

基于故障模型的广域故障定位新方法

马静¹, 李金龙², 李金辉³, 杨奇逊¹, 王增平¹

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;
2. 四川成都电业局, 四川 成都 610021; 3. 安徽宣城供电公司, 安徽 宣城 242000)

摘要: 提出一种利用广域测量信息进行故障定位的新方法。该方法在系统正常运行时, 形成网络关联系数矩阵。故障发生后, 对每条支路计算定位函数在每个步长点的值, 并据此确定故障位置。该方法在故障定位过程中, 无需修改网络矩阵, 能同时确定故障线路和故障位置, 计算量小, 易于实现; 不受过渡电阻和故障类型的影响, 可靠性高。算例结果验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 故障模型; 故障定位; PMU; 广域测量; 电力系统

A novel wide-area fault location algorithm based on fault model

MA Jing¹, LI Jin-long², LI Jin-hui³, YANG Qi-xun¹, WANG Zeng-ping¹

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Sichuan Chengdu Electric Power Bureau, Chengdu 610021, China;
3. Xuancheng Power Supply Company, Xuancheng 242000, China)

Abstract: A novel wide-area fault location algorithm is proposed. Under the normal condition of the power system, network correlation coefficient matrix is formed. After the fault occurs, by analyzing fault model, value of location function at each search step on each branch is calculated. And fault location is determined on this basis. This method does not modify network matrix during fault location process, and can locate fault branch and fault distance simultaneously. It has less calculation burden and is easy to be realized. The simulation results based on PSCAD verify the validity and feasibility of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50837002 and No.50907021).

Key words: fault model; fault location; PMU; wide area measurement system; power system

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0074-05

0 引言

输电线路担负着传送电能的重要任务, 其故障直接威胁到电力系统的安全运行^[1]。输电线路故障的准确定位对于快速查找故障点, 减轻故障巡线负担有重大意义。快速确定故障位置, 可减少停电检修时间, 及时发现绝缘隐患, 提高供电可靠性, 保障系统安全运行^[2-3]。目前, 国内外已广泛开展了故障定位新方法的研究。按采用的电气量划分, 有行波定位^[4-5]和工频量定位^[6-7]等方法; 按同步测量的配置划分, 有单端定位^[8-9]、双端定位^[10-11]、多端定位^[12-13]和广域定位^[14-17]等方法。其中, 广域故障定

位方法由于采用全局信息, 可在全网范围内寻找故障点^[14-17], 因此具有更广阔的应用前景。

本文提出一种基于故障模型的广域故障定位新方法。该方法在系统正常运行情况下, 形成网络关联系数矩阵。故障发生后, 根据网络关联系数矩阵, 用变步长搜索技术定位故障线路和确定故障位置。该方法仅需要配置有限的PMU, 无需修改关联系数矩阵, 不受故障类型和过渡电阻的影响, 计算量小, 可靠性高, 且能同时完成故障线路和故障位置的确定。算例结果验证了该方法的有效性和可行性。

1 故障模型

不计系统中的电力电子等非线性器件, 故障状态网络可以看作线性网络^[18], 由无故障状态网络和故障附加网络组成。故障附加网络中, 传输线路采

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50837002); 国家自然科学基金项目(50907021); 华北电力大学博士学位教师科研基金项目(200822002); “111”引智计划(B08013)

用 π 型等值电路, 用集中参数表示。假设线路 b_0 故障, 故障点与节点 K_1 的距离占支路全长的比例为 α , 故障线路如图 1 所示。

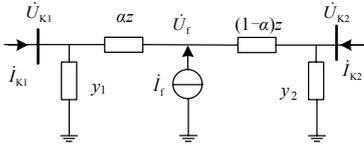


图 1 故障支路

Fig.1 Fault branch

故障附加网络仅故障点存在附加电源^[2]。图 1 中故障支路两端节点为 K_1 , K_2 。支路阻抗为 z , 两端对地导纳为 y_1 、 y_2 。故障点附加电流为 i_f , 故障点电压为 \dot{U}_f , 支路两端电流为 i_{K1} 和 i_{K2} 。对故障支路, 列写节点电压方程:

$$\begin{cases} \left(y_1 + \frac{1}{\alpha z}\right)\dot{U}_{K1} - \frac{1}{\alpha z}\dot{U}_f = i_{K1} \\ \left(y_2 + \frac{1}{(1-\alpha)z}\right)\dot{U}_{K2} - \frac{1}{(1-\alpha)z}\dot{U}_f = i_{K2} \\ -\frac{1}{\alpha z}\dot{U}_{K1} - \frac{1}{(1-\alpha)z}\dot{U}_{K2} + \left(\frac{1}{\alpha z} + \frac{1}{(1-\alpha)z}\right)\dot{U}_f = i_f \end{cases} \quad (1)$$

消去 \dot{U}_f , 以矩阵的形式表示:

$$\begin{bmatrix} y_1 + 1/z & -1/z \\ -1/z & y_2 + 1/z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{K1} \\ \dot{U}_{K2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{K1} + (1-\alpha)i_f \\ i_{K2} + \alpha i_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)是故障支路的等效节点电压方程。节点导纳矩阵与故障前相同, 节点注入电流等于支路电流故障分量与故障附加电源的叠加。由式(2)可得图 2 所示故障模型, 将故障点注入电流转化为节点注入电流, 不改变故障前后支路的结构和参数, 因此不影响整个网络的节点导纳矩阵。

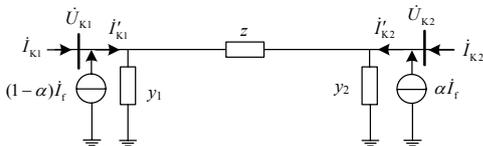


图 2 故障模型

Fig.2 Fault model

2 故障定位原理

根据故障模型, 故障前后电力网络的节点导纳矩阵不变, 故障附加网络的节点电压方程为:

$$\vec{U} = Y^{-1}\vec{J} \quad (3)$$

其中: Y 为网络节点导纳矩阵; \vec{J} 为故障模型等值的节点注入电流向量; \vec{U} 为节点电压向量。

支路始端电流向量为^[18-19]:

$$\vec{I}' = (Y_B A^T + Y_{B1} A_1^T) Y^{-1} \vec{J} \quad (4)$$

其中: Y_B 是系统支路导纳矩阵; A 为节点-支路关联矩阵; Y_{B1} 是系统支路始端对地支路导纳矩阵; A_1 为节点-对地支路关联矩阵; T 表示矩阵转置。

式(4)电流向量 \vec{I}' 中, 对应故障支路的电流是图 2 中的 i'_{K1} 和 i'_{K2} 。根据故障模型, 故障支路两端实际电流为:

$$i_{K1} = i'_{K1} - (1-\alpha)i_f \quad (5)$$

$$i_{K2} = i'_{K2} - \alpha i_f \quad (6)$$

故障附加网络支路始端电流向量实际值为:

$$\vec{I} = (Y_B A^T + Y_{B1} A_1^T) Y^{-1} \vec{J} - (1-\alpha)i_f \vec{e}_{K1} - \alpha i_f \vec{e}_{K2} \quad (7)$$

其中: \vec{e}_{K1} 是对应有向支路 K_1 - K_2 (从 K_1 指向 K_2) 的位置为 1, 其余元素为 0 的列向量; \vec{e}_{K2} 是对应有向支路 K_2 - K_1 (从 K_2 指向 K_1) 的位置为 1, 其余元素为 0 的列向量。

定义网络关联矩阵为 $C = (Y_B A^T + Y_{B1} A_1^T) Y^{-1}$, 它是支路始端电流相量和节点注入电流相量的比例系数矩阵, 仅与网络的拓扑结构和系统参数有关。由于本文采用故障模型, 故障发生前后系统拓扑结构和参数不改变, 因此网络关联矩阵保持不变, 并可在故障前算出。式(7)可化简为:

$$\vec{I} = C\vec{J} - (1-\alpha)i_f \vec{e}_{K1} - \alpha i_f \vec{e}_{K2} \quad (8)$$

根据故障模型, 只有故障支路两端节点 K_1 和 K_2 有注入电流:

$$\vec{J} = [0 \cdots (1-\alpha)i_f \cdots \alpha i_f \cdots 0]^T \quad (9)$$

用 \vec{C}_{K1} 和 \vec{C}_{K2} 表示矩阵 C 的第 K_1 列和 K_2 列, 由式(8)和式(9)得:

$$\vec{I} = [\vec{C}_{K1} - \vec{e}_{K1}, \vec{C}_{K2} - \vec{e}_{K2}] [(1-\alpha)\alpha]^T i_f \quad (10)$$

对变量 $d \in [0, 1]$, 令向量函数为

$$\vec{p}(b, d) = \vec{I} / \left[(1-d)(\vec{C}_{K1} - \vec{e}_{K1}) + d(\vec{C}_{K2} - \vec{e}_{K2}) \right] \quad (11)$$

其中, $/$ 表示两个向量对应元素相除。

对故障支路 $b=b_0$, 且 $d=\alpha$, \vec{p} 中所有元素都等于 i_f ; 否则, 各元素差别较大。定义 \vec{p} 中各元素的一阶中心矩为定位函数:

$$g(b,d) = \sum_{i=1}^m \left| p[i] - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m p[j] \right| \quad (12)$$

其中： m 为向量 \bar{p} 中元素的个数； $p[i]$ 为向量 \bar{p} 的第 i 个元素； b 为被判断的支路。

定位函数 $g(b,d)$ 是计算支路 b 和计算距离 d 的多元函数。当计算支路为故障支路且计算距离为实际距离，即 $b=b_0$ 且 $d=\alpha$ 时，定位函数 $g=0$ ，考虑到计算误差， $g \approx 0$ 。当计算支路为无故障支路，即 $b \neq b_0$ 时， g 较大。当计算支路为故障支路，但计算距离不等于实际距离，即 $b=b_0$ ，但 $d \neq \alpha$ 时， g 也较大。由此可以定位故障线路和故障位置。

检测到短路故障发生^[19]后，令 d 在区间 $[0,1]$ 内，对每条支路搜索，取定位函数最小的点为故障点，该点所在支路为故障支路。对一个有 B 条支路的系统，故障定位流程如图 3 所示。

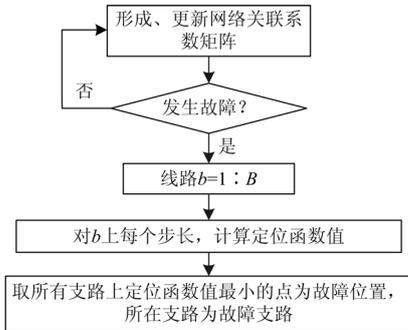


图 3 故障定位流程

Fig.3 Fault location flow chart

由于故障模型的等效，不改变系统的结构和参数，搜索过程中无需修改网络关联系数矩阵，减少了每一步搜索中修改节点导纳矩阵和矩阵求逆过程，大大减少了计算量。同时结合变步长搜索技术，在定位函数值大的点用大步长，函数值小的点采用小步长，可进一步缩短故障位置搜索时间，同时保证确定故障位置的精度。

3 PMU 的配置

当 $\bar{c}_{K1} - \bar{e}_{K1}$ ， $\bar{c}_{K2} - \bar{e}_{K2}$ 相同位置元素为 0 时，由节点 K_1, K_2 的注入电流引起的对应支路电流恒为 0，故障模型将失效。在式(12)，向量 \bar{p} 中将出现 $\frac{0}{0}$ 。实际计算中 $\frac{0}{0}$ 可能为任意值，无法衡量定位函数的大小。由此可知，需要在节点注入引起电流响应恒不为 0 的支路上配置 PMU，即网络关联系数矩阵中不含 0 元素的行对应的支路。

从物理上看，这些支路是故障附加网络中通过小阻抗接地的支路，包括与发电机和负荷相连的支

路。因此只需在所有的发电机端和负荷端母线上配置 PMU，可保证故障定位的完成。

4 仿真实证

本文采用 IEEE-9 节点系统，基于 PSCAD 软件对提出的故障定位算法进行仿真实证。系统结构如图 4 所示。

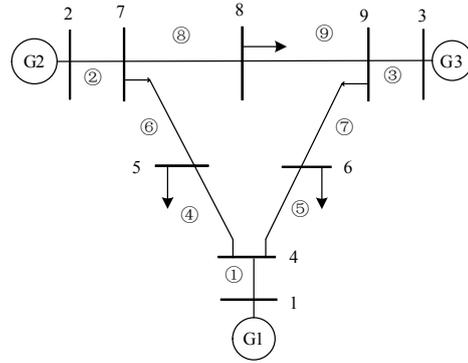


图 4 IEEE-9 节点系统

Fig.4 IEEE-9-bus test system

系统电压等级为 220 kV，线路长度为 100 km。线路正序和负序参数^[20]为： $R_1=0.0357(\Omega/\text{km})$ ， $X_1=0.5077(\Omega/\text{km})$ ， $G_1=0$ ， $B_1=(3.271e-6) (\text{S}/\text{km})$ ；零序参数为： $R_0=0.03631(\Omega/\text{km})$ ， $X_0=0.1326(\Omega/\text{km})$ ， $G_0=0$ ， $B_0=(2.322e-6) (\text{S}/\text{km})$ ，采用集中参数模型。发电机 1： $Z_1=0.155+j5.95 (\Omega)$ ， $Z_0=1.786+j7.58 (\Omega)$ ；发电机 2： $Z_1=0.238+j6.19 (\Omega)$ ， $Z_0=0.8330+j5.12 (\Omega)$ ；发电机 3： $Z_1=0.420+j5.95 (\Omega)$ ， $Z_0=1.785+j7.54 (\Omega)$ ；负载 5、6、8： $(30+j20) (\text{MVA})$ 。

在支路⑧上 40 km 处设置单相金属性接地故障，定位函数在各支路上的计算结果如图 5 所示。由图 5 可知，定位函数 g 仅在支路⑧上存在零值点，在其他支路上($b \neq \text{⑧}$)所有点的值都很大。由此确定

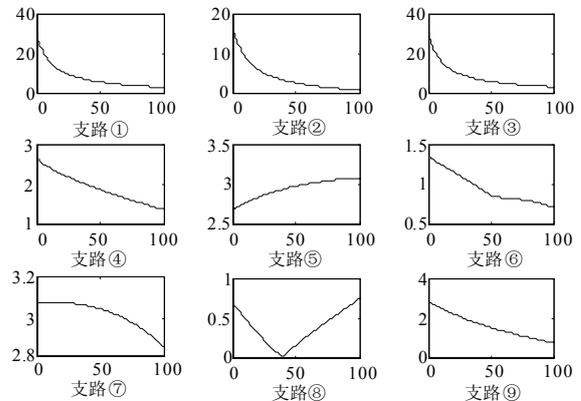


图 5 定位函数在不同支路上的值

Fig.5 Location function value

⑧为故障支路, 定位函数零值点为故障点。对所有支路上发生的故障, 都有类似的结果。可见, 该算法能有效定位故障支路和故障位置。

在支路⑧上不同位置设置不同类型的故障, 并以定位误差验证算法确定故障位置的精度, 得到定位结果如表 1 所示。由表 1 结果可以看出, 本文方法能高精度确定故障位置。

表 1 故障位置确定结果

Tab. 1 Fault distance location result

实际距离/ km	故障类型	AG	BC	BCG	ABC
	故障电阻/ Ω	0	300	0	300
20	距离/km	19.93	20	19.99	20.01
	误差/%	-0.07	0	-0.01	0.01
40	距离/km	39.96	39.98	39.98	39.99
	误差/%	-0.04	-0.02	-0.02	-0.01
60	距离/km	59.97	59.95	59.96	59.96
	误差/%	-0.03	-0.05	-0.04	-0.04
80	距离/km	80.02	79.95	79.94	79.95
	误差/%	0.02	-0.05	-0.06	-0.05

实际系统中, 高压长线路为分布参数。对于分布参数线路, 为验证算法对分布参数线路的适应性, 将图 4 系统的参数变为: 电压等级 500 kV, 线路长度为 300 km, 采用分布参数模型。线路正序和负序参数为: $R_1=0.02083 (\Omega/\text{km})$, $X_1=0.2811 (\Omega/\text{km})$, $G_1=0$, $B_1=(4.0527e-6) (\text{S}/\text{km})$; 零序参数为 $R_0=0.1148 (\Omega/\text{km})$, $X_0=0.7190 (\Omega/\text{km})$, $G_0=0$, $B_0=(1.6431e-6) (\text{S}/\text{km})$ 。支路⑧上 40%处设置单相金属性接地故障, 定位函数值如图 6 所示。

由图 6 可知, 分布参数的系统模型下的定位函数值与集中参数的函数值接近, 且无故障支路上函

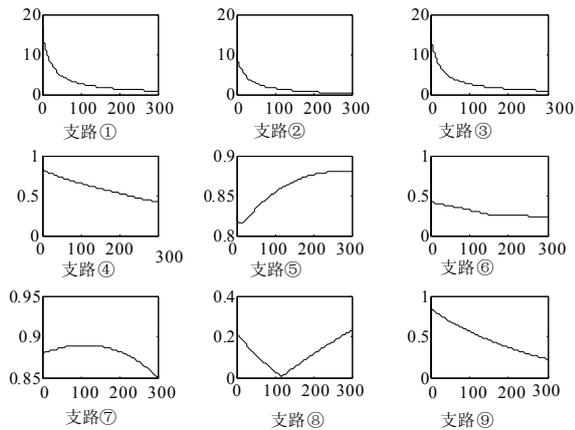


图 6 定位函数在不同支路上的值

Fig.6 Location function value

数值很大, 故障点函数值接近于 0。所有支路上发生故障, 都有类似的结果。在支路⑧上不同点设置不同类型故障, 故障位置确定结果如表 2 所示。由图 6 和表 2 可知, 对于分布参数特性的高压长线路, 本算法仍可以定位故障线路及故障位置, 但定位误差有所增大。

表 2 故障位置确定结果

Tab. 2 Fault distance location result

实际 距离/ km	故障类型	AG	BC	BCG	ABC
	故障电阻/ Ω	0	300	0	300
60	距离/km	61.59	59.73	62.82	59.91
	误差/%	0.53	-0.09	0.94	-0.03
120	距离/km	120.45	119.91	120.87	120.21
	误差/%	0.15	-0.03	0.29	0.07
180	距离/km	178.89	179.58	178.02	179.94
	误差/%	-0.37	-0.14	-0.66	-0.02
240	距离/km	238.65	239.46	238.35	239.73
	误差/%	-0.45	-0.18	-0.55	-0.09

5 结论

本文提出一种基于故障模型的广域故障定位新方法, 在系统正常运行时, 形成网络关联系数矩阵。故障发生后, 根据故障模型和关联系数矩阵, 利用变步长搜索技术确定故障位置。该方法计算量小, 易于实现, 可靠性高, 能在全网范围内同时确定故障线路和故障位置, 不受过渡电阻的影响。仿真结果验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. 基于相量测量的输电线路故障测距新算法[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 28-32. LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. A new phasor measurement based fault location algorithm for transmission lines[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 28-32.
- [2] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 1-14.
- [3] 索南加乐, 张悛宁, 齐军, 等. 基于参数识别的时域法双端故障测距原理[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 65-69. SUONAN Jia-le, ZHANG Ji-ning, QI Jun, et al. Time domain fault location method based on transmission line parameter identification using two terminals data[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 65-69.
- [4] 李泽文, 姚建刚, 曾祥君, 等. 基于整个电网行波时差的故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 60-64.

- LI Ze-wen, YAO Jian-gang, ZENG Xiang-jun, et al. Fault location based on traveling wave time difference in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 60-64.
- [5] 于桂音, 陈平, 徐丙垠, 等. 基于行波原理的优化组合故障测距技术[J]. 继电器, 2008, 36(9): 11-15, 20.
- YU Gui-yin, CHEN Ping, XU Bing-yin, et al. An optimal combined transmission line fault location technique based on travelling wave principles[J]. Relay, 2008, 36(9): 11-15, 20.
- [6] 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, 23.
- 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, 23.
- [7] 王波, 周昱勇. 基于 PMU 的多端传输线路故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 32-35, 39.
- WANG Bo, ZHOU Yu-yong. A novel PMU-based fault location algorithm for multi-terminal transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 32-35, 39.
- [8] 张举, 宋振红, 李志雷, 等. 高压输电线路单端故障测距新方法[J]. 继电器, 2006, 34(4): 1-5.
- ZHANG Ju, SONG Zhen-hong, LI Zhi-lei, et al. A new algorithm of single-ended line fault location technique for EHV transmission line[J]. Relay, 2006, 34(4): 1-5.
- [9] 宋国兵, 索南加乐, 许庆强, 等. 基于单端电流量的同杆双回线故障定位方法[J]. 继电器, 2004, 32(7): 1-6.
- SONG Guo-bing, SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, et al. Fault location for parallel transmission lines on the same tower based on one-terminal current[J]. Relay, 2004, 32(7): 1-6.
- [10] 吴瑞春, 焦彦军, 张新国. 双端测距以及同步算法的实现[J]. 继电器, 2008, 36(5): 7-9.
- WU Rui-chun, JIAO Yan-jun, ZHANG Xin-guo. Realization of two-terminal fault location and synchronization algorithm[J]. Relay, 2008, 36(5): 7-9.
- [11] 孙莉. 一种高压输电线路双端故障测距的实用算法的实现[J]. 继电器, 2007, 35(23): 9-13.
- SUN Li. New practical searching method of two-terminal fault location for EHV transmission line[J]. Relay, 2007, 35(23): 9-13.
- [12] Brahma S M. New fault-location method for a single multiterminal transmission line using synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 21(3): 1148-1153.
- [13] Liu Chih-Wen, Lien Kai-Ping, Chen Ching-Shan, et al. A universal fault location technique for n-terminal ($n \geq 3$) transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 23(3): 1366-1373.
- [14] Mazlumi K, Askarian Abyaneh H, Sadeghi S H H, et al. Determination of optimal PMU placement for fault-location observability[C]. //Southeast University. DRPT 2008. Nanjing(China): 2008: 1938-1942.
- [15] Lien Kai-Ping, Liu Chih-Wen, Yu Chi-Shan, et al. Transmission network fault location observability with minimal PMU placement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 21(3): 1128-1136.
- [16] Yuan Liao. New fault location approach using voltage measurements[C]. // IEEE Virginia Council. Proceedings of IEEE SoutheastCon 2007. Richmond: 2007.
- [17] Yuan Liao. Fault location using sparse current measurements[C]. // IEEE. 39th North American Power Symposium. Las Cruces: 2007: 1-6.
- [18] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 计及暂态过程的多支路切除潮流转移识别算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 24-30.
- XU Hui-ming, BI Tian-shu, HUANG Shao-feng, et al. Flow transferring identification algorithm for multi-branches removal event with consideration of transient phenomena[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(26): 24-30.
- [19] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊. 基于广域同步量测的电力系统扰动识别与定位方法[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 35-41.
- QIN Xiao-hui, BI Tian-shu, YANG Qi-xun. WAMS based power system disturbance identification and location approach[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 35-41.
- [20] 王波, 江全元, 陈晓刚, 等. 基于同步电压相量的故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 33-37.
- WANG Bo, JIANG Quan-yuan, CHEN Xiao-gang, et al. Novel fault locating method based on synchronized voltage phasor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 33-37.

收稿日期: 2009-11-13; 修回日期: 2010-10-09

作者简介:

马静(1981-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: hdmajing@yahoo.com.cn

李金龙(1987-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统保护与控制;

李金晖(1985-), 女, 助理工程师, 主要从事电力系统运行与控制及电力系统继电保护等方面的研究。