

输电线路加权数据融合故障测距算法研究

刘洪正¹, 高厚磊², 韩志骏¹, 李超¹, 邹贵彬², 陈学伟²

(1. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250021; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 高压输电线路故障测距具有多种不同的方法, 如基于稳态量的单、双端测距和基于行波信号的单、双端测距等。由于电力系统存在许多不确定性因素及干扰, 单一测距方法都有其固有的局限性。将多传感器数据融合技术引入电力系统故障测距, 充分利用多测距源提供的冗余信息, 提出自适应加权数据融合测距算法。该算法利用先验知识或仿真数据获取各单一测距算法在不同工况下的加权系数, 然后对单一算法的测距结果进行加权融合, 最终获得可靠精确的测距结果。应用 PSCAD/EMTDC 建立 500 kV 输电系统模型, 通过模拟不同故障情况对算法进行了仿真验证。仿真结果表明, 融合测距算法基本不受过渡电阻、故障位置、故障类型、分布电容等因素的影响, 具有良好的可靠性、精确性和鲁棒性。

关键词: 输电线路; 故障测距; 加权数据融合; 多传感器; 自适应

Transmission line fault location algorithm based on weighted data fusion

LIU Hong-zheng¹, GAO Hou-lei², HAN Zhi-jun¹, LI Chao¹, ZOU Gui-bin², CHEN Xue-wei²

(1. Shandong Electric Power Corporation Maintenance Company, Jinan 250021, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: There are several algorithms for high-voltage transmission line fault location, such as steady state signal based one/two terminal algorithm, travelling wave based one/two-terminal algorithm. Due to many uncertainties and interference in transmission system, any single fault location method has its inherent limitations. By introducing multi-sensor data fusion technique, a self-adaptive weighted data fusion fault location algorithm is proposed, whose feature is fully using all the location information from multi-source. This new algorithm uses a priori knowledge or simulation data to obtain the weight coefficients of each single location algorithm corresponding to different fault conditions. The weight coefficients are then used to do calculation of weighted data fusion for all single location result. And finally the reliable and accurate location result will be obtained. This algorithm is tested under various fault conditions on a 500 kV transmission system model by using PSCAD/EMTDC. Simulation results show that the proposed algorithm is less influenced by fault resistance, fault position, fault type, system operation mode and distributed capacitance, and naturally possesses higher reliability, accuracy and robustness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177094).

Key words: transmission line; fault location; weighted data fusion; multi-sensor; self-adaption

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)15-0015-06

0 引言

输电线路的准确故障定位是从技术上保证电网可靠和经济运行的重要措施之一, 可产生显著的社会和经济效益。高压输电线路的测距方法按测距原理可分为故障分析法和行波法, 按测距所需的信息来源可分为单端法、双端法和多端法等。

单端测距算法实现简单, 已提出较多实用方法^[1], 但故障点过渡电阻及对端系统阻抗的不确定性不可避免地会引起测距误差。双端测距算法不存在原理误差, 但双端同步测距算法对 GPS 时钟的依赖性强, 硬件投资较大; 双端非同步测距算法需要两端的数据同步, 但在伪根判别、适应线路类型等方面尚有待于进一步改进^[2-3]。行波测距理论上不受系统运行方式、过渡电阻等因素的影响, 测距精度高, 但行波法的测距精度受参数频变及波速变化的影响较大, 在电压相角过零或接近零时发生故障,

基金项目: 国家自然科学基金(51177094); 国网山东省电力公司科技项目(2012A-82)资助

产生的电压、电流行波比较微弱,会造成测距失败,且在近区还存在难以识别反射波的问题,许多文献对此进行了有益探索^[4-6]。

故障测距的性能力求能适应各种运行方式和各种复杂故障,由于电力系统存在许多不确定性因素及干扰,单一测距方法都有其固有的局限性。因此,需要将故障分析法和行波法结合起来以满足精确故障测距的要求。

1 多传感器数据融合概述

随着电力系统的复杂性日益提高,依靠单传感器、单数据源进行故障测距限制颇多,难以满足当代电力系统快速、准确故障定位的需要。在故障测距系统中使用多传感器、多数据源融合技术,对观测测量提供了互补信息和冗余信息,将这些信息进行融合,得出比单个传感器更准确更完全的故障信息,可以提高故障定位的准确性和可靠性^[7-9]。

图1所示为多传感器数据融合示意图,传感器之间的冗余数据增强了系统的可靠性,传感器之间的互补数据扩展了单一传感器的性能。多传感器融合系统具有以下优点:1)提高系统的可靠性和鲁棒性;2)扩展时间上和空间上的观测范围;3)增强数据的可信任度;4)增强系统的分辨能力。

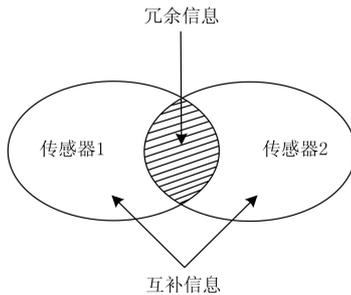


图1 多传感器数据融合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-sensor data fusion

2 加权数据融合算法

加权数据融合算法原理如图2所示,算法的核心思想是:在总均方误差最小条件下,根据各个传感器所得到的测量值 x_i 寻找各个传感器所对应的最优加权因子 w_i ,使融合后的估计值 \hat{x} 达到最优^[3-4]。

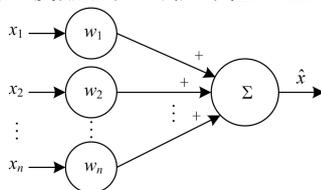


图2 加权数据融合算法

Fig. 2 Weighted data fusion algorithm

为了方便分析,不妨以两个传感器为例对同一常量进行测量,测量值为

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + v_1 \\ x_2 &= x_0 + v_2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $v_i(i=1,2)$ 为测量时存在的随机误差,且设 $v_i \sim N(0, \sigma_i^2)$; x_0 为待测常量真实值;两传感器测量值 x_1, x_2 相互独立。

假定 x_0 的估计值 \hat{x} 与观测值 $x_i(i=1,2)$ 成线性关系,且 \hat{x} 为 x 的无偏估计,则有

$$\hat{x} = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 \quad (2)$$

其中, $\Omega = (\omega_1, \omega_2)$ 为各个传感器测量值的权值。

设估计误差为 $\tilde{x} = x_0 - \hat{x}$,则 \tilde{x} 的均方误差为

$$E(\tilde{x}^2) = E\{[x_0 - \omega_1(x_0 + v_1) - \omega_2(x_0 + v_2)]^2\} \quad (3)$$

因为 \hat{x} 为 x_0 的无偏估计,所以有

$$E(\tilde{x}) = E[x_0 - \omega_1(x_0 + v_1) - \omega_2(x_0 + v_2)] = 0 \quad (4)$$

由于 $E(v_1) = E(v_2) = 0$, $E(x_0) = E(\hat{x})$,所以有

$$\omega_2 = 1 - \omega_1 \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)并整理可得

$$E(\tilde{x}^2) = E[\omega_1^2 v_1^2 + (1 - \omega_1)^2 v_2^2 + 2\omega_1(1 - \omega_1)v_1 v_2] \quad (6)$$

由于 v_1, v_2 相互独立,则有 $E(v_1 v_2) = 0$,又 $E(v_1^2) = \sigma_1^2$, $E(v_2^2) = \sigma_2^2$,则有

$$E(\tilde{x}^2) = \omega_1^2 \sigma_1^2 + (1 - \omega_1)^2 \sigma_2^2 \quad (7)$$

为使 $E(\tilde{x}^2)$ 最小,则应使 $\frac{\partial E(\tilde{x}^2)}{\partial \omega_1} = 0$,解出最优权值为

$$\begin{aligned} \omega_1^* &= \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \\ \omega_2^* &= 1 - \omega_1^* = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \end{aligned} \quad (8)$$

最优估计值为

$$\hat{x} = \frac{\sigma_2^2 x_1}{\sigma_2^2 + \sigma_1^2} + \frac{\sigma_1^2 x_2}{\sigma_2^2 + \sigma_1^2} \quad (9)$$

推广此结论到多个传感器的情况,设多传感器的方差分别为 $\sigma_i^2(i=1,2,\dots,n)$,各传感器的测量值分别为 $x_i(i=1,2,\dots,n)$,彼此相互独立。真值 x_0 的估计值为 \hat{x} ,并且是无偏估计,各传感器的加权因子

分别为 $\omega_i (i=1, 2, \dots, n)$, 根据多元函数极值理论, 可求出均方误差最小时所对应的加权因子为

$$\omega_i^* = \frac{1}{\sigma_i^2 \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sigma_j^2}} \quad (10)$$

3 基于加权数据融合的综合故障测距算法

图 3 所示为基于多传感器系统的自适应加权数据融合故障测距算法流程图。该算法将双端同步数据故障测距算法、双端非同步数据故障测距算法和行波测距算法的测距结果作为三种不同类型的数据源, 利用先验知识或仿真实验数据获取相应的权值系数进行自适应加权融合, 以获得更准确、可靠的测距结果。

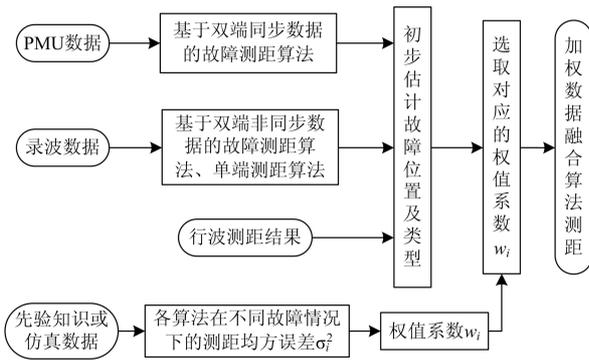


图 3 自适应加权数据融合故障测距算法流程图

Fig. 3 Flow chart of self-adaptive weighted data fusion fault location algorithm

在以上算法中基于单端数据的故障测距算法, 由于其固有的原理误差, 使其只能作为其他算法都失效或只有一端电压电流数据时的辅助测距方法。

双端同步数据故障测距算法和双端非同步数据故障测距算法都是基于输电线路分布参数的传输线方程。如图 4 所示为均匀输电线路分布参数模型, z_1 、 y_1 分别为线路单位长度的阻抗和导纳, 其中: $z_1 = r_1 + jx_1$, $y_1 = g_1 + jb_1$ 。

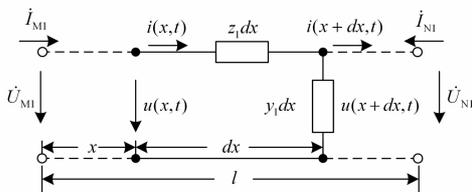


图 4 输电线路的分布参数模型

Fig. 4 Distributed parameter model of transmission line

由图 4 所示的电压电流和线路分布参数, 可以得到均匀长线传输方程为

$$\dot{U}_{M1} = \dot{U}_{N1} \cosh \gamma l - \dot{I}_{N1} Z_c \sinh \gamma l \quad (11)$$

$$\dot{I}_{M1} = \frac{\dot{U}_{N1}}{Z_c} \sinh \gamma l - \dot{I}_{N1} \cosh \gamma l \quad (12)$$

式中: \dot{U}_{M1} 、 \dot{I}_{M1} 分别表示稳态运行时 M 端电压、电流的正序分量; \dot{U}_{N1} 、 \dot{I}_{N1} 分别表示稳态运行时 N 端电压、电流的正序分量; γ 为线路传播系数; Z_c 为线路特性阻抗; l 为线路全长。在发生故障时, 分别用两端电压电流数据代入式 (11) 中, 联立即可求取故障距离; 利用故障前数据联立式 (11)、式 (12) 可以修正线路参数 Z_c 和 γ 。

双端非同步算法和双端同步算法的主要区别在于前者需要利用故障前的稳态数据求取不同步角度, 而后者需要精确的 PMU 信号进行同步^[10-13]。

行波测距算法采用双端测距原理 (D 型), 利用故障初始行波到达线路两端的时间差计算故障距离。其测距原理如图 5 所示, 计算公式为

$$X_M = [(T_M - T_N) \cdot v + L] / 2 \quad (13)$$

式中: t_M 和 t_N 分别表示初始行波到达故障线路两侧变电站 M、N 的精确时间; v 为故障线路上的行波传播速度; L 为线路 MN 的实际长度^[14-15]。

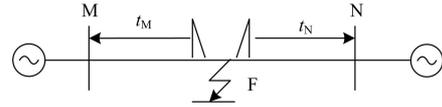


图 5 双端行波测距示意图

Fig. 5 Schematic diagram of double-end travelling wave fault location

4 仿真验证及分析

参照 500 kV 线路实际参数, 在 PSCAD 中搭建的仿真模型如图 6 所示。模拟导线型号为 4×LGJ400/35, 模拟线路长度 300 km, 采用分布参数线路模型。

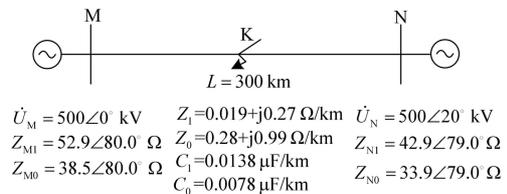


图 6 仿真模型及参数

Fig. 6 Simulation model and parameters

在仿真过程中, 模拟单相接地、相间短路、两相接地短路和三相短路等故障在不同故障距离时的

情况, 取过渡电阻为 $100\ \Omega$ 。具体测距流程如下:

1) 应用微分法提取行波信号, 根据式(13)计算不同故障类型与故障距离时的测距结果, 并按故障类型、故障区域求取对应的均方误差 σ_1^2 。

2) 应用基于参数检测的双端非同步数据故障测距算法计算不同故障类型与故障距离时的测距结果, 并按故障类型、故障区域求取对应的均方误差 σ_2^2 。

3) 应用基于 PMU 的双端同步数据故障测距算法, 根据式(11)计算不同故障类型与故障距离时的测距结果, 并按故障类型、故障区域求取对应的均方误差 σ_3^2 。

4) 根据式(10)所示的加权因子公式, 利用步骤 1、2、3 中的均方误差数据求取各测距算法在不同故障类型、故障区域情况下的权值系数 w_i 。

5) 随机设置故障类型、故障距离, 利用步骤 4

求取的权值系数 w_i , 根据式(2)所示的加权融合公式求取故障距离, 并与各单独测距算法进行比较。

表 1 所示为在过渡电阻为 $100\ \Omega$ 时, 不同故障类型、不同故障距离条件下双端行波测距、双端非同步数据测距、基于 PMU 的双端同步数据测距三种方法的测距结果及误差。其中, 双端行波测距采用电压行波微分法识别行波波头; 双端非同步数据测距模拟两端非同步角度为 18° ; 双端同步数据测距假定两端电压电流数据完全同步。

根据表 1 中各算法的测距误差可以求取其不同故障类型、不同故障区域时的均方误差, 与此同时, 可对各测距算法的精度进行对比分析。

表 1 中, 测距误差的定义式为

$$E\% = \frac{|\text{测距结果} - \text{实际故障距离}|}{\text{线路全长}} \times 100\% \quad (14)$$

表 1 各独立算法测距结果及误差
Table 1 Results and error of each independent fault location method

故障类型	故障区域	实际故障距离/km	双端行波测距/km	误差/%	区域均方误差 σ_1^2	双端非同步数据测距/km	误差/%	区域均方误差 σ_2^2	双端同步数据测距/km	误差/%	区域均方误差 σ_3^2
单相接地	近区 (0~10%、90%~100%)	10	9.54	0.15	0.027 4	15.48	1.83	1.413 3	11.74	0.58	0.723 6
		30	29.52	0.16		31.77	0.59		31.35	0.45	
		270	270.47	0.16		269.52	0.16		268.95	0.35	
		290	290.57	0.19		285.82	1.39		285.52	1.49	
	中段 (10%~90%)	50	49.74	0.09	0.006 3	51.70	0.57	0.113 9	51.17	0.39	0.070 9
		100	99.72	0.09		101.28	0.43		100.60	0.20	
		150	150.03	0.01		150.68	0.23		149.97	0.01	
相间短路	近区 (0~10%、90%~100%)	10	9.50	0.17	0.023 3	15.43	1.81	1.386 9	12.88	0.96	0.832 2
		30	29.58	0.14		30.77	0.26		30.55	0.18	
		270	270.45	0.15		270.14	0.05		269.81	0.06	
		290	290.46	0.15		285.54	1.49		285.38	1.54	
	中段 (10%~90%)	50	49.67	0.11	0.008 7	50.75	0.25	0.020 4	50.46	0.15	0.008 7
		100	99.66	0.11		100.51	0.17		100.21	0.07	
		150	149.91	0.03		150.29	0.10		149.96	0.01	
两相接地短路	近区 (0~10%、90%~100%)	10	9.47	0.18	0.022 9	14.85	1.62	1.184 7	11.86	0.62	0.800 4
		30	29.61	0.13		30.17	0.06		30.01	0.00	
		270	270.51	0.17		270.24	0.08		269.96	0.01	
		290	290.36	0.12		285.63	1.46		284.97	1.68	
	中段 (10%~90%)	50	49.68	0.11	0.008 7	50.20	0.07	0.004 6	50.00	0.00	0.001 2
		100	99.66	0.11		100.23	0.08		99.94	0.02	
		150	150.05	0.02		150.21	0.07		149.88	0.04	
三相短路	近区 (0~10%、90%~100%)	10	9.44	0.19	0.027 7	15.02	1.67	1.352 8	12.65	0.88	0.877 7
		30	29.52	0.16		30.39	0.13		30.25	0.08	
		270	270.44	0.15		269.89	0.04		269.69	0.10	
		290	290.51	0.17		285.16	1.61		285.06	1.65	
	中段 (10%~90%)	50	49.70	0.10	0.008 3	50.37	0.12	0.005 4	50.22	0.07	0.004 3
		100	99.68	0.11		100.28	0.09		100.10	0.03	
		150	150.02	0.01		150.15	0.05		149.95	0.02	
		200	200.28	0.09	200.00	0.00		199.80	0.07		
		250	250.32	0.11	249.91	0.03		249.70	0.10		

综合表 1 的测距结果可以得出以下结论:

1) 在绝大多数的故障情况下, 双端行波测距的测距结果精度最高, 基于 PMU 同步数据测距方法的测距结果次之, 双端非同步数据测距方法的测距结果最差。

2) 三种测距方法在线路中段故障时的测距精度都明显高于线路出口故障; 此外, 双端行波测距在线路出口处故障时的测距精度明显高于其他两种方法。

3) 在本文的仿真实验中, 故障类型的不同对双端行波测距精度有一定影响, 但影响不大; 对基于 PMU 的双端同步数据测距影响相对较大(此结果具有一定的随机性, 但从原理上并不影响自适应加权数据融合算法得到最优测距结果)。

4) 以上实验结果中, 双端行波测距和双端同步数据测距都是假设两端电压电流数据完全同步, 而双端非同步数据测距则存在 18° 的相差。但在实际应用中, 由于 GPS 以及 PMU 装置必然会存在一定的同步误差, 双端行波测距以及基于 PMU 的双端同步数据测距的测距精度可能会略有下降。

表 2 所示为依据表 1 不同测距方法测距结果的区域均方误差求取的各测距方法的权值系数。

表 2 自适应加权数据融合故障测距权值系数

Table 2 Weight coefficients of self-adaptive weighted data fusion fault location

故障类型	故障区域	行波测距权	非同步测距	同步测距权
		值系数 ω_1	权值系数 ω_2	值系数 ω_3
单相接地	近区	0.945 8	0.018 3	0.035 8
	中段	0.874	0.048 3	0.077 7
相间短路	近区	0.957 1	0.016 1	0.026 8
	中段	0.412 1	0.175 8	0.412 1
两相接地	近区	0.954 3	0.018 4	0.027 3
	短路	0.098 6	0.186 5	0.714 9
三相短路	近区	0.950 5	0.019 5	0.03
	中段	0.223 9	0.344 1	0.432 1

为了验证基于多传感器系统的自适应加权数据融合故障测距算法的测距精度以及与其他各单独测距方法进行对比, 按照不同故障类型、故障区域随机选取故障位置应用各测距算法进行测距, 测距结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 依据先验知识(或仿真数据)获取的自适应权值系数进行加权融合处理后的测距结果明显优于其他各单独测距算法, 自适应加权数据融合故障测距算法充分利用各传感器(数据源)的冗余信息提高了故障测距的精度及可靠性。

表 3 加权数据融合算法与各单独测距算法测距结果的比较

Table 3 Comparison of fault location results between weighted data fusion algorithm and each single algorithm

故障类型	故障距离/km	行波测距/km	非同步测距/km	同步测距/km	融合测距/km
单相接地	20	19.61	21.74	21.38	19.71
接地	120	119.81	121.04	120.35	119.91
相间短路	25	24.54	25.81	25.55	24.59
短路	180	180.14	180.19	179.85	180.03
两相短路	12	11.6	14.93	13.11	11.70
路接地	220	220.32	220.17	219.84	219.95
三相短路	8	7.5	12.92	10.62	7.70
短路	135	134.85	135.17	134.98	135.03

为了更直观地对比表 3 中各单独测距算法以及加权数据融合测距算法的测距误差, 绘制误差折线图如图 7 所示。由图 7 可以看出, 在各种故障类型及故障距离条件下, 加权数据融合故障测距算法的测距误差明显低于其他各单独测距算法。

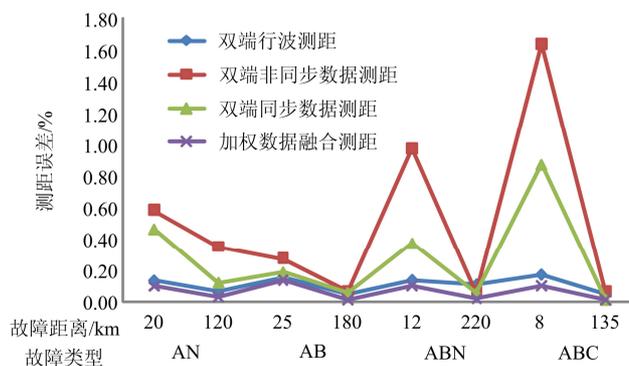


图 7 各测距方法测距精度对比

Fig. 7 Accuracy comparison of each fault location method

5 结论

本文提出了基于多传感器系统的自适应加权数据融合故障测距算法, 算法充分利用各传感器(数据源)提供的冗余信息, 利用先验知识或仿真数据获取其在不同故障情况下的权值系数, 应用加权数据融合算法求取故障距离, 是一种鲁棒性很强的自适应故障测距算法。此外, 由于具备多传感器(数据源)的冗余信息, 加权数据融合算法基本不受过渡电阻、故障位置、故障类型、系统运行方式、分布电容、负荷电流等因素的影响, 基于 PSCAD/EMTDC 的大量仿真实验结果验证了算法的可靠性与精确性。

参考文献

- [1] 束洪春, 高峰, 李卫东, 等. 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, 56.
SHU Hong-chun, GAO Feng, LI Wei-dong, et al. A practical fault location algorithm for HV transmission line using one end data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(5): 9-15, 56.
- [2] 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 Yong-jian, HUANG Shao-ping, TANG Jian-dong. Research on adaptability to measurement error for several two-terminal fault location algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 134-139.
- [3] 索南加乐, 宋国兵, 许庆强, 等. 利用两端非同步电流的同杆双回线故障定位研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 99-106.
SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, XU Qing-qiang, et al. Fault location algorithms for parallel transmission lines using two terminals nonsynchronized current data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 99-106.
- [4] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95.
TAN Jian, GE Wei-chun, QIU Jin-hui, et al. Study on single terminal method and double terminal method of traveling wave fault location in transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 92-95.
- [5] 王奎鑫, 祝成, 孙佳佳, 等. 输电线路组合行波测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 82-86.
WANG Kui-xin, ZHU Cheng, SUN Jia-jia, et al. Research of combined traveling wave's fault location method on transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 82-86.
- [6] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-267.
ZHU Yong-li, FAN Xin-qiao, YIN Jin-liang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-267.
- [7] 陈健鑫. 基于信息融合技术的 AT 牵引网故障测距方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 26-28.
CHEN Jian-xin. Analysis of fault location in the AT traction network based on information synthesis[J]. Power System Protection and Control, 2009, 36(19): 26-28.
- [8] 梁毓明, 徐立鸿, 朱丙坤. 测距传感器数据在线自适应加权融合[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(7): 1447-1449.
LIANG Yu-ming, XU Li-hong, ZHU Bing-kun. Ranging sensors measurement adaptive weighted fusion on-line[J]. Computer Measurement and Control, 2009, 17(7): 1447-1449.
- [9] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
XU Min, CAI Ze-xiang, LIU Yong-hao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broad band traveling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [10] 张晓明, 徐岩, 王瑜, 等. 一种基于参数检测的双端故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 106-111.
ZHANG Xiao-ming, XU Yan, WANG Yu, et al. A fault location algorithm for two-terminal transmission lines based on parameter detection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 106-111.
- [11] 杜召满, 赵舫. 一种新的超高压输电线路双端测距算法[J]. 高电压技术, 2003, 29(11): 11-12.
DU Zhao-man, ZHAO Fang. A new fault location algorithm using asynchronous two-terminal data[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(11): 11-12.
- [12] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. 一种基于 PMU 的线路自适应故障测距算法[J]. 继电器, 2004, 32(10): 6-9.
LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. An adaptive fault location algorithm based on PMU for transmission line[J]. Relay, 2004, 32(10): 6-9.
- [13] 束洪春, 高峰, 陈学允, 等. 双端不同步采样的高压输电线路故障测距算法研究[J]. 电工技术学报, 1997, 12(6): 43-48, 54.
SHU Hong-chun, GAO Feng, CHEN Xue-yun, et al. Studies on fault location algorithms for HV transmission line using both line terminals asynchronous data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997, 12(6): 43-48, 54.
- [14] 陈羽, 刘东, 徐丙垠. 基于广域网络信息的行波测距算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 65-70.
CHEN Yu, LIU Dong, XU Bing-yin. A travelling wave location algorithm based on wide area network information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 65-70.
- [15] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

收稿日期: 2013-11-06; 修回日期: 2014-02-27

作者简介:

刘洪正(1963-), 男, 高级工程师, 长期从事超高压输电系统运行、维护和管理的工作;

高厚磊(1963-), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护, 故障测距, 数字化变电站等。

E-mail: houlei@sdu.edu.cn