

基于信息矛盾原理的畸变信息修正及配电网故障区段定位

焦彦军¹, 杜松广¹, 王琪¹, 陈成²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;
2. 哈尔滨电气集团阿城继电器有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要: 为解决依靠故障过流信息的配电网故障定位在信息畸变时易造成的误判, 首先对畸变信息进行了分类, 在矩阵算法的基础上提出了信息矛盾原理来检测可识别畸变, 并通过贝叶斯定理对节点畸变的可能性进行了分析, 最后给出了畸变修正和故障定位的策略。该策略可以快速找到畸变信息的位置, 仅需提取部分故障信息即可对畸变进行修正, 对较复杂的畸变以适当扩大定位区间段的方式来保证故障定位的可靠性。该策略具有故障定位准确、速度快、可靠性高的特点, 可以满足复杂多电源线路上的多重故障和多重信息畸变的故障定位。

关键词: 配电网; 故障定位; 信息矛盾原理; 贝叶斯定理; 信息畸变

Information aberrance correction and fault-section location for distribution networks based on the information contradiction theory

JIAO Yan-jun¹, DU Song-guang¹, WANG Qi¹, CHEN Cheng²

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Acheng Relay Limited Liability Company, Harbin Electric Corporation, Harbin 150000, China)

Abstract: The fault sections location in distribution networks based on the information of the short circuit current may get false results due to the information aberrance. To solve the problem, firstly this paper classifies the information aberrance, then proposes the information contradiction theory based on the matrix algorithm to detect recognizable aberrance, analyzes the possibility of aberrant node through the Bayes theorem, and proposes the scheme of aberrance correction and fault location. This strategy can find the position of aberrant node quickly, only extract part of the fault information for correcting aberrance, and for the complex aberrance, expand fault segment appropriately to ensure the reliability of fault location. The strategy has accurate location and fast speed and high reliability. It can solve the fault location of multiple faults and multiple information aberrance in complex multiple power system.

Key words: distribution network; fault location; information contradiction theory; Bayes theorem; information aberrance

中图分类号: TM77; TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0043-06

0 引言

故障定位是配电网自动化中最基本和最重要的功能, 当配电网发生故障后, 各分段开关及联络开关处的 FTU 将实时故障信息通过数据通信上传到配电站, 由主站高级应用软件进行故障定位^[1]。在实际运行中, 安装于户外的 FTU 运行环境恶劣, 易承受电磁等干扰, 当配电网故障时尤其多重故障同时发生时, 故障信息发生畸变或缺失的可能性较高^[2], 极易造成主站对故障区段的误判或漏判。

目前, 众多学者对计及信息畸变的配电网故障定位展开了深入研究, 文献[3]在矩阵算法的基础上

提出了一种比较信息修正代价的方法来修正畸变, 但只能解决同一馈线上单重故障的情况, 文献[4]采用的链表法能判断畸变时的多重故障, 但当树枝的首末节点发生畸变时可能造成误判; 文献[5]根据故障定位的结果进行逆运算, 再将得到的期望故障信息与原信息进行比较判断, 但对于节点规模较大的配电网, 复杂的 FTU 期望状态的生成会严重制约故障定位速度; 此外, 一些基于人工智能的算法, 如遗传算法^[1,6]、蚁群算法^[7]、粒子群算法^[8-9]等也对故障定位进行了尝试, 但此类方法参数设定复杂, 计算量大, 且算法本身也存在“早熟收敛”等缺陷, 易出现错判、漏判的情况。

随着分布式电源的接入和配电网规模的扩大, 线路发生多重故障的可能性日益增加, 数据通信中也面临着更多的不确定性, 因此提出一种简便快速、可以解决同一馈线上多重故障和多重畸变的定位方案对于提高配电网可靠性有着重要意义。

为此, 本文在矩阵算法的基础上提出了基于信息矛盾原理的畸变修正策略, 当检测到故障时, 首先通过信息矛盾原理对故障信息序列进行畸变检测, 若存在矛盾信息对, 则根据贝叶斯定理对局部信息进行判断, 根据不同的畸变类型得出相应的畸变修正方案和故障定位策略。

1 基于矩阵算法的故障定位模型

1.1 网络模型的建立

网络模型的建立可分为以下几个步骤:

1) 将馈线上的断路器、分段开关和联络开关抽象为节点, 并进行统一编号(编号任意), 将线路抽象为边, 形成拓扑图的形式。图 1 为简单配电网形成的拓扑图。

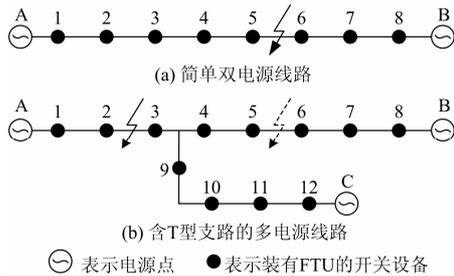


图 1 简单配电网的拓扑图

Fig. 1 Topological diagram of simple distribution network

2) 确定网络的正方向: 在全网中任意选择某一个电源作为根电源, 以假定只有该电源向全网供电的功率流出方向为正方向。

3) 网络描述矩阵 D 的形成: 若节点 i 和节点 j 之间存在一条馈线且该馈线的正方向是由节点 i 指向节点 j , 则对应的网络描述矩阵中的元素 $d_{ij}=1$, 而 $d_{ji}=0$ 。

4) 定义故障信息序列 $F=[f_1, f_2, \dots, f_n]$ (n 为该故障信息区间中的节点个数), 故障信息序列的各元素由 FTU 生成并上传配电主站, 其中

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 有过电流信息且电流} \\ & \text{方向与网络正方向一致} \\ -1 & \text{节点 } i \text{ 有过电流信息且电流} \\ & \text{方向与网络正方向相反} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 没有过电流信息} \end{cases} \quad (1)$$

5) 故障判别矩阵 P 的形成: 将 F 中的信息按

顺序替代 D 的对角线元素即形成故障判定矩阵 P 。

故障区段 (a, b) 表示节点 a, b 之间发生故障, 以图 1(a) 所示的网络为例, 电源 A 为根电源, 故障区段为 $(5, 6)$, 则最终形成的故障判别矩阵 P 为

$$P_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 故障定位基本原理与判据

1.2.1 基本原理

当某区段发生故障时, 故障区段应位于最后一个经历了故障电流的节点和第一个未经历故障电流的节点之间, 考虑到系统多电源供电的情况, 故障区段两侧的 FTU 信息可能为 1 与 0、1 与 -1、0 与 -1; 对于含有 T 型支路的线路, 需通过一定的逻辑排除可能的错判; 另外若末端节点的故障信息为 1, 则可判定为末端节点之后线路发生故障。

1.2.2 故障判据

1) 当 $p_{ii}=1$ 时, 若节点 i 为末端节点, 则末端节点之后线路发生故障。

2) 当 $p_{ii}=1$ 时, 若节点 i 存在子节点, 对于所有 $p_{ij} \neq 0 (i \neq j)$, 都满足 $p_{ij} \neq 1$, 则故障位于节点 i 与 j (j 不唯一) 之间。

3) 当 $p_{ij}=-1$ 时, 若有 $p_{ij}=1$ 且 $p_{ii}=0$, 且 j 的兄弟节点的故障信息都不为 1, 则故障位于 i 与其子节点之间。

基于上述网络描述矩阵与判据的故障定位不仅适用于简单线路故障, 也适用于多电源配电网发生多重故障的定位。

1.3 对故障信息缺失的解决方案

当某些节点因 FTU 故障而不能得到该节点信息, 或者该点过流信息由于通信原因畸变为不确定信号时, 即为检测到故障信息缺失。经分析可知, 故障并不会因某节点缺失信息而被覆盖, 因此在用上述判据进行故障定位时可以忽略信息缺失的节点, 将其父节点与子节点默认为直接相连即可^[2]。

2 基于信息矛盾原理的信息畸变识别

2.1 畸变信息的分类

不同文献的算法虽原理各不相同, 但往往都会对某些关键信息的特殊畸变失去效力^[9], 总结无法

识别的畸变可知, 其根本原因是畸变后的故障信息序列可能为其他故障正确的信息序列, 由于算法均默认信息序列正确从而无法识别此类畸变。基于此, 本文将畸变类型分为以下两种。

1) 不可识别畸变: 畸变后的故障信息序列与某故障类型正确上传的信息序列一致。如图 1(a)中, 故障区段为(5, 6), 正常故障信息序列应为 $F = [1, 1, 1, 1, -1, -1, -1]$, 若节点 5 的信息由 1 畸变为 -1, 则畸变信息序列与区段(4, 5)发生故障时的正常信息序列一致, 根据定位判据会导致误判。

由于仅依靠开关量的故障信息序列难以消除此类畸变, 因此只能通过引进其他故障信息进行定位^[10-11], 考虑到此类畸变发生的概率微乎其微, 亦可忽略不计。本文在仅有基于开关量的故障信息序列的前提下, 讨论可识别畸变的解决方案。

2) 可识别畸变: 畸变后的故障信息序列不与任何故障正确上传的信息序列一致。由于畸变信息与正常信息存在差异, 因此可以研究两者的不同点来识别此类畸变。

2.2 信息矛盾原理

对于简单双电源线路, 如图 1(a)所示, 经分析可知, 任何一对父节点与子节点的 FTU 正确上传的故障信息不应该为 0 与 1、-1 与 1 或者 -1 与 0, 若检测到上述任何一种情况则称之为信息矛盾, 检测到的父子节点称之为矛盾信息对。

对于含有 T 型支路的多源复杂线路, 需要排除某些特殊情况, 例如图 1(b)所示, T 型线路之前发生故障, 则 3 号节点故障信息为 -1, 但其子节点 4 的故障信息可能为 0(其下游支路无故障和电源)或 1(其下游支路同时发生故障)。

综合上述情况可将信息矛盾原理归结如下:

1) 当检测到某子节点故障信息为 1 时, 除非该子节点有兄弟节点的故障信息为 -1, 否则其父节点的故障信息不可能为 0 或 -1;

2) 当检测到某子节点故障信息为 0 时, 除非该子节点有兄弟节点的故障信息为 -1, 否则其父节点的故障信息不可能为 -1。

进一步分析可知, 检测到 FTU 上传的信息矛盾是矛盾信息对的故障信息发生可识别畸变的充分必要条件。因此可通过信息矛盾原理来检测 FTU 上传的信息是否发生畸变。

3 基于贝叶斯定理的畸变信息修正策略

3.1 基本原理与修正方案

设事件 K_1, K_2, \dots, K_i 分别是存在信息矛盾的信息序列 F 发生的条件下可能的畸变节点集合, K_i

发生的概率以 $P(K_i/F)$ 来表示, 对畸变节点的识别即转化成求解最大的 $P(K_i/F)$ 所对应的 K_i 。由贝叶斯公式可知

$$P(K_i/F) = \frac{P(F/K_i)P(K_i)}{P(F)} \quad (3)$$

式中: $P(F/K_i)$ 为某正确的故障信息序列中, 节点集 K_i 发生畸变而得到 F 的概率; $P(K_i)$ 为节点集 K_i 发生畸变的概率。由式(3)可得, 两个不同的畸变节点集合 K_i 与 K_j 发生的概率比为

$$\frac{P(K_i/F)}{P(K_j/F)} = \frac{P(F/K_i)P(K_i)}{P(F/K_j)P(K_j)} \quad (4)$$

根据配电网模型可作出如下假设。

假设 1: 在配电网系统中, 每个节点 FTU 上传的故障信息发生畸变的概率是均等的, 记作 P_{aberrant} , 且 $P_{\text{aberrant}} \ll 1$; 不同的节点信息发生畸变互为独立事件。

假设 2: 配电网中的每条支路发生故障的概率是均等的。

由假设 1 可知, $P(K_i) = P_{\text{aberrant}}^n$, 其中 n 为 K_i 中节点个数; 由假设 1 与 2 可知, $P(F/K_i)$ 亦与 P_{aberrant}^n 成正比, 即 K_i 中节点数越少, $P(F/K_i)$ 与 $P(K_i)$ 越大, 再由式(4)可知 $P(K_i/F)$ 亦越大, K_i 发生的置信度越高。因此对于故障信息序列中的每一个矛盾信息对, 可以首先认为其附近只有一个节点发生畸变, 称为一重畸变, 若能通过修改某一个节点故障信息消除信息矛盾则完成畸变修正; 若改变任何一个节点故障信息都不能消除信息矛盾, 则认为矛盾信息对附近发生有两个节点发生畸变(二重畸变), 尝试修改两个节点信息并检测是否仍存在信息矛盾; 如此检测直至信息矛盾消除。

由信息矛盾原理可知发生畸变的节点为矛盾信息对或在其附近, 因此并不需要对全部节点的信息进行判断, 只需提取局部故障信息进行比较即可。分析可知当进行 n 重畸变检测时, 需要提取矛盾信息对的上下游各 n 个节点故障信息进行局部判断, 我们称之为 n 维判断, n 维判断共需 $2n+2$ 个节点故障信息。若矛盾信息对的某一侧已无节点, 则需提取另一侧较多的节点以保证 n 维判断的节点数目达到 $2n+2$ 个。

如图 1(a)中, 若故障信息序列为 $F = [1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, -1]$, 判断节点 3、4 存在信息矛盾后, 首先提取节点 2、3、4、5 的故障信息进行一维判断, 依次尝试修改每个节点信息并检测信息矛盾, 当将节点 3 的故障信息修改为 1 时, 信息矛盾消除,

则完成修改。

3.2 考虑故障定位可靠性的多种修正方案处理

在进行 n 维判断时, 常会遇到修改多个节点均可消除信息矛盾的情形, 如图 1(a)中, 若故障信息序列为 $F = [1, 1, 0, 1, -1, -1, -1, -1]$, 则对畸变信息修正的方案及其故障定位区段如表 1 所示。

表 1 某畸变信息的多种修正方案

Table 1 Several correction scheme of some aberrant information

方案	修正结果	判定故障区段	畸变节点
1	[1,1,0,0,-1,-1,-1,-1]	(2,3), (4,5)	节点 4
2	[1,1,1,1,-1,-1,-1,-1]	(4,5)	节点 3
3	[1,1,0,-1,-1,-1,-1,-1]	(2,3), (3,4)	节点 3

根据假设 1 与假设 2 可知此三种畸变修正方案概率均相等。文献[4]采用故障区段最少的原则来进行定位, 但由于邻近区间间发生故障通常并非独立事件, 其发生的概率不能简单相乘。分析可知可能的多重故障区段通常相邻, 且得到的方案通常在三个以内, 为保证配电网故障定位及供电恢复的可靠性, 可将不同的结果得到的区段进行合并, 以适当扩大故障区段的方式来防止错判和误判。如上例中, 判定故障区段为(2, 5), 并给出可能的畸变节点 3 和 4, 即可完成可靠性较高的故障定位。

整体故障定位算法的流程图如图 2 所示。

4 算例分析

本文采用 VC++6.0 进行编程, 以文献[9]中的算例配电网进行分析, 结构图如图 3 所示, 假设电源 S 为系统的根电源, 三个分布式电源均接入配电网。对不同的故障类型进行仿真测试, 其中算例 1 与文献[9]的算例 1 的输入量相同。程序结果见表 2。

表 2 故障测试结果

Table 2 Test results of fault

算例	输入量	判断结果	
		故障区段	畸变节点
1	FTU 上传故障电流信息	(2, 3)	8
	[1, 1, 0, -1, -1, -1, 0, -1, 1, 0, 0, -1,	(3, 4)	
	-1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, 0, 0,	(17, 18)	
2	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, -1, -1, 0, 0,	(26, 29)	27/28
	-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1,	(19, 20)	29、30
-1, 0, 0, 0, 1, -1, 0, -1, -1, -1, -1, -1]	(18, 33)		
3	[1, 1, -1, -1, -1, -1, 0, 0, 0, 0, 0,	(19, 20)	
	-1, -1, -1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, -1, 0,	(18, 33)	
	0, 0, -1, -1, -1, 0, 0, -1, -1, -1]		

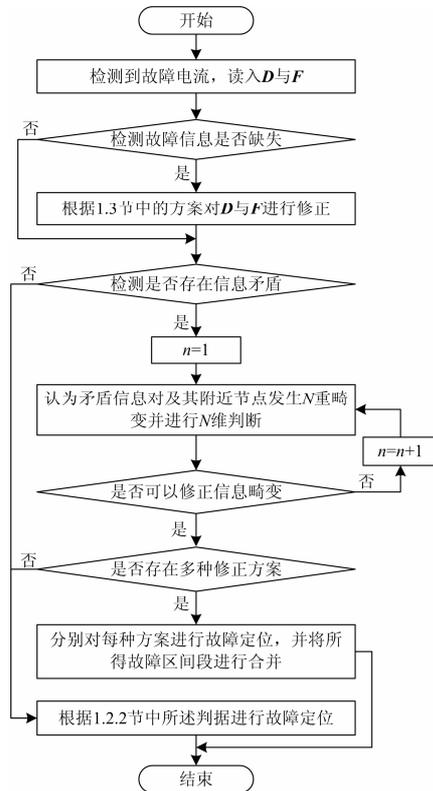


图 2 故障定位流程图

Fig. 2 Flow chart of fault location

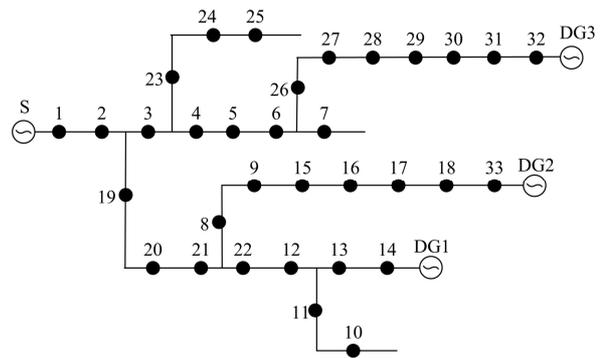


图 3 算例配电网

Fig. 3 Distribution network of test example

对表 2 中算例的分析过程如下:

1) 对算例 1 进行信息矛盾检测可知节点 8 与 9 互为矛盾信息对, 提取上下游节点 21 与 15 的信息并进行一维判断, 局部信息为[1, -1, 1, 1], 当将节点 8 的信息修改为 1 时信息矛盾消除, 因此认为节点 8 发生畸变。将修正信息重新进行故障定位即可得到故障区段。

文献[9]的结果认为节点 3 发生畸变, 但其遗漏了区段(2, 3)与(3, 4)同时发生故障的可能, 而本文方法不会导致此类漏判。

2) 同理, 算例 2 中矛盾信息对为 27 与 28, 进

行一维判断的局部信息为 $[1, -1, 0, -1]$, 此时存在三种修正方案: ①将节点 27 的信息修改为 0, 故障区段为 $(26, 27), (28, 29)$; ②将节点 27 的信息修改为 1, 故障区段为 $(27, 28), (28, 29)$; ③将节点 28 的信息修改为-1, 故障区段为 $(26, 27)$ 。为保证故障定位可靠性, 将上述三种方案结果进行合并, 故障区段判定为 $(26, 29)$, 畸变节点为 27 或 28。

3) 同理, 算例 3 中矛盾信息对为 28 与 29, 进行一维判断的局部信息为 $[-1, -1, 0, 0]$ 。修改任何节点信息均无法消除信息矛盾, 因此认为矛盾信息对附近发生二重畸变, 提取节点 36 与 31 的信息并进行二维判断, 局部信息为 $[-1, -1, -1, 0, 0, -1]$, 当将节点 29 与 30 的信息修改为-1 时信息矛盾消除, 因此认为节点 29 与 30 发生畸变, 通过判断可知此区段内无故障发生。

上述算例表明本文方法对复杂多电源线路中多重故障和多重畸变均有较好的适应性, 且方法简单实用, 可靠性高。由于线路单重畸变的可能性更大, 进行一维判断的节点信息较少, 将单重畸变的局部信息类型和修正及定位结果整理于表 3 中, 其中节点 b 与 c 为矛盾信息对。可在主站中存储表 3 结果, 一维判断时通过对比迅速得出畸变节点与故障区段, 进一步提高了故障定位的速度。

表 3 单重畸变的局部信息类型和定位结果

Table 3 Part information types and location results of single aberrance

四个相邻节点 a,b,c,d 的故障信息		判断结果	
信息序列	修正后的信息序列	故障区段	畸变节点
$[1,0,1,1]$	$[1,1,1,1]$	无	b
$[1,0,1,0]$	$[1,1,1,0][1,0,0,0]$	$(a,b), (c,d)$	b/c
$[1,0,1,-1]$	$[1,1,1, -1][1,0,0, -1][1,0, -1, -1]$	(a,d)	b/c
$[0,0,1,0]$	$[0,0,0,0]$	无	c
$[0,0,1, -1]$	$[0,0,0, -1][0,0, -1, -1]$	$(b,c), (c,d)$	b/c
$[0, -1,0,0]$	$[0,0,0,0]$	无	b
$[-1, -1,0, -1]$	$[-1, -1, -1, -1]$	无	c
$[1, -1,0,0]$	$[1,0,0,0][1,1,0,0]$	$(a,b), (b,c)$	b/c
$[1, -1,0, -1]$	$[1, -1,-1-1][1,0,0, -1][1,1,0, -1]$	(a,d)	b/c
$[0, -1,0, -1]$	$[0,0,0, -1][0, -1,-1, -1]$	$(a,b), (c,d)$	b/c
$[1, -1,1,1]$	$[1,1,1,1]$	无	b
$[-1, -1,1, -1]$	$[-1, -1, -1, -1]$	无	c
$[1, -1,1,0]$	$[1,1,1,0]$	(c,d)	b
$[1, -1,1, -1]$	$[1,1,1, -1][1, -1, -1, -1]$	$(a,b), (c,d)$	b/c
$[0, -1,1,-1]$	$[0, -1, -1, -1]$	(a,b)	c

5 结束语

本文提出了一种基于信息矛盾原理的解决信息发生畸变的故障定位策略, 可以快速定位到发生畸变的节点, 根据贝叶斯定理提出了对局部信息的修正方案, 并以适度扩大故障定位区段的方式来保证复杂畸变情况下故障定位的可靠性。该策略对多电源复杂线路上的多重故障、多重畸变具有较好的适应性, 在故障定位的速度、准确性、可靠性等方面均有明显的改进。算例分析结果验证了本方法的有效性。

参考文献

- [1] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130. WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [2] 梅念, 石东源, 李银红, 等. 计及信息畸变影响的电网故障诊断分级优化方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 178-185, 190. MEI Nian, SHI Dong-yuan, LI Yin-hong, et al. Power system fault diagnosis based on gradual optimization in consideration of alarm information aberrance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 178-185, 190.
- [3] 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): 66-70. MEI Nian, SHI Dong-yuan, YANG Zeng-li, et al. An applied matrix algorithm for fault location in power distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-70.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 严太山, 崔杜武, 陶永芹. 基于改进遗传算法的配电网故障定位[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 255-259.
YAN Tai-shan, CUI Du-wu, TAO Yong-qin. Fault location for distribution network by improved genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 255-259.
- [7] 陈歆技, 丁同奎, 张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 74-77.
CHEN Xin-ji, DING Tong-kui, ZHANG Zhao. Ant colony algorithm for solving fault location in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 74-77.
- [8] 周濂, 郑柏林, 廖瑞金, 等. 基于粒子群和差分进化算法的含分布式电源配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 33-37.
ZHOU Quan, ZHENG Bo-lin, LIAO Rui-jin, et al. Fault-section location for distribution networks with DG based on a hybrid algorithm of particle swarm optimization and differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 33-37.
- [9] 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 radialized distribution networks based on BPSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 35-39.
- [10] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 172-178.
JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.
- [11] 高振兴, 郭创新, 俞斌. 基于多源信息融合的电网故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 17-23.
GAO Zhen-xing, GUO Chuang-xin, YU Bin. Study of a fault diagnosis approach for power grid with information fusion based on multi-data resources[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 17-23.

收稿日期: 2013-05-09; 修回日期: 2013-06-06

作者简介:

焦彦军 (1963-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护;

杜松广 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护、配电网自动化; E-mail:dusongguang@126.com

王琪 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护、配电网自动化。