

DOI: 10.7667/PSPC160476

含多微网的主动配电网故障区段定位算法

马腾飞, 高亮

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 为了解决多微网并网给配电网保护带来的问题, 提出了一种基于主从式区域纵联保护的故障区段定位矩阵算法。保护主机根据保护从机发送的信息以及当前的网络结构和运行方式生成相应的网络描述矩阵, 根据各保护从机采集的故障电流方向信息生成故障信息矩阵, 在主机中通过这两个矩阵的加法运算得到故障判断矩阵, 由相应的判据实现故障区段定位, 并发送命令给保护从机跳开相应的断路器隔离故障。该算法原理简单, 运算速度快, 存储量小, 不仅可以定位开环情况下的单、多重故障, 而且可以定位闭环情况下的单、多重故障, 不受网络结构变化以及微网投切的影响, 具有一定的自适应性。

关键词: 微网; 主动配电网; 故障定位; 矩阵算法; 区域纵联保护

Fault location algorithm for active distribution network with multi micro-grids

MA Tengfei, GAO Liang

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to solve the problems that multi micro-grids brings to the protection of distribution network, a fault location matrix algorithm based on master-slave regional pilot protection system is proposed. Firstly, a network matrix which is based on the information of the auxiliary machine sending and the present network structure and the operation mode is formed, and simultaneously, a fault information matrix based on fault current directional information collected by each slave protection is formed; then, a fault judgment matrix is got by the additive operation of the two matrices; finally, we can locate the fault with corresponding criterion and send order to the auxiliary machine to cut breaker isolated fault. This algorithm is simple, fast and small memory space, which can locate single or multi fault of both open-loop distribution network and close-ring distribution network. The algorithm is unaffected when the network structure is changed or the micro-grid is switched, which has a certain self-adaptive.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307104) and Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-connected Technology (No. 13DZ2251900).

Key words: micro-grids; active distribution network; fault location; matrix algorithm; regional pilot protection

0 引言

近年来, 由于分布式发电技术具有灵活、环保等优点, 从而得到了广泛的应用。当分布式电源的渗透率较高时, 将会以微网(Micro-grids, MG)的形式并网^[1]。但是, 分布式电源大量接入配电网以后, 也带来了许多新的问题^[2]。为了解决大量分布式电源接入配电网所带来的问题, 国际大电网会议

(CIGRE)C6.11 项目组于 2008 年提出了主动配电网(Active distribution network, ADN)的概念, 旨在解决电网兼容及应用大规模间歇式可再生能源, 提升绿色能源的利用率, 优化一次能源结构等问题^[3], 其中, 故障定位技术尤为关键。本文将对故障定位技术进行讨论。

微电网并网后, 配电网的结构将变为一种遍布电源的互联网络, 而且环状网络也将变得更加复杂。发生故障时, 传统的故障定位方法将不再适应。近年来已有学者对含分布式电源的配电网的故障定位方法进行了一些研究。文献[4]通过建立关联方向向

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307104); 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)

量、过流方向向量、过流状态向量、判据向量这四个向量来实现故障区段的定位,判断过程比较复杂。文献[5]将故障信息矩阵改为由短路电流幅值形成,避免了多重故障时需要假设多次正方向,但计算量较大且判据较复杂。文献[6]利用搜索树建立故障相关区域的网络信息矩阵,结合智能电子设备完成含分布式电源配电网故障定位的新方法,但其网络描述矩阵不够简单,复杂网络时存储量较大,没有考虑多重故障的情况。文献[7]通过定义两种不同功能的智能电子设备经两次判断后完成故障定位,但是初步定位时其矩阵修订过程比较繁琐。文献[8]在文献[7]的基础上进行了改进。文献[9]提出一种基于分布决策的故障定位算法,利用智能电子装置收集各节点的信息完成故障定位,需要进行两次定位才能精确定位故障。文献[10]通过节支关联矩阵与故障信息矩阵的乘法运算来得到故障区段,运算量大,而且当网络结构发生变化时需要某些节点重新定义正方向,发生多重故障时会出现落判。文献[11]基于图论的故障定位算法可以适应网络结构的变化,但是没有考虑多重故障的情况。文献[12-13]将差动保护应用到主动配电网中可以很好地解决含分布式电源的配电网继电保护问题。

本文在文献[10]的基础上提出一种新的矩阵算法,该算法计算简单,网络结构变化时不需要重新定义方向而且发生多重故障时也能精确定位所有故障,实现故障隔离。

1 主从式区域纵联保护方案

如图1所示,在两个变电站中各设置一个保护主机,同时每个独立的微网、分段开关、联络开关等具有切断短路电流能力的开关处均安装一个保护从机,保护从机与保护主机通信来实现信息的交互。保护主机的主要功能是完成故障的判断和定位,保护从机负责采集其安装点处的故障方向信息和开关状态信息,保护主机根据从机传递的信息来实现故障的定位与隔离。

当某条线路发生故障时,位于该线路出口处的保护从机将检测出正向过流这时发送信息请求保护主机查询此线路上其他保护从机的故障判断结果。一般来说正常情况下位于故障点上游的保护从机将会检测到正向过流,而位于故障点下游的保护从机且与微网相连时将会检测到反向过流,线路末端的保护从机则会检测到低电压、低电流,总之不会检测出正向过流。因此保护主机根据保护从机的判断

信息以及当前的网络拓扑结构就能够完成故障定位并发送跳闸指令跳开相应断路器,隔离故障。

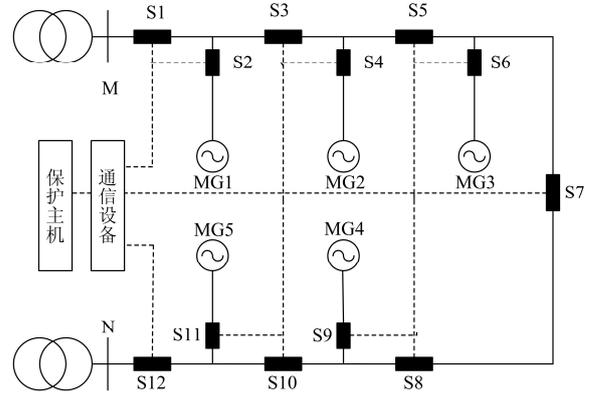


图1 含多微网的配电网结构图

Fig. 1 Configuration of distribution system with multi-grids

2 算法的基本原理

2.1 网络描述矩阵 D

当系统开环运行时,以常开型联络开关为界对配电网分区,仅选择含有故障信息的区间进行运算^[14]。对这区间中所有装有保护从机的断路器、分段开关等当作节点进行编号,设定正方向,本文规定:开环运行时,以系统电源指向各支路或微网的方向为正方向;当系统闭环运行时,任意选取某个系统电源假定作为唯一供电电源,其指向各支路或微网的方向为正方向,这样能够确保方向元件基本不受微网容量和并网位置的影响。然后通过各节点之间的有向连接关系构造一个网络描述矩阵 D , D 中各元素的值 d_{ij} 定义如下:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i, j \text{ 连接且正方向由 } i \text{ 指向 } j (i \neq j) \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

这种方法形成的网络描述矩阵只有 1, 0 两种元素,矩阵的稀疏性强,存储空间更少,计算速度更快。

2.2 故障信息矩阵 G

发生故障时,故障区域内的保护从机将采集该处的电气量信息来判断是否存在故障电流以及故障电流的方向,若该处存在故障电流且故障电流方向与网络假定正方向一致,则保护从机向保护主机发送信号“1”,若故障电流方向与假定正方向相反,则发送信号“-1”,若没有检测到故障电流,则发送信号“0”。保护主机收到从机的信息后,将这三种信号值(1、-1、0)分别对应的存储在故障信息矩阵 G 中, G 为一对角矩阵,维数与 D 相同,其主对角线上的元素值如下:

$$g_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{故障电流方向与网络假定正方向相同} \\ -1, & \text{故障电流方向与网络假定正方向相反} \\ 0, & \text{无故障电流} \end{cases}$$

2.3 故障判断矩阵 P 及判定准则

故障发生后, 在保护主机中将网络描述矩阵 D 与故障信息矩阵 G 相加得到故障判断矩阵 P , 即

$$P = D + G \quad (1)$$

故障判断矩阵 P 生成后, 根据下面的判定准则即可实现故障定位。

1) 当 $P_{ii}=1$ 时, 对所有的 $P_{ij}=1$ 的 $j(j \neq i)$, 都有 $P_{jj}=0$ 或 -1 , 则故障发生在 i, j 间。其物理意义是当节点 i 存在正向故障电流, j 点在 i 点的网络正方向上且与 i 点直接相连, j 点没有流过故障电流或流过反向故障电流, 说明 i, j 区段发生了故障。

2) 当 $P_{ii}=-1$ 时, 对所有的 $P_{ji}=1$ 的 $j(j \neq i)$, 都有 $P_{jj}=0$, 则故障发生在 i, j 间。其物理意义是 i 点流过反向故障电流, i 点连接在 j 点正方向下的下方, 且 j 点没有故障电流, 说明 i, j 区间发生了故障且电源位于 i 点下游(相对于网络假定正方向)。

3) 当 $P_{ii}=1$ 时, 若所有的 $P_{ij}=0(i \neq j)$ 说明 i 为末端节点且末端发生故障。其物理意义是 i 点流过正向故障电流, 网络正方向下没有与其直接相连的节点, 说明该点为末端节点且末端发生了故障。

以上三条准则满足其中任意一条即可。

3 算例分析

3.1 开环运行时发生单重故障

网络结构如图 1 所示, 因为网络开环运行, 所以以常开型联络开关 S_7 为界, 取 M 侧供电区域网络进行分析如图 2 所示(N 侧同理)

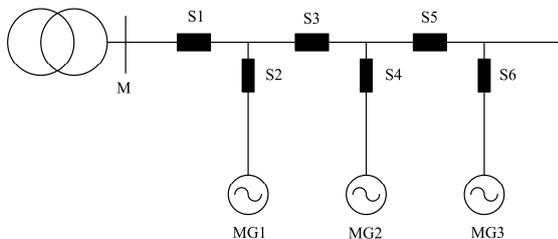


图 2 开环网络 M 侧拓扑结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of open network M side topology

按第 2 节中网络描述矩阵的生成方法生成图 2 所示的网络描述矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

假设故障发生在节点 3、5 之间, 各保护从机将故障信息发送给保护主机, 生成故障信息矩阵 G 为

$$G = \text{diag}[1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad -1]$$

则故障判断矩阵 P 为

$$P = D + G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

在该判断矩阵 P 中: 因为 $P_{33}=1$, $P_{34}=1$, $P_{35}=1$, 且 $P_{44}=-1$, $P_{55}=-1$, 满足判定准则 1), 因此故障发生在节点 3、4、5 之间, 保护主机发送命令跳开断路器 3、4、5, 隔离故障。这与假设相符, 判断准确。

3.2 开环运行时发生多重故障

假设节点 1、3 之间和节点 5、6 之间同时发生故障, 此时故障信息矩阵 G 为

$$G = \text{diag}[1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad -1]$$

判断矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

因为 $P_{11}=1$, $P_{12}=1$, $P_{13}=1$ 且 $P_{22}=-1$, $P_{33}=-1$ 满足准则 1), 同时, $P_{55}=1$, $P_{56}=1$, $P_{66}=-1$ 也满足准则 1)。因此节点 1、2、3 之间以及 5、6 之间有故障, 判断准确。

3.3 闭环运行时发生多重故障

当配网闭环运行且发生多重故障时, 联络开关 S_7 将检测到有电流流过, 此时将联络开关一并纳入网络描述矩阵中, 如图 1 所示的网络结构图, 假设 M 侧系统电源(任意选取)为系统的唯一供电电源, 则闭环运行时按照第 2 节中的方法生成图 1 网络的网络描述矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

假设在节点 5、7 之间和节点 8、10 之间同时发生故障, 保护从机发送故障信息给保护主机, 生成故障信息矩阵为

$$G = \text{diag}[1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1]$$

则判断矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

可以看出: $P_{55} = 1, P_{56} = 1, P_{57} = 1$, 且 $P_{66} = -1, P_{77} = -1$, 节点 5、6、7 之间有故障, 同时有 $P_{88} = 1, P_{89} = 1, P_{8,10} = 1$, 且有 $P_{99} = -1, P_{10,10} = -1$, 节点 8、9、10 之间也有故障, 判断准确。

4 微网投切时算法的适用性分析

微网由于其本身的特性, 在配网中投切比较频繁, 网络结构也随之改变, 因此故障定位算法必须具有一定的自适应性。本文提出的故障定位算法可以满足这个条件。

当某个微网的出口断路器断开, 使得该微网脱网运行时, 保护从机检测到该出口断路器的状态为断开, 因此将不再检测电流信息, 发送信息给保护主机, 在主机中形成网络描述矩阵时将该断路器节点对应的行和列全部赋值为 0, 故障信息矩阵中对

应的节点也赋为 0 即可。

下面以第 3.3 节中闭环运行时且 MG_2 和 MG_4 退出情况下, 在节点 5、7 之间和节点 8、10 之间同时发生故障为例进行验证(开环运行时同理), 此时保护主机根据从机发送的信息生成网络描述矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

故障信息矩阵为

$$G = \text{diag}[1 \quad -1 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad -1]$$

因此故障判断矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

判断矩阵中: $P_{55} = 1, P_{56} = 1, P_{57} = 1$, 且 $P_{66} = -1, P_{77} = -1$ 满足判定准则 1), 故节点 5、6、7 之间有故障, 同时有 $P_{88} = 1, P_{8,10} = 1$, 且有 $P_{10,10} = -1$, 故节点 8、10 之间有故障, 判断同样是准确的。

5 结论

本文提出了一种基于主从式区域纵联保护的故障定位矩阵算法。相比于其他含分布式电源配电网的故障定位算法, 本算法不受网络结构和微网投切的影响具有一定的自适应性, 更符合主动配电网保护控制的发展要求。另外, 本算法不仅可以定位单

重故障，而且可以定位多重故障。算法原理简单，存储空间小，计算速度快，具有很强的实用性。

参考文献

[1] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.

[2] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5, 10.
ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5, 10.

[3] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.

[4] 田书, 刘颖. 高分布式电源渗透的配电网网络保护新原理[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, 33(4): 490-494.
TIAN Shu, LIU Ying. New principle of network protection in distribution networks containing many distribution generations[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2014, 33(4): 490-494.

[5] 李开文, 袁荣湘, 邓翔天, 等. 含分布式电源的环网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 62-68.
LI Kaiwen, YUAN Rongxiang, DENG Xiangtian, et al. Improved matrix algorithm for fault location in ring distribution system with distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(12): 62-68.

[6] 吴宁, 许扬, 陆于平. 分布式发电条件下配电网故障区段定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 77-82.
WU Ning, XU Yang, LU Yuping. New fault section location algorithm for distribution network with DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 77-82.

[7] 林霞, 陆于平, 王联合, 等. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 50-56.
LIN Xia, LU Yuping, WANG Lianhe, et al. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 50-56.

[8] 田果, 黄小莉. 含光伏电源配电网的改进矩阵保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 79-83.

TIAN Guo, HUANG Xiaoli. An improved matrix protection algorithm with distribution network including photovoltaic power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 79-83.

[9] 唐斐, 陆于平. 分布式发电系统故障定位新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 62-68.
TANG Fei, LU Yuping. A new fault location algorithm for distributed generation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 62-68.

[10] 丛伟, 荀堂生, 肖静, 等. 包含多微网的配电系统故障检测算法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(7): 50-53.
CONG Wei, XUN Tangsheng, XIAO Jing, et al. Faulty section detection algorithm for distribution system with multi micro-grids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(7): 50-53.

[11] 田果, 黄小莉, 邓强, 等. 基于图论的智能配电网馈线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 95-99.
TIAN Guo, HUANG Xiaoli, DENG Qiang, et al. Feeder protection based on graph theory in smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 95-99.

[12] 李瑞生. 适用主动配电网的差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 104-109.
LI Ruisheng. Differential protection scheme to apply to active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 104-109.

[13] 李瑞生. 一种基于虚拟节点网络拓扑结构适用于架空线路主动配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 70-75.
LI Ruisheng. An aerial line active distribution network pilot protection scheme based on topology of virtual node[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 70-75.

[14] 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 Limin, LIU Haoming. General matrix algorithm for fault section detection in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 14-17.

收稿日期: 2016-04-06; 修回日期: 2016-07-10

作者简介:

马腾飞(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网的保护与控制技术; E-mail: 506524172@qq.com

高亮(1960-), 男, 硕士, 教授, 长期从事变电站自动化技术和继电保护装置的研究。E-mail: gaoliang@shiep.edu.cn

(编辑 姜新丽)