

一种高速铁路贯通地线断线故障定位方法

潘怡林,陈丽华,黄文,何正友,王科

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 结合电路和空间电位分布原理,提出了一种高速铁路贯通地线断线故障定位方法。根据扼流变压器的位置对贯通地线进行区段划分,并通过监测信号电缆护层接地电流变化来确定断线区段。向故障区段钢轨首端注入一定电流,通过测量贯通地线上方的地表电位精确定位断线故障点。采用 CDEGS 仿真平台搭建高速铁路综合接地系统模型进行验证,仿真结果表明所提出的方法能较精确定位断线点。

关键词: 高速铁路;贯通地线;故障定位;信号电缆护层电流;地表电位;CDEGS

中图分类号: U 229;TM 744+.3

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.023

0 引言

为了降低钢轨电位,保障人身、设备安全,我国高速铁路广泛采用综合接地系统。贯通地线是综合接地系统的重要组成部分,它将沿线的电力供电设备、信号设备、建筑物、站台、桥梁和隧道钢筋等连成一体^[1],一旦出现故障将带来严重后果,如沿线设备缺少等电位接地体,不同设备参考地电位存在偏差从而引起保护误动作;牵引回流系统缺少一条重要的回流通路,造成电流分配不均、钢轨电位过高^[2-3]。由于贯通地线常年埋在地下并贯穿整条线路,因此,如何在不开挖的前提下精确定位贯通线断线故障点,缩短故障检修时间,对保障牵引供电系统的安全稳定可靠运行具有重要的意义。

在电力系统中,很多学者针对不同导体断线的识别方法展开了深入研究。应用较多的有脉冲反射法^[4]、节点电压测试法^[5]、支路电阻测量法^[6]以及电桥法与放音法相结合^[7]等。这些方法在实际中已得到良好的应用。在牵引供电系统中,针对贯通地线断线的诊断方法少有文献报道,文献^[8]提出在贯通地线上设置监测点,通过观察电流变化来确定是否断线,该方法原理简单且直观,但考虑到实际贯通地线每隔 500 m 左右会和保护线连接一次^[1],采用该方法需要沿线设置大量的监测点,且只能进行区段定位,不能实现精确定位。由于贯通地线是埋地的铜绞线,又沿着线路全线铺设进行单相交流回流,电力系统中的许多方法均不适用于贯通地线故障定位研究。

本文针对以上问题,结合上述方法和牵引供电系统的特点,提出了一种贯通地线断线故障精确定位的方法。首先,理论分析应用信号电缆护层电流进行区段定位的可行性;接着,分析贯通地线地表电位分

布,根据地表电位分布规律对贯通地线的断点进行精确定位;最后,通过 CDEGS 仿真平台对本文所提出的方法进行仿真校验。

1 牵引供电综合接地系统

高速铁路牵引供电系统普遍采用全并联自耦变压器(AT)供电方式,主要包括牵引变电所、牵引网和综合接地系统三部分,其系统结构如图 1 所示。

图中,AT₁和AT₂为2个AT,两AT所之间的距离一般在 10~15 km^[14]。牵引网为动车组提供电能,并通过钢轨和综合接地系统进行回流。综合接地系统包括贯通地线、保护线和线路上的各个横向连接

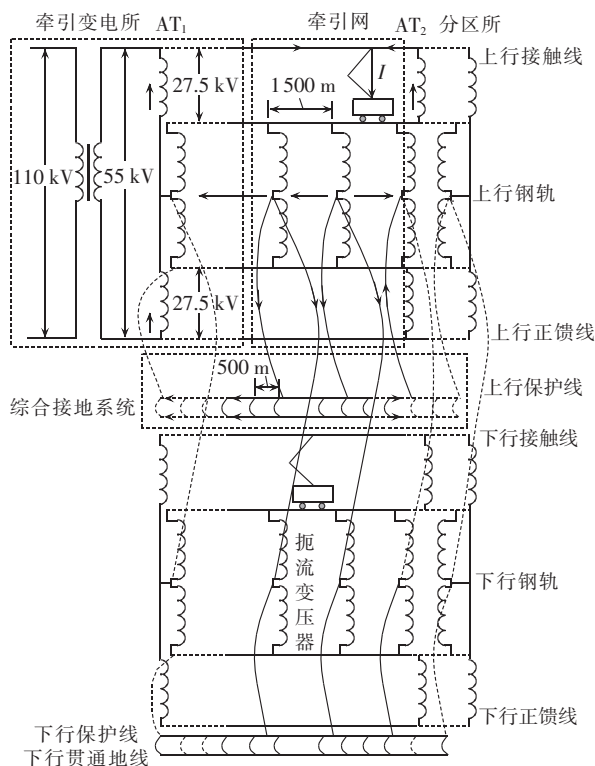


图 1 AT 供电系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of AT-fed system of high-speed railway

收稿日期:2015-07-04;修回日期:2016-07-06

基金项目:国家自然科学基金高铁联合基金重点项目(U1234203)

Project supported by the National Natural Science Foundation with High-Speed Railway(U1234203)

线,同时沿线强弱电设备、桥梁隧道钢筋结构、各类电缆护层接地全部接入贯通地线。线路中的横向连接大部分是通过 2 根轨道之间的扼流变压器来实现的,同时沿线信号电缆也通过扼流变压器的中性点与贯通地线形成连接,从而形成电缆护层的双端接地。相邻扼流变压器的间距在 1.5 km 左右^[1],根据扼流变压器的间距,一条长线路可划分为若干小区间。相邻扼流变压器之间的连接关系如图 2 所示。

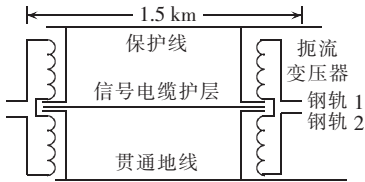


图 2 相邻扼流变压器连接示意图

Fig.2 Schematic diagram of connection between two adjacent impedance transformers

2 贯通地线断线分析

2.1 信号电缆护层电流分析

信号电缆护层可等效为阻抗模型,通常保护线和贯通地线每隔 500 m 连接一次^[1],2 个扼流变压器之间线路可等效为如图 3 所示的电路模型。

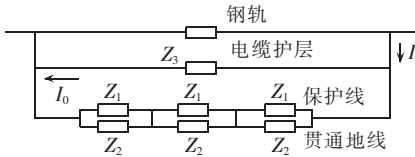


图 3 扼流变压器之间线路等效电路

Fig.3 Equivalent circuit between impedance transformers

图中, I 为钢轨流入扼流变压器的电流有效值, Z_1 和 Z_2 分别为长 500 m 的保护线和贯通地线等效阻抗, Z_3 为电缆护层阻抗。由基尔霍夫电压定律知,流过信号电缆护层的电流有效值 I_0 为:

$$I_0 = \frac{3Z_1Z_2}{Z_3(Z_1+Z_2)+3Z_1Z_2} I \quad (1)$$

若中间段的贯通地线发生断裂,其等效电路如图 4 所示。

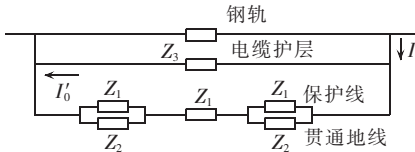


图 4 贯通地线断裂时的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit with broken integrated grounding line

此时,信号电缆护层电流 I'_0 可表示为:

$$I'_0 = \frac{Z_1+2Z_1Z_2}{(Z_3+Z_1)(Z_1+Z_2)+2Z_1Z_2} I \quad (2)$$

对比式(1)、(2)可知, $I'_0 > I_0$,即当贯通地线发生断裂后,流过电缆护层的电流增大。同理可验证贯通地线任何一段发生断裂后,离断点最近的 2 个扼流变压器之间连接的信号电缆护层电流会增大,由此可判断贯通地线断裂所在区段。

2.2 贯通地线地表电位分析

在获取贯通地线断线区段后,向故障区段钢轨的首端注入直流电流,此电流通过线路横向连接流入贯通地线,通过检测贯通线上方电位的变化情况,实现对贯通地线的断点进行精确定位。常用地表电位计算法主要有矩量法、有限元法、镜像法等^[11]。下面结合有限元法和镜像法来计算贯通地线的地表电位。贯通地线可按一定的长度划分为多个有限元,如图 5 所示。

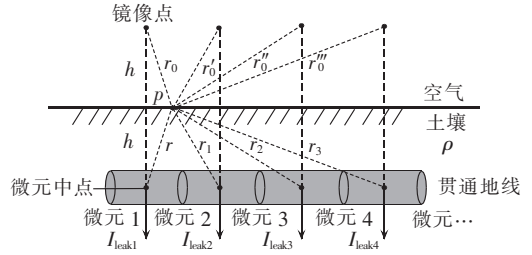


图 5 镜像法求地表电位示意图

Fig.5 Schematic diagram of image method to measure surface potentials

图中,微元 1 在空间任意一点产生的电位为^[11]:

$$U = \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_0} \right) I_{\text{leak}1} \quad (3)$$

其中, ρ 为土壤电阻率; r 为微元中点到场点 p 的距离; r_0 为微元镜像点到场点 p 的距离; $I_{\text{leak}1}$ 为微元 1 处的泄漏电流。

当场点 p 位于土壤与地表的分界面时,有 $r=r_0$,则地面上任意一点的电位为:

$$U = \frac{\rho}{2\pi r} I_{\text{leak}1} \quad (4)$$

根据叠加定理,贯通地线产生的地表电位 U_d 的通用计算公式可表示为:

$$U_d = \sum_{i=1}^n \frac{\rho}{2\pi r_i} I_{\text{leak}i} \quad (5)$$

图 5 中 p 点地表电位可表示为:

$$U_p = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{I_{\text{leak}1}}{r} + \frac{I_{\text{leak}2}}{r_1} + \frac{I_{\text{leak}3}}{r_2} + \frac{I_{\text{leak}4}}{r_3} \right) \quad (6)$$

当图 5 中所示贯通地线存在断线时,注入的电流可通过保护线传输到断线的另一端,如图 6 所示。

由于断点处泄漏到大地中的电流为 0,则 p 点电位为:

$$U'_p = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{I_{\text{leak}1}}{r} + \frac{I'_{\text{leak}4}}{r_3} \right) \quad (7)$$

比较式(6)和(7)可知, $U'_p < U_p$ 。即当贯通地线存

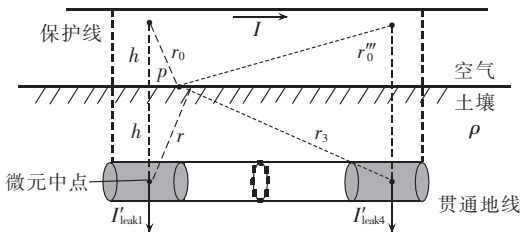


图 6 镜像法求断线时的地表电位

Fig.6 Schematic diagram of image method to measure surface potentials for broken integrated grounding line

在断线时,断点附近的地表电位会减小。基于此可判断贯通地线是否断线,并对断点进行精确定位。

综上分析,贯通地线断点定位的方法流程如图 7 所示。

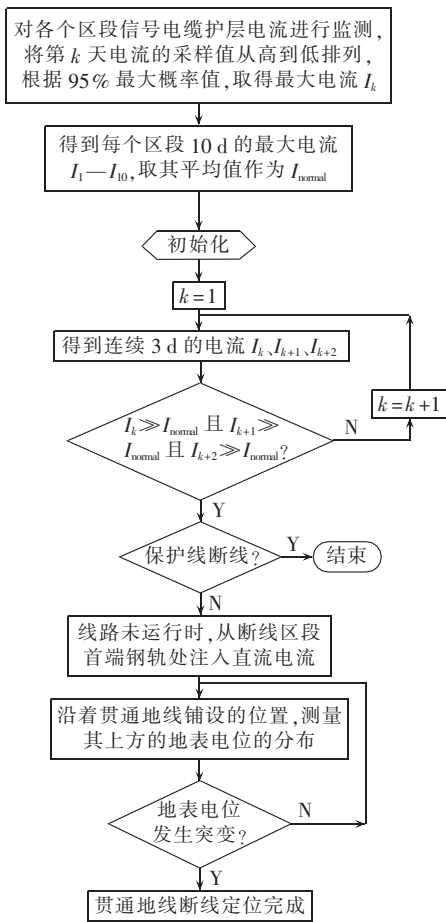


图 7 确定贯通地线断线位置流程图

Fig.7 Flowchart of break point determination

在实际运营过程中,每段信号电缆护层的电流具有很强的随机性,考虑到牵引供电系统具有一定的周期性,周期一般为 24 h,因此可利用 95% 概率求出一天每个区段护层电流监测值的 95% 概率极大值作为评判标准,以减小线路可能出现的瞬时故障对电流的影响。

另外,电流增大也可能是保护线发生断线造成的。因此,应先确定区段内的保护线是否完好,进而

确定是否为贯通地线故障。

3 实例分析

3.1 牵引供电系统仿真模型及信号电缆护层电流仿真

某高速铁路牵引供电系统采用 AT 全并联供电方式,钢轨和保护线以及贯通地线每隔 1.5 km 连接一次;上下行钢轨、保护线和贯通地线每隔 1.5 km 连接一次;保护线和贯通地线每隔 500 m 横连。其中一个 AT 段长度为 12 km,信号电缆型号 SPTYWPL-2344A^[3],铝护套外径为 31.2 mm,厚度为 1.2 mm,护层直流电阻为 0.8 Ω。贯通地线埋地深度为 0.7 m,土壤电阻率为 100 Ω·km,其他导体型号及参数如表 1 所示。基于 CDEGS 仿真平台,搭建某高铁牵引供电系统仿真模型。

表 1 相关导体型号

Table 1 Type of related conductors

导体	型号	截面积/mm ²	单根面积/mm ²	材料
接触线	CTMH150	151	0	铜-镁
保护线	JL125-26/7	120	19.6	钢-铝
贯通地线	JL63-6/1	60	10.08	铜
钢轨	CHN60	77.45	—	钢

当机车在不同位置时,每一段贯通地线正常和断线故障 2 种情况下,流过每一段信号电缆护层的电流分布如图 8 所示。

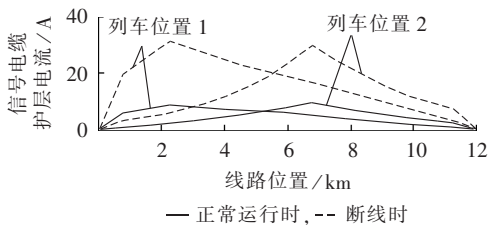


图 8 信号电缆护层电流分布仿真图

Fig.8 Simulative current distributions of signal cable sheath

从图 8 中可知,当列车运行到某个区段附近时,该区段的信号电缆护层电流会达到最大值;当各个区段的贯通地线发生断线后,对应区段的信号电缆电流变化的最大值会显著增大。由此,可根据正常和故障时电缆护层电流的大小判断故障所在区段。

3.2 贯通地线地表电位仿真

3.2.1 正常情况下贯通地线地表电位分布

向扼流变压器区段一端的钢轨注入 50 A 直流电流,贯通地线正常时,其正上方纵向 1 500 m 范围内地表电位分布如图 9 所示。

从图 9 可知,从电流注入点首端到线路末端,地表电位呈现整体下降的趋势,这是由于外加入的电流在沿着线路传输时泄漏到土壤中的电流越来越

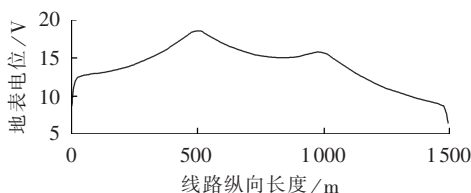


图 9 贯通地线地表电位分布图

Fig.9 Simulative earth surface potential distribution of integrated grounding line

小,使地表电位也不断降低。

3.2.2 断线故障后贯通地线地表电位分布

在一个区段中分别在贯通地线 700 m、900 m、1 100 m 处设置断裂点,向扼流变压器区段的钢轨一端注入 50 A 直流电流,其地表电位分布如图 10 所示。

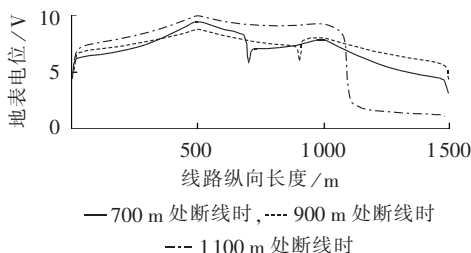


图 10 贯通地线断线时地表电位分布图

Fig.10 Simulative earth surface potential distributions of broken integrated grounding line

由图10可知,当断点分别在距离贯通地线首端 700 m、900 m、1 100 m 处时,对应的地表电位出现了显著的突变,说明能从地表电位的分布来较精确地判断贯通地线断线的位置。其中 1 100 m 位置断点处的突变下降幅度很大,是因为在 1 000 m 处存在保护线和贯通地线的横连线,1 100 m 处断线后大部分电流会通过横连线进入保护线,导致后方贯通地线的泄漏电流极大降低,使地表电位急剧减小。

需要注意设置的断点和仿真结果的电位突变点之间存在一定的误差。并且,电位突变点都在断点前方几米。为了查看误差的大小,不断改变贯通地线断开的位置,每隔 100 m 进行一次仿真,记录地表电位突变点的位置和误差。仿真结果如图 11 所示。

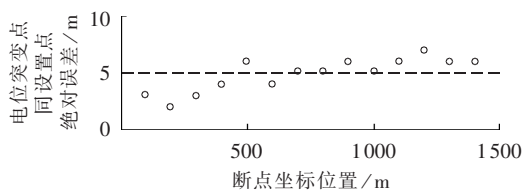


图 11 断点绝对误差仿真

Fig.11 Simulative absolute error of break point

通过仿真发现,地表电位突变点都会断裂点前方几米处。在进行现场修正的时候,可以适当判断故障点在电位突变点后方几米。通过分析,其绝对误差的平均值为 4.85 m,说明本文所采用方法误差

较小,能够对故障断点进行较精确定位。

3.2.3 多点断线贯通地线地表电位分布

同时在 700 m 和 1 200 m 处设置断点,向扼流变压器区段的钢轨一端注入 50 A 直流电流,贯通地线地表电位的分布如图 12 所示。

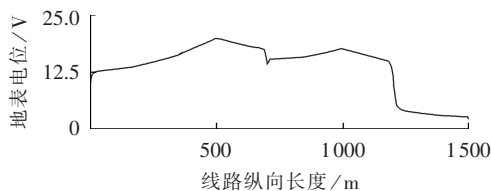


图 12 贯通地线两断点时地表电位分布图

Fig.12 Simulative earth surface potential distribution of integrated grounding line with two break points

由图 12 可知,2 个断点所在处的地表电位均发生了突变,说明本文所采用方法能对多点故障进行诊断。但是,如果 2 个故障点都在 1 000 m 之后,此方法只能定位前面那个故障。要解决这个问题,可以在首端注入电流完成定位后,将首末端颠倒,再从区段末端注入电流,测量地表电位来进行定位。若 2 次地表电位突变点不是同一点,说明出现了 2 个断点均在 1 000 m 后的情况。

4 结论

本文提出了一种高速铁路埋地贯通地线断线定位的方法,通过理论分析和 CDEGS 仿真分析得到如下结论:

- a. 利用信号电缆护层电流能对牵引供电系统贯通地线的故障区段进行精确定位;
- b. 根据地表电位分布情况可对故障区段的断点进行精确定位,绝对误差在 5 m 左右,可用于现场修正;
- c. 该方法不受故障区段断点数目的影响,能诊断出该区间内的多个断点。

参考文献:

[1] 铁道部工程设计中心. 铁路综合接地和信号设备防雷系统设计指南[M]. 北京:中国铁道出版社,2009:1-3.
[2] 姜春林. 高速电铁牵引供电自动化系统方案研究[J]. 电力自动化设备,2000,20(5):1-6.
JIANG Chunlin. Study on comprehensive automation system scheme for traction power supply of high-speed railway [J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(5):1-6.
[3] 钱澄浩,何正友,高朝晖,等. 高速铁路全并联 AT 牵引网短路故障情况下磁场环境特性分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):155-161.
QIAN Chenghao,HE Zhengyou,GAO Zhaohui,et al. Analysis of magnetic environment characteristics for high-speed railway all-parallel AT traction network with short circuit[J]. Electric Power

- Automation Equipment, 2014, 34(3): 155-161.
- [4] 齐红丽, 孟立凡, 刘晓东, 等. 长导体断裂无损检测及仿真技术的应用[J]. 测试技术学报, 2004, 18(2): 186-188.
- QI Hongli, MENG Lifan, LIU Xiaodong, et al. The validation of long-conductor breakpoint location by non-destructive testing theory and the application of computer simulation[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2004, 18(2): 186-188.
- [5] 胡婷, 游大海, 金明亮. 输电线路故障测距研究现状及其发展[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 146-150.
- HU Ting, YOU Dahai, JIN Mingliang. Present situation and development of fault location for transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 146-150.
- [6] 闵永智, 党建武, 张雁鹏. 铁路信号电缆断线故障在线监测与定位方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(4): 910-913.
- MIN Yongzhi, DANG Jianwu, ZHANG Yanpeng. A method of online monitoring and positioning on broken fault for railway signaling cable[J]. Computer Measurement and Control, 2012, 20(4): 910-913.
- [7] 刘健, 王建新, 王森. 测量误差对接地网故障诊断影响的分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 95-97.
- LIU Jian, WANG Jianxin, WANG Sen. Influence of measurement error on grounding grids diagnosis and its applications[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 95-97.
- [8] 杨世武. 高铁和重载条件下电气化铁道干扰对室外信号影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- YANG Shiwu. Study on interference upon track-side signaling from electrified railway under high speed and heavy haul conditions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [9] 常媛媛, 张晨. 高速铁路信号电缆不同接地方式对芯线的干扰影响研究[J]. 中国铁路, 2010(4): 27-31.
- CHANG Yuanyuan, ZHANG Chen. Study on influence of different grounding mode for core wire of signal cable in high-speed railway[J]. Chinese Railway, 2010(4): 27-31.
- [10] 牛晓民. 电力系统接地分析软件 CDEGS 简介[J]. 华北电力技术, 2004(12): 29-31.
- NIU Xiaomin. Introduction of CDEGS[J]. North China Electric Power, 2004(12): 29-31.
- [11] 李中新, 袁建生, 张丽萍. 变电站接地网模拟计算[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 76-79.
- LI Zhongxin, YUAN Jiansheng, ZHANG Liping. Numerical calculation of substation grounding systems [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 76-79.
- [12] 张丽萍, 袁建生, 李中新. 变电站接地网不等电位模型数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 1-3.
- ZHANG Liping, YUAN Jiansheng, LI Zhongxin. Calculation of substation grounding grids with unequal-potential model[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 1-3.
- [13] 杨琳, 吴广宁, 曹晓斌. 变电站接地网暂态建模方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 161-165.
- YANG Lin, WU Guangning, CAO Xiaobin. A transient modeling approach of substation grounding grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 161-165.
- [14] 张民, 何正友, 方雷, 等. 自耦变压器供电方式下降低高速铁路钢轨电位的方法及其仿真分析[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 80-84.
- ZHANG Min, HE Zhengyou, FANG Lei, et al. Methods to reduce rail potential of high-speed railway adopting autotransformer feeding system and simulation analysis on them[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 80-84.
- [15] XIE Shaofeng. Study on methods to reduce rail potential of high-speed railway[C]//Proceedings of 32nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Paris, France: IECON, 2006: 1042-1046.
- [16] OTERO A F, CIDRAS J, ALAMO J L. Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 873-878.

作者简介:



潘怡林

潘怡林(1991—),男,四川成都人,硕士研究生,研究方向为高速铁路综合接地系统故障诊断(E-mail: 524243493@qq.com);

陈丽华(1972—),女,云南昆明人,副教授,主要从事微机保护及综合自动化、城轨供电系统故障检测方面的研究;

黄文(1989—),女,山东济南人,硕士研究生,研究方向为高速铁路综合接地系统;

何正友(1970—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事信号处理和信息理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等方面的研究工作。

Method for locating integrated grounding line break fault of high-speed railway

PAN Yilin, CHEN Lihua, HUANG Wen, HE Zhengyou, WANG Ke

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A method combining circuit and space potential distribution principles is introduced for locating the integrated grounding line break fault of high-speed railway, which divides the integrated grounding line into several sections according to the position of impedance transformers, determines the broken section by monitoring the current variation of its signal cable sheath, injects DC current into the rail of faulty section at its head end, and measures the earth surface potential above the integrated grounding line to accurately locate the break point. A simulation model of integrated grounding system for high-speed railway is built on CDEGS platform and the simulative result shows the proposed method can accurately locate the break point.

Key words: high-speed railway; integrated grounding line; electric fault location; signal cable sheath current; earth surface potential; CDEGS