

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.02.039

一种综合应用工频法和行波法的组合故障测距法

李振兴¹, 田 斌^{1,2}, 吴李群¹, 王 欣¹, 方绍晨¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网恩施供电公司, 湖北 恩施 445000)

摘要: 为提高输电线路的故障测距性能,笔者综合分析了工频法和行波法二者之间的测距特点,并提出了一种综合应用工频量法和单端行波法的组合故障测距法。首先,基于输电线路的沿线电压幅值分布规律,利用切线交叉的工频测距原理,初步确定故障区域,接着,在此基础上用A型行波法精确地测出故障位置。通过引入行波测距避免工频测距后续的迭代计算,克服迭代不收敛或收敛至伪根的问题,提高测距精度;用工频初步测距,缩小行波波头辨识范围,提高行波测距可靠性。经仿真验证:所提组合法比工频法测距精度更高,比行波法的波头识别更加准确可靠。

关键词: 输电线路; 故障测距; 行波测距法; 工频测距法; 组合测距法

New Fault Locating Method Based on the Traveling Wave Method Combining with Frequency Parameters Method

LI Zhenxing¹, TIAN Bin^{1,2}, WU Liquan¹, WANG Xin¹, FANG Shaochen¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China;

2. State Grid Enshi Power Supply Company, Hubei Enshi 445000, China)

Abstract: In order to improve the performance of ranging, by comprehensive analysis the characteristics of main frequency parameters fault location method and traveling wave method, this paper presents a new method which takes into account the characteristics and application of those two fault location methods. First, based on the voltage distribution along the transmission line, according the tangent intersection of two voltage distribution curve to recognize the fault distance approximately, then obtained the accurate location results by A-type traveling-wave method. The proposed method by introducing traveling wave to evades the iterative calculation of frequency parameters fault location, keeps clear of false root or no convergence; use main frequency parameters method to narrow the search further, overcomes the difficulty in recognizing traveling-wave fronts. The simulation indicates that the proposed method not only have higher precision than main frequency parameters method, but also have the ability to accurately identify wave fronts.

Key words: transmission line; fault location; traveling wave method; frequency parameters; combination method

0 引言

输电线能远距离、大容量传输电能。实现资源优化配置,调节电能供需平衡。但输电线路也是电力系统中故障发生机率最高的电气元件。输电线路发生故障时,快速准确的故障测距是帮助检修人员查找故障位置,排除故障的有效手段^[1]。故障测

距对快速恢复输电,减少经济损失,促使电力系统安全稳定运行具有极为重要的意义。

鉴于故障测距的重要性,投入了大量的科研力量,致使目前涌现出了许多原理不同、性能各异的输电线路故障测距方案,按其测距原理主要可划分为工频测距法和暂态行波法两大类^[2-5]。

工频测距法是对输电线路故障时测量所得工

收稿日期:2017-09-18; 修回日期:2017-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477090);强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金资助项目(2016KF003)。

Project Supportal by National Natural Science Foundation of China(51477090); State key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology(HUST)Open Fundation Projects(2016KF003).

频量进行分析和计算来确定故障点位置, 可靠性高, 鲁棒性强^[6]。文[7]中采用牛顿迭代法求解复杂的非线性方程来获得故障位置, 但在迭代计算中可能面临不收敛或收敛至伪根的现象。文[8]采用直接搜索法对输电线路逐段搜索寻找故障位置, 此法虽然原理简单但是计算量大。文[9]提出双端数据无需同步的故障测距方法, 虽采用二分法大大提高了迭代计算的收敛速度, 但仍需迭代计算数十次才能使结果达到故障测距精度要求, 而且还存在伪根识别的问题。工频法测距原理复杂, 一般在有限的计算内无法得到非常精确的故障位置, 复杂的迭代修正或逐段搜索方式计算量大、存在伪根, 且易受过渡电阻、运行方式等因素的影响。

行波法是利用故障产生的暂态行波在故障点和测量点之间传播的时间差来测量故障距离, 测距原理简单, 受过渡电阻、运行方式等影响较小, 测距精度高^[10]。但是在行波测距过程中, 波头的准确识别直接关系着行波测距性能。然而从实际工程中所获现场波形混杂着多种噪声, 这增加了行波波头辨识难度, 极大的影响了行波测距可靠性。对此, 目前主要通过滤波去噪和锁定故障区域缩小波头识别范围来提高波头辨识的准确性。文[11]在综述行波测距现状的过程中, 对小波变换^[12]、希尔伯特黄变换^[13]、数学形态法^[14]等波头检测方法进行了比较分析, 通过变换滤波去除噪声, 保存简单有用的波形, 虽然降低了波头识别难度。但在滤波过程中极有可能造成波形畸变, 从而影响测距的整体可靠性。文[15]提出一种基于反极性行波检测的单端故障测距法。通过反极性行波出现时刻与故障点位置所存在的分段线性关系, 确定故障点所属线路区段和第2波头性质, 从而提高波头识别准确性, 但此测距过程仅限于行波范围内, 其可靠性还能进一步提高。

鉴于工频测距法和暂态行波法所具备的互补特性, 文中提出一种综合应用工频法和行波法的组合故障测距法。首先, 利用工频法测得故障所处的粗略位置。然后, 根据初步测距结果锁定行波波头识别的范围。最后, 在此基础上用A型行波法精确的测出故障位置。文中所提组合测距法综合应用了工频法与行波法, 实现了二者测距性能的优化互补。

1 工频初步测距

1.1 沿线电压分布

由于双端数据非同步仅影响正弦信号的相位而不影响其幅值^[16], 所以为了避免双端数据不同步对故障测距性能造成影响, 可以基于沿线电压幅值

分布规律进行工频测距。

文中已知均匀输电线路全长为 l 。采用分布参数线路模型, 线路参数中的电阻、电感、电容和电导分别为 $R(\Omega/\text{km})$, $L(\text{H}/\text{km})$, $C(\text{F}/\text{km})$, $G(\text{S}/\text{km})$; 两端电源系统的角频率为 ω 。则有:

传播常数为

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1)$$

特性阻抗为

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2)$$

获取线路两端电流电压测量值: U_{m0} 、 I_{m0} 、 U_{n0} 、 I_{n0} , 并结合输电线路参数分别计算出距M母线端 x 处的电压 $U_m(x)$ 和 $U_n(x)$ 。计算式为

$$\begin{cases} U_m(x) = U_{m0} \cosh(\gamma \cdot x) - Z_c I_{m0} \sinh(\gamma \cdot x) \\ U_n(x) = U_{n0} \cosh(\gamma \cdot x) + Z_c I_{n0} \sinh(\gamma \cdot x) \end{cases} \quad (3)$$

现已证明, 线路中沿线电压幅值分布为数千公里级的周期曲线, 而现存的输电线长度主要为百公里级, 所以在输电工程中沿线电压分布曲线的单调性最多改变一次^[2]。具体见图1所示的3种情况。

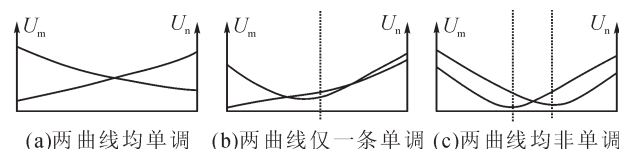


图1 3种情况下的区间划分

Fig. 1 Interval division in three situations

沿线电压幅值分布曲线上的斜率计算式为

$$K(x) = \frac{|U(x + \Delta x)| - |U(x)|}{\Delta x} \quad (4)$$

在图1中, 取 $K_m(0)$ 、 $K_m(l)$ 、 $K_n(0)$ 、 $K_n(l)$ 分别为两推算曲线首尾两端的斜率。当为图1(a)所示两曲线均单调时, 此时曲线两端的斜率同号。即 $K_m(0) \cdot K_m(l) > 0$, $K_n(0) \cdot K_n(l) > 0$; 当为图1(b)所示两曲线仅一条单调时, 两端斜率同号和异号的曲线各有一条。即 $K_m(0) \cdot K_m(l) < 0$, $K_n(0) \cdot K_n(l) > 0$; 当为图1(c)所示两曲线均非单调时, 此时两端斜率均异号。即 $K_m(0) \cdot K_m(l) < 0$, $K_n(0) \cdot K_n(l) < 0$ 。

1.2 单调分区

结合上述电压幅值分布曲线的特点, 可以通过比较曲线首尾两端的斜率来判断曲线的单调性。当两推算曲线均单调时, 如图1(a)中所示, 最多有一个交点, 此时测距不存在伪根; 只有当存在非单调曲线时, 如图1(b)、(c)中所示, 才可能有两个交点。对于存在非单调曲线的情况, 为了方便去除伪根, 可在曲线极值点处对线路进行分区, 确保每个区间曲线单调且不超过一个交点。其中寻找极值

点的具体过程如下。

设 a_1, b_1 为线路初始的首尾两端, c_1 为线路中点。即 $[a_1, b_1] = [0, l]$, $c_1 = (a_1 + b_1)/2$, 分别求斜率 $K(a_1)$ 、 $K(b_1)$ 、 $K(c_1)$, 当 $K(a_1) \cdot K(c_1) > 0$ 时, $[a_1, c_1]$ 区间单调, $K(b_1) \cdot K(c_1) < 0$ 时, $[c_1, b_1]$ 区间存在极值点。取 $[a_2, b_2] = [c_1, b_1]$, c_2 为 $[a_2, b_2]$ 的中点。以此类推, 最终找到极值点。

经上所述, 对于推算的沿线电压幅值分布非单调的情况, 需在推算沿线电压分布曲线极值点处划分单调区域, 并分区域求取切线交点。对于全线上存在多交点的情况需根据故障处电压幅值最小的原理去除伪根。去伪之后仅存的切线交点横坐标 x 即为故障所处的粗略位置。

1.3 切线交叉测距原理

当输电线路发生区内故障时, 沿线电压幅值在平面坐标系中的分布见图2。横坐标 x 为实际输电线路长度, 纵坐标 y 为对应的电压幅值。

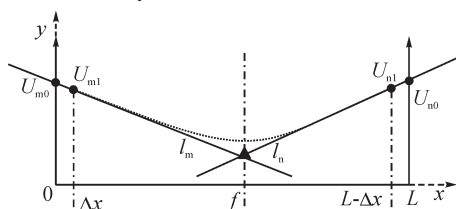


图2 故障测距原理图

Fig. 2 Principle diagram of fault location

在直角坐标系中, 已知两点坐标可确定一条过点直线; 同平面内两非平行直线必定相交于一点, 且利用两相交的直线函数可计算出此交点坐标。据此, 文中结合线路区内故障时的沿线电压幅值分布规律, 提出基于切线交叉的工频测距新原理^[17-18]。

首先, 求取近端点的电压。在距线路 M、N 两母线端 $\Delta x = 1$ km 处分别取近端点 m_1, n_1 。参照式(3), 利用母线端电流电压测量值以及线路参数可计算出近端点电压 U_{m1}, U_{n1} 。

$$\begin{cases} U_{m1} = U_{m0} \cosh(\gamma \cdot \Delta x) - Z_c I_{m0} \sinh(\gamma \cdot \Delta x) \\ U_{n1} = U_{n0} \cosh(\gamma \cdot \Delta x) - Z_c I_{n0} \sinh(\gamma \cdot \Delta x) \end{cases} \quad (5)$$

如此便在平面上得到了 m_0, n_0, m_1, n_1 4 点的坐标 $(0, U_{m0}), (l, U_{n0}), (\Delta x, U_{m1}), (l - \Delta x, U_{n1})$ 。

接着, 确定沿线电压幅值分布的切线函数。将上述所得坐标 $m_0(0, U_{m0})$ 与 $m_1(\Delta x, U_{m1})$ 带入式(4)得到切线 l_m 的函数; 同理, 用 $n_0(l, U_{n0})$ 与 $n_1(l - \Delta x, U_{n1})$ 得到切线 l_n 的函数。

$$\begin{cases} \frac{X-0}{\Delta x-0} = \frac{Y-U_{m0}}{U_{m1}-U_{m0}} & \text{M端推算得 } l_m \text{ 线} \\ \frac{X-l}{(l-\Delta x)-l} = \frac{Y-U_{n0}}{U_{n1}-U_{n0}} & \text{N端推算得 } l_n \text{ 线} \end{cases} \quad (6)$$

最后, 求取两切线交点。在平面坐标系中, 两非平行的直线 l_m, l_n 必将相交于一点。根据式(6)构建并解其方程组, 所得解 (x, y) 即为交叉点的坐标。横坐标 x 为输电线路所测得故障点的位置。

2 行波精确测距

在工程实际中, 输电线路并非理想的线性元件, 所以, 利用切线交叉工频测距仅能粗略确定故障区域。对此传统缩小误差的办法是通过多次迭代修正不断收敛至故障位置, 但此种方案计算量大, 迭代可能不收敛或收敛至伪根。在文中所提组合测距法中用单端行波测距取代迭代计算。

2.1 单端行波测距原理

当输电线路发生区内故障时, 在故障点处会产生沿线路传播的暂态行波。行波在传播过程中遇到母线或故障点等波阻抗不连续点时会发生折反射现象。单端行波法即利用到达母线测量端的初始行波与后续反射波之间的时间差来确定故障位置。

文中以 A 型单端行波法为例, 见图3。故障发生后, 故障点 f 处产生的初始故障行波于 t_0 时刻到达测量端 M, 初始故障行波经测量端与故障点之间反射一次后, 于 t_1 时刻再次到达测量端, 在波速已知的条件下, 故障距离 x 为

$$x = \frac{v(t_1 - t_0)}{2} \quad (7)$$

式(7)中: v 为行波波速, 波速一般设定成 0.987 倍光速。

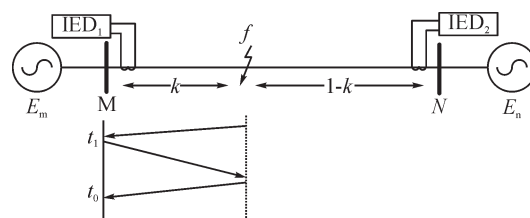


图3 A型单端行波测距原理图

Fig. 3 A-type traveling wave location method diagram

2.2 波头识别

根据式(7)进行行波故障测距的关键在于: 准确定时刻 t_0, t_1 , 即在测量端准确辨识出故障点反射波^[19-21]。而在实际应用中现场波形中噪声混杂, 可辨识度较低, 而测距结果直接依赖于行波辨识结果。工频测距法能明显地确定故障位置分布范围, 因此, 可以借助其定位结果确定故障所处的大致区间, 限定行波辨识的目标区域, 从而提高辨识准确度。

根据上文结论, 考虑到故障位置对测距精度的影响, 可以灵活限定故障发生的可能位置。故障范围表达为

$$x = [d - \delta l, d + \delta l] \quad (8)$$

式(8)中: d 为工频量法测距结果; l 为线路总长度; δ 为工频量法定位误差,其取值视 d 而定。

由式(8)可得,行波辨识区域被缩减转换为时间范围 T

$$T = \left[t_0 + \frac{2(d - \delta l)}{v}, t_0 + \frac{2(d + \delta l)}{v} \right] \quad (9)$$

基于初始故障电流行波与故障点反射波极性相同的特性,在时间范围 T 内辨识与初始故障电流行波极性相同的波头,其对应时间即为 t_1 ,再由式(7)

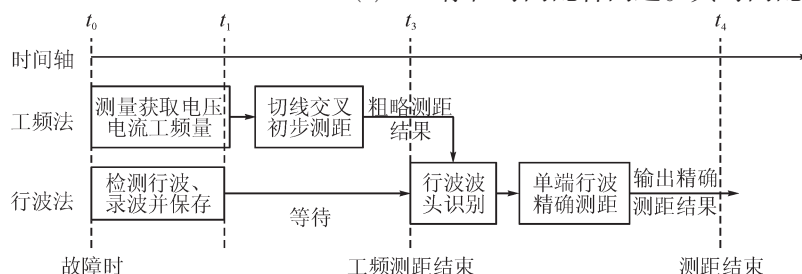


图4 组合测距中的时间配合关系图

Fig. 4 Time coordination schematic diagram of integrated location

结合图4所示,组合法的实施步骤及时间配合关系如下:

首先,同时测量数据采集。当线路故障时,故障点会产生向线路两端传输的暂态行波,而由两端测量装置获取的电流电压值也会发生相应的变化。系统将对行波和工频分量分别进行同时采集、保存、计算等处理。即图4中 t_0 - t_1 时间段所示。

然后,工频法初步测距。基于输电线路的沿线电压幅值分布规律,利用切线交叉的工频测距原理进行初步测距,得到故障粗略位置,从而锁定行波波头所在区域。由于对行波的录波行为比工频初步测距的速度要快,行波录波行为会提前完成。所以在工频初步测距锁定故障范围之前,需要对所录行波进行保存,并停止等待 t_1 - t_2 段时间。

最后,行波法精确测距。结合工频初步测距锁定的故障范围,从保存的录波中根据反射波的极性特点识别出波头,再根据单端行波原理到精确的故障测距结果。即 t_3 - t_4 段所示。

4 仿真验证

为了验证文中所提故障测距方案的正确性。在PSCAD/EMTDC上搭建输电系统仿真模型,并做故障仿真运行实验。其中搭建的输电系统仿真模型见图5。

其中输电线路的电压等级为500 kV,线路两侧系统的功角差为 $\delta=5^\circ$,输电线路长度为300 km。具

计算故障距离。

3 组合法实施过程中的配合关系

对输电线路而言,测距结果的高精度是电力工程关键,而对故障测距的快速性要求相对于保护而言不是很高。目前无论是工频法还是行波法基本上都能满足故障测距的时间要求。

对比行波法与工频法的测距速度,行波法要快很多。因此,在文中所提组合测距法的实施过程中存在时间配合问题。其时间配合关系见图4。

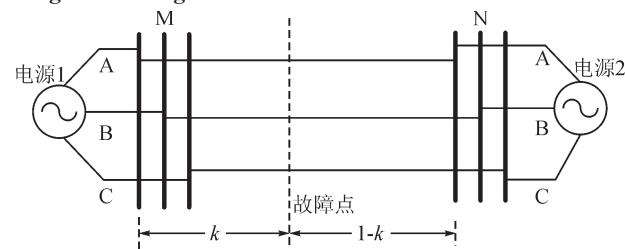


图5 输电线路模型简图

Fig. 5 The text power system modeled

体参数设置如下:

M端系统参数为 $Z_m = (1.05 + j43.18) \Omega$; N端系统参数为 $Z_n = (1.06 + j44.92) \Omega$; 线路参数为 $R_l = 0.0208 \Omega/\text{km}$, $L_l = 0.8984 \text{ mH}/\text{km}$, $C_l = 12.9 \mu\text{F}/\text{km}$, $R_0 = 0.1148 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 2.2886 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0 = 5.2 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

分别设置不同类型、不同位置、不同过渡电阻的故障进行测距仿真运行。仿真时以每周期24点为采样率(即采样频率为1.2 kHz),利用FFT变换获得所需的工频量,取故障后30 ms的测量数据进行初步的工频测距,工频初步故障测距仿真结果见表1。

引入绝对误差的概念,即

$$\varepsilon = \text{测量距离} - \text{实际距离} \quad (10)$$

对表1中工频故障测距仿真结果进行分析。文中所提切线交叉的工频测距将故障位置锁定在1 km范围以内。虽然不足以直接满足现实工程中的测距精度要求,但也能将故障位置锁定在线路约1%的范围内。

利用迭代修正法虽可以一定程度上提高故障

表1 工频初步故障测距仿真结果
Table 1 Frequency parameters location results

故障类型	过渡电阻/ Ω	测量结果/km			
		20	100	150	250
单相接地故障(AG)	0	20.57	100.22	149.93	249.68
	100	20.61	100.26	150.10	249.62
	300	20.54	100.28	149.91	249.65
相间故障(AB)	0	20.72	100.36	150.16	249.54
	30	20.65	100.31	150.12	249.51
	50	20.71	100.39	149.89	249.48
相间接地故障(ABG)	0	20.75	100.37	150.17	249.47
	30	20.67	100.39	150.19	249.49
	50	20.59	100.43	149.82	249.46
三相故障(ABC)	0	20.88	100.36	149.85	249.39
	30	20.93	100.39	150.18	249.43
	50	20.90	100.44	149.09	249.35

测距精度,但是经多次迭代之后存在不收敛或收敛至伪根的风险。文中则在故障所处位置已知的基础上,利用A型行波法进行精确的故障测距。

因已知故障存在的大致区域,在行波中的故障测距过程中,缩小了行波反射波头识别的范围,成功解决了反射波头识别困难的问题。使得行波测距变得更加快速精准。行波精确测距仿真结果见表2。

表2 行波精确测距仿真结果
Table 2 Rveling wave location results

故障类型	过渡电阻/ Ω	测量结果/km			
		20	100	150	250
单相接地故障(AG)	0	20.36	100.15	149.93	249.84
	100	20.24	100.19	150.06	249.82
	300	20.33	100.18	150.11	249.77
相间故障(AB)	0	20.32	99.83	149.87	249.73
	30	20.35	99.89	149.84	249.85
	50	20.31	99.82	149.84	249.78
相间接地故障(ABG)	0	20.29	100.14	149.95	249.76
	30	20.25	100.20	149.87	249.71
	50	20.34	100.16	149.82	249.86
三相故障(ABC)	0	20.38	100.12	150.08	249.79
	30	20.31	99.77	149.90	249.88
	50	20.37	99.85	150.13	249.94

从表2中测距结果中还可明显看出,行波测距精度在工频初次测距结果的基础上有了很大的提高,达到甚至超过了现存多数测距法的精度水准。

经仿真验证,文中所提的组合测距法,集行波

法与工频法之所长,避二者之所短,通过优化互补使其测距性能得到了极大的提升。

5 结论

文中鉴于工频法与暂态行波法的互补特性,提出了一种综合应用工频法与行波法的组合故障测距法。首先基于输电线路的沿线电压幅值分布规律,提出一种切线交叉的工频测距原理,并进行工频初步测距;接着根据初步测距结果锁定波头识别范围;最后根据识别的波头用行波法精确测出故障位置。

1)相对工频法而言避免了后续的迭代计算,克服了迭代不收敛或收敛至伪根的问题,提高了测距精度;

2)对行波法而言缩小了反射行波波头的辨识范围,提高了波头识别的准确度,大大增加了测距方案的可靠性。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 第二版.西安:西安交通大学出版社,2007:145-168.
GE Yaozhong. New relay protection and fault location principle and technology[M]. 2nd ed.Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2007:145-168.
- [2] 刘玉萍,林圣,何文,等. 动态条件下基于在线参数估计的故障定位算法[J]. 电力系统自动化, 2013,37(13): 103-108.
LIU Yuping, LIN Sheng, HE Wen, et al. A fault location method based on online parameter estimation under dynamic conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(13):103-108.
- [3] 林富洪,王增平. 采用同向正序基频分量的双回线故障测距原理[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4): 93-98.
LIN Fuhong, WANG Zengping. Fault locating method based on two terminal common positive sequence fundamental frequency component for parallel transmission line[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):93-98.
- [4] 马静,史宇欣. 基于分布参数的同杆双回线跨线及接地故障单端定位方法[J]. 电网技术,2014,38(9):2525-2531.
MA Jing, SHI Yuxin. Distributed parameter based one-end fault location for inter line fault and earth fault in double circuit transmission lines on same tower[J]. Power System Technology,2014,38(9): 2525-2531.
- [5] 梁睿,孙式想. 单端行波故障测距的组合方法研究[J]. 电网技术,2013,37(3):699-706.
LIANG Rui, SUN Shixiang. A combined method for single ended traveling wave fault location[J]. Power System Tech-

- nology, 2013, 37(3):699-706.
- [6] 李永坚, 黄绍平, 唐剑东. 几种工频双端测距算法对测量误差的适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14):134-139.
- LI Yongjian, HUANG Shaoping, TANG Jiandong. Research on adaptability to measurement error for several two-terminal fault location algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 134-139.
- [7] 康小宁, 索南加乐. 求解频域参数方程的双端故障测距原理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10):16-20.
- KANG Xiaoning, SOUNAN Jiale. Frequency domain fault location method based on the transmission line parameter identification using two terminal data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 16-20.
- [8] 束洪春, 司大军, 葛耀中, 等. 利用双端不同步数据的高压输电线路故障测距实用算法及其实现[J]. 电网技术, 2000, 24(2), 45-49.
- SHU Hongchun, SI Dajun, GE Yaozhong, et al. Study on practical fault location algorithm for two-terminal HV and EHV transmission lines using asynchronous data at both ends[J]. Power System Technology, 2000, 24(2):45-49.
- [9] 桂 勋, 刘志刚. 基于高压输电线电压沿线分布规律的故障双端测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19):63-69.
- GUI Xun, LIU Zhigang. An accurate algorithm of two terminal fault location based on the distribution of line voltage along HV transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19):63-69.
- [10] 覃 剑. 输电线路单端行波故障测距的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(15):65-70.
- QIN Jian. Study on single terminal traveling wave fault location of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(15):65-70.
- [11] 何军娜, 陈剑云, 艾颖梅, 等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24):148-154.
- HE Junna, CHEN Jianyun, AI Yingmei, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24):148-154.
- [12] 马丹丹, 王小茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3):55-59.
- MA Dandan, WANG Xiaoru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3):55-59.
- [13] 张小丽, 曾祥君, 马洪江, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8):64-68.
- ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8):64-68.
- [14] 梁远升, 王 钢, 李海峰. 双端不同步线路参数自适应时频域故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4):62-66.
- LIANG Yuansheng, WANG Gang, LI Haifeng. Fault location algorithm based on time-frequency-domain with two terminals asynchronous[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4):62-66.
- [15] 张 峰, 梁 军, 李建超, 等. 基于初始反极性行波检测的单端故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4):108-113.
- ZHANG Feng, LIANG Jun, LI Jianchao, et al. Single ended fault location algorithm based on detection of initial of initial reverse polarity traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4):108-113.
- [16] 许东升, 田凤兰, 赵 珩, 等. 电力电缆故障现场测距方法的研究与应用[J]. 高压电器, 2009, 45(5):136.
- XU Dongsheng, TIAN Fenglan, ZHAO Heng, et al. Research and application of power cable fault diagnostic method[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):136.
- [17] 许 飞, 董新洲, 王 宾, 等. 新型输电线路单端电气量组合故障测距方法及其试验研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4):37-42.
- XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Combined single end fault location method of transmission line and its experiments[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4):37-42.
- [18] 吴 骏, 王 震, 袁海星, 等. 基于物联网技术的配电网故障定位研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12):72-78.
- WU Jun, WANG Zhen, YUAN Haixing, et al. Study on the fault location of the distribution system based on internet of things[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12):72-78.
- [19] 蒋小平, 张红菊, 马速良, 等. 特高压带高压并联电抗器线路的行波差动保护研究[J]. 高压电器, 2016, 52(2):121-127.
- JING Xiaoping, ZHANG Hongju, MA Suliang, et al. Study on travelingwave differential protection on UHV transmission line with high voltage shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2):121-127.
- [20] 司马文霞, 陈 伟, 杜 林, 等. 基于输电网中故障行波分布和网络依赖图的故障定位算法[J]. 高压电器, 2010, 46(6):45.
- SIMA Wenxia, CHEN Wei, DU Lin, et al. A fault location method of high voltage grid transmission line based on over-voltage online monitoring signal[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6):45.
- [21] 覃 剑. 影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2):28-35.
- QIN Jian. Analysis on main influencing factors for transmission line traveling wave fault location accuracy[J]. Power System Technology, 2007, 31(2):28-35.

- [14] 施东风, 孙沙清, 王 冲, 等. 不同布置方式220 kV变电所对周围环境的电磁辐射分布[J]. 环境测量管理与技术, 2007, 19(2): 44-51.
SHI Dongfeng, SUN Shaqing, WANG Chong, et al. The electromagnetic radiation environment distribution from different layout of 220 kV transformer substations[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2007, 19(2): 44-51.
- [15] 黄道春, 阮江军, 文 武, 等. 特高压交流输电线路电磁环境研究[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 6-11.
HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WEN Wu, et al. Study on electromagnetic environment of UHV AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 6-11.
- [16] 庄振明, 谢咏梅, 宋永忠. 解决电磁辐射分析仪测量值偏高的方法[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(4): 70-71.
ZHUANG Zhenming, XIE Yongmei, SONG Yongzhong. The method for measured values correct of electromagnetic radiation analyzer[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2008, 20(4): 70-71.
- [17] 彭继文, 周建飞, 周年光, 等. 湿度对500 kV超高压交流架空送电线路区域电磁环境的影响研究[J]. 电网技术, 2008, 32(s2): 237-239.
PENG Jiwen, ZHOU Jianfei, ZHOU Nianguang, et al. Research on effects of humidity on 500 kV EHV AC overhead transmission lines regional electromagnetic environment[J]. Power System Technology, 2008, 32(s2): 237-239.
- [18] 俞集辉, 郑亚利, 徐禄文, 等. 湿度、温度对工频电场强度的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 137-140.
YU Jihui, ZHENG Yali, XU Luwen, et al. Effect of humidity and temperature on power electric-field intensity[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2009, 32(2): 137-140.
- [19] 何家宁, TAO D, 张宗华, 等. 电选机电场强度与相对湿度之间的关系[J]. 金属矿山, 2006, 360(6): 27-29.
HE Jianing, TAO D, ZHANG Zonghua, et al. Relationship between electric field intensity and relative humidity of electrostatic separator[J]. Metal Mine, 2006, 360(6): 27-29.
- [20] 彭一琦. 考虑气象条件的输电导线工频电场计算新方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2507-2512.
PENG Yiqi. Novel method for transmission line power frequency electric field calculation considering the weather condition[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2507-2512.
- [21] 孙 涛, 何旺龄, 万保权, 等. 湿度对高压输电线路工频电场测量的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1710-1716.
SUN Tao, HE Wangling, WAN Baoquan, et al. Influence of humidity on power frequency electric field measurements for high voltage transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1710-1716.
- [22] 张广洲, 朱银军, 张业茂, 等. 输电线路工频电场分布特性与计算方法辨析[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2581-2586.
ZHANG Guangzhou, ZHU Yinjun, ZHANG Yemao, et al. Calculation methods and distribution characteristics of power frequency electric field of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2581-2586.
- [23] 梁振光, 董 霞, 郑 路, 等. 500 kV变电站工频电场的测量与分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 81-83.
LIANG Zhenguang, DONG Xia, ZHENG Lu, et al. Measurement and analysis of power frequency electric field in a 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 81-83.

兰新生(1979—), 男, 高级工程师, 从事电力环境测量与治理研究。

(上接第245页)

sion lines fault location precision based on traveling wave[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.

李振兴(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力

系统继电保护与安全稳定控制。

田 斌(1989—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制(通信作者)。