

Fault Location of Distribution Network with Distributed Generation Based on Improved Matrix Algorithm

Bo Zhang¹, Tao Zheng¹, Yuyuan Huang¹, Ping Zhao²

¹School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing

²Taizhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Taizhou Zhejiang

Email: 1185531211@qq.com, zhengtao@ncepu.edu.cn

Received: Oct. 21st, 2019; accepted: Nov. 6th, 2019; published: Nov. 13th, 2019

Abstract

The access of distributed generation (DG) puts forward higher requirements for fault location of distribution network. In order to solve the problem that the T-wiring segment in the distribution network with DG may lead to the misjudgment of the matrix algorithm fault location, the traditional matrix algorithm is improved. Firstly, based on the topology connection relationship of the distribution network, and the feeder terminal unit (FTU) uploading fault overcurrent information, the network description matrix and the fault information matrix are constructed, and the fault judgment matrix is calculated. Secondly, if the FTU uploading information of the two sub-nodes of the T-wiring segment in the distribution network is different, the fault judgment matrix is corrected; finally, the fault section is located by using the fault location criterion. The results of the example show that the proposed method can locate fault sections accurately when single and multiple faults occur in the case of T-wiring segment in the distribution network with DG.

Keywords

Distribution Network, Fault Location, Improved Matrix Algorithm, T-Wiring Segment, Distributed Generation

基于改进矩阵算法的含分布式电源配电网故障定位

张波¹, 郑涛¹, 黄予园¹, 赵萍²

¹华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

²国网浙江省电力有限公司台州供电公司, 浙江 台州

Email: 1185531211@qq.com, zhengtao@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2019年10月21日; 录用日期: 2019年11月6日; 发布日期: 2019年11月13日

摘要

分布式电源(Distributed generation, DG)的接入对配电网故障定位提出了更高的要求。为了解决含DG配电网中T接区段可能导致基于传统矩阵算法的故障定位错判的问题,对传统矩阵算法进行了改进。首先,基于配电网拓扑连接关系和馈线终端单元(Feeder terminal unit, FTU)上传故障过电流信息,构建网络描述矩阵和故障信息矩阵,计算得到故障判断矩阵;其次,若配电网中T接区段的两个子节点FTU上传信息不同,修正故障判断矩阵;最后,利用故障定位判据定位故障区段。算例结果表明,本文所提方法在含DG配电网存在T接区段情况下发生单重、多重故障时,仍能准确地定位故障区段。

关键词

配电网, 故障定位, 改进矩阵算法, T接区段, 分布式电源

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

配电网是电力系统中与用电负荷直接相连的部分,在发生短路故障时能准确地定位并隔离故障区段,对提高配电网供电可靠性具有重要意义[1] [2]。目前,随着分布式发电技术迅速发展,越来越多分布式电源(Distributed generation, DG)接入配电网,使配电网由一个单电源辐射网变为多电源复杂网络。含DG的配电网结构复杂,输出功率双向流动,导致传统故障定位方法失效[3] [4]。

为了实现含DG配电网的故障定位,国内外专家提出了诸如矩阵算法、优化算法等故障定位方法。矩阵算法故障定位原理简单、定位速度快,具有较好的应用前景[5]。

文献[6]提出配电网故障定位的统一矩阵算法,能够准确定位并隔离故障区段,但需要矩阵相乘和规格化处理运算,计算过程复杂,处理时间长,不利于快速定位故障区段。文献[7]提出的矩阵新算法通过假定全网统一正方向,适用于多电源复杂配电网的故障定位,避免了矩阵相乘和规格化处理等复杂运算,提高了定位速度,但不能定位馈线末端区段。文献[8]通过增加故障定位判据,解决了文献[7]中配电网馈线末端故障不能定位的问题。文献[9]基于上述文献,以联络开关为界对配电网划分区域,提高故障定位速度。文献[10]对文献[9]中网络描述矩阵的构建方式进行了改进,使网络描述矩阵形成更快,稀疏性更强,在多电源多重故障情况下能够快速、准确的定位故障区段。但若配电网中存在T接区段时,文献[10]所提故障定位方法可能错判。

本文在文献[10]传统矩阵算法基础上,提出了基于改进矩阵算法的含DG配电网故障定位方法,不仅能够实现含DG配电网发生单重、多重故障时准确地定位故障区段,而且可以有效避免T接区段导致的故障定位错判问题。

2. 基于传统矩阵算法的配电网故障定位基本原理

基于传统矩阵算法的含DG配电网故障定位原理为:配电网发生短路故障时,故障区段的父节点与子节点馈线终端单元(Feeder terminal unit, FTU)上传信息不同,此特征可以作为配电网故障定位判据。其中,对于构成某区段的开关,父节点定义为沿着全网正方向经过该区段的第一个开关,其余开关都定义

为子节点。因此，若某区段的父、子节点 FTU 上传信息不同，则可以判定该区段为故障区段。传统矩阵算法故障定位首先建立网络描述矩阵 D 和故障信息矩阵 G ；然后二者相加得到故障判断矩阵 P ；最后利用上述故障区段特征形成故障定位判据，分析矩阵 P 中相关元素完成故障定位。

2.1. FTU 上传信息机制

根据配电网中断路器、分段开关以及联络开关，可以将配电网划分为若干馈线区段。配电网故障定位就是在发生短路故障时，确定最小的馈线区段，即故障区段。随着配电自动化的发展，配电网中的断路器、分段开关以及联络开关都装设了 FTU，用于实时监控配电网状态。当配电网发生短路故障时，FTU 检测到故障过电流并将故障信息上传至配电网控制主站，为矩阵算法故障定位提供了前提。

当含 DG 配电网发生短路故障时，由系统主电源和故障点下游 DG 提供的故障过电流方向相反。为了区分上述故障过电流方向以适应 DG 接入情况下配电网故障定位，规定从系统侧主电源到馈线末端或 DG 的方向为全网正方向。含 DG 配电网中各 FTU 根据是否检测到故障过电流及其方向是否与全网正方向一致，共设置“-1, 0, 1”三种工作模式[10]：若某 FTU 检测到故障过电流且其方向与全网正方向一致，则该 FTU 向控制主站上传信息为“1”；若某 FTU 检测到故障过电流且其方向与全网正方向相反，则上传“-1”；若某 FTU 未检测到故障过电流，则上传“0”。

2.2. 网络描述矩阵 D

含 DG 的配电网中开关包括断路器、分段开关以及联络开关，根据图论相关知识，将整个配电网看作一个图，而各断路器、分段开关以及联络开关看作节点。为了描述各节点之间的拓扑连接关系，建立网络描述矩阵 D 。网络描述矩阵 D 为一个方阵，维度为配电网中所有节点的总数。若节点 i 与节点 j 分别为某馈线区段的父节点与子节点，置矩阵 D 中非对角元素 $d_{ij} = 1$ ；否则，将其置其为 0。网络描述矩阵 D 构造规则如下：

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 分别为某区段的父、子节点} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (1)$$

2.3. 故障信息矩阵 G

为了反映含 DG 配电网中各节点是否流经故障过电流，根据第 2.2 节，构造故障信息矩阵 G ，其为与网络描述矩阵同型的对角矩阵，对角线元素依次为各 FTU 上传信息。故障信息矩阵构造规则如下：

$$g_{ii} = \begin{cases} -1 & \text{节点 } i \text{ 处 FTU 检测到过电流且方向与全网正方向相反} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 处 FTU 未检测到过电流} \\ 1 & \text{节点 } i \text{ 处 FTU 检测到过电流且方向与全网正方向相同} \end{cases} \quad (2)$$

2.4. 故障判断矩阵 P

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 。故障判断矩阵 P 的非对角元素表征配电网中各节点之间的拓扑连接关系；其对角元素表征各节点 FTU 检测到的故障过电流信息。

2.5. 故障定位判据

含 DG 配电网发生短路故障时，故障区段的父、子节点 FTU 上传信息不同，表明有故障过电流注入该区段。因此，根据故障区段的父、子节点 FTU 上传信息不同的特点构建故障定位判据。基于矩阵算法的故障定位本质就是：根据故障定位判据，对故障判断矩阵相关元素进行分析，满足判据条件的馈线区段即为故障区段。矩阵算法故障定位判据如下：

条件一：父节点 i 、子节点 j 构成的双端馈线区段发生短路故障

1) 配电网发生单重故障：若 $p_{ii} = 1$ ，所有的 $p_{ij} = 1$ ($i \neq j$)，有 $p_{jj} = 0$ 或 -1

2) 配电网发生多重故障：若 $p_{ii} = 0$ ，所有的 $p_{ij} = 1$ ($i \neq j$)，有 $p_{jj} = -1$

条件二：父节点 i 构成的末端馈线区段发生短路故障

1) 配电网发生单重故障：若 $p_{ii} = 1$ ，所有的 $p_{ij} = 0$ ($i \neq j$)

由上述判据可知，文中矩阵算法不仅可以满足双端馈线区段和末端馈线区段的故障定位，而且在配电网发生单重、多重故障时也可以定位故障区段。

但是，配电网中存在大量 T 接区段，利用上述传统矩阵算法判断 T 接区段状态时，需要两次故障定位过程；若两次定位结果自相矛盾，就会导致故障定位错判。因此，需要对矩阵算法故障定位的方法改进，使其能够满足含 DG 配电网存在 T 接区段情况下发生单重、多重故障时，仍然能够定位故障区段。

3. 基于改进矩阵算法的配电网故障定位基本原理

3.1. T 接区段对故障定位的影响

配电网由于与用电负荷直接相连，其结构复杂，T 接区段较多。当含 DG 配电网发生短路故障时，若配电网中存在 T 接区段，则可能导致故障定位错判。

如图 1 所示，父节点 i 与子节点 j 、 k 共同构成 T 接区段(a)，图中虚线箭头表示规定的全网正方向。图 1(a)中父节点 i 上游连接系统侧主电源，子节点 j 下游连接 DG。当子节点 k 下游某馈线区段发生短路故障时，短路电流流经方向如图 1(a)实线箭头所示。根据前述传统矩阵算法定位得出，父节点 i 与子节点 j 之间 T 接区段(a)为故障区段，父节点 i 与子节点 k 之间 T 接区段(a)为非故障区段，定位结果相矛盾。而实际上 T 接区段(a)为正常区段，传统矩阵算法故障定位错判。同理，图 1(b)中父节点 i 上游某区段和 T 接区段(a)发生双重故障，子节点 j 下游连接 DG。利用传统故障定位方法定位得出，父节点 i 与子节点 j 之间 T 接区段(a)为故障区段，父节点 i 与子节点 k 之间 T 接区段(a)为非故障区段，定位结果相矛盾，导致故障定位错判。

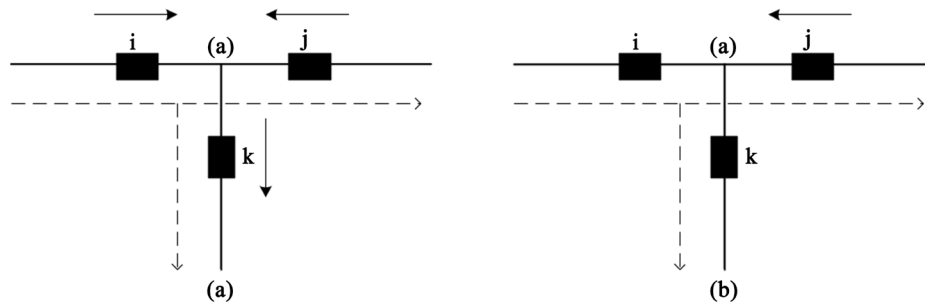


Figure 1. Simplified diagram of T-wiring segment of distribution network with DG

图 1. 含 DG 配电网 T 接区段简化图

通过分析，得出如下结论：含 DG 配电网发生短路故障时，若 T 接区段两个子节点 FTU 上传信息不同，可能导致该区段定位结果自相矛盾，从而导致错判。因此，需要对矩阵算法改进，使其能够适应含 DG 配电网中存在 T 接区段情况下的故障定位。

3.2. 改进矩阵算法基本原理

矩阵算法改进思想为：

- 1) 通过故障判断矩阵每行的非对角元素，判断哪些节点共同构成 T 接区段；
- 2) 通过故障判断矩阵中每行的对角元素，判断 T 接区段两个子节点 FTU 上传信息是否相同；

3) 若 T 接区段两个子节点 FTU 上传信息不同, 则利用等效的思想, 在满足 T 接区段状态不变的前提下, 将两个子节点 FTU 上传信息修正使二者相同, 即修正对应的故障判断矩阵对角元素。修正原则为: 若两个子节点 FTU 上传信息不同, 只要有一个为“1”, 二者都修正为“1”; 若没有“1”, 只要有一个“-1”, 二者都修正为“-1”;

4) 对故障判断矩阵修正后, 利用矩阵算法故障定位判据, 判断该 T 接区段是否为故障区段; 该 T 接区段判断结束后, 为了避免影响其他区段定位结果, 故障判断矩阵修正的对角元素恢复原值。

3.3. 改进矩阵算法故障定位流程

改进矩阵算法故障定位流程图如图 2 所示:

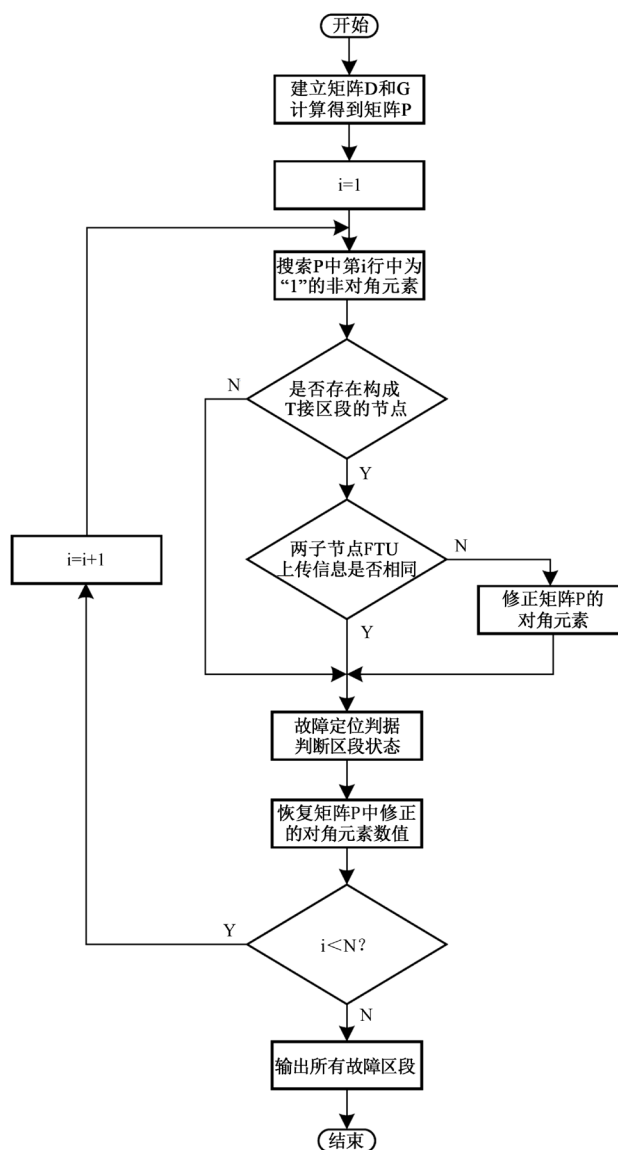


Figure 2. Flow chart of fault location of distribution network with DG
图 2. 含 DG 配电网故障定位流程图

基本步骤为:

步骤 1: 根据配电网各节点拓扑连接关系以及 FTU 上传故障信息形成网络描述矩阵 D 和故障信息矩阵 G , 二者矩阵相加得到故障判断矩阵 P ;

步骤 2: 对故障判断矩阵第一行元素进行分析, 根据第一行的非对角元素判断是否存在构成 T 接区段的节点;

步骤 3: 在步骤 2 判断基础上, 若没有构成 T 接区段的节点, 利用故障定位判据直接判断馈线区段状态;

步骤 4: 在步骤 2 判断基础上, 若存在构成 T 接区段的节点且两个子节点 FTU 上传信息相同, 利用故障定位判据直接判断该 T 接区段状态;

步骤 5: 在步骤 2 判断基础上, 若存在构成 T 接区段的节点且两个子节点 FTU 上传信息不同, 首先修正故障判断矩阵相关对角元素, 然后利用故障定位判据判断该 T 接区段状态;

步骤 6: 恢复故障判断矩阵中修正的对角元素数值;

步骤 7: 判断故障判断矩阵 N 行元素是否都分析完毕。若没有分析完, 转到步骤 2 对下一行继续分析; 若分析完毕, 输出所有故障区段, 故障定位结束。

4. 算例分析

如图 3 为含 DG 配电网简化模型, 配电网中接入两个 DG, S1 为系统侧主电源变电站二次侧出口断路器, S8、S10 为分布式电源出口断路器, 其余开关均为分段开关。

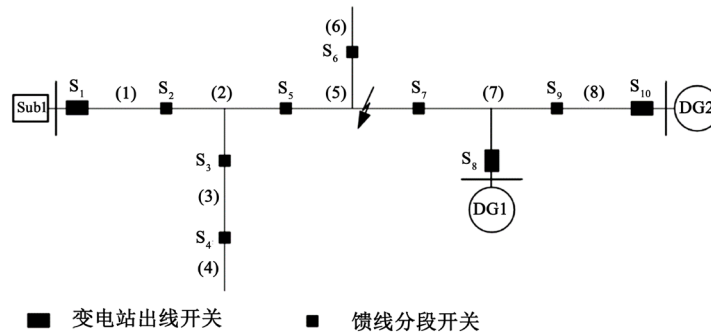


Figure 3. Simplified diagram of distribution network with DG
图 3. 含 DG 配电网简化图

假设图 3 所示配电网 T 接区段(5)发生了短路故障, 通过对比传统矩阵算法和本文所提的改进矩阵算法故障区段定位结果, 证明本文方法的有效性。

图 3 配电网 T 接区段(5)发生了短路故障时, 各开关 FTU 上传故障过电流信息为: [1 1 0 0 1 0 -1 -1 -1 -1], 首先建立网络描述矩阵 D 为:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

然后建立故障信息矩阵 G 为:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

最后计算得到故障判断矩阵 P 为:

$$P = D + G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用传统的矩阵算法故障定位过程为:

1) $p_{11} = 1$, $p_{12} = 1$, $p_{22} = 1$, 节点 1,2 构成的双端馈线区段(1)正常;

2) $p_{22} = 1$, $p_{23} = p_{25} = 1$, 节点 2,3,5 构成 T 接区段(2);

$p_{22} = 1$, $p_{23} = 1$, $p_{33} = 0$, T 接区段(2)故障;

$p_{22} = 1$, $p_{25} = 1$, $p_{55} = 1$, T 接区段(2)正常; 综上所述, 可得 T 接区段(2)错判。

3) $p_{33} = 0$, $p_{34} = 1$, $p_{44} = 0$, 节点 3,4 构成的双端馈线区段(3)正常;

4) $p_{55} = 1$, $p_{56} = p_{57} = 1$, 节点 5,6,7 构成 T 接区段(5);

$p_{55} = 1$, $p_{56} = 1$, $p_{66} = 0$, T 接区段(5)故障;

$p_{55} = 1$, $p_{57} = 1$, $p_{77} = -1$, T 接区段(5)故障; 综上所述, 可得 T 接区段(5)故障。

因此, 可以得出如下结论: 利用传统的矩阵算法可以准确判断双端馈线区段和末端馈线区段的状态;

但若配电网中存在 T 接区段时, 则可能导致传统的矩阵算法故障定位错判, 导致定位失败。

考虑配电网中存在的 T 接区段, 利用本文所提改进的矩阵算法进行故障定位, 双端馈线区段和末端馈线区段状态的判断过程与上述传统矩阵算法判断过程完全一致, 这里仅仅分析 T 接区段状态的判断:

1) $p_{22} = 1$, $p_{23} = p_{25} = 1$, 节点 2,3,5 构成 T 接区段(2);

$p_{33} = 0$, $p_{55} = 1$, 两个子节点 3,5 处 FTU 上传信息不同;

$p_{33} = p_{55} = 1$, 两个子节点 3,5 处 FTU 上传信息修正;

$p_{22} = 1$, $p_{23} = 1$, $p_{33} = 1$, T 接区段(2)正常;

$p_{22} = 1$, $p_{25} = 1$, $p_{55} = 1$, T 接区段(2)正常; 综上所述, 可得 T 接区段(2)正常。

- 2) $p_{55} = 1$, $p_{56} = p_{57} = 1$, 节点 5,6,7 构成 T 接区段(5);
 $p_{66} = 0$, $p_{77} = -1$, 两个子节点 6,7 处 FTU 上传信息不同;
 $p_{66} = p_{55} = -1$, 两个子节点 6,7 处 FTU 上传信息修正;
 $p_{55} = 1$, $p_{56} = 1$, $p_{66} = -1$, T 接区段(5)故障;
 $p_{55} = 1$, $p_{57} = 1$, $p_{77} = -1$, T 接区段(5)故障; 综上考虑, 可得 T 接区段(5)故障。

由改进矩阵算法故障定位, 得出故障区段为开关 5、6、7 构成的 T 接区段(5)。通过与传统矩阵算法故障定位对比可知, 本文所提基于改进矩阵算法故障定位方法可以避免 T 接区段导致的含 DG 配电网故障定位错判, 具有一定的有效性。

对双端馈线区段、末端馈线区段和 T 接区段设置单重故障以及多重故障, 进行故障定位算例测试, 结果如表 1 所示:

Table 1. Fault location simulation result

表 1. 故障定位仿真结果

序号	预设故障区段	FTU 上传故障信息	定位过程	定位结果
1	区段(8)	[1 1 0 0 1 0 1 -1 1 -1]	$p_{99} = 1$, $p_{9,10} = 1$, $p_{10,10} = -1$	区段(8)
2	区段(6)	[1 1 0 0 1 1 -1 -1 -1 -1]	$p_{66} = 1$	区段(6)
3	区段(5)	[1 1 0 0 1 0 -1 -1 -1 -1]	$p_{55} = 1$, $p_{56} = p_{57} = 1$, $p_{66} \neq p_{77}$, $p_{66} = p_{77} = -1$, $p_{55} = 1$, $p_{56} = 1$, $p_{66} = -1$ $p_{55} = 1$, $p_{57} = 1$, $p_{77} = -1$	区段(5)
4	区段(7)	[1 1 0 0 1 0 1 -1 -1 -1]	$p_{77} = 1$, $p_{78} = p_{79} = 1$, $p_{88} = p_{99}$, $p_{77} = 1$, $p_{78} = 1$, $p_{88} = -1$ $p_{77} = 1$, $p_{79} = 1$, $p_{99} = -1$	区段(7)
5	区段(1)(8)	[1 -1 0 0 -1 0 -1 -1 1 -1]	$p_{11} = 1$, $p_{12} = 1$, $p_{22} = -1$ $p_{99} = 1$, $p_{9,10} = 1$, $p_{10,10} = -1$	区段(1) 区段(8)

5. 结语

本文针对含 DG 配电网中存在的 T 接区段可能导致传统矩阵算法故障定位错判的问题, 对传统矩阵算法进行改进, 提出一种基于改进矩阵算法的含 DG 配电网故障定位方法。通过算例分析, 验证了本文所提方法不仅能够实现含 DG 配电网发生单重、多重故障时准确地定位故障区段, 而且可以有效避免 T 接区段可能导致的故障定位错判, 具有一定的实用性。

参考文献

- [1] 马士聪, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119-124.
- [2] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 7-13.
- [3] 刘健, 张小庆, 同向前, 等. 含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 36-42.

-
- [4] 孙景钊, 陈荣柱, 蔡轶, 等. 含分布式电源配电网的故障定位新方案[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1645-1650.
 - [5] 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.
 - [6] 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(1): 31-33.
 - [7] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障定位的一种新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 48-50.
 - [8] 蒋秀洁, 熊信银, 吴耀武, 等. 改进矩阵算法及其在配电网故障定位中的应用[J]. 电网技术, 2004(19): 63-66.
 - [9] 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(5): 22-25.
 - [10] 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.