

地铁直流牵引供电系统接触网故障点测距方法^{*}

王开康 吕 意

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 分析了地铁直流牵引供电系统中不同的故障点测距方法的优、缺点。提出了一种地铁直流牵引供电系统接触网双端故障点测距方法。根据故障发生时故障点两端的两个牵引变电所直流馈线保护装置采集的电气量,利用经过推算得到的故障点测距公式计算出故障点的位置。分析表明,所提出的双端故障点测距方法消除了过渡电阻和对侧系统对计算结果的影响,可实现对故障点的精确定位。

关键词 地铁;直流牵引系统;故障点测距;接触网;双边供电

中图分类号 U231+.8;U228.2+6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.045

Fault Location Method of Metro DC Traction Power Supply System Catenary

WANG Kaikang, LYU Yi

Abstract The advantages and disadvantages of different methods of fault location measurement in metro DC traction power supply system are analyzed. A metro DC traction power supply system catenary dual-terminal fault location method is proposed. According to the electrical quantities collected by the DC feeder protection devices of the two traction substations at both ends of the fault point when the fault occurs, the fault location formula is used to allocate the fault point. Analysis shows that the proposed dual-terminal fault location method eliminates the influence of transition resistance and opposite system on the calculation results. The analysis can realize the precise allocation of the fault point.

Key words metro; DC traction power supply system; fault location; catenary; bilateral power supply

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

地铁具有速度快、无污染、工作安全可靠、准时方便、乘坐舒适、占用地面空间少等明显的优势,它已逐渐成为有效解决大中城市交通紧张状况的首选^[1]。但与此同时,地铁直流牵引供电系统因受天

气或人为因素的影响,存在发生故障的概率,给该系统的运行与维护带来了新的问题与挑战。

接触网是直流牵引供电系统中仅有的无后备部分,其工作状态一直影响着该系统的安全、稳定运行。由于列车在运行过程中采用受电弓(集电靴)滑动取流,且接触网的一些构件及导线容易受天气因素影响进而发生损坏,导致接触网故障概率非常高;接触网沿隧道壁敷设,排查寻找故障点的难度大和费时长,将延误列车的正常运行。因此,如何快速而精确地测算出故障点的位置,成为直流牵引供电系统安全、稳定运行的关键。

在通常情况下,接触网线路出现的故障大致可划分为两大主要类型:瞬时故障和永久故障。瞬时故障发生时,直流牵引系统可利用继电保护装置的重合闸功能恢复供电,但故障点仍是该系统运行中的薄弱点,需及时发现故障点并排除故障,避免发生二次故障进而影响该系统的安全、稳定运行;而当产生永久故障时,则需快速查明故障发生的位置并及时修复排除。因此,故障点测距方法的引入,不仅能为维修人员及时发现故障点和抢修线路提供便利,且能保证直流牵引系统的安全可靠供电,保障地铁安全运营。对直流牵引供电系统故障点测距技术进行研究,是地铁牵引供电系统的可靠性、安全性和经济性运行需求下的一个重要课题。

1 直流牵引供电系统接触网故障点测距方法概述

由于直流牵引供电系统组成和运行方式的相似性,既有的电力系统及电气化铁路中的故障点测距方法可为地铁牵引供电系统的故障点测距提供参考。电力系统中最常用的故障点测距方法主要有两种:故障点分析法和行波法^[2]。其中:故障分析法也被称为电阻法,该方法根据供电系统的相关

^{*} 天津市智能制造专项资金项目(20192017)

电气参数和测量到的故障时的电气量,通过推导得到的公式计算出故障点的位置,这是一种传统的故障点测距方法;行波法则基于暂态行波在传播过程中遇到波阻抗不连续点发生的折射和反射原理,利用探测得到的行波波头之间的时间差来实现故障点测距。行波法中,波速是影响故障点定位精度的关键,波速的计算取决于大地电阻率的大小和接触网架构的配置。此外,行波测距需专用设备实现,投资较大。

直流牵引供电系统接触网沿线的隧道内地质条件比较复杂,不同区域地质段的土壤电阻率也有所不同。且由于直流牵引供电系统的站间距太短,电压等级低,行波过程不明显^[2],采用行波法测距存在行波波头检测难度大和定位精度差等问题^[3],因此,行波法并不适用于直流牵引供电系统的故障点测距。

目前,地铁主要采用 DC 1 500 V 或 DC 750 V 电压等级的直流供电方式向列车供电,直流电压、直流电流相比于交流有效信息较少,只有幅值或变化量等有效信息。在稳态的条件下,为便于简化分析,电容、电感等参数可不纳入计算,为故障点分析法提供了便利。

根据测算时所使用的故障量的不同,故障点分析法又能划分为单端法和双端法两类。单端法是利用牵引变电所馈线一侧的电压、电流及必要的线路参数来计算故障点的位置的测距方法。单端法的设备简单且容易实现,但由于只使用一个检测端检测到的电气数据进行故障点定位,因此过渡电阻对单端法的定位精度有一定的影响;且由于无法获取对端的电气量等信息,一旦对端系统的运行方式发生改变,单端法将无法准确定位故障点位置。因此从原理上分析可认为,采用单端法不大可能得到较为精确的结果。双端法是根据短路线路两端的电气量计算故障点位置,从原理上消除了过渡电阻和对侧系统的影响。而且,随着国内电力系统自动化和电力监控技术水平的日益发展,电气量采集与电力调度中心数据交换的速度和准确度都有所提高,这也为双端法提供了技术条件。

2 双端故障点测距原理

2.1 直流牵引供电系统结构

图 1 为直流牵引供电系统双边供电方式示意图,在一个供电区间内由两个牵引变电所从 m、n 两端为接触网供电。牵引变电所将外部电源引入的 35 kV 交流电转换为 750 V / 1 500 V 直流电,通过

高速直流开关给接触网供电,经走行轨、回流电缆返回至变电所负极^[1]。

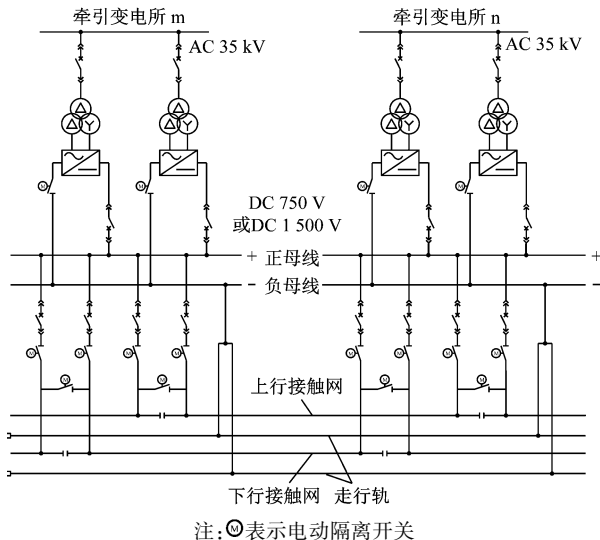
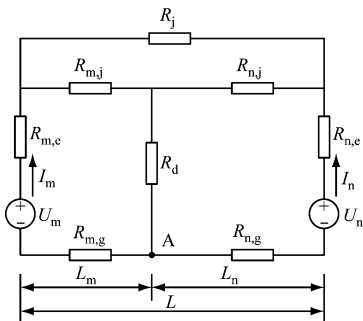


图 1 直流牵引供电系统双边供电方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bilateral power supply mode of DC traction power supply system

2.2 故障定位原理

图 2 为直流牵引供电系统接触网的短路故障模型。



注: L ——牵引变电所 m、n 之间的线路长度; L_m ——故障点 A 到牵引变电所 m 之间的距离; L_n ——故障点 A 到牵引变电所 n 之间的距离; U_m 、 I_m ——分别为 m 端直流馈线保护动作时的电压、电流; U_n 、 I_n ——分别为 n 端直流馈线保护同时刻的电压、电流; $R_{m,c}$ ——m 端电源等效内阻; $R_{m,j}$ ——m 端接触网短路电阻; $R_{m,g}$ ——m 端走行轨短路电阻; $R_{n,c}$ ——n 端电源等效内阻; $R_{n,j}$ ——n 端接触网短路电阻; $R_{n,g}$ ——n 端走行轨短路电阻; R_j ——复线对侧接触网电阻; R_d ——短路过渡电阻。

图 2 直流牵引供电系统接触网的短路故障模型

Fig. 2 Short-circuit fault model of DC traction power supply system catenary

图 2 中,直流牵引供电系统采用双边联跳保护,若 m 端直流馈线保护先动作,将发出联跳信号,启动 n 端保护,反之亦然。可认为输电线电阻与长度成正比,即:

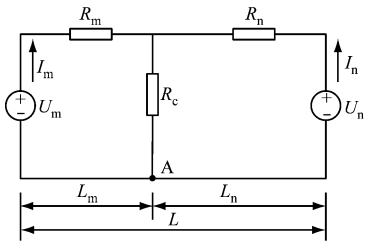
$$R_j = \frac{L}{L_m} R_{m,j} = \frac{L}{L_n} R_{n,j} \quad (1)$$

$$R_g = \frac{L}{L_m} R_{m,g} = \frac{L}{L_n} R_{n,g} \quad (2)$$

式中:

R_g ——走行轨电阻参数。

为便于分析计算,对图 2 中的直流牵引供电系统接触网的故障模型进行电阻的 Δ -Y 等效变换,可以得到如图 3 所示的等效电路。



注: R_m 、 R_n 、 R_c 为等效电阻; A 为故障点。

图 3 直流牵引供电系统接触网短路故障模型等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of catenary short-circuit fault model in DC traction power supply system

由图 3 可得到计算式如下:

$$R_m = R_{m,e} + R_{m,g} + \frac{L_m}{2L} R_j \quad (3)$$

$$R_n = R_{n,e} + R_{n,g} + \frac{L_n}{2L} R_j \quad (4)$$

$$R_c = R_d + \frac{L_m L_n}{2L^2} R_j \quad (5)$$

根据基尔霍夫电压和电流定律,可对图 3 中电路列如下方程:

$$\left. \begin{aligned} U_m &= R_m I_m + R_c (I_m + I_n) \\ U_n &= R_n I_n + R_c (I_m + I_n) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

求解式(6)可得:

$$\left. \begin{aligned} I_m &= \frac{(R_n + R_c) U_m - R_c U_n}{(R_m + R_c)(R_n + R_c) - R_c^2} \\ I_n &= \frac{(R_m + R_c) U_n - R_c U_m}{(R_m + R_c)(R_n + R_c) - R_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

进而有:

$$\frac{I_m}{I_n} = \frac{R_n U_m + R_c (U_m - U_n)}{R_m U_n - R_c (U_m - U_n)} \approx \frac{R_n U_m}{R_m U_n} \quad (8)$$

由式(3)—(4)可知:

$$\frac{R_n}{R_m} = \frac{R_{n,e} + \frac{L_n}{L} R_g + \frac{L_n}{2L} R_j}{R_{m,e} + \frac{L_m}{L} R_g + \frac{L_m}{2L} R_j} \quad (9)$$

一般情况下 $R_{m,e} \ll R_j$, $R_{n,e} \ll R_j$, 故 $R_{m,e}$ 、 $R_{n,e}$ 可忽略。从而有:

$$\frac{I_m}{I_n} \approx \frac{L_n}{L_m} \cdot \frac{U_m}{U_n} \quad (10)$$

所以可以得到故障点位置的计算公式为:

$$L_m = \frac{U_m I_n}{U_m I_n + U_n I_m} L \quad (11)$$

$$L_n = \frac{U_n I_m}{U_m I_n + U_n I_m} L \quad (12)$$

采用式(11)—(12)计算故障点距 m、n 两端的距离,即可确定故障点的位置。

3 双端故障点测距的实现方案

直流牵引供电系统双端故障点测距方案如图 4 所示。双端故障点测距需要保证线路两端电压电流数据的同步获取,因此需要引入时钟同步单元,以确保两端采集到的数据在时间上保持同步。时钟同步单元可采用无线形式的时钟同步方案(如 GPS(全球定位系统))或有线形式的时钟同步方案。

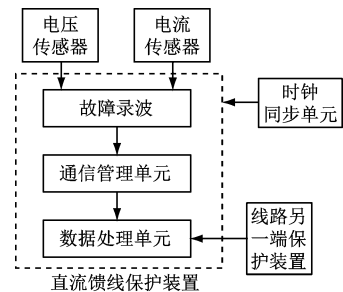


图 4 直流牵引供电系统双端故障点测距方案

Fig. 4 Dual-terminal fault location scheme of DC traction power supply system

通常情况下,对两侧变电所馈线直流保护装置实时监测安装处的母线电压和馈线电流,当直流牵引供电系统线路发生故障时,根据所提出的故障点测距方案,保护装置将自行进行故障录波,并将录波数据中最大电流存储发送到通信管理单元;两个变电所直流馈线保护装置通过通信管理单元实现联跳,并利用联跳通道实现数据的相互传送;每侧的数据处理单元根据实际测距原理,利用双端采样的电流和电压数据进行故障点测距,计算出故障点的位置。

为测试所提出的双端故障点测距方法在现场的实际运行效果,将直流馈线保护装置安装于某地铁直流牵引网进行短路试验。试验区段选取相距 2.6 km 的两座牵引变电所 m、n 之间的供电区间。

(下转第 229 页)

2) 互联网票务平台。由 AGM/BOM 把交易数据(如进出站、补登、撤销等)实时传至互联票务网平台,在互联网票务平台完成防复制验证、行程控制、行程匹配。互联网票务平台数据使用 AFC 系统网络,把完整行程消费订单上传至 ANCC 后,再由 ANCC 进行对账处理。

4 结语

随着城市轨道交通线路的持续扩充,线网的客流量不断增加,AFC 设备运维的工作量也越来越大。与此同时,传统单程票的使用占比逐渐下降,但仍需为传统单程票业务配置与之匹配的设备和运维人员,性价比很低,不符合城市轨道交通 AFC 系统的发展趋势。发展纸质二维码单程票代替传统单程票一方面有利于降低建设成本,(票卡设备采购成本约为 80 万元/站),另一方面有利于减轻运维人员的工作量,进而达到降低运维人员数量的目的。

参考文献

[1] 张鹏,王健,吴娟,等. 南京地铁移动支付关键技术的研究及应用[J]. 都市轨道交通,2020(6):146.

(上接第 224 页)

短路故障试验的测距结果如表 1 所示。从表 1 中的故障点测距结果可看出,本文所提出的方法具有较高的测量精度。

表 1 两端故障点测距试验结果

Tab.1 Dual-terminal fault location test results

故障点到 m 端的 距离/m	m 端测距结果 /m	n 端测距结果 /m
500	562(+62)	2 035(-65)
1 000	1 084(+84)	1 660(+60)
1 300	1 257(-43)	1 361(+61)
1 600	1 578(-22)	1 064(+64)
2 100	2 188(+88)	473(-27)

注:括弧内的数据为偏差值。

4 结语

在直流牵引供电系统中,供电线路故障后迅速且精确地测算故障点的位置,对及时进行线路修复和保证安全可靠供电至关重要。本文提出了一种双端故障点测距方法,根据故障发生时故障点两端的两个牵引变电所直流馈线保护装置采集的电气

ZHANG Peng, WANG Jian, WU Juan, et al. Research and application of key mobile payment technologies in the Nanjing Metro [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020(6):146.

[2] 吕欢. 云计算技术在城市轨道交通 AFC 领域的应用研究[J]. 现代城市轨道交通,2016(3):104.

LYV Huan. Study on cloud computing technology in AFC application of transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2016(3):104.

[3] 裴顺鑫,张宁. 地铁自动售检票系统的互联标准[J]. 都市轨道交通,2007(5):38.

PEI Shunxin, ZHANG Ning. Research on the interconnection standards for subway AFC system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2007(5):38.

[4] 杨政军. 二维码电子车票在自动售检票系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究,2016(4):78.

YANG Zhengjun. Application of the two-dimensional code electronic ticket in AFC system [J]. Urban Mass Transit, 2016(4):78.

[5] 许巧祥,李灏,徐建国,等. 南京地铁移动支付的模式选择与战略思考[J]. 都市轨道交通,2019(2):103.

XU Qiaoxiang, LI Hao, XU Jianguo, et al. Model choice and strategic considerations in adopting mobile payment technology for Nanjing Metro Company [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019(2):103.

(收稿日期:2021-12-27)

量,利用经过推算得到的故障点测距公式计算出故障点的位置。所提出的双端故障点测距方法消除了过渡电阻和对侧系统对计算结果的影响,可实现故障点的精确定位,为地铁直流牵引供电系统提供了一种行之有效的故障点测距方法。

参考文献

[1] 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应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008:3.

YU Songwei, YANG Xingshan, HAN Lianxiang, et al. Design principle and application of power system for urban rail transit [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2008:3.

[2] 和敬涵,孟鑫,宋晓明,等. 基于时域微分的地铁直流牵引系统故障定位[J]. 电工技术学报,2016(3):164.

HE Jinghan, MENG Xin, SONG Xiaoming, et al. Fault location research of DC railway traction system based on time-domain differential [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016(3):164.

[3] 占栋,王轶,赵文军,等. 地铁直流牵引网短路故障测距方法及装置[J]. 电气化铁道,2020(4):90.

ZHAN Dong, WANG Yi, ZHAO Wenjun, et al. Method and device for short-circuit fault location of subway DC traction network [J]. Electric Railway, 2020(4):90.

(收稿日期:2021-06-30)