通常需要停电区段列车降弓，逐一排除车辆故障，这样操作往往需要花费较长时间，影响线路抢险效率。文章根据直流电路物理特性，建立 1500DC 直流供电系统电流模型，分析接触网电流回路，建立损失电流与接触网长度关系，得出利用故障点相邻两个牵引降压变电所损失电流比值确定故障点所在具体位置，再结合 ATS 系统查看故障点处有无列车，从而判断是列车供电故障，还是接触网供电故障，从而大大缩短故障排查时间，提高接触网供电系统故障抢险效率。

参考文献：

- [1]梁焜.城市轨道交通（单轨）接地漏电保护故障定位探析[J].中国新技术新产品，2019（7）：66.
 - [2]周才发.跨座式单轨交通直流牵引系统接地保护设计[J].都市轨道交通·第 23 卷，2010.02.
 - [3]张坤.悬挂式单轨牵引回流接地故障检测保护机制研究[J].机车电传动，2018（6）：84-88.
 - [4]黄德勇.跨座式单轨车 GR 故障发生在牵引主回路处理方案探讨[J].中国设备工程，2020.05.
 - [5]张斌.城市轨道交通直流牵引系统接地保护问题探讨[J].河南科技 2012.（3）：54-55.
 - [6]黄辉.城市轨道交通专用轨回流系统直流接地保护方案[J].应用技术 2022（12）：203-210.
 - [7]谢红霞.简析跨座式单轨交通接地漏电保护和列车 GR 故障的关系[J].世界家苑，2022.10.
- 作者简介：万江云 1988 年，男，研究生学历，工程师，城市轨道交通。