

配电网故障区间定位的改进矩阵算法

黄佳乐, 杨冠鲁

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 分析目前配电网故障定位算法中存在的不足, 结合配电网的结构特点, 提出网络关系矩阵概念和用于故障定位的改进矩阵算法。该算法与之前的矩阵算法及其他改进矩阵算法相比, 具有原理简单, 无须复杂的运算且运算量小, 实时性好的特点。不仅适用于单电源供电的简单配电网故障定位, 也适用于多电源供电的复杂配电网故障定位。不仅可以快速准确地定位单点故障, 也可以快速准确地定位多点故障。甚至各台柱上 FTU 上传主站的信号发生畸变时, 仍能快速准确地定位故障, 具有非常好的容错性能。实例分析和案例仿真表明该算法的可行性与准确性。

关键词: 配电网; 故障定位; 矩阵算法; 容错性

Modified matrix algorithm for fault section location of distribution network

HUANG Jia-le, YANG Guan-lu

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The shortcomings of current fault location algorithms for distribution network are analyzed; network relationship matrix and modified matrix algorithm for fault location are proposed combined with the structure characteristics of distribution network. Comparing to the matrix algorithm and its improved algorithm which are proposed before, this algorithm has the feature of simple principle, less computation without complex computing, good real-time performance. It can be applied to both simple distribution network with single power source and complex distribution network with multiple power sources, not only the single point fault but also the multiple point faults can be located quickly and accurately. Even the signals which FTU on pillars send to master station distort, fault point still can be located quickly and accurately, it has very good fault tolerance. Analyses and simulations demonstrate the feasibility and accuracy of the modified matrix algorithm.

Key words: distribution network; fault location; matrix algorithm; fault tolerance

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)11-0041-05

0 引言

现代电网在国民经济和人民生活占有重要的地位, 其规模、容量和覆盖范围也越来越大, 用户对电能质量的要求也越来越高, 对供电可靠性提出了更高的要求。国家电力公司也明确提出了供电可靠性要达到 99.96% 的目标, 提高配电自动化是实现这一目标的重要保证。配电网发生故障时, 快速准确定位和隔离故障区段, 减少停电面积和缩短停电时间, 是配电网自动化系统的重要内容。

早期基于重合器、分段器的故障定位方法存在切断故障的时间较长、容易扩大事故范围和无法进

行全局最优网络重构的缺陷。伴随着电子技术、计算机和通信技术的发展进步, 馈线终端单元 (Feeder Terminal Unit, FTU) 在配电网的改造升级中扮演着重要的角色, 发挥着重要的作用, 基于 FTU 的故障定位方法主要有图论算法^[1-9]和人工智能算法^[10-14]。矩阵算法^[1]及其改进算法^[2-7]计算速度快, 但容错性能较差。文献[8]提出具有较好容错性的算法, 但其算法复杂, 计算量大。过热区域搜索算法^[9]过程复杂, 计算量大, 实时性差。人工智能算法^[10-14]具有较好的容错性, 但迭代复杂, 计算量大, 定位速度慢。文献[15]提出根据配电网树形结构的链表法, 提高了定位速度, 具有不错的容错能力, 但以树枝首末节点状态进行一次定位, 若首末节点故障信息相同, 则对本树不进行二次定位, 可能造成误判漏判。

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (2009J01257);
厦门市科技计划资助项目 (3502Z20093027)

针对上述方法存在的优点与不足, 总结归纳并提出一种新型的改进矩阵算法, 与之前的矩阵算法及其改进矩阵算法相比, 该算法原理简单、运算量小, 定位速度快, 不仅可以处理常见的单电源单点故障定位问题, 也能解决多重电源多点故障的定位问题。最为重要的是该算法容错性能好, 在故障信息受环境影响发生畸变时能给出最佳的判断结果。

1 故障定位的改进矩阵算法

1.1 概述

根据配电网的结构特点构造网络关系矩阵 A , 各台柱上 FTU 将实时检测的过电流状态信息上报控制中心的 SCADA 系统, 生成故障信息矩阵 B , 根据相应的搜索策略得到故障状态矩阵 C , 由 B 、 C 得到故障诊断矩阵 D , 再由 D 得到故障评价函数 f , 当故障评价函数取最小值时, 此时的诊断方案即为最佳方案, 则根据此时的 C 就可以准确地定位和隔离故障区段。

1.2 网络关系矩阵

将配电网中的断路器、分段开关和联络开关视为节点, 馈线视为设备。不妨假定电流从母线流向馈线为参考方向, 依次沿参考方向逐条支路将它们按序编号。假设某配电网有 m 个节点, n 个设备, 则矩阵 A 为 $n \times m$ 维, 第 i 行表示以节点 S_i 为起点, 此时置 $A_{ii} = 1$, $A_{ij} = 0 (1 \leq j < i)$, 若 $S_j (i < j \leq m)$ 在 S_i 参考方向前方, 则置 $A_{ij} = 1$, 否则置 $A_{ij} = 0$ 。图 1 所示的网络关系矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

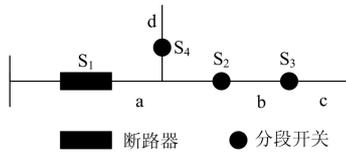


图 1 一个简单的配电网

Fig. 1 A simple distribution network

图 1 中有节点 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 , 设备 a、b、c、d。 S_1 为起点时, S_2 、 S_3 、 S_4 在其参考方向前方, 则 $A_{12} = 1$, $A_{13} = 1$, $A_{14} = 1$; S_2 为起点时, 只有 S_3 在其参考方向前方, 则 $A_{23} = 1$, $A_{24} = 0$; 以 S_3 、 S_4 为起点时, 其参考方向前方没有其他节点, 则相应的元素置为 0。记 S_j^* 表征节点 S_j 的检测的故障状

态 (有故障电流时为 1, 否则为 0), 第 j 列表征节点 S_j 参考方向前方第一个设备故障时, 各节点的故障状态。图 1 中, 若设备 b 故障, 此时 S_1 、 S_2 流过故障电流, $S_1^* = 1$ 、 $S_2^* = 1$ 、 $S_3^* = 0$ 、 $S_4^* = 0$, 设备 b 是节点 S_2 参考方向前方的第一个设备, 第 2 列向量 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T = [S_1^* \ S_2^* \ S_3^* \ S_4^*]^T$ 。当有多个设备故障时, 对应列的元素相或即表征各节点的检测的故障状态, 若设备 b、d 故障, 第 2 列向量 $[1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 和第 4 列向量 $[1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ 各元素相或得向量 $[1 \ 1 \ 0 \ 1]^T$, 表示节点 S_1 、 S_2 、 S_4 流过故障电流。第 i 行若只有一个元素 1, 则表示节点 S_i 参考方向前方的设备为馈线末端。

综上所述, 网络关系矩阵 A 反映了网络的拓扑结构, 每行表示节点间的依赖关系, 每列则表示对应设备故障时各节点的理论故障状态, 所蕴含的信息更丰富。 A 为上三角矩阵, 不仅占用存储空间小, 更易于运算。

1.3 其他矩阵

故障信息矩阵 B 为一列向量, 表示各节点实时上传给主站 SCADA 系统的检测的故障状态信息, 信息可能由于环境的影响而发生畸变。

$$B = [S_1^* \ S_2^* \ S_3^* \ S_4^*]^T \quad (2)$$

故障状态矩阵 C 表征网络诊断方案的一个解, 设有 n 个故障设备 $Dev_k (1 \leq k \leq n)$, 设备 Dev_k 故障时各节点对应的理论故障状态为向量 A_k , 则有

$$C = \bigoplus_{k=1}^n A_k \quad (3)$$

式中: A_k 表示矩阵 A 的第 k 列向量; 算子 \oplus 表示对两向量对应的元素或操作; $\bigoplus_{k=1}^n A_k$ 表示对向量 A_1 , A_2 , \dots , A_k 对应的元素或操作。

故障诊断矩阵 D 表征故障信息矩阵 B 和故障状态矩阵 C 的接近程度, B 和 C 越接近, 表示诊断结果与故障状态越吻合, 此时 D 的元素 1 越少, D 为一向量。

$$D = B \otimes C \quad (4)$$

式中, 算子 \otimes 表示对两向量对应的元素异或操作。

1.4 故障评价函数

故障评价函数 f 表征诊断结果的优良性, f 的值越小, 表示此时的诊断结果越佳。

$$f = \sum_{j=1}^m D_j + \lambda n \quad (5)$$

式中: $\sum_{j=1}^m D_j$ 表示对向量 D 的各元素求和; λ 为比例因子 ($0 < \lambda < 1$); n 为故障设备数。

1.5 诊断规则

诊断规则主要用于最快地搜索最佳的诊断结果, 本文约定的诊断规则是根据各节点上传主站 SCADA 系统的故障信息, 即故障信息矩阵 B 和网络关系矩阵 A , 具体规则如下:

①若 B 的元素全为 0, 表示所有设备正常, 无须处理。

②若 B 的元素全为 1 或有 0 元素在元素 1 的前面, 如 $[1 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ 等, 则先对馈线末端的设备诊断 (A 中行向量只含一个元素 1 的行所对应的设备即为馈线末端)。

③ B 为其他情况时, 比较 B_i 和 B_{i+1} ($1 \leq i < m$), 若相等, 则 $i = i + 1$, 继续比较; 若不相等, 则诊断节点 S_i 参考方向前方的第一个设备发生故障, 则由式(3)得向量 C , 由式(4)得向量 D , 由式(5)得评价函数 f , 若 $f = \lambda$ 则诊断结束, 节点 S_i 参考方向前方的第一个设备即为发生故障的设备。若 $f > \lambda$, 则 $i = i + 1$, 继续比较, $n = 1$ 的所有情况记录下每次 f 的值; 再对这些可能故障的设备两两组合进行判断 ($n = 2$), 并记录每次的 f ; 有时根据需要甚至要判断同时发生三处故障的情况 ($n = 3$), 并记录 f ; 同时发生四处及四处以上故障的可能性很低, 就不予以判断。当 f 最小时, 此时的诊断结果即为最佳诊断方案。

2 实例分析

2.1 简单网络

图 1 为简单的单电源配电网, 单点故障在第一节已经予以讨论, 下面分析多点故障的情况: 不妨假设设备 c 、 d 同时故障, 上传给主站的信号无畸变, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 均流过故障电流, $B = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$, 此时 B 全为 1, 则先对馈线末端的设备进行诊断, A 中第 3、4 行只有一个元素 1, 表示设备 c 、 d 是馈线末端。只有 c 故障时, 则有 $C = [1 \ 1 \ 1 \ 0]^T$, $D = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, $f = (0 + 0 + 0 + 1) + \lambda = 1 + \lambda$, $f > \lambda$; 只有 d 故障时, 则 $C = [1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, $D = [0 \ 1 \ 1 \ 0]^T$, $f = (0 + 1 + 1 + 0) + \lambda = 2 + \lambda$, $f > \lambda$; c 、 d 同时故障时, $C = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$, $D = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, $f = 0 + \lambda = \lambda$, 诊断结束, 表明此时设备 c 、 d 同时故障。

当上传给主站的信号发生畸变时, 例如若 d 处

发生故障, 理论上 $B = [1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, 但此时节点 S_3 上传的信号畸变, $B = [1 \ 0 \ 1 \ 1]^T$, 此时 B 中有元素 0 在元素 1 的前面, 属于诊断规则的第 2 种情况, 首先诊断馈线末端设备。若 d 故障, 则 $C = [1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, $D = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$, $f = 1 + \lambda$; 若 c 故障, 则 $C = [1 \ 1 \ 1 \ 0]^T$, $D = [0 \ 1 \ 0 \ 1]^T$, $f = 2 + \lambda$; 若 c 、 d 故障, 则 $C = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$, $D = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$, $f = 1 + 2\lambda$ 。 $f_{\min} = 1 + \lambda$, 即诊断为只有 d 处发生故障。

分析表明本算法不仅适用于单电源单点故障的定位, 也适用于单电源多点故障的定位, 特别是当上传给 SCADA 系统的故障状态信息发生畸变时, 仍然能准确实现故障定位, 具有较好的容错性能, 且算法简单, 计算量小, 具有较好的实时性。

2.2 复杂网络

对于多电源供电的复杂配电网, 以联络开关为界, 配电网可视为多个单电源简单配电网的组合, 以电流从母线流向馈线为参考方向, 依次对各子网的各支路的节点及设备沿参考方向编号, 如图 2 所示, 故障定位原理和单电源供电的简单配电网定位原理相同, 只是最终的诊断结果要综合各子网的诊断结果。图 2 为典型的手拉手环网双电源供电复杂配电网, 视联络开关两侧分别为子网 1 和子网 2, 则有

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

假设设备 c_1 、 c_2 发生故障, 则节点 S_{11} 、 S_{13} 和节点 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{23} 流过故障电流, $B_1 = [1 \ 0 \ 1]^T$, $B_2 = [1 \ 1 \ 1]^T$ 。对于子网 1, 诊断为 c_1 处发生故障; 对于子网 2, 诊断为 c_2 处发生故障, 综合即为设备 c_1 和 c_2 处发生故障。

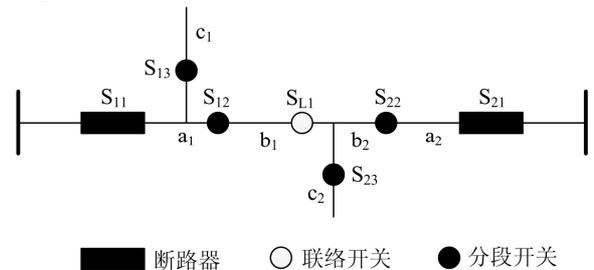


图 2 双电源供电复杂配电网

Fig. 2 A complex distribution network with two power sources

受到干扰或环境的影响时，上传主站 SCADA 系统的故障状态信号畸变时，由于将复杂配电网分解为多个单电源供电子网单独处理，对于每个单电源供电子网算法有非常好的容错性能，因此对于复杂的配电网同样具有非常好的容错性能。

3 仿真验证

图 3 为三电源供电复杂配电网，由 3 个单电源供电简单配电网组成，分别对多点故障信号无畸变（ d_1 、 c_2 、 d_3 、 f_3 ）和信号有畸变（节点 S_{13} 、 S_{22} 、 S_{33} 上传主站的信号发生畸变）时进行仿真验证，仿真结果如表 1 和表 2 所示。

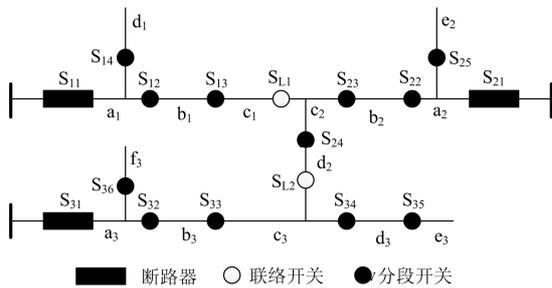


图 3 三电源供电复杂配电网

Fig. 3 A complex distribution network with three power sources

表 1 多点故障无信号畸变诊断结果

Table 1 Result of multiple point faults without signals distortion

	B	故障设备	f
子网 1	$[1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$	d_1	λ
子网 2	$[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$	c_2	λ
子网 3	$[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]^T$	f_3	$3 + \lambda$
		d_3	$1 + \lambda$
		f_3, d_3	2λ

表 2 多点故障信号畸变诊断结果

Table 2 Result of multiple point fault with signals distortion

	B	故障设备	f
子网 1	$[1 \ 0 \ 1 \ 1]^T$	d_1	$1 + \lambda$
		c_1	$2 + \lambda$
		c_1, d_1	$1 + 2\lambda$
子网 2	$[1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$	e_2	$2 + \lambda$
		d_2	$2 + \lambda$
		c_2	$1 + \lambda$
		c_2, e_2	$2 + 2\lambda$
子网 3	$[1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T$	f_3	$2 + \lambda$
		d_3	$2 + \lambda$
		f_3, d_3	$1 + 2\lambda$

对于子网 1、2， $f = \lambda$ 为最小，即诊断为 d_1 、 c_2 处发生故障；对于子网 3， $f = 2\lambda$ 为最小，即诊断为 f_3 、 d_3 同时发生故障。所以总配电网的结果即为 d_1 、 c_2 、 d_3 、 f_3 发生故障，这与假设完全一致，故障定位正确。

对于子网 1， $f = 1 + \lambda$ 为最小，即诊断为 d_1 处发生故障；对于子网 2， $f = 1 + \lambda$ 为最小，即诊断为 c_2 处发生故障；对于子网 3， $f = 1 + 2\lambda$ 为最小，即诊断为 f_3 、 d_3 发生故障，故障定位结果正确。

仿真算例表明，本算法对于多电源供电配电网多点故障时可以快速准确地定位故障，且具有非常好的容错性能，当发生多点故障时，且上传主站的信号发生畸变时，仍能准确地定位故障。

4 结语

本文提出了一种改进矩阵算法，与以往的矩阵算法及其改进算法相比，本算法结合配电网的结构特点，定位原理简单，首次提出网络关系矩阵，该矩阵小巧且蕴含的信息更丰富，本算法没有矩阵相乘或规格化等复杂的计算，只有向量元素的加法及简单的逻辑或、异或运算，运算简单且运算量小，实时性好。本算法不仅适用于单电源供电的简单配电网故障定位，也适用于多电源供电的复杂配电网故障定位，不仅可以快速准确地定位单点故障，也可以快速准确地定位多点故障，甚至各台柱上 FTU 上传主站的信号发生畸变时，仍能快速准确地定位故障，具有非常好的容错性能。实例分析和案例仿真表明算法的可行性与准确性。

参考文献

- [1] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33. LIU Jian, NI Jian-li, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [2] 王飞, 孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 45-47. WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 45-47.
- [3] 夏雨, 姚月娥, 刘全志, 等. 配电网故障定位和隔离的新统一矩阵算法[J]. 高电压技术, 2002, 28(3): 4-5. XIA Yu, YAO Yue-e, LIU Quan-zhi, et al. A new general matrix arithmetic on the location and isolation of the fault

- section in power distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(3): 4-5.
- [4] 马强, 张利民, 刘皓明. 配电网故障区间判断的通用矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 14-17. MA Qiang, ZHANG Li-min, LIU Hao-ming. General matrix algorithm for fault section detection in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 14-17.
- [5] 罗梅, 杨洪耕. 配电网故障定位的一种改进通用矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 64-68. LUO Mei, YANG Hong-geng. An improved general matrix algorithm for fault locating in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 64-68.
- [6] 苏永智, 潘贞存, 丁磊. 一种复杂配电网快速故障定位算法[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 75-78. SU Yong-zhi, PAN Zhen-cun, DING Lei. A fast algorithm of fault location for complicated distribution network[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 75-78.
- [7] 梅念, 石东源, 杨增力, 等. 一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 66-69. MEI Nian, SHI Dong-yuan, YANG Zeng-li, et al. A practical matrix-based fault location algorithm for complex distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-69.
- [8] 陈艳丽, 周群, 滕欢. 配电网故障定位容错算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 91-95. CHEN Yan-li, ZHOU Qun, TENG Huan. Fault-tolerance algorithm for fault location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 91-95.
- [9] 梅念, 石东源, 段献忠. 基于过热区域搜索的多电源复杂配电网故障定位方法[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 95-99. MEI Nian, SHI Dong-yuan, DUAN Xian-zhong. A fault algorithm for complex multi-source distribution networks based on over-heated region searching[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 95-99.
- [10] 郭壮志, 陈波, 刘灿萍, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 88-92. GUO Zhuang-zhi, CHEN Bo, LIU Can-ping, et al. Fault location of distribution network based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 88-92.
- [11] 李超文, 何正友, 张海平, 等. 基于二进制粒子群算法的辐射状配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 35-39. LI Chao-wen, HE Zheng-you, ZHANG Hai-ping, et al. Fault location for radicalized distribution networks based on BPSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 35-39.
- [12] 王林川, 李庆鑫, 刘新全, 等. 基于改进蚁群算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 29-33. WANG Lin-chuan, LI Qing-xin, LIU Xin-quan, et al. Distribution network fault location based on the improved ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 29-33.
- [13] 彭敏放, 沈美娥, 贺建飏, 等. 容差电路软故障检测与定位[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 222-227. PENG Min-fang, SHEN Mei-e, HE Jian-biao, et al. Soft-fault detection and location for circuits with tolerance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 222-227.
- [14] 单文俊, 程浩忠, 王一, 等. 基于树形结构编码单亲遗传算法的配电网优化规划[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 154-159. SHAN Wen-jun, CHENG Hao-zhong, WANG Yi, et al. Distribution network optimal planning based on tree structure encoding partheno-genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 154-159.
- [15] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196. WENG Lan-tian, LIU Kai-pei, LIU Xiao-li, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.

收稿日期: 2013-08-22; 修回日期: 2013-11-04

作者简介:

黄佳乐(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制、智能仪器与仪表; E-mail: jiale0_0@126.com

杨冠鲁(1960-), 男, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制、智能仪器与仪表。