

# 基于分布参数模型的高压输电线路 单相接地故障单端测距方法

林富洪<sup>1</sup>, 曾惠敏<sup>2</sup>

- (1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 福建省电力有限公司 福州超高压输变电局, 福建省 福州市 350013)

## One-Terminal Fault Location of Single-Phase to Earth Fault Based on Distributed Parameter Model of HV Transmission Line

LIN Fuhong<sup>1</sup>, ZENG Huimin<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Fuzhou Extra High Voltage Power Transmission & Substation Bureau, Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350013, Fujian Province, China)

**ABSTRACT:** Due to the existence of distributed capacitance and transition resistance in HV transmission lines, existing fault location methods based on one-terminal impedance are not suitable for the one-terminal fault location of HV transmission lines. To solve this problem, a transmission line model based on distributed parameters is built and the calculation formula for operation voltage at reference position is defined. A location function based on phase characteristics and a location function based on amplitude characteristics, which utilize one-terminal data, are given. It is known from theoretical analysis that the voltage location function possesses different phase characteristics while the selected reference position is located at the left side or the right side of the faulty point, i.e., an only step abrupt change of the phase characteristic occurs while the reference position moves through the fault point, and when the selected reference position coincides with faulty point, the amplitude of voltage location function reaches its minimum. On this basis a one-terminal phase-based fault location method and a one-terminal amplitude-based fault location method for the fault location of single-phase earth fault of HV transmission line are proposed. Simulation results show that the two proposed fault location method are slightly affected by fault position, transition resistance and load current, their fault location results are accurate for high-resistance earth-fault, thus they can meet the requirement of on-site application.

**KEY WORDS:** HV transmission line; distributed parameter; fault location; one-terminal data

**摘要:** 由于分布电容和过渡电阻的影响, 现有单端阻抗法无法适用于高压输电线路单端故障测距。针对这一问题, 采用分布参数模型建模, 定义了参考位置操作电压计算式。分别

给出了相位法定位函数和幅值法定位函数, 经理论分析可知: 当参考点位置位于故障点左侧或右侧时, 电压定位函数具有不同的相位特性, 其在故障点前后会发生唯一一次阶跃性突变; 而所取的参考点与故障点重合时, 电压定位函数幅值达到最小。在此基础上提出了适用于高压输电线路单相接地故障的单端相位测距法和单端幅值测距法。仿真结果表明, 这2种方法受故障位置、过渡电阻和负荷电流的影响很小, 高阻接地故障时依然具有很高的测距精度, 因此都能够满足现场的应用要求。

**关键词:** 高压输电线路; 分布参数; 故障测距; 单端信息

## 0 引言

单端阻抗法故障测距只需测量一侧信息, 具有对硬件要求低、易于实现和算法稳定等优点, 在中低压线路中获得了广泛的应用<sup>[1-11]</sup>。然而, 由于高压输电线路分布电容的影响, 单端阻抗法应用于高压输电线路故障测距时存在很大的误差, 特别是发生中高阻短路故障时, 其测距结果会严重偏离真实故障距离, 不能满足现场的应用要求。因此, 基于集中参数模型的单端阻抗法不能直接应用于高压输电线路的故障测距<sup>[1-11]</sup>。在所有线路故障中, 单相接地短路占80%以上, 基于分布参数模型研究一种适用于高压线路单相接地故障的单端故障测距算法, 具有较强的工程实际意义。

文献[12]采用分布参数建模, 利用观测点处负序电流的相角估算故障点电压的相角, 然后在故障点电压瞬时值过零点时刻计算测量阻抗。该方法在中

低阻短路故障时，由于沿线电压下降明显，利用观测点处负序电流相角估算故障点电压相角存在的误差对测距结果影响不大；但在高阻短路故障时，由于线路沿线各点电压相差很小，利用观测点处负序电流相角估算故障点电压相角存在的误差，加上暂态过程的影响使得该方法测距误差较大，需进一步改进。文献[13]采用分布参数建模，根据故障点处的残压与故障电流同相位的特征进行故障定位。该方法改善了分布电容对单端阻抗法故障测距的影响，但在高阻接地故障时，测距误差达-2.38%，误差绝对值大于1.5%，不能满足现场的应用要求，因此，仍需进一步完善。文献[14]采用分布参数建模，利用线路沿线分布电压的差分在一个时间段内的能量在故障点呈现最小值这一特征进行定位。文献[15]采用分布参数建模，利用单端电压电流计算沿线电压对距离导数的范数在线路上的分布进行故障点的定位。文献[14-15]都涉及了大量的求导运算和积分运算，所需运算量大，算法复杂，不易实现。

本文采用分布参数模型建模，定义了参考位置操作电压计算式，分别定义了相位法定位函数和幅值法定位函数，在此基础上提出了适用于高压线路单相接地故障的单端相位测距法和单端幅值测距法。

## 1 故障后各电气量之间的关系

高压线路内部故障正(负、零)序等值网见图1。

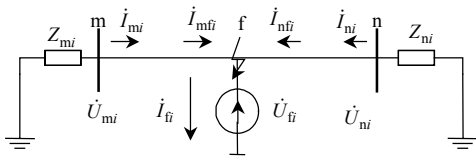


图1 区内故障时系统正(负、零)序等值网

Fig. 1 Positive (Negative or Zero) sequence equivalent circuit of system with internal fault

故障点与保护安装处各电气量之间存在如下关系：

$$\begin{cases} \dot{U}_{mi} = \dot{U}_{fi} \cosh(\gamma_i l_{mf}) + \dot{I}_{fi} Z_{ci} \sinh(\gamma_i l_{mf}) \\ \dot{I}_{mi} = \dot{I}_{fi} \cosh(\gamma_i l_{mf}) + \dot{U}_{fi} \sinh(\gamma_i l_{mf}) / Z_{ci} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $i=1, 2, 0$ ； $\dot{U}_{mi}$ 、 $\dot{I}_{mi}$  ( $i=1, 2, 0$ ) 为 m 端保护测量到的正、负、零序电压和电流； $\dot{U}_{fi}$ 、 $\dot{I}_{fi}$  ( $i=1, 2, 0$ ) 为故障点 f 处的正、负、零序电压和电流； $l_{mf}$  为故障点 f 到 m 端的距离； $r_i$ 、 $Z_{ci}$  ( $i=1, 2, 0$ ) 分别表示线路正、负、零序传播常数和正、负、零序波阻抗。由式(1)可得

$$\dot{U}_{mi} = \frac{1}{\cosh(\gamma_i l_{mf})} \dot{U}_{fi} + Z_{ci} \tanh(\gamma_i l_{mf}) \dot{I}_{mi} \quad (2)$$

以 A 相为例，由式(2)可得 m 处的电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mA} = & \dot{U}_{mA1} + \dot{U}_{mA2} + \dot{U}_{mA0} = \frac{1}{\cosh(\gamma_1 l_{mf})} \dot{U}_{kA1} + \\ & Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{mf}) \dot{I}_{mA1} + \frac{1}{\cosh(\gamma_1 l_{mf})} \dot{U}_{kA2} + \\ & Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{mf}) \dot{I}_{mA2} + \frac{1}{\cosh(\gamma_0 l_{mf})} \dot{U}_{kA0} + \\ & Z_{c0} \tanh(\gamma_0 l_{mf}) \dot{I}_{mA0} = \frac{1}{\cosh(\gamma_1 l_{mf})} \dot{U}_{fA} + \\ & Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{mf}) [\dot{I}_{mA} + k_f(l_{mf}) \dot{I}_{m0}] \end{aligned} \quad (3)$$

其中零序电流补偿系数为

$$k_f(l_{mf}) = \frac{Z_{c0} \sinh(\gamma_0 l_{mf}) - Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_{mf}) + Z_{m0} [\cosh(\gamma_0 l_{mf}) - \cosh(\gamma_1 l_{mf})]}{Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_{mf})} \quad (4)$$

基于分布参数模型，文献[12]推得 m 端负序电流与故障点支路负序电流之间存在如下关系：

$$\frac{\dot{I}_{f2}}{\dot{I}_{m2}} = [\cosh(\gamma_1 l_{mf}) + \tanh(\gamma_1 l_m) \sinh(\gamma_1 l_{mf})] \cdot \left\{ 1 + \frac{\tanh[\gamma_1 (l_m + l_{mf})]}{\tanh[\gamma_1 (l_n + l_{mn} - l_{mf})]} \right\}$$

式中： $l_{mn}$  为线路全长； $l_m$ 、 $l_n$  分别为由 m、n 侧负序系统阻抗决定的虚拟等值线路长度，且  $l_m = \arctan h[(Z_{m2}/Z_{c1})/\gamma_1]$ ， $l_n = \arctan h[(Z_{n2}/Z_{c1})/\gamma_1]$ 。

图2给出了  $\dot{I}_{f2}$  相位以  $\dot{I}_{m2}$  相位进行估算的误差特性曲线。由图知， $\dot{I}_{f2}$  以  $\dot{I}_{m2}$  估算的最大相位估算误差小于  $0.35^\circ$ ，因此，实际计算中故障点支路负序电流的相角可近似为保护安装处的负序电流相角。

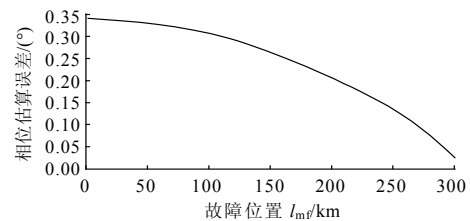


图2  $\dot{I}_{f2}$  以  $\dot{I}_{m2}$  估算的相位误差特性

Fig. 2 Angle of  $\dot{I}_{f2} / \dot{I}_{m2}$  with fault distance increasing

定义距 m 端长  $l_{mx}$  处参考位置 x 的操作电压为  $\dot{U}_{op-A}(l_{mx}) = \dot{U}_{mA} - Z_{c1} \tanh(\gamma_1 l_{mx}) [\dot{I}_{mA} + k_f(l_{mx}) \dot{I}_{m0}]$  式中  $k_f(l_{mx})$  为距 m 端长  $l_{mx}$  处的零序电流补偿系数。

## 2 故障点电压的计算

实际故障点电压相量是未知的，但由图3(a)、图3(b)可知， $\dot{U}_{fA}$  可以通过 m 端保护测量到的电压、电流计算得到，文献[3-4]给出了其具体计算方法如式(5)所示。

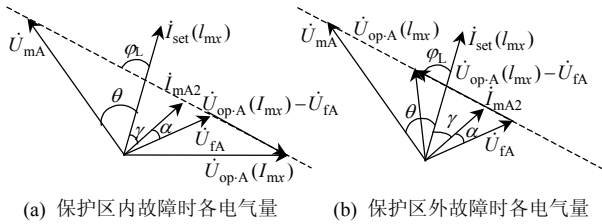


图 3 单相接地故障后的电压电流相量图

Fig. 3 Voltage and current vectors diagram of single phase to earth fault

$$\dot{U}_{fA} = \left| \frac{\dot{U}_{mA} \sin(\varphi_L - \theta)}{\dot{I}_{mA2} \sin(\varphi_L + \gamma + \alpha)} \right| \dot{I}_{mA2} \exp(-j\alpha) \quad (5)$$

式中： $\dot{I}_{set}(l_{mx}) = \dot{I}_{mA} + k_i(l_{mx})\dot{I}_{m0}$ ； $\varphi_L$  为线路正序阻抗角； $\theta = \arg[\frac{\dot{U}_{mA}}{\dot{I}_{set}(l_{mx})}]$ ； $\gamma = \arg[\frac{\dot{I}_{set}(l_{mx})}{\dot{I}_{mA2}}$ ； $\alpha$  为 m 端测量的负序电流与故障点支路负序电流间的夹角。

### 3 单端相位测距法基本原理

定义相位法定位函数  $f(l_{mx})$  为

$$f(l_{mx}) = \frac{\dot{U}_{mA} - \dot{U}_{fA}}{\dot{U}_{op-A}(l_{mx}) - \dot{U}_{fA}}$$

由图 3(a)可知,当故障位于 m 端和 x 点之间时,故障点电压  $\dot{U}_{fA}$  在  $\dot{U}_{mA}$  和  $\dot{U}_{op-A}(l_{mx})$  之间,此时  $\arg f(l_{mx}) \in (90^\circ, 270^\circ)$ 。由图 3(b)可知,当故障位于 x 点和 n 端之间时,故障点电压  $\dot{U}_{fA}$  在  $\dot{U}_{mA}$  和  $\dot{U}_{op-A}(l_{mx})$  的一侧,此时  $\arg f(l_{mx}) \in (-90^\circ, 90^\circ)$ 。因此,可得相位法定位函数相位变化情况如图 4 所示。由图 4 可知,当  $l_{mx} = l_{mf}^-$  时,  $\arg f(l_{mx}) \in (-90^\circ, 90^\circ)$ ；当  $l_{mx} = l_{mf}^+$  时,  $\arg f(l_{mx}) \in (90^\circ, 270^\circ)$ , 即当  $l_{mx}$  由  $l_{mf}^-$  增大到  $l_{mf}^+$  时,相位法定位函数相位会从  $(-90^\circ, 90^\circ)$  进入  $(90^\circ, 270^\circ)$ , 此时相位法定位函数相位会发生一次阶跃式突变,故障特征明显。本文利用此相位突变特性进行单端故障测距。

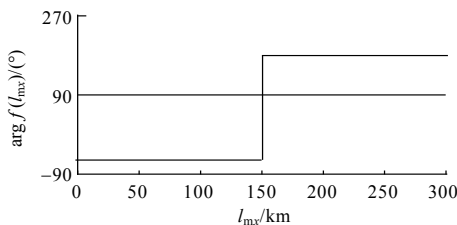


图 4 相位法定位函数相位特性曲线

Fig. 4 Phase characteristics analysis of phase fault location function while single phase to earth fault occurs

### 4 单端幅值测距法基本原理

定义幅值法定位函数  $f(l_{mx})$  为

$$f(l_{mx}) = \dot{U}_{op-A}(l_{mx}) - \dot{U}_{fA}$$

由图 3(a)可知,当  $l_{mf} > l_{mx}$  且 x 点由 m 端向故障

点变化时,  $|\dot{U}_{op-A}(l_{mx}) - \dot{U}_{fA}|$  单调递减且当  $l_{mf} = l_{mx}$  时达到最小。由图 3(b)可知,当  $l_{mf} < l_{mx}$  且 x 点由故障点向 n 端变化时,  $|\dot{U}_{op-A}(l_{mx}) - \dot{U}_{fA}|$  单调递增,且当  $l_{mf} = l_{mx}$  时达到最小。通过理论分析可得幅值法定位函数幅值特性曲线见图 5。由前面分析和图 5 可知,参考点 x 点与故障点重合时,幅值法定位函数幅值达到最小,根据此特征进行定位,故障特征明显。

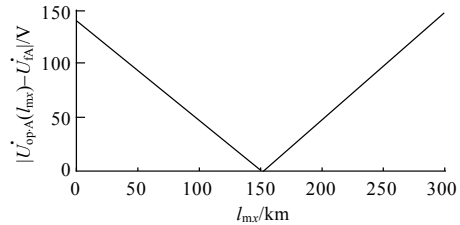


图 5 单相接地故障时幅值法定位函数幅值特性曲线

Fig. 5 Amplitude characteristics analysis of amplitude fault location function while single phase to earth fault occurs

### 5 试验验证

#### 5.1 仿真模型及参数

以我国京津唐 500 kV 超高压输电线路参数建立 PSCAD/EMTDC 仿真模型,如图 6 所示。

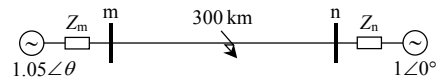


图 6 双端系统单相仿真模型

Fig. 6 The one-line diagram of the simulated two-terminal lines system

线路 mn 两端等效电源相角差为  $\theta$ , 二者电源幅值分别为 1.05 倍的标么值和 1 倍的标么值。输电线路全长 300 km。两侧系统参数： $Z_{m1} = 4.2643 + j85.1453 \Omega$ ,  $Z_{m0} = 0.6 + j29.0911 \Omega$ ,  $Z_{n1} = 7.9956 + j159.6474 \Omega$ ,  $Z_{n0} = 2.0 + j37.4697 \Omega$ 。

线路参数： $R_1 = 0.02083 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1 = 0.8948 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_1 = 0.0129 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $R_0 = 0.1148 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0 = 2.2886 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0 = 0.00523 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

#### 5.2 单端相位测距法仿真结果

单端相位测距法仿真结果如图 7—9 所示。由图 7 可知,在故障位置和负荷电流的各种不同组合情况下,当  $\theta = 60^\circ$  时,在 290 km 处发生 A 相接地故障时相位法相对误差达最大,为 0.078 3%。由图 8 可知,在过渡电阻和故障位置的各种不同组合情况下,当 290 km 处发生 A 相经 300  $\Omega$  过渡电阻接地故障时相位法相对误差达最大,为 0.935 0%。由图 9 可知,在负荷电流和过渡电阻的各种不同组合情况下,当  $\theta = 10^\circ$  时,距 m 端 51 km 处发生 A 相经 300  $\Omega$

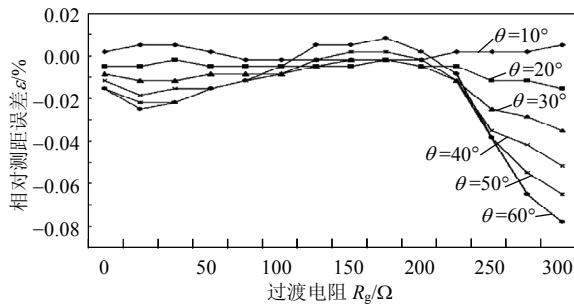


图 7 故障位置和负荷电流对单端相位法 AG 故障测距的影响

Fig. 7 Influence of fault position and load current on fault location for the AG fault based on one-terminal phase characteristics

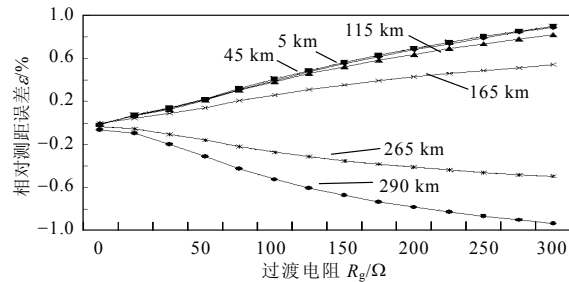


图 8 过渡电阻和故障位置对单端相位法 AG 故障测距的影响

Fig. 8 Influence of fault impedance and fault position on fault location for the AG fault based on one-terminal phase characteristics

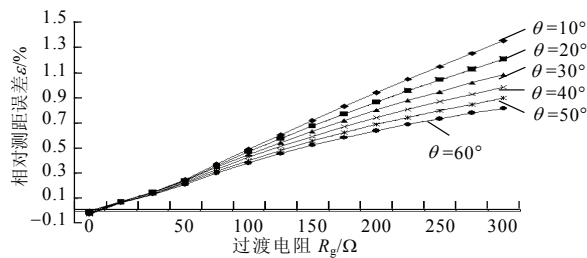


图 9 过渡电阻和负荷电流对 51 km 处 AG 故障单端相位法测距的影响

Fig. 9 Influence of fault impedance and load current on fault location for AG fault at 51 km position based on one-terminal phase characteristics

过渡电阻接地故障时相位法相对误差达到最大，为 1.3517%，小于 1.5%，满足工程要求。

### 5.3 单端幅值测距法仿真结果

单端幅值测距法仿真结果见图 10—12。由图 10 可知，在过渡电阻和故障位置的各种不同组合情况下，290km 处发生 A 相经 300Ω 过渡电阻接地故障时幅值法相对误差最大(0.933%)。由图 11 可知，在故障位置和负荷电流的各种不同组合情况下，θ=60° 时 290km 处发生 A 相接地故障时幅值法相对误差最大(0.08%)。由图 12 可知，在负荷电流和过渡电阻的各种不同组合情况下，θ=10° 时距 m 端 51 km 处发生 A 相经 300Ω 电阻接地故障时幅值法相对误差达到最大(1.48%)，小于 1.5%，满足工程要求。

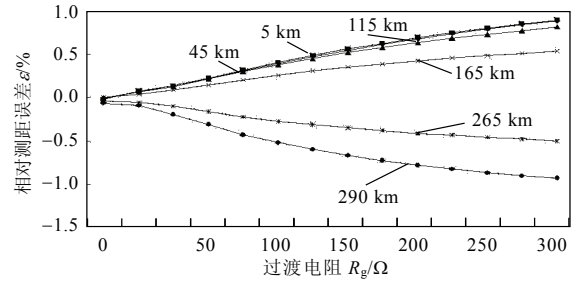


图 10 过渡电阻和故障位置对单端幅值法 AG 故障测距的影响

Fig. 10 Influence of fault impedance and fault position on fault location for the AG fault based on one-terminal amplitude characteristics

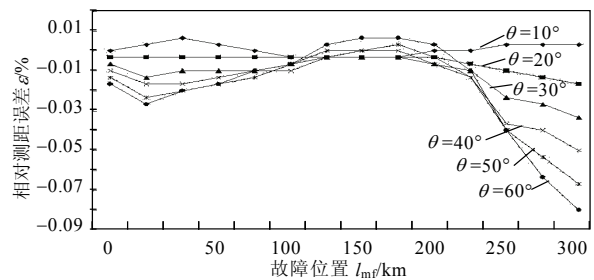


图 11 故障位置和负荷电流对单端幅值法 AG 故障测距的影响

Fig. 11 Influence of fault position and load current on fault location for the AG fault based on one-terminal amplitude characteristics

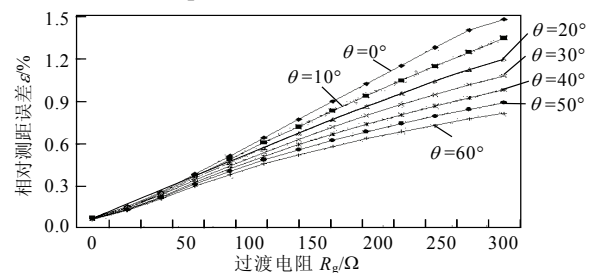


图 12 过渡电阻和负荷电流对 51 km 处 AG 故障单端幅值法测距的影响

Fig. 12 Influence of fault impedance and load current on fault location for AG fault at 51 km position based on one-terminal phase characteristics

## 6 结论

基于分布参数模型，定义了参考位置操作电压计算式。分别定义了相位法定位函数和幅值法定位函数，在此基础上分别提出了适用于高压输电线路单相接地故障的单端相位测距法和单端幅值测距法。仿真试验结果表明，本文所提出的测距方法受过渡电阻、负荷电流和故障位置等因素影响很小，高阻短路故障时都依然有很高的测距精度。

## 参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 260-285.

- [2] 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(in Chinese).
- [3] Ha Hengxu, Zhang Baohui. Study on reactance relays for single phase to earth fault on EHV transmission lines[C]//2004 International Conference on Power System Technology. Singapore: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004: 1-5.
- [4] 魏佩瑜, 于桂音, 张铭新, 等. 一种新的比相式电抗型距离继电器算法[J]. 继电器, 2006, 34(8): 13-16.  
Wei Peiyu, Yu Guiyin, Zhang Mingxin, et al. A novel algorithm of reactance type distance relay based on phasor comparison[J]. Relay, 2006, 34(8): 13-16(in Chinese).
- [5] 卢继平, 黎颖, 李健, 等. 行波法与阻抗法结合的综合单端故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 65-69.  
Lu Jiping, Li Ying, Li Jian, et al. Non-communication fault locating of transmission line based on traveling wave and impedance method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 65-69(in Chinese).
- [6] 束洪春, 高峰, 李卫东. 利用单端工频量的高压输电线路故障测距实用方法研究[J]. 电工技术学报, 1998, 13(5): 9-15.  
Shu Hongchun, Gao Feng, Li Weidong. A practical fault location algorithm for HV transmission line using one end data[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 1998, 13(5): 9-15(in Chinese).
- [7] Yang Cheng, Suonan Jiale, Guobing Song, et al. One-terminal impedance fault location algorithm for single phase to earth fault of transmission line[C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chendu: Sichuan University, 2010: 1-6.
- [8] 索南加乐, 王树刚, 张超, 等. 利用单端电流的同杆双回线准确故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 25-29.  
Suonan Jiale, Wang Shugang, Zhang Chao, et al. An accurate fault location algorithm for parallel transmission lines using one-terminal current[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 25-29(in Chinese).
- [9] 黄小波, 林湘宁, 马晓飞, 等. 适用于集中参数单端测距模型的距离修正方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 44-48.  
Huang Xiaobo, Lin Xiangning, Ma Xiaofei, et al. Improved algorithm for the lump parameter based single location models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 44-48(in Chinese).
- [10] 张艳霞, 李志果. 基于单端电气量的故障[J]. 天津大学学报, 2006, 39(8): 928-931.  
Zhang Yanxia, Li Zhiguo. Fault location algorithm based on single terminal electrical data[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(8): 928-931(in Chinese).
- [11] 袁宇春, 曾潜明. 考虑分布参数的高压输电线路单端故障测距算法[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 110-112.  
Yuan Yuchun, Zeng Qianming. Fault location algorithm for high voltage transmission lines with one-terminal data considering distributed parameters[J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement): 110-112(in Chinese).
- [12] 王宾, 董新洲, 薄志谦, 等. 特高压长线路单端阻抗法单相接地故障测距[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 25-29.  
Wang Bin, Dong Xinzhou, Bo Zhiqian, et al. An impedance fault location algorithm for UHV long transmission lines with single-line-to-ground faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 25-29(in Chinese).
- [13] 林湘宁, 黄小波, 翁汉刚, 等. 基于分布参数模型的比相式单相故障单端测距算法[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 74-79.  
Lin Xiangning, Huang Xiaobo, Weng Hanli, et al. A novel phase comparison algorithm for single terminal fault location based on distributed parameter model[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 74-79(in Chinese).
- [14] 哈恒旭, 王婧, 谭雨珍, 等. 基于微分算子逼近的单端故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 69-73.  
Ha Hengxu, Wang Jing, Tan Yuzhen, et al. New single-ended fault locating principle based on differential operator approach [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 69-73(in Chinese).
- [15] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 高压输电线路单端测距新原理探讨[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 42-45.  
Ha Hengxu, Zhang Baohui, Lü Zhilai. A novel principle of single-ended line fault location technique for EHV transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 42-45(in Chinese).



林富洪

收稿日期: 2010-11-15。

作者简介:

林富洪(1986), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护;

曾惠敏(1988), 女, 通信作者, 研究方向为电力系统自动化, E-mail: zenghuimin1988@163.com。

(责任编辑 李兰欣)