

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.028

基于波速修正的多回输电线路行波测距算法

田斌¹, 方覃绍阳¹, 李振兴², 李志伟¹, 刘波¹, 高鹏¹

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

摘要: 行波传输速度是影响行波测距精度的关键因素之一, 输电线路暂态行波速度的难以确定严重制约了行波测距精度。对此, 文中从优化行波传输速度着手, 提出一种多回输电线路行波故障精确测距方法。首先基于波速误差对输电线路行波测距精度的影响, 分析了现存行波波速确定方法的优劣。进一步, 基于同杆多回输电线路共用输电走廊的结构特点, 在非故障线路上实时在线测量出行波速度, 并将其应用于故障线路的精确行波测距计算中。理论分析和仿真数据均表明: 此方法不受线路参数的影响, 能有效克服环境因素给沿线波速带来的误差。使测距波速更加贴近于行波传输的实际速度。可在一定程度上提高行波测距精度。

关键词: 故障定位; 输电线路; 同杆多回线路; 行波测距; 行波波速

Parallel Multiloop Transmission Line Travelling Wave Location Algorithm Based on Amending Wave Velocity

TIAN Bin¹, FANG Qinshaoyang¹, LI Zhenxing², LI Zhiwei¹, LIU Bo¹, GAO Peng¹

(1. State Grid Enshi Power Supply Company, Hubei Enshi 445000, China;

2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: The measurement accuracy of traveling wave velocity is one of the main influence factors for traveling wave fault location. Starting from optimizing the traveling wave transmission speed, an accurate location method for multiloop transmission line is proposed in this paper. First, analyze the effect of wave velocity error to location accuracy, and summarize the advantages and disadvantages of the classical methods of determining the wave velocity. Then, according to the structural characteristics of multi-loop transmission lines, the common transmission corridor is adopted, measurement the normal line velocity, used for fault line precision distance calculation. Both theoretical analysis and simulation indicate that the proposed method will not be affected by line parameters and environmental factors, at the same time can improve the fault location accuracy to a certain extent.

Key words: fault location; transmission line; multiple circuit lines; traveling wave location method; traveling wave velocity

0 引言

同杆多回输电线路在大容量电能输送中得到了广泛应用^[1-2]。由于一般输送距离远, 途经环境恶劣, 导致故障发生概率高且危害大。所以对已经发生故障的输电线路, 必须精确锁定故障位置, 从而

指导快速排除故障、尽早恢复正常供电运行。又由于在恶劣环境下对远距离输电线路进行沿途巡线比较困难, 所以需要利用线路两端测量点的测量行波或电气数据进行故障测距^[2]。

目前, 输电线路故障测距方法主要分为工频故障分析法和暂态行波法两种^[3-6]。故障分析法是利

收稿日期: 2018-08-11; 修回日期: 2018-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507091); 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 Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51507091), State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (HUST) Open Foundation Project(2016KF003).

用输电线路故障时的电压电流工频测量值, 进行分析和计算求出故障点的距离。传统测距方法多归于此类, 但此法相对行波法而言具有测距原理复杂, 精度不易控制等缺点; 暂态行波法是基于速度、距离、时间三者之间的关系, 通过测量故障行波到达测量点的时间, 并结合行波传输速度, 计算出故障点与测量点之间的距离^[7]。此法原理简单, 测距精度高, 且不受运行方式、故障类型及过渡电阻的影响。但是行波测距性能受行波速度、波头识别、时间同步等因素的限制^[8-9],

就波速与行波测距精度之间的相互关系, 文[10]重点分析了波速对行波测距精度的影响; 文[11]基于地模和线模波速差异, 利用二者到达母线的时差来消除波速的影响, 但在此法中地模分量的衰减畸变比较严重, 地模和线模分量不易区分, 故此法对测距性能的提高不明显; 文[12]采用区外故障行波波速测量法。即根据线路区外故障时线路两端故障测距装置测量的行波时间之差, 并结合线路长度计算出行波波速。但此法忽略了故障区内外环境因素的不同, 用区外在线测得的传输波速无法准确代替故障区内行波的传输速度。

对此, 考虑到非确定环境因素对波速的影响, 文中基于同杆多回输电线路的结构特点, 提出了一种在线优化波速的行波故障测距方法。首先采用人工设定的波速测出粗略故障位置, 再在同环境的非故障线路上在线测得行波速度, 然后利用在线实测的行波速度对故障线路进行精确故障测距。最后在PSCAD上建立输电系统模型。建模时考虑了沿途环境差异性导致的线路参数非均匀性, 并在此基础上验证所提波速优化方案及行波测距方法的性能。

1 波速对行波测距精度的影响

行波测距三要素分别为时间、速度、距离。文中从速度入手, 重点分析波速误差对行波故障测距精度的影响。

令 v 为实际波速, v_{set} 为设定波速。则绝对误差为 $\Delta v = v - v_{\text{set}}$; 相对误差为 $e_x = (\Delta v / v) \times 100\%$ 。

以单端A型测距法为例, A型测距是根据故障点产生的行波传到母线后反射到故障点, 再由故障点反射到母线的时差来定位。设故障发生的时刻为 t_0 , 测量端检测到的故障初始行波波头时刻为 t_1 , 检测到第一个经故障点反射的波头时刻为 t_2 。测得故障距离为 $x_1 = \frac{1}{2} v_{\text{set}} (t_2 - t_1)$; 相对误差为 $e_x = \Delta v \times$

$$\frac{|t_2 - t_1|}{2L} \times 100\%。$$

以双端D型测距法为例, D型测距是利用故障点产生的暂态行波传输到达两端母线的时差来计算故障位置的。 t_m 和 t_n 分别为两端检测到的故障初始行波波头时刻。测得故障距离为 $x = \frac{1}{2} [L + v_{\text{set}} (t_m - t_n)]$; 相对误差为 $e_x = \Delta v \times \frac{|t_m - t_n|}{2L} \times 100\%$ 。

经上述分析可知, 无论是单端还是双端行波法, 其故障测距误差均与波速误差成正比。波速是影响测距精度的重要因素之一。在故障的行波测距中获得并利用贴近实际的行波速度是提高行波测距精度的关键。

2 现存行波速度确定方案

目前关于行波速度的获取方法主要有工设定波速、线路参数计算波速、在线测量波速3种。

1) 人工设定波速是依据工程实际经验将行波波速设定为固定值。如根据输电电压等级设置一个接近光速 c 的值来近似表示行波速度, 一般在 $0.936c$ (110 kV)~ $0.987c$ (500 kV)之间。由于波速与线路参数、途经环境、实时气候等因素相关联。设定的波速所依据的参考线路可能与目标线路存在区别, 因此该方法无法保证波速准确^[13-15]。

2) 计算波速。即是根据线路参数来计算行波传输速度。

对于无损线路, 在不考虑参数的频率相关性时。已知单位长度线路中零序电感为 L_0 、零序电容为 C_0 、正序电感为 L_1 、正序电容为 C_1 。线路的线模分量和地模分量的波速计算式分别为:

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (2)$$

当考虑输电线路参数的频率相关性时, 行波波速计算式为

$$v = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{2} [\omega^2 LC - RG + \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}]}} \quad (3)$$

式(3)中: R 、 L 、 G 、 C 分别为单位长度线路的电阻、电感、电导及电容; ω 为角频率。

由于线路参数又受线路结构、途径环境、测量技术等因素影响, 线路参数在时间与空间上具有很强的不确定性。况且在利用线路参数精确计算行波波速时, 除了要求线路参数准确, 还要确定行波

的中心频率,否则也会导致行波波速计算不准。因此基于公式利用线路参数来计算行波波速也可能存在较大的误差,影响测距精度。

3)在线测量波速。即根据线路故障时的折反射行波到达检测点的时间差来确定行波波速。如文[16-18]利用线路区外故障时双端行波测距系统在线测量行波波速,从而实现了波速的在线测量和调整,能有效提高行波波速的精确度。但未考虑非均匀性环境因素的影响^[19-20]。

图1 远距离输电线路的途经环境见图1。

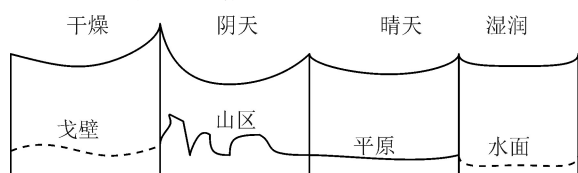


图1 远距离输电线路的途经环境图

Fig. 1 Environment map of long distance transmission line

如图1所示,输电线路沿途经过的地质环境(戈壁、山区、平原、水面等)、气候环境(干湿度、温度等)直接导致土壤电阻率,空气绝缘性,架空线路结构(垂幅)的不同。即在输电线路各不同环境区段、各不同气候时段中的线路参数差别很大。从而不难得得出输电线路暂态行波的传输速度在时间与空间上具有非恒定性的结论。

为克服输电线路沿途环境非确定性造成的行波测距误差,文中在考虑环境因素的基础上提出波速实时在线优化方案。

3 改进行波测距原理

同杆并架双回线的模型简图见图2,从图2中可看出,同杆并架双回线为多相线路平行结构,共用相同的输电走廊。各相线之间具有相同的输电走廊环境,沿途线路参数所受环境影响因素相同。即可认为相同环境段中各相线具有相同的行波传输速度。

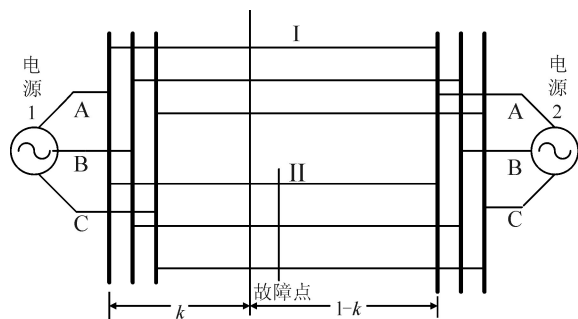


图2 同杆双回线模型简图

Fig. 2 Simplified system of double circuit line on the same tower

以此类推,多回线路具有多线并行输电的结构特点(6根以上)。输电线路故障时一般具有并行于故障相的非故障线路(由于多回线路中所有相线全部故障的概率极小,故此处可忽略所有相线全部故障的情况)。故障相与非故障相共用输电走廊,途经环境相同。下面将基于这些特点提出行波测距波速改进方案。

3.1 线上行波提取

行波采集装置见图3,其结构主要由电源供电、行波提取、高速采样、存储及无线通信等部分组成。在线路负荷电流较大时,可用互感器直接从高压线路通过感应取电,为检测装置提供电能以及给备用电池充电。负荷电流较小时由备用电池为检测装置提供电能支撑。利用 Rogowski 线圈对故障行波信号进行采集, Rogowski 线圈具有带宽高,无磁滞,无饱和等优点,不会造成行波信号的畸变。将提取的波信号经适当放大,滤波之后送入高速采样与存储单元。由 CPU 读取采样数据并进行一系列的后续数据处理,检测出波头并确定波头到达装置的时间。再通过无线通信对监测信息进行传送。该装置最大的优点是可将检测装置直接安装于高压输电导线上进行行波检测,能有效减小波的折反射干扰。可就近监测暂态行波电流,完整反映出行波电流的电磁暂态特征。

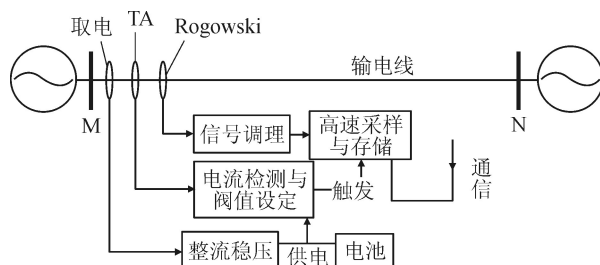


图3 故障行波采集装置

Fig. 3 Device of fault traveling wave acquisition

考虑输电线路沿途环境造成的输电线路参数差异,文中采用分布式沿途行波检测方式^[18-19],在高压输电线上沿途每隔 50~100 km 直接安装行波检测装置。如此便将远距离输电线路分成了若干个区段,见图4。各区段之间拥有明显不同的环境。分区段考虑环境因素的差异,克服沿线参数误差,优化输电线路的行波速度,从而提高行波测距精度。

3.2 测距原理

测距主要分两步进行,先通过人工设定的波速初步确定故障区域,再通过故障区域内的非故障线得出行波传输速度,最后利用计算得到的传播速度进行故障区内精确故障测距。

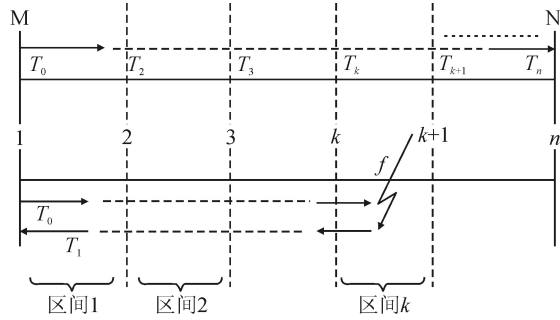


图4 分布式行波检测原理图

Fig. 4 Structure of distributed fault location system

如图4所示,当距离M端 x 远的 f 点发生故障时,故障点会产生暂态行波,并沿故障相向两端传播,当初始行波到达M端时,被M端安装的设备检测到,令初次检测到的时刻为 T_0 。行波在到达M端后将会发生反射,反射波回到故障点处又发生透射与反射,其中反射过后再次到达M端并被装置检测到,记反射波被M端第二次检测到得时刻为 T_1 。在非故障相上,在 T_0 时刻,由M端向N端发射与故障相M端一次检测到的一样的行波。并记下沿线分布式检测终端检测到的行波到达时刻 $T_2 \sim T_n$ 。

1)初步故障选区。取行波速度为光速的0.95倍,即 $v_0=0.95 \times 300 \text{ m}/\mu\text{s}=285 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。用单端A型行波法粗略测得故障位置 $x_0 = \frac{v_0(T_1 - T_0)}{2}$ 。

2)区内非故障线优化波速。故障发生时,非故障相的各检测终端检测到行波的时刻依次为 $t_1 \sim t_n$ 。而各个检测终端的位置已知(为依次为 $X_1 \sim X_n$)。依图进行计算,当 $X_n \leq x_0 \leq X_{n+1}$ 时, $v_n = \frac{X_n}{t_n - t_0}$, $v_{n+1} = \frac{X_{n+1}}{t_{n+1} - t_0}$ 。从而得到精确波速: $v = \frac{v_n + v_{n+1}}{2}$ 。

3)精确测距。将测量得到的精确速度 v 代入行波测距方程,求取故障距离 $x = v(T_1 - T_0)/2$,其中 x 即为最终的精确测距结果

4 仿真实验

搭建如图2所示的双回线模型图。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 $\delta=30^\circ$,线路两侧系统参数分别为:M端: $Z_{m1}=28.305 \text{ } \Omega$; $Z_{m0}=26.295 \text{ } \Omega$, N端: $Z_{n1}=31.423 \text{ } \Omega$; $Z_{n0}=28.104 \text{ } \Omega$ 。

输电线路全长300 km。为模拟环境差异导致的输电线参数的非均匀性,建模时将线路分为3段,每段长100 km,每段的线路参数为

1)I段线路参数。正(负)序: $R_1=0.022 \text{ } \Omega/\text{km}$; $X_1=$

$0.283 \text{ } \Omega/\text{km}$; $C_1=0.013 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$; 零序: $R_0=0.182 \text{ } \Omega/\text{km}$; $X_0=0.867 \text{ } \Omega/\text{km}$; $C_0=j0.005 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$ 。

2)II段线路参数。正(负)序: $R_1=0.258 \text{ } \Omega/\text{km}$; $X_1=0.284 \text{ } \Omega/\text{km}$; $C_1=0.012 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$; 零序: $R_0=0.286 \text{ } \Omega/\text{km}$; $X_0=0.923 \text{ } \Omega/\text{km}$; $C_1=j0.092 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$ 。

3)III段线路参数。正(负)序: $R_1=0.274 \text{ } \Omega/\text{km}$; $X_1=0.303 \text{ } \Omega/\text{km}$; $C_1=0.042 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$; 零序: $R_0=0.196 \text{ } \Omega/\text{km}$; $X_0=0.695 \text{ } \Omega/\text{km}$; $C_0=j0.028 \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$

取光速的0.95倍设为行波的测距速度,即为 $v_0=0.95 \times 300 \text{ m}/\mu\text{s}=285 \text{ m}/\mu\text{s}$;其行波的初始测距结果见表1(平均值)。

表1 利用人工设定波速进行的初步测距结果

Table 1 Preliminary measurement results of the artificial setting wave velocity are used

故障位置/km	50	100	150	250
测距误差/km	0.68	0.63	0.49	0.54

根据初步测距结果(误差在700 m内)对行波波速进行修正,修正后的行波速度见表2。

表2 经优化后的行波传输速度

Table 2 Traveling wave propagation speed after optimization

故障位置/km	50	100	150	250
行波速度/(km·s ⁻¹)	282.244	287.009	285.609	285.463

利用优化后的行波速度进行精确测距,其测距结果见表3(平均值)。

表3 利用优化后波速进行的精确测距结果

Table 3 Results of accurate measurement of the wave velocity after optimization

故障位置/km	50	100	150	250
测距误差/km	0.19	0.07	0.17	0.22

表3所示经优化后的测距误差均在300 m以内。将经波速优化之后表3的行波测距误差与波速优化之前表1的行波测距误差进行对比,可发现表3中测距误差在表1的基础上有了显著缩小。即可表明,通过文中所提行波波速优化方法能有效地缩小测距误差,提高测距精度。

5 结语

文中基于同杆多回线共用输电走廊的特点,利用非故障线优化行波传输速度,从而提高故障线路的行波测距精度。

所提方案与直接利用光速测距相比,更加贴近于行波在输电线路中传播的实际速度,克服了输电线路沿途环境时空随机性及线路参数非均匀性对行波测距精度的影响。

参考文献:

- [1] 夏勇军,尹项根,胡刚,等.同杆双回线路继电保护原理及工程应用[J].电力系统保护与控制,2009,37(3):98-103.
XIA Yongjun, YIN Xianggen, HU Gang, et al. Principle and engineering application of double-circuit transmission lines protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 98-103.
- [2] 王艳,郝良霞,徐玉琴.特高压同塔双回线路故障测距算法[J].电力自动化设备,2016,36(4):7-13.
WANG Yan, HAO Liangxia, XU Yuqin. Fault location algorithm for double circuit UHV transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 7-13.
- [3] 葛耀中.新型继电保护和故障测距的原理与技术[M].第2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.
- [4] 李振兴,田斌,李振华,等.适用于单/双回线的双端非同步故障测距方法[J].电力系统自动化,2016,40(22):105-110.
LI Zhenxing, TIAN Bin, LI Zhenhua, et al. Two terminal nonsynchronized fault location algorithms for single/double transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 105-110.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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):45-49.
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): 45-49.
- [8] 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 reverse polarity traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 108-113.
- [9] 覃剑,葛维春,邱金辉,等.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, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Analysis on main influencing factors for transmission lines fault location precision based on traveling wave[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.
- [10] 申文,刘亚东,盛戈峰,等.输电线路实际运行状态对行波波速的影响[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(9):12-16.
SHEN Wen, LIU Yadong, SHENG Gehao, et al. Influence of operating state of overhead transmission line on traveling wave velocity[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 12-16.
- [11] 尹晓光,宋琳琳,尤志,等.与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(1):35-39.
YIN Xiaoguang, SONG Linlin, YOU Zhi, et al. Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 35-39.
- [12] 黄雄,王志华,尹项根,等.高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J].电网技术,2004,28(19):34-37.
HUANG Xiong, WANG Zhihua, YIN Xianggen, et al. Travelling wave velocity measurement in fault location based on travelling wave for high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 34-37.
- [13] 刘亚东,盛戈峰,王葵,等.输电线路分布式综合故障定位方法及其仿真分析[J].高电压技术,2011,37(4):923-929.
LIU Yadong, SHENG Gehao, WANG Kui, et al. Method and simulation analysis of comprehensively distributed fault location of transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 923-929.
- [14] 王建,熊小伏,梁允,等.地理气象相关的输电线路风险差异评价方法及指标[J].中国电机工程学报,2016,36(5):1252-1259.
WANG Jian, XIONG Xiaofu, LIANG Yun, et al. Geographical and meteorological factor related transmission line risk difference assessment method and indexes[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1252-1259.
- [15] 高艳丰,朱永利,闫红艳,等.一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(8):8-13.
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [16] 张广斌,束洪春,于继来,等.基于回路电流故障主导波头到达时差的输电线路故障测距[J].中国电机工程学

- 报, 2013, 33(28): 137-145.
- ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Traveling wave fault location for transmission lines based on arrival time difference of dominant faulted waves in closed loop circuit current[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 137-145.
- [17] 李振兴, 田 斌, 吴李群, 等. 一种综合应用工频法和行波合故障测距法[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 240-245.
- LI Zhenxing, TIAN Bin, WU Liqun, et al. New fault locating method based on the traveling wave method combining with frequency parameters method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 240-245.
- [18] 李振兴, 吴李群, 田 斌, 等. 不同步双端数据修正波速的单端行波测距算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 16-22.
- LI Zhenxing, WU Liqun, TIAN Bin, et al. Single-terminal traveling wave location algorithm based on amending wave velocity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 16-22.
- [19] 范新桥, 朱永利, 卢伟甫. 基于多点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 39-45.
- FAN Xinqiao, ZHU Yongli, LU Weifu. Traveling wave fault location based on multiple current measurements for transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 39-45.
- [20] 徐湘忆, 盛戈皞, 刘亚东, 等. 输电线路分布式行波检测的故障定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 34(3): 134-138.
- XU Xiangyi, SHENG Gehao, LIU Yadong, et al. Fault location method for transmission line based on distributed traveling wave detection[J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2012, 34(3): 134-138.
- 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。
-
- (上接第 183 页)
- standards for distance from oil and gas pipeline to high-voltage power line[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(1): 82-84.
- [20] 陈文涛, 李 山. 750 kV 双回平行线路间感应电压和感应电流的计算与实测研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 111-115.
- CHEN Wentao, LI Shan. Study on calculation and measurement of induced voltage and induced current between 750 kV double-circuit parallel lines[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 111-115.
- [21] 王晓燕, 赵建国, 邬 雄, 等. 交流输电线路交叉跨越区域空间电场计算方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 411-416.
- WANG Xiaoyan, ZHAO Jianguo, WU Xiong, et al. Calculation method of electric field intensity for AC crossing transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 411-416.
- 史志强(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事高压研究。