

# 考虑轨地回路分布式参数的直流牵引供电系统 双端稳态故障测距算法

刘 炜<sup>1</sup>,唐一文<sup>1</sup>,李富强<sup>1</sup>,王 竞<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031;2. 中国船舶重工集团公司第七一二研究所,湖北 武汉 430064)

**摘要:**针对城市轨道交通直流牵引供电系统短路故障定位困难的问题,提出了一种考虑轨地回路分布式参数的双端稳态故障测距算法。在发生短路故障后,利用故障区间相邻牵引变电所馈线直流开关柜的测试电路将直流牵引网电压施加在接触网与钢轨之间,利用2次测量的牵引网端口电阻进行故障测距。在考虑钢轨-大地两层回流结构的基础上,对分布式参数的轨地回路进行T型等效,通过解析计算得到故障距离与端口电阻的表达式。该方法不需要增加额外的故障测距设备且不需要双端数据的同步,不受接触电阻和暂态过程中的钢轨阻抗频率特性的影响。利用CDEGS仿真软件模拟直流牵引供电系统故障,讨论了不同接触电阻、故障点位置、过渡电阻以及电压、电流测量装置测量误差对故障测距精度的影响。在实验室小功率平台上采用裸导线模拟完全绝缘和较低过渡电阻的2种情况,结果验证了所提故障测距算法的有效性和实用性。

**关键词:**城市轨道交通;直流牵引供电系统;故障测距;稳态数据;轨地回路;分布式参数

**中图分类号:**TM 922

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202007016

## 0 引言

城市轨道交通直流牵引供电系统发生短路故障后,迅速、精准地确定故障发生位置,能够缩短故障恢复时间,提高运营效率。研究适用于城市轨道交通直流牵引供电系统的短路故障测距算法,对于保障供电系统的安全运行具有重要意义。

目前关于城市轨道交通直流牵引供电系统短路故障的定位研究较少,通常借鉴电力系统中常用的故障定位方法。行波法具有故障测距精度高、不受故障点过渡电阻和线路分布电容干扰等影响、不需要GPS及两端数据通信、故障测距成本低的优点,成为了继电保护领域的研究热点<sup>[1-3]</sup>。文献[4-5]将行波法应用于高压直流输电线路故障定位研究中,仿真结果证实了行波法在输电线路故障测距中的有效性及准确性。但是城市轨道交通两牵引变电所站间距离短、电压等级低,导致行波波头难以识别。另一种常用的故障测距方法是故障分析法,其分为单端分析法和双端分析法。由于双端故障分析法消除了接触电阻的影响,因此有良好的工程应用前景。文献[6]提出在传统故障测距法中引入双端稳态电气量,该方法需要故障发生后达到稳态的电压、电流值,而在实际地铁运行中,故障发生后直流保护装置会立即动作,在达到稳态之前就切断电路,不可能获得稳态电气量。文献[7]提出一种基于最小二乘法的双端时域微分方程故障定位算法,利用故障发生后监

测到的双端暂态电气量进行故障测距。文献[8]基于集中参数模型,利用故障发生后的电气量列写故障回路方程,使用最小二乘法求解超定矩阵方程,从而求解故障距离。但是双端法对数据的同步性要求很高,部分通信装置还无法保证双端数据完全同步。文献[9]提出一种基于线路沿线电压分布规律的故障测距法,基于分布式参数线路模型分析沿线的电压幅值分布规律,从而实现故障定位。文献[10-13]将分布式参数模型用于高压直流输电线路的故障定位中,通过建立输电线路的分布参数模型,引入贝瑞隆模型计算沿线电压差,利用故障点处电压最低的原理实现故障定位。但贝瑞隆模型本身是一个近似模型,是否适用于城市轨道交通直流牵引供电系统还有待考证。

传统的故障测距方法都是利用故障发生后到直流开关分断前的很小一段时窗内的单端或者双端电气量进行计算。但是暂态过程的电气量受多重因素影响,如钢轨的阻抗频率特性及钢轨-地过渡电阻。特别是钢轨阻抗特性受集肤效应的影响,参数确定困难。城市轨道交通直流牵引供电系统区别于高压直流输电线路,存在轨地回流系统,因此在故障测距时不能单纯地将钢轨和轨地回路作为一个集中参数的阻抗模型处理。

本文在不增加额外的故障测距设备的基础上,利用故障发生后馈线直流开关柜的测试电路实现双端稳态故障测距,在考虑轨地回流系统的基础上,对分布参数的轨地回路进行T型等效,建立了城市轨道交通直流牵引供电系统双端稳态故障测距模型,以此得到双端的馈线电流与牵引变电所端口等值电阻与

收稿日期:2019-12-13;修回日期:2020-05-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB1201002-07)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2017YFB1201002-07)

故障距离的关系。本文算法消除了接触电阻的影响,且不要求双端故障测距数据同步,仿真模拟试验及结果证明了算法的有效性与准确性。

## 1 利用馈线直流开关柜测试电路实现双端稳态故障测距的步骤

当直流牵引供电系统发生接触网对钢轨短路故障时,离故障点较近的牵引变电所A的直流馈线保护动作,同时双边联跳另一端牵引变电所B相应的直流馈线保护。馈线直流开关柜内一般设置测试电路以实现线路测试功能,利用馈线直流开关柜既有的测试电路实现双端稳态故障测距的系统结构如图1所示。图中, $R_c$ 为测试电阻,单位为 $\Omega$ ;  $U_1$ 和 $U_2$ 分别为牵引变电所A和B的牵引网电压,单位为V;  $I_1$ 、 $I_2$ 为接触网电流,单位为A;  $r_j$ 为接触网单位长度电阻,单位为 $\Omega/\text{km}$ ;  $R_f$ 为发生短路故障时的接触电阻,单位为 $\Omega$ ;  $L_d$ 为故障点与牵引变电所A间的距离,单位为m;  $L$ 为牵引变电所A、B之间的距离,单位为m。

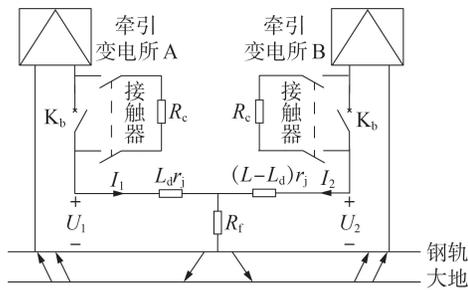


图1 直流牵引供电系统线路测试原理图

Fig.1 Principle diagram of line test for DC traction power supply system

故障测距的具体步骤如下。

(1)当牵引网故障为永久故障时,直流保护动作后,首先由牵引变电所A通过馈线直流开关柜内的测试接触器旁路直流快速断路器 $K_b$ ,将直流牵引网电压通过测试电阻加在接触网和钢轨之间,记录牵引变电所A出口的牵引网电压 $U_1$ 和接触网电流 $I_1$ ,计算牵引变电所A的端口等值电阻 $R_e = U_1/I_1$ 。

(2)为避免短路故障发生时接触电阻 $R_f$ 的影响,对牵引变电所B重复步骤(1),计算得到牵引变电所B的端口等值电阻 $R'_e$ 。

(3)将步骤(1)、(2)中得到的结果,以及端口等值电阻、接触网电压、电流等上送至故障点两端任一牵引变电所内的故障测距装置,利用2次测量的牵引网端口电阻进行故障测距。

## 2 考虑轨地回路分布式参数的双端稳态故障测距算法

在直流牵引供电系统中,钢轨通过扣件安装在道床上,文献[14]规定我国新建线路的钢轨-地

过渡电阻不应低于 $15 \Omega \cdot \text{km}$ ,运行线路的钢轨-地过渡电阻不应低于 $3 \Omega \cdot \text{km}$ 。将轨地回路考虑为分布式参数电路,采用本文稳态故障测距算法的等值电路模型如图2所示。图中, $U_{a0}$ 为整流机组的空载电压,单位为V;  $R_s$ 为整流机组等值电阻,单位为 $\Omega$ ; 直流馈线保护装置通过线路测试时的旁路电阻 $R_c$ 接入接触网与钢轨之间;  $r_T$ 为钢轨单位长度纵向电阻,单位为 $\Omega/\text{km}$ ;  $g_T$ 为钢轨对地单位长度电导,单位为 $\text{S}/\text{km}$ ,钢轨-地过渡电阻 $R_T = 1/g_T$ ,单位为 $\Omega \cdot \text{km}$ ;  $U_{T1}$ 为牵引变电所处钢轨对地电压;  $I_{T1}$ 为钢轨流回整流机组负母线的电流;  $U_{T2}$ 为故障点处钢轨对地电压;  $I_{T2}$ 为流向牵引变电所方向的钢轨电流。

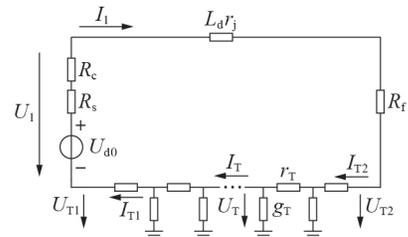


图2 直流牵引供电系统短路分布式参数模型

Fig.2 Short circuit distributed parameter model of DC traction power supply system

轨地微元结构示意图如图3所示。当直流牵引网电压通过测试电阻 $R_c$ 施加到接触网和钢轨之间时,距离牵引变电所 $x$ 处的钢轨对地电压为 $U_T$ ,钢轨电流为 $I_T$ , $x+dx$ 处的电压和电流分别为 $U_T+dU_T$ 和 $I_T+dI_T$ ,显然有:

$$\begin{cases} dI_T = U_T g_T dx \\ dU_T = (I_T + dI_T) r_T dx \end{cases} \quad (1)$$

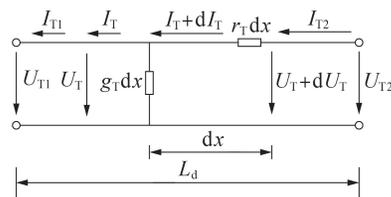


图3 轨地微元结构图

Fig.3 Micro-element diagram of rail potential to earth

定义 $Z_c = \sqrt{r_T/g_T}$ ,  $\gamma = \sqrt{r_T g_T}$ ,求解式(1)可得:

$$\begin{bmatrix} U_{T2} \\ I_{T2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L_d) & Z_c \sinh(\gamma L_d) \\ \frac{\sinh(\gamma L_d)}{Z_c} & \cosh(\gamma L_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{T1} \\ I_{T1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将钢轨对地的双端口网络用T型等值电路表示,则直流牵引供电系统稳态短路模型如图4所示。此时有:

$$\begin{cases} Z = [\cosh(\gamma L_d) - 1] \times 2Z_c / \sinh(\gamma L_d) \\ Y = [\sinh(\gamma L_d)] / Z_c \end{cases} \quad (3)$$

在测试回路中,牵引变电所A出口的接触网和

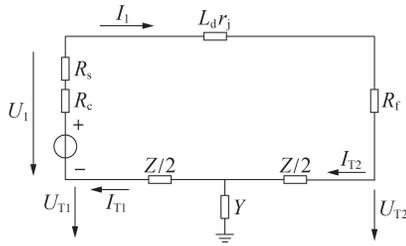


图 4 直流牵引供电系统稳态短路 T 型等值模型

Fig.4 T-type equivalent model of steady-state short circuit of DC traction power supply system

钢轨之间的端口等值电阻为:

$$R_e = \frac{U_1}{I_1} = L_d r_j + [\cosh(\gamma L_d) - 1] \frac{2Z_c}{\sinh(\gamma L_d)} + R_f \quad (4)$$

接触电阻的分压直接影响到牵引网电压分布时,忽略接触电阻就会影响故障测距的精度。为消除接触电阻的影响,本文利用馈线保护装置测量得到的牵引变电所 B 出口的牵引网电压  $U_2$ 、接触网电流  $I_2$ 。此时牵引变电所 B 出口的接触网和钢轨之间的端口等值电阻  $R'_e$  为:

$$R'_e = \frac{U_2}{I_2} = (L - L_d) r_j + \left\{ \cosh[\gamma(L - L_d)] - 1 \right\} \times \frac{2Z_c}{\sinh[\gamma(L - L_d)]} + R_f \quad (5)$$

联立式(4)和式(5),消去  $R_f$  得:

$$\frac{U_1}{I_1} - \frac{U_2}{I_2} = (2L_d - L) r_j + 2Z_c \left\{ \frac{\cosh(\gamma L_d) - 1}{\sinh(\gamma L_d)} - \frac{\cosh[\gamma(L - L_d)] - 1}{\sinh[\gamma(L - L_d)]} \right\} \quad (6)$$

已知  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $I_1$ 、 $I_2$  以及故障点相邻的两牵引变电所之间的距离  $L$  的情况下,在故障测距算法中设置较真实的钢轨纵向电阻、钢轨-地过渡电阻值,可通过式(6)求解出故障距离  $L_d$ 。

### 3 基于 CDEGS 软件验证直流牵引供电系统短路故障测距算法

#### 3.1 直流牵引供电系统建模

CDEGS 软件是用于解决电气系统接地、电流分布特性、电磁场和电磁干扰等工程问题的专业工具软件。该软件可在正常、故障、雷击以及暂态条件下计算地上或者地上任意位置的带电导体以及导体周围介质的电位梯度分布,其中 MALZ 模块主要用于对电流频率为 0~1 MHz 的导体网络进行建模仿真,该模块可以使用 CDEGS 软件的所有土壤模块。

利用 CDEGS 软件的 MALZ 模块对某实际的地铁线路进行建模,隧道全长为 20 km,道床结构和隧道结构采用混凝土层描述,其基本结构如图 5 所示。图中,  $l_1 = 10 \text{ m}$ ;  $l_2 = 4.4 \text{ m}$ ;  $l_3 = 0.6 \text{ m}$ 。

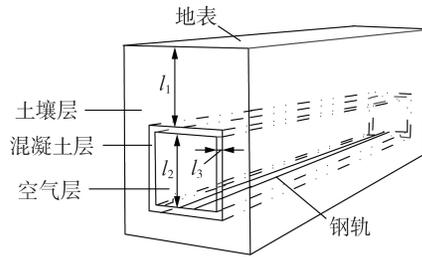


图 5 地铁隧道结构示意图

Fig.5 Structural diagram of metro tunnel

在 CDEGS 软件中对 2 个相邻牵引变电所进行建模,利用圆导体等效排流网,则直流牵引供电系统的等效模型示意图如图 6 所示。

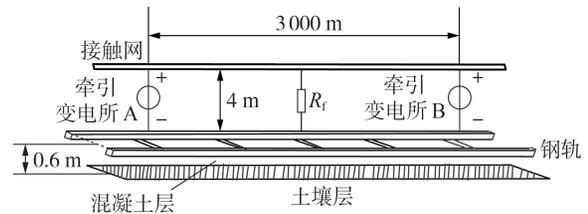


图 6 直流牵引供电系统的 CDEGS 等效模型

Fig.6 Equivalent model of DC traction power supply system CDEGS software

60 kg / m 钢轨的纵向电阻为  $0.02 \Omega / \text{km}$ 。在 CDEGS 仿真中,将包裹钢轨的绝缘层厚度设置为 0.01 m,通过设置钢轨绝缘层的电阻率模拟不同的钢轨-地过渡电阻。绝缘层的电阻率设为  $450 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ ,导体置于电阻率为  $250 \Omega \cdot \text{m}$  的混凝土层中,钢轨-地过渡电阻约为  $15 \Omega \cdot \text{km}^{[17]}$ 。接触网导体完全绝缘,置于电阻率为  $10^{18} \Omega \cdot \text{m}$  的空气层。仿真中,每隔 10 m 设置 1 个观测点。模型具体参数见表 1。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数	参数值	参数	参数值
区间长度 / km	3	混凝土电阻率 / ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	250
轨间距 / m	1.435	土壤电阻率 / ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	38.8
钢轨纵向电阻 / ( $\text{m}\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	20	空气电阻率 / ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$10^{18}$
钢轨-地过渡电阻 / ( $\Omega \cdot \text{km}$ )	15	钢轨等效导体直径 / mm	100
接触网电阻 / ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.01045	钢轨等效导体涂层厚度 / m	0.01

#### 3.2 短路点接触电阻及故障发生位置对故障测距精度的影响

仿真模型中,与故障点相邻的牵引变电所 A、B 分别位于线路的 10、13 km 处,故障点与牵引变电所 A 的距离为  $L_f$ 。分别模拟在不同故障点经不同的接触电阻发生短路故障的情况,采用本文算法进行故障定位,仿真结果如图 7 所示。图中,故障测距误差  $\varepsilon$  的计算方法如式(7)所示。

$$\varepsilon = \left( |L_d - L_f| / L_f \right) \times 100\% = \left( L_e / L_f \right) \times 100\% \quad (7)$$

其中,  $L_d$  为故障测距结果;  $L_f$  为实际故障距离;  $L_e$  为故障测距绝对误差。

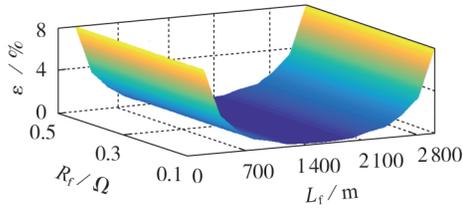


图7 不同故障位置及接触电阻情况下,本文算法的故障测距误差

Fig.7 Fault location errors of proposed algorithm under different fault locations and short circuit resistances

图7表明:本文算法的故障测距精度不受接触电阻大小的影响;故障点靠近两侧牵引变电所时,故障测距误差相对较大,最大可达到8.12%,但故障测距结果距离真实故障点16.24 m,故障测距效果依然较理想;短路故障发生在两站中间的区域时,故障测距误差较小,最小仅为1.03%。

### 3.3 故障区间在线路中的相对位置对故障测距精度的影响

利用仿真模型分别模拟故障发生在线路中不同区间的情况,接触电阻和钢轨-地过渡电阻分别设置为  $0.004 \Omega$  和  $15 \Omega \cdot \text{km}$ , 仿真结果如图8所示。图中,  $L_s$  为牵引变电所A位于整条线路上的位置。

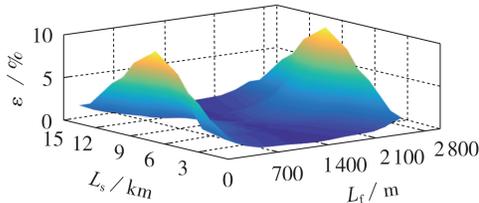


图8 不同故障区间内发生短路故障时的故障测距误差

Fig.8 Fault location errors of short circuit faults in different fault intervals

图8表明:故障(测距)区间在线路上的相对位置对近端短路故障测距误差的影响较大,对中远端故障测距误差的影响较小;当故障区间在线路位置的始末端时,本文算法的故障测距精度最高(误差不超过2.37%),判定的故障位置距离实际故障位置4.74 m;当故障发生在线路的中心位置时,本文算法的故障测距精度最低,当发生近端短路故障时,本文算法的故障测距误差最高达到9.40%,但算法判定的故障位置与实际故障位置的距离在30 m内。

### 3.4 电压、电流测量误差对测距精度的影响

电压、电流测量装置都存在测量精确度问题,如莱姆霍尔电压传感器DVL2000在  $-40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$  的工作环境温度中,测量精度为  $\pm 0.2\%$ ;霍尔电流传感器

LTC 1000-SF在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  的工作环境温度中,测量精度为  $\pm 0.4\%$ ,在  $-40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$  的工作环境温度中测量精度为  $\pm 1\%$ 。为了验证电压、电流测量误差是否直接影响到本文算法的效果,模拟在线路0.8 km处发生短路故障且电压、电流测量值存在测量误差的情况,接触电阻和钢轨-地过渡电阻分别设置为  $0.004 \Omega$  和  $15 \Omega \cdot \text{km}$ ,电压、电流测量误差见式(8)。

$$\begin{cases} \Delta U = (U' - U) / U \\ \Delta I = (I' - I) / I \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $U'$  和  $U$  分别为电压测量值和电压真实值;  $I'$  和  $I$  分别为电流测量值和电流真实值。

图9为电压、电流测量值存在误差时,本文算法的故障测距误差。图9表明:①在测量精度范围内,本文算法的误差最大为5.6%,判定的故障点距实际故障点45.2 m,误差最小为0.775%,判定的故障点距实际故障点6.2 m;②当电压、电流测量装置存在测量误差时,本文算法仍可实现有效的故障定位。

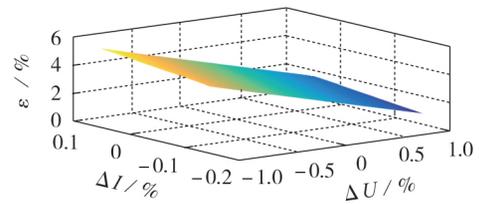


图9 电压、电流测量值存在误差时,本文算法的故障测距误差

Fig.9 Fault location errors of proposed algorithm when measurement errors of voltage and current exists

### 3.5 钢轨-地过渡电阻对故障测距精度的影响

钢轨-地过渡电阻受运营时钢轨的污秽程度、隧道干燥程度等外界因素的影响,在实际供电系统中分布范围广。为了分析钢轨-地过渡电阻对本文算法故障测距精度的影响,将不同钢轨-地过渡电阻下的实际故障距离,与本文算法计算得到的故障距离进行对比(本文算法中,式(6)仍然采用  $15 \Omega \cdot \text{km}$  的钢轨-地过渡电阻进行计算),结果如图10所示。

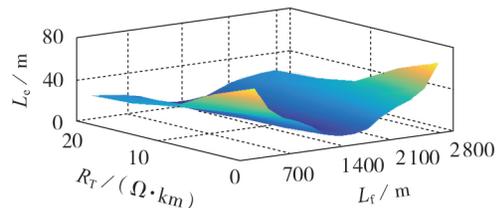


图10 不同钢轨-地过渡电阻下,本文算法的故障测距误差

Fig.10 Fault location errors of proposed algorithm under different rail-to-ground resistances

图10的仿真结果表明:①本文算法的故障测距精度在一定程度上受钢轨-地过渡电阻的影响,实际的钢轨-地过渡电阻越低,测距误差越大;②实际的钢轨-地过渡电阻对于近端短路故障测距误差的影

响更大,当钢轨-地过渡电阻为  $1 \Omega \cdot \text{km}$ 、 $L_t=200 \text{ m}$  时,本文算法的故障测距最大,判定的故障点距实际的故障点  $66.8 \text{ m}$ ,当  $L_t=1200 \text{ m}$  时,判定的点距实际的故障点仅  $14.88 \text{ m}$ ;③当钢轨-地过渡电阻大于  $15 \Omega \cdot \text{km}$  时,钢轨-地过渡电阻变化对于文算法的故障测距几乎没有影响;④本文提出的考虑轨地回路分布式参数的直流牵引供电系统双端稳态故障测距算法可与钢轨-地过渡电阻检测<sup>[15]</sup>和在线监测方法<sup>[16-17]</sup>结合,通过及时更新钢轨-地过渡电阻数据可以显著降低测量误差。

#### 4 模拟实验

搭建模拟试验平台验证本文所提测距算法的有效性,实验原理图见附录。图中,AC 380 V 经变压器降压后再经 6 脉波整流桥整流输出直流  $100 \text{ V}$ ,将  $4 \Omega$  的电阻接入电路模拟测试电阻;铜导线连接电源正极,模拟接触网,另一条导线接入电源负极,模拟钢轨,导线的电阻参数为  $1.1 \Omega / \text{km}$ ;空气开关 K 连接正、负极导线模拟短路,线路长度为  $100 \text{ m}$ ;通过电流、电压传感器采集短路过程数据。

试验第 5 s 闭合开关 K,分别模拟在钢轨完全绝缘(案例 1)及所在土壤中存在较低的钢轨-地过渡电阻(案例 2)2 种情形下在不同位置发生短路故障的情况,将短路后到达稳态的模拟试验数据代入式(6)计算故障测距结果,并通过式(7)计算故障测距误差,结果见表 2。表 2 证实了本文算法的有效性,但其故障测距精度受钢轨-地过渡电阻的影响:当钢轨-地过渡电阻较低时,对于近端短路故障的测距误差较大。在现场应用时,应尽量保证较高的钢轨-地过渡电阻值,并加强运营线路过渡电阻的实时监测,在测距过程中修正式(6)的钢轨-地过渡电阻参数。

表 2 模拟试验结果

Table 2 Results of simulation test

$L_t / \text{m}$	$L_d / \text{m}$		$\varepsilon / \%$	
	案例 1	案例 2	案例 1	案例 2
10	10.2	6.7	2.0	33.0
20	20.3	17.2	1.5	14.0
30	30.7	28.3	2.3	5.7
40	40.4	37.6	1.0	6.0
50	50.4	48.7	0.8	2.6

#### 5 结论

(1)本文提出考虑轨地回路分布式参数的直流牵引供电系统双端稳态故障测距算法。在发生短路故障后,利用故障区间相邻牵引变电所馈线直流开关柜的测试电路将直流牵引网电压施加在接触网与钢轨之间,利用 2 次测量的牵引网端口电阻进行故障测距。本文算法不需要增加额外的测距设备,利用双端稳态数据,不受接触电阻和暂态过程中的钢

轨阻抗频率特性的影响,且无需双端数据同步。

(2)利用 CDEGS 软件进行大量仿真,结果表明,本文算法的精度较高,受故障点发生位置的影响小,在电压、电流测量装置的测量精度范围内能有效、准确的故障定位。

(3)模拟试验结果证实了本文提出的测距算法的有效性,如果该方法在现场应用,应将钢轨-地过渡电阻检测和在线监测方法相结合,及时更新测距算法中的钢轨-地过渡电阻并输入参数中。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] 靳维,陆于平. 基于双端弱同步的配电网行波测距方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 102-109.  
JIN Wei, LU Yuping. Fault location method based on traveling wave with dual-terminal weak synchronization for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 102-109.
- [2] 邓丰,李欣然,曾祥君. 基于全波形信息的混联线路单端行波定位方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3471-3485.  
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun. Single-ended traveling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission line based on the full-waveform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3471-3485.
- [3] 彭楠,王政,梁睿,等. 基于广域行波波头频率分量幅值比信息的输电网非同步故障定位[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 56-62.  
PENG Nan, WANG Zheng, LIANG Rui, et al. Asynchronous fault location of transmission system based on wide area amplitude ratio information of frequency components in traveling wave fronts[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 56-62.
- [4] 王永进,樊艳芳. 基于反行波与信号处理的特高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 114-121.  
WANG Yongjin, FAN Yanfang. Longitudinal protection method based on reverse traveling wave and signal processing for UHVDC power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 114-121.
- [5] 任师铎,肖浩,李银红. 高压直流输电线路行波保护实用整定原则[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 54-60.  
REN Shiduo, XIAO Hao, LI Yinhong. Practical setting principle of traveling wave protection for HVDC power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 54-60.
- [6] 周文卫,陈丹,陈立扬. 一种改进的地铁故障测距方法及应用[J]. 电气化铁道, 2012, 23(2): 47-50.  
ZHOU Wenwei, CHEN Dan, CHEN Liyang. An improved metro fault location method and application[J]. Electric Railway, 2012, 23(2): 47-50.
- [7] 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, 31(3): 164-170.  
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, 31(3): 164-170.
- [8] 张勋,李乾,于龙,等. 基于双端数据的直流牵引网故障测距算法[J]. 铁道学报, 2014, 36(10): 33-39.  
ZHANG Xun, LI Qian, YU Long, et al. Fault location algo-

- rithm for DC traction supply based on two-ended data[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(10): 33-39.
- [9] 李振兴, 王新, 田斌, 等. 基于沿线电压分布规律的快速故障测距[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 112-120.  
LI Zhenxing, WANG Xin, TIAN Bin, et al. A fast fault location method based on distribution voltage regularities along transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 112-120.
- [10] 宋国兵, 周德生, 焦在滨, 等. 一种直流输电线路故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 57-61.  
SONG Guobing, ZHOU Desheng, JIAO Zaibin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [11] 李斌, 郭子焯, 姚斌, 等. 适用于半波长线路的贝瑞隆差动改进算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 80-85.  
LI Bin, GUO Zixuan, YAO Bin, et al. Bergeron model based current differential protection modified algorithm for half-wavelength transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 80-85.
- [12] 张云柯, 李博通, 李斌, 等. 超高压输电线路直流融冰过程中接地故障定位技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 105-111.  
ZHANG Yunke, LI Botong, LI Bin, et al. Ground-fault location technology for extra-high voltage transmission lines during DC de-icing process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 105-111.
- [13] 薛士敏, 贺家李, 李永丽. 特高压输电线路基于贝瑞隆模型的距离保护[J]. 继电器, 2005, 33(19): 1-4, 13.  
XUE Shimin, HE Jiali, LI Yongli. Distance protection based on Bergeron model for UHV transmission lines[J]. Relay, 2005, 33(19): 1-4, 13.
- [14] 北京市地下铁道科学技术研究所. 地铁杂散电流腐蚀防护技术规范: CJJ 49—1992[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 轨道交通地面装置 第2部分: 直流牵引系统杂散电流防护措施: GB/T 28026.2—2011/IEC62128-2: 2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [16] 李威. 地铁轨地过渡电阻及走行轨阻抗在线测量[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(4): 416-420.  
LI Wei. Research on real-time measurements of track continuity and track-to-earth resistance of metro[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(4): 416-420.
- [17] 张栋梁, 高强, 阳建林, 等. 城市轨道交通供电区间接过渡电阻在线测量方法的研究[J]. 铁道机车车辆, 2012, 32(2): 96-99.  
ZHANG Dongliang, GAO Qiang, YANG Jianlin, et al. Research of on-line measurement of track to earth resistance between urban rail transit substations[J]. Railway Locomotive & Car, 2012, 32(2): 96-99.
- [18] COTTON I, CHARALAMBOUS C, AYLOTT P, et al. Stray current control in DC mass transit systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 722-730.

#### 作者简介:



刘 炜

刘 炜(1982—), 男, 湖南益阳人, 副教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为城市轨道交通牵引供电(E-mail: liuwei\_8208@swjtu.cn);

唐一文(1995—), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市轨道交通继电保护(E-mail: 136293951@qq.com)。

(编辑 任思思)

## Two-terminal steady state fault location algorithm based on distribution parameters of rail-earth reflux system in DC traction power supply system

LIU Wei<sup>1</sup>, TANG Yiwen<sup>1</sup>, LI Fuqiang<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Shipbuilding Industry Corporation No.712 Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** To overcome the difficulty of locating short circuit faults in DC traction power supply system for urban rail transit, a two-terminal steady state fault location algorithm based on the distribution parameters of rail-earth reflux system is proposed. A DC traction network voltage is applied between catenary and rail by the test circuit of feeder DC switchgears of traction substations adjacent with the fault interval after short circuit faults. The fault location is calculated by using port resistance of traction network measured twice. Considering the double layer rail-earth reflux structure, the T-type equivalent circuit of rail-earth reflux system with distributed parameters is carried out, the expressions of fault location and steady state currents are inferred. The proposed method requires no additional fault locating equipment and the synchronization of two-terminal data, and is not affected by the short circuit resistance and impedance-frequency characteristic of rail in transient process. The fault of DC traction power supply system is simulated in CDEGS software. The influences of different short circuit resistances, fault point locations, transition resistances and measuring errors of current and voltage measuring devices on fault locating accuracy are discussed. The effectiveness of the two-terminal steady state fault location algorithm is verified by the simulation of complete insulation and low transition resistance using bare conductor on laboratory small power platform.

**Key words:** urban rail transit; DC traction power supply system; electric fault location; steady state data; rail-earth reflux system; distribution parameters

附录

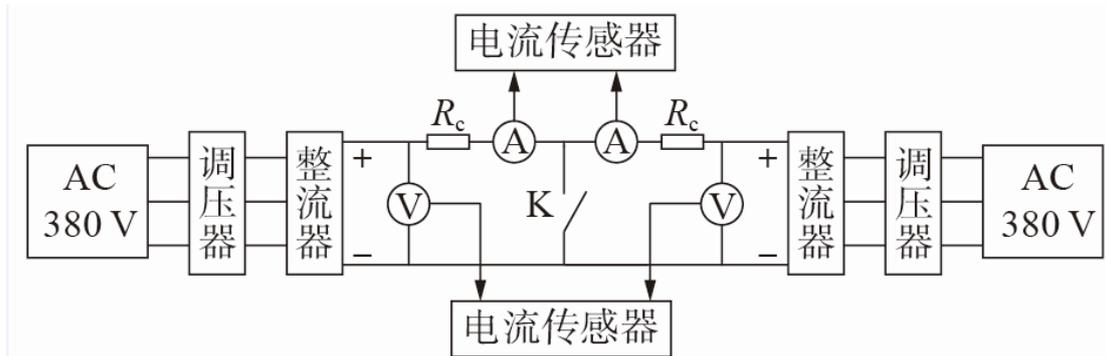


图 A1 模拟试验原理图

Fig.A1 Schematic diagram of simulation test