

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190587

基于子网络划分的含 DG 配电网故障区段定位

郭利爽¹, 李凤婷¹, 赵新利², 周嘉阳³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆兵电能源研究院股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830026; 3. 国网江西电力有限公司吉安供电公司, 江西 吉安 343009)

摘要: 针对含分布式电源配电网的故障区段定位困难的问题, 提出一种基于子网络划分的配电网故障区段定位算法。该算法分为三步: 第一步构建配电网的拓扑网络描述矩阵; 第二步将结构复杂的配电网划分为多个子网络, 并获取各子网络的方向性描述矩阵和故障信息向量, 进而建立故障定位判别矩阵; 第三步根据判别矩阵进行故障定位。案例分析了配电网发生单一故障、故障路径部分重叠及故障路径完全重叠的多重故障时的适应性, 结果表明了所提算法的有效性。

关键词: 含 DG 配电网; 子网络划分; 矩阵算法; 故障区段定位

Fault section location for distribution network with DG based on sub-network partition

GUO Lishuang¹, LI Fengting¹, ZHAO Xinli², ZHOU Jiayang³

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Xinjiang Military Power Research Institute Co., Ltd., Urumqi 830026, China;

3. Ji'an Power Supply Company, State Grid Jiangxi Electric Power Company, Ji'an 343009, China)

Abstract: It is difficult to locate fault section of distribution network with distributed generation. Aiming at this problem, a fault location algorithm based on sub-network partition is proposed. The algorithm works in three stages: in the first stage, it constructs the topological network description matrix of distribution network; in the second stage, it divides the complex distribution network into several sub-networks, then obtains the directional description matrix and fault information vector of each sub-network, furthermore, establishes the fault location discrimination matrix; in the last stage, it locates the fault section according to the discrimination matrix. The adaptability of a single point fault, fault paths partial and complete overlap of multipoint faults in distribution network is analyzed by case study. The results show the effectiveness of the proposed algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51767023).

Key words: distribution network with DG; sub-network partition; matrix algorithm; fault section location

0 引言

分布式电源(Distribution Generation, DG)广泛接入配电网可提高系统安全性和可靠性、降低线路损耗、提高能源利用率, 但 DG 的接入也使辐射状配电网由原来的单电源供电网络变为多电源供电的复杂网络, 导致基于馈线终端(FTU)的配电网故障区段定位方法更加复杂^[1-4]。含 DG 配电网发生故障后, 快速准确的定位方法可有效缩短故障隔离与恢复供电时间, 提高配电网供电可靠性。因此, 寻找

快速可靠的故障区段定位方法对含 DG 配电网具有重要意义^[5-8]。

目前, 国内外专家与学者针对含 DG 配电网的故障区段定位方法主要包括人工智能算法和矩阵算法。人工智能算法是将故障区段定位问题转换为优化问题进行求解。文献[9-12]考虑了 DG 接入配电网的影响, 重新确定了馈线开关状态信息的编码, 提出采用粒子群改进算法定位故障区段。该算法原理简单, 搜索速度快, 容错性强, 可快速准确定位故障区段, 但易出现早熟和陷入局部最优。文献[13-18]提出采用遗传算法、蚁群算法和萤火虫算法等智能算法进行故障区段定位。上述算法均可实现配电网

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51767023)

故障区段的准确定位, 具有较强的纠错能力, 但智能算法还处于发展中, 还存在或多或少的缺陷, 如不易收敛、全局搜索能力差等。矩阵算法是将网络描述矩阵和故障信息向量相乘形成判据矩阵, 进而定位故障区段。文献[19-20]对分布式电源接入配电网方式及故障电流特性进行了分析, 提出了基于改进矩阵算法的新判据, 能对故障情况做出准确判断; 文献[21-22]提出故障定位的统一判据, 但只适用于定位单一故障; 文献[23-26]重新构造了网络描述矩阵, 提出一种新的故障区段定位判据, 可解决单一故障和多重故障定位问题, 但需向量相乘, 计算量大, 速度慢。

虽然文献[27]提出通过断开联络开关将配电网自动划分为多个子网络, 进而对各子网络进行故障定位, 但改变了配电网的拓扑结构, 对于含 DG 配电网并不适用。因此, 本文提出一种适用于含 DG 配电网的基于子网络划分的故障区段定位新算法。该算法以网络描述矩阵为基础, 提出一种子网络划分新算法, 同时, 考虑到因故障信息向量不准确可能造成误判的问题, 提出一种可反映实际故障电流的子网络故障信息向量自动生成算法; 根据子网络描述矩阵和故障信息向量构建判别矩阵, 进而快速准确地定位出故障区段。最后以 35 节点含 DG 配电网为例, 算例分析证明了该算法的有效性。

1 构建网络描述矩阵

配电网的网络图是依次描绘出网络的各节点并按配电网结构进行连接所形成的图。网络图不仅可以形象直观地反映配电网结构而且具有很好的扩展性, 适用于结构复杂的配电网。本文在建立网络图时, 将线路上的开关设备等效为节点(node), 且每个开关设备均配备有 FTU, 将相邻节点间的馈线和配电变压器等等效为图的边, 简化后的配电网如图 1 所示。配电网含有一个主电源(S)和两个分布式电源(DG), 其中 10 个线路开关设备和 3 个控制开关将所有馈线分成 13 个区段, 数字为开关编号, 带圆圈的数字为区段编号。

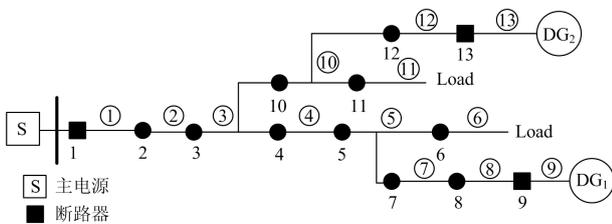


图 1 含 DG 配电网

Fig. 1 Distribution network with DG

对于含有 m 个馈线区段和 n 个开关节点的网络的图可以用网络描述矩阵 M 来表示馈线区段与开关节点的邻接关系, M 的每一行表示一个馈线区段, 每一列表示一个开关节点, 用 1 表示两者相邻接, 0 表示两者不相邻接, 图 1 中网络的描述矩阵可以表示为

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 \end{matrix} \\ \begin{matrix} ① \\ ② \\ ③ \\ ④ \\ ⑤ \\ ⑥ \\ ⑦ \\ ⑧ \\ ⑨ \\ ⑩ \\ ⑪ \\ ⑫ \\ ⑬ \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

图 2 配电网描述矩阵

Fig. 2 Description matrix of distribution network

2 故障定位原理

在配电网故障区段定位中, 矩阵算法因原理简单而被广泛研究。本文以网络描述矩阵为基础, 通过子网络划分算法将含 DG 的配电网拆分为多个结构简单的子网络, 然后将各子网络的方向性描述矩阵和故障信息向量相乘构建判据矩阵。

2.1 子网络划分

故障发生后, 将复杂配电网划分为若干个子网络, 之后对各子网络进行故障定位, 可缩短对停电负荷的恢复供电时间, 因此, 子网络划分是准确定位故障区段的关键。

本文以全网描述矩阵 M 为基础, 提出一种划分子网络的方法, 即确定各子网络所包含的开关和区段。具体方法步骤如下。

第一步: k 表示开关编号, j 表示区段编号, d_j 表示与 j 区段相连接的开关集, l_j 表示区段集, d_{dj} 为 d_j 的维度, i 表示第 i 个子网络, d_{Ddi} 为子网络开关集的维度, d_{Dli} 为子网络区段集的维度, d_{Di} 为子网络维度, 初始状态下 d_j 与 l_j 均为空集, d_{dj} 、 d_{Ddi} 、 d_{Dli} 、 d_{Di} 的值均为 0, p 、 q 为循环控制变量。

第二步: 对 M 按照区段编号进行搜索, 判断搜索到的开关是否和区段相连, 若是, 则将其存入 d_j , 并令 $d_{dj}=d_{dj}+1$, 同时, 将区段 j 存入 l_j 。

第三步: 判断与区段 j 连接的开关节点数是否

大于等于 3，若否，直接将 d_j 与 l_j 存入子系统 i 中，若是，说明存在分支，进一步判断子系统是否已存在元素，若否，则将 d_j 与 l_j 存入子系统 i 中，若是，则令 $i=i+1$ ，然后将 d_j 与 l_j 存入子系统 i 中。

第四步：判断所有的区段是否搜索完，若是，结束整个过程；若否，继续搜索下一个区段。

图 3 所示为子网络划分的搜索算法流程。

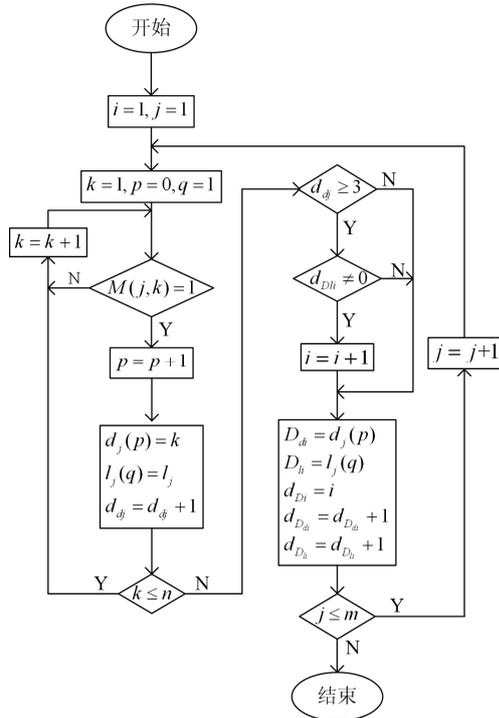


图 3 子网络的形成方法

Fig. 3 Formation method of sub-networks

以图 1 所示配电网为例，采用上述子网络划分方法，可得如图 4 所示的 4 个子网络。

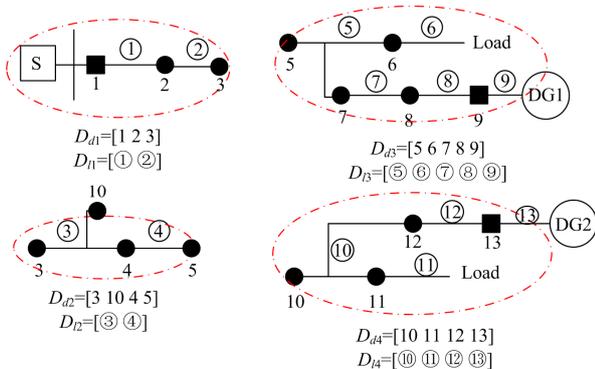


图 4 配电网子网络

Fig. 4 Sub-networks of distribution network

2.2 子网络方向性描述矩阵的形成

在上节基础上，设计了子网络方向性描述矩阵生成方法。该方法形成的是表示开关和区段邻接关

系的矩阵，且该矩阵可体现开关和区段之间的方向关系，矩阵产生方法步骤如下。

第一步：确定第 i 个子网络的非方向性描述矩阵 M_i 。

(a) 确定 M_i 的行列数，即矩阵维度。每个描述矩阵的规模由开关个数与区段个数决定，由 2.1 节可知，第 i 个子网络的开关集为 D_{di} ，区段集为 D_{li} ，因此， M_i 的维度为 $d_{D_{di}} \times d_{D_{li}}$ 。

(b) 确定 M_i 的元素，其元素可直接根据全网描述矩阵 M 得到，具体元素可表示为 $m_i(j, k) = m(l_i(j), d_i(k))$ 。

第二步：对矩阵 M_i 的第一列元素进行判断，若为 0，则继续判断下一个元素，若为 1，则将该元素“1”所在行的其他元素“1”修正为“-1”，直到判断完第一列所有元素。

第三步：对矩阵 M_i 的行进行判断，依次判断每行元素“1”的个数，若多于 1，则将该行第一个元素“1”保留下来，其余元素“1”均修正为“-1”，直到所有的行都判断完。

仍以图 1 所示配电网为例，采用上述方法形成的子网络方向性网络描述矩阵如图 5 所示。

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \end{matrix} \quad M_3 = \begin{bmatrix} 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \textcircled{5} \\ \textcircled{6} \\ \textcircled{7} \\ \textcircled{8} \\ \textcircled{9} \end{matrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 5 & 10 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \textcircled{3} \\ \textcircled{4} \end{matrix} \quad M_4 = \begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 & 13 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \textcircled{10} \\ \textcircled{11} \\ \textcircled{12} \\ \textcircled{13} \end{matrix}$$

图 5 子网络描述矩阵

Fig. 5 Description matrix of sub-networks

2.3 子网络故障信息的形成

配电网发生故障时，安装于柱上开关的各 FTU 可检测故障过电流，若超过整定值，则 FTU 将故障信息上传至控制中心。DG 的接入使故障时电流方向不唯一，因此首先需要规定系统主电源单独供电时的电流方向为正方向。定义一个 $1 \times N$ 维的矩阵向量 G 表示故障信息，规定 $G_i=1$ 表示开关 i 检测到正方向过电流， $G_i=0$ 表示开关 i 没有检测到过电流或检测到反方向过电流。

当发生多重故障时，上述故障信息形成方法仅能反映开关的故障状态，无法反映流经开关的故障电流大小，如图 1 中区段⑥和⑩均故障，开关 3、4、

10 的故障信息均为“1”, 而实际流经开关 3 的电流应为流经开关 4 和 10 的电流和。考虑到上述情况可能造成误判, 本文设计了一种可以反映实际故障情况的子网络故障信息自动生成方法, 大致思路为: 从子网络始端区段 j 开始, 利用子网络描述矩阵 M_i

确定区段 j 下游所联节点 (n_1, n_2, \dots, n_t) , 若 $t > 1$, 将 G_i 中 n_1, n_2, \dots, n_t 所对应的故障信息值分别进行 G_i/t 处理, 若 $t < 1$, 则进行下一区段的判断, 当所有子网络的区段判断完后结束。方法具体步骤流程图如图 6 所示。

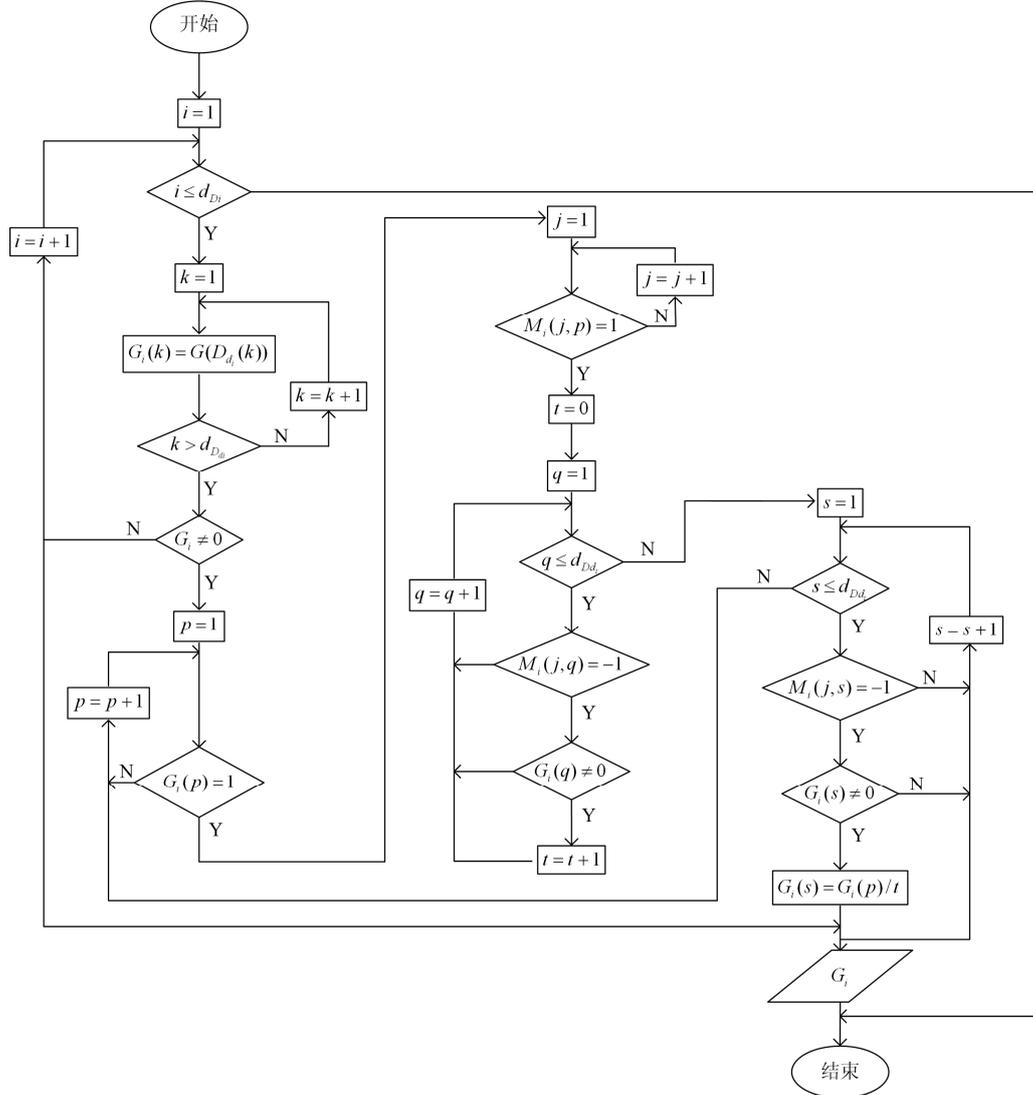


图 6 子网络故障信息形成方法

Fig. 6 Formation method of sub-network fault information

假设图 1 中的线路区段 8 和 11 故障, 采用上述方法所形成的各子网络故障信息如式(1)。

$$\begin{cases} G_1 = [1 \ 1 \ 1]^T \\ G_2 = [1 \ 1/2 \ 1/2 \ 1/2]^T \\ G_3 = [1/2 \ 0 \ 1/2 \ 1/2 \ 0]^T \\ G_4 = [1/2 \ 1/2 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (1)$$

2.4 故障定位的判据

令 P_i 为子系统故障定位矩阵, 该矩阵中非零元

素所对应的区段即为故障区段, 结合子网络方向性描述矩阵 M_i 和故障信息 G_i , 构建如式(2)所示的故障定位判据。

$$P_i = M_i G_i \quad (2)$$

仍以图 1 中线路区段 8 和 11 故障为例, 将各子网络采用式(2)进行判断, 经判断, 子网络 1 和 2 均为零矩阵, 子网络 3 和 4 的判据矩阵分别为 $P_3 = [0, 0, 0, 1/2, 0]^T$ 、 $P_4 = [0, 1/2, 0, 0]^T$, 分别将判据矩阵与子网络 3 和 4 的区段集进行匹配, 与 P_3 中非零元

素对应的区段为“8”，与 P_4 中非零元素对应的区段为“11”，即故障区段为“8”和“11”，结果与假设一致。

3 算例分析

3.1 子网络划分

本节以图 7 所示的 35 节点含 DG 配电网为例对所提方法的有效性进行测试。配网包含一个主电源(S)和四个分布式电源(DG₁—DG₄)，其中有 35 个节点、35 个区段，编号如图 7 所示，网络描述矩阵参见附录。

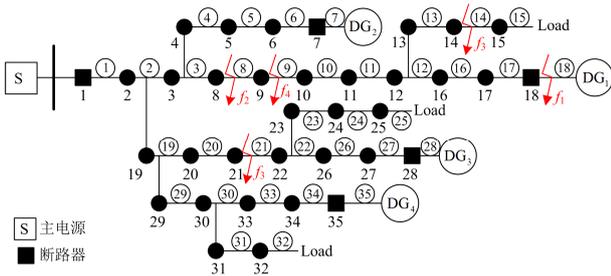


图 7 算例配电网

Fig. 7 Distribution network of test example

对算例配电网采用子网络自动化划分方法，可得各子网络如图 8 所示。

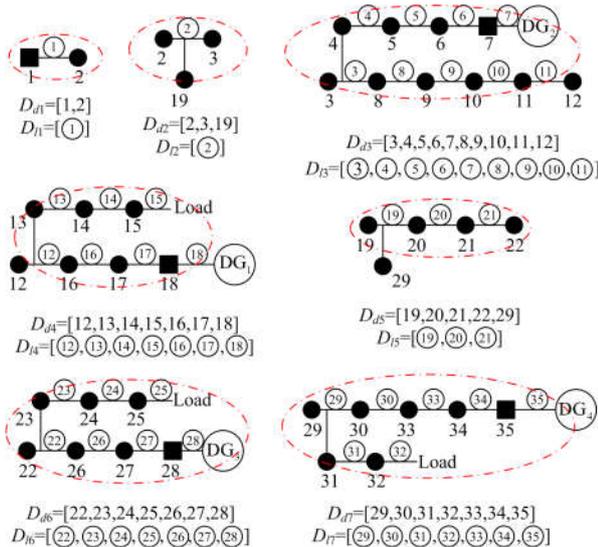


图 8 算例子网络

Fig. 8 Sub-networks of test example

对全网描述矩阵采用子网络方向性描述矩阵形成方法，得各子网络方向性描述矩阵如图 9 所示。

3.2 故障定位

3.2.1 单一故障

假设区段 18 发生故障，FTU 上传的全网故障

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \textcircled{1} \quad M_2 = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 19 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \textcircled{2}$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \textcircled{3} \\ \textcircled{4} \\ \textcircled{5} \\ \textcircled{6} \\ \textcircled{7} \\ \textcircled{8} \\ \textcircled{9} \\ \textcircled{10} \\ \textcircled{11} \end{matrix}$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \textcircled{12} \\ \textcircled{13} \\ \textcircled{14} \\ \textcircled{15} \\ \textcircled{16} \\ \textcircled{17} \\ \textcircled{18} \end{matrix} \quad M_5 = \begin{bmatrix} 19 & 20 & 21 & 22 & 29 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \textcircled{19} \\ \textcircled{20} \\ \textcircled{21} \end{matrix}$$

$$M_7 = \begin{bmatrix} 29 & 30 & 31 & 32 & 33 & 34 & 35 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \textcircled{29} \\ \textcircled{30} \\ \textcircled{31} \\ \textcircled{32} \\ \textcircled{33} \\ \textcircled{34} \\ \textcircled{35} \end{matrix} \quad M_6 = \begin{bmatrix} 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \textcircled{22} \\ \textcircled{23} \\ \textcircled{24} \\ \textcircled{25} \\ \textcircled{26} \\ \textcircled{27} \\ \textcircled{28} \end{matrix}$$

图 9 子网络方向性描述矩阵

Fig. 9 Directivity description matrix of sub-network

信息向量如式(3)，对其采用子网络故障信息向量自动形成方法所产生的各子网络故障信息向量如式(4)。

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\begin{cases} G_1 = [1 \ 1]^T \\ G_2 = [1 \ 1 \ 0]^T \\ G_3 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \\ G_4 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ G_5 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ G_6 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ G_7 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (4)$$

求得各子网络故障信息向量 G_i 后，可以判断非零向量所对应的子网络可能包含故障区段，将非零向量 G_i 和对应的 M_i 代入式(2)，结果如式(5)所示，对比区段集可确定故障区段为 18。

$$\begin{cases} P_{1,2} = [0] \\ P_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \\ P_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (5)$$

假设主线路区段 8 故障, FTU 上传的全网故障信息向量如式(6), 各子网络故障信息如式(7)所示。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_1 = [1 \ 1]^T \\ \mathbf{G}_2 = [1 \ 1 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_3 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_5 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_6 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_7 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 子网络 4、5、6、7 一定不存在故障区段, 因此, 将非零故障信息向量 \mathbf{G}_i 与对应的子网络方向性描述矩阵 \mathbf{M}_i 代入式(2), 计算结果如式(8), 可确定区段 8 故障。

$$\begin{cases} P_{1,2} = [0] \\ P_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (8)$$

3.2.2 故障路径部分重叠

假设区段 14 和 21 均发生故障, 则故障路径部分重叠。全网故障信息向量如式(9), 采用子网络故障信息自动形成方法, 可得子网络故障信息非零向量如式(10), 将非零向量 \mathbf{G}_i 和对应的 \mathbf{M}_i 代入式(2), 得判据矩阵如式(11), 可以确定故障区段为“14、21”, 与假设一致。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_1 = [1 \ 1]^T \\ \mathbf{G}_2 = [1 \ 1/2 \ 1/2]^T \\ \mathbf{G}_3 = [1/2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1/2 \\ \quad 1/2 \ 1/2 \ 1/2 \ 1/2]^T \\ \mathbf{G}_4 = [1/2 \ 1/2 \ 1/2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_5 = [1/2 \ 1/2 \ 1/2 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_{1,2} = [0] \\ P_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \\ P_4 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \\ P_5 = [0 \ 0 \ 1] \end{cases} \quad (11)$$

3.2.3 故障路径完全重叠

假设线路区段 8 和 9 均故障, 则两个故障区段的故障路径完全重叠, 同样, 依次获取各子系统的故障信息向量如式(12), 然后代入式(2), 计算结果如式(13), 将计算结果与区段集进行匹配可得故障区段为 8, 与假设不一致, 这是由于区段 8 故障与区段 8、9 均故障上传的故障信息相同, 故无法通过修正故障信息向量将两处故障同时定位出来, 但可配合重合闸进行多次定位, 逐一排除故障。

$$\begin{cases} \mathbf{G}_1 = [1 \ 1]^T \\ \mathbf{G}_2 = [1 \ 1 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_3 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_5 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_6 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{G}_7 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{1,2} = [0] \\ P_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (13)$$

3.3 对比现有故障定位方法

为了验证所提故障区段定位算法的优越性, 将其与现有几种配电网故障定位方法从建模模型、计算量、定位速度、多重故障定位性能等方面进行对比, 结果如表 1 所示。对比另两种算法, 本文所提算法定位过程中计算量小、速度快, 且可以较好地定位出多重故障。

表 1 不同方法对比结果

Table 1 Comparison results of different methods				
方法	建模模型	主要计算量	定位速度	多重故障定位性能
文献[16]	优化模型	评价函数与寻最优	较快	一般
文献[22]	矩阵模型	全网判断矩阵	慢	一般
本文	矩阵模型	少数子网络判据矩阵	快	较好

4 结论

1) 针对原矩阵算法只适用于传统配电网, 提出一种适用于含分布式电源的复杂配电网故障区段定位算法。该算法将复杂配电网划分为多个结构简单

- scheme for distribution systems with DGs based on optimized thevenin equivalent parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 411-419.
- [3] 何瑞江, 胡志坚, 李燕, 等. 含分布式电源配电网故障区段定位的线性整数规划方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3684-3692.
HE Ruijiang, HU Zhijian, LI Yan, et al. Fault section location method of DG-DNs based on integer linear programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3684-3692.
- [4] 梁睿, 孟祥震, 周鲁天, 等. 配电网故障定位技术发展现状及展望[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 20-27.
LIANG Rui, MENG Xiangzhen, ZHOU Lutian, et al. Status quo and prospect of distribution network fault location[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 20-27.
- [5] SANTOS W C, LOPES F V, BRITO N S D, et al. High-impedance fault identification on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 23-32.
- [6] 杨刚. 含分布式电源配电网故障定位[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
YANG Gang. Fault location in distribution network with distributed generation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [7] 龙毅, 欧阳金鑫, 熊小伏, 等. 基于零序功率变化量的配电网单相高阻接地保护[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3687-3695.
LONG Yi, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Protection principle of single-phase high resistance fault for distribution network base on zero-sequence power variation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3687-3695.
- [8] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 152-161.
XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 152-161.
- [9] 吴凡, 赵晋泉, 朱斌, 等. 基于 MOPSO 的含分布式光伏配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 46-53.
WU Fan, ZHAO Jinquan, ZHU Bin, et al. Faulty section location based on MOPSO for distribution networks with distributed photovoltaic generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 46-53.
- [10] 单宝峰, 陈军港, 撒奥洋, 等. 基于 QPSO 算法的含分布式电源配电网故障诊断[J]. 青岛大学学报: 工程技术版, 2018, 33(1): 28-32, 39.
SHAN Baofeng, CHEN Jungang, HAN Aoyang, et al. Based on quantum-behaved particle swarm optimization of distributed generation distribution network fault diagnosis[J]. Journal of Qingdao University: Engineering & Technology, 2018, 33(1): 28-32, 39.
- [11] 黄知伟. 基于云粒子群算法的含 DG 配电网故障定位[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
HUANG Zhiwei. Fault location for distribution networks with DG based on CPSO algorithm[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016.
- [12] 徐鹏飞, 邢仁周. 粒子群优化算法含分布式电源配电网故障定位[J]. 电源技术, 2018, 42(4): 591-592, 600.
XU Pengfei, XING Renzhou. Fault location of distribution network with distributed power supply by particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Engineering, 2018, 42(4): 591-592, 600.
- [13] GONG M, XU Z, XIE Y, et al. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm of chaotic optimization[C] // 2017 Chinese Automation Congress (CAC), October 20-22, 2017, Jinan, China: 4984-4988.
- [14] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [15] 庞清乐, 刘昱超, 李希年, 等. 基于电流极性比较的主动配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 101-108.
PANG Qingle, LIU Yuchao, LI Xinian, et al. Current polarity comparison based fault location for active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 101-108.
- [16] 岳凯旋, 王宝华. 基于萤火虫算法的含 DG 配电网故障区段定位[J]. 智能电网, 2015, 5(4): 197-203.
YUE Kaixuan, WANG Baohua. Fault location for distribution networks with DG based on firefly algorithm[J]. Smart Grid, 2015, 5(4): 197-203.
- [17] 王秋杰, 金涛, 谭洪, 等. 基于分层模型和智能校验算法的配电网故障定位技术[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5327-5337.

- WANG Qiujie, JIN Tao, TAN Hong, et al. The technology on fault location of distribution network based on hierarchical model and intelligent checking algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5327-5337.
- [18] 陈志伟, 舒勤. 基于小波包变换的混联配电网故障定位方法[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 100-108.
CHEN Zhiwei, SHU Qin, Fault location method for hybrid distribution network base on wavelet transformation[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 100-108.
- [19] 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, 48.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, TONG Xiangqian, et al. Fault location for distribution systems with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 36-42, 48.
- [20] 刘彦超. 含分布式电源配电网的快速故障区段定位[J]. 电气技术, 2017(9): 61-65, 71.
LIU Yanchao. Fast fault section location for distribution network with distribution generations[J]. Electrical Engineering, 2017(9): 61-65, 71.
- [21] 童鑫. 含分布式电源配电网的故障分析和控制研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2018.
TONG Xin. Study on the fault analysis and control of distribution system with distributed generators[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2018.
- [22] 张全起, 梅明伟. 配电网故障区段定位的改进矩阵算法[J]. 山东电力技术, 2018, 45(8): 72-75.
ZHANG Quanqi, MEI Mingwei. Improved matrix algorithm for fault location in distribution network[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(8): 72-75.
- [23] 贾仕龙. 含分布式电源的配电网故障区段定位[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
JIA Shilong. The research of fault-section location for distribution network with distributed generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [24] 王一非, 贾燕冰. 含分布式电源配电网故障定位改进矩阵算法[J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 58-64.
WANG Yifei, JIA Yanbing. Fault location of distribution networks with DGs based on an improved matrix algorithm[J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 58-64.
- [25] 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.
- [26] 杜梭安, 吴杰康. 基于等级区域划分的故障定位矩阵算法[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 120-124.
DU An'an, WU Jiekang. Matrix algorithm for fault location based on hierarchinal region partition[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 120-124.
- [27] 孙孔明. 配电网故障区段定位及拓扑重构方法[D]. 济南: 山东大学, 2018.
SUN Kongming. Study on power distribution system fault location and topology reconfiguration[D]. Jinan: Shandong University, 2018.

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-08-05

作者简介:

郭利爽(1992—), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为直流配电网继电保护; E-mail: 863140337@qq.com

李凤婷(1965—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新能源并网技术与继电保护。E-mail: xjlf2009@sina.com

(编辑 魏小丽)