

一种基于有向图的配电网故障定位方法

李佩杰, 刘 乾, 白晓清, 阳育德, 李 滨

(广西大学广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西南宁 530004)

A Method of Fault Location in Distribution Network Based on Directed Graph

LI Peijie, LIU Qian, BAI Xiaoqing, YANG Yude, LI Bin

(Guangxi key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

摘 要: 为提高配电网的故障定位效率, 减少因故障停电带来的损失, 本文基于有向图提出了一种配电网故障定位的新方法。它利用主站接收到的故障指示器动作信号, 通过构造节-支关联矩阵和线路电流向量, 进行两者相乘运算, 确定故障所在区段。所提方法无需规格化处理, 可实现含分布式电源接入、多重故障和闭环运行的复杂配电网故障定位, 具有较强的容错能力。文中不仅应用 KCL 电流定律从理论证明了方法的正确性和适用性, 而且还在某市配电网系统上进行了仿真。结果表明了该方法可以用于实际配电网, 具有很大的应用前景。

关键词: 故障定位; 故障指示器; 有向图; 闭环; 分布式电源

Abstract: In this paper, a new fault location method for distribution system based on the directed graph is proposed to improve the fault locating efficiency of distribution network and reduce the losses caused by fault outage. By applying actuating signals of fault indicators received from master station, the bus-branch incidence matrix and branch current vector are built, and they are multiplied to determine the location of faulted line sections. No need of normalization processing, proposed approach can locate fault position of complex distribution systems integrated with DGs and work in situation of multiple faults with close-loop control, which has better fault-tolerant capacity. In this paper, the correctness and applicability are proved by KCL theory, and the simulation on a city distribution system is carried out. The results show that proposed method can be used in practice, which has a great prospect in application.

Keywords: fault location; fault indicator; directed graph;

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2013CB228205); 国家自然科学基金项目(51367004, 51407036)

closed-loop; distributed generator

0 引 言

配电网故障率一直很高, 严重影响着供电可靠性。故障定位作为配网自动化建设的重要内容, 对减少因停电带来的损失有着重要的现实意义。随着国家分布式并网政策的出台, 光伏等分布式发电(distributed generation, DG)容量的迅猛增加, 将改变配电网潮流单向流动的特性, 更加剧了故障定位的难度^[1]。因此, 研究一种快速、经济、可靠的故障定位方式显得非常必要。

现有的故障定位方法大致可分为两类, 一类是在母线端通过检测故障波形、信号进行定位^[2-5]。文献 [2] 提出“S 注入法”对故障进行精确定位, 但是定位过程复杂, 并且所依赖的注入信号设备投资较大。文献 [3-4] 采用行波法, 其中文献 [3] 通过识别暂态行波对来自故障点和不连续点反射波的检测计算确定故障区段。文献 [4] 将变压器端传回来的数据整理, 利用多端行波法根据拓扑结构进行运算, 得到配电网的故障点。然而, 行波法的故障定位准确性与配电网的结构有关, 方法对配电网的适用性不强。文献 [5] 利用零序电流突变量作为判据, 实现了谐振接地配电网中单相接地故障的带电定位, 但需要对消弧线圈进行调节, 定位过程繁琐。另一类常见的方法是借助线路馈线终端(feeder terminal unit, FTU)上传的较为精确的量测信息, 并结合各种算法进行定位^[6-12], 效果良好, 缺点是 FTU 价格昂贵, 投资较大。

近年来, 故障指示器因其低廉的成本、良好的定位效果, 在配电网中得到了广泛的应用^[13-14]。它

自动定位的原理与第二类方法类似，借鉴基于 FTU 状态的矩阵算法，可以直接、快速进行区段定位。文献 [15] 提出了配电网故障区段判断的统一矩阵算法，但是需要对故障信息矩阵进行规格化处理。文献 [16] 给出了一种新的矩阵故障定位算法，虽无需规格化处理，却只能对单一故障进行定位。文献 [17] 中的优化矩阵算法，能满足闭环配电网的故障定位需求，然而必须对矩阵进行复杂规格化处理。文献 [18] 在此基础上进行了改进，使其能够定位多重故障。最近还有学者提出具有一定容错能力的矩阵算法^[19]，能进行多电源系统的多重故障定位，但在解决复杂配网故障定位时需将网络拆成多个子网进行综合诊断。

本文从故障指示器的原理出发，提出了一种基于有向图的故障定位新方法，应用 KCL 电流定律从理论上证明了该方法的正确性和适用性。所提方法原理简单，无需规格化处理和拆成多个子网，能解决含 DG 接入、多重故障以及闭环运行的复杂配电网故障定位，并具有较强的容错能力，完全可以满足配电网在实时定位上的应用。一个实际电网系统的计算验证了该方法的有效性，展示了它良好的实用前景。

1 故障指示器和主站故障定位系统

配电网规模庞大、分支复杂，线路故障频发。常规的蹬杆检查、绝缘摇表的人工查找故障方式费时费力，降低了供电可靠性。故障指示器作为一种集故障检测、判断、报警于一体的装置，一般安装于配网长线路的中段、分支入口、变电站的出口和电缆与架空线连接处等。它的广泛应用，提高了配电网的故障处理效率和运行可靠性。

故障指示器的原理非常简单。如图 1 所示，短路故障时，故障点到电源点之间会出现突变的故障电流，从而触发了沿线上的故障指示器动作，窗口

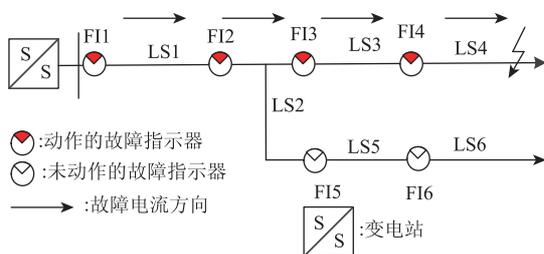


图 1 故障定位示意图

显示为红色或光闪。系统检修人员可从电源点开始，沿着动作故障指示器的路径查找，最后一个动作的故障指示器到后方没有动作的故障指示器之间的线路即为故障区段。

显然，故障指示器定位的是区段，而非准确的故障点，但也排除了相当多的非故障区段，大大提高系统检修人员定位故障点的速度。

然而，上述故障指示器的应用方式仍未摆脱人工巡线的模式，随着通信技术的发展，故障指示器已经能够实现故障动作信息的自动上传，通过故障指示器的发射单元以无线通信方式发送给配网调度中心^[20]，如图 2 所示。除无线通信模块外，随着 DG 接入及局部闭环供电的应用，故障指示器还增加了电流方向检测功能，能够在多源的系统中区分动作信号以进行故障区段定位。

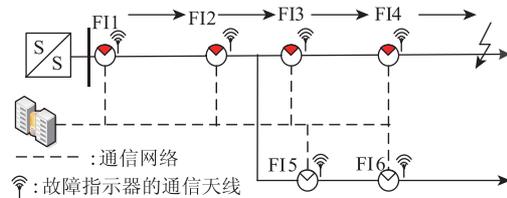


图 2 故障指示器通信网络图

借助于上述无线通信，调度中心将收集到的故障指示器动作信息显示在地理信息系统 (geographic information system, GIS)。系统运行人员可以通过地图和单线图来追踪、判断故障区段。由于 GIS 中的信息量过于庞大，计算机的窗口显示范围又有限，以肉眼来判别故障区段的操作异常繁琐。因此，根据故障指示器的动作信息，由计算机程序自动定位故障区段将是配电网故障定位的发展趋势。

2 基于有向图的故障定位原理

一个电路可以用一个有向图 G 表示，设它的节点数为 m ，支路数为 b ，则有向图 G 可以用节(点)-支(路)关联矩阵 A_a 表示。 A_a 的维数为 $m \times b$ ，它的行和列分别对应节点和支路，元素为 1 时，表示该列对应支路和该行对应的节点关联，且支路的方向背离节点；元素为 -1 时，表示该列对应支路和该行对应的节点关联，支路的方向指向节点；元素为 0 时，表示该列对应支路和该行对应的节点无关联。为使 A_a 中的各行彼此独立，通常设一参考

节点, 将 A_a 降阶为 A 。由 KCL 电流定律可得^[21]

$$A\mathbf{i} = \mathbf{0} \quad (1)$$

式中: \mathbf{i} 为支路电流, 是维数为 b 的列向量。

如图 3 所示的电路, 将 1 号节点设为参考点, 根据节点与支路的关联性, 此时, 节-支关联矩阵 A_b 为

$$A_b = \begin{matrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\ \begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

然而, 若图 3 所示的电路发生短路故障, 故障节点将通过大地与电源点形成通路。为描述此种情况, 对图 3 进行变换, 增加了支路: 支路 5、支路 6、支路 7、支路 8, 即图 G 中每个节点存在唯一一条指向参考点 1 的支路, 如图 4 所示。

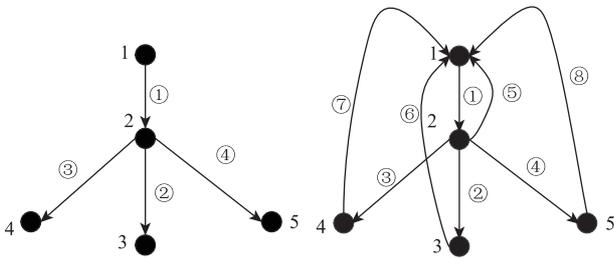


图 3 一个简单的电路图

图 4 变换后的电路图

根据节点与支路的关联性, 此时, 有向图 G 的节-支关联矩阵 A_G 为

$$A_G = \begin{matrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} & \textcircled{6} & \textcircled{7} & \textcircled{8} \\ \begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

将指向参考节点的支路与其它支路分离, 关联矩阵 A_G 就可以分离成两部分 $[A_b \quad \mathbf{I}]$, 于是有

$$[A_b \quad \mathbf{I}] \begin{bmatrix} \mathbf{i}_b \\ \mathbf{i}_c \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中: \mathbf{I} 必为一单位矩阵; \mathbf{i}_c 为指向参考节点的支路电流; \mathbf{i}_b 为其它支路电流。

对式(4)中矩阵分块相乘后得

$$-A_b \mathbf{i}_b = \mathbf{i}_c \quad (5)$$

实际上, 配电网中支路电流的关系便可使用式(5)表示, \mathbf{i}_b 表征故障支路电流。若故障电流为 0, 式(5)即为系统正常运行时的支路电流方程; 若系统线路出现短路故障, 式(5)即为含短路通路的支路电流方程。

3 基于有向图的配电网的定位方法

3.1 单故障的定位方法

配电网通常以开环运行, 电流由电源点单向流往负荷, 呈辐射状特点。因此, 配电网可表示成多棵有向树, 规定每条支路的电流方向为参考方向, 即从每棵树根到树枝为正方向。图 3 实际上为一个简单的配电网拓扑图, 参考点 1 即为电源点。

根据故障指示器的安装位置, 在电源出口和每个故障指示器紧邻下方一侧置一个节点, 根据故障指示器的安装位置将线路分为几段, 如图 5 所示。线路在 4 个故障指示器下分为了 4 个区段, 且区段编号随区段上方的故障指示器编号: FI_1 下方与 FI_2 、 FI_3 及 FI_4 的上方共构成一个区段(区段 1), FI_2 、 FI_3 和 FI_4 的下方分别构成一个区段(区段 2、3、4)。根据分段后的网络拓扑构造节-支关联矩阵 A_b 。

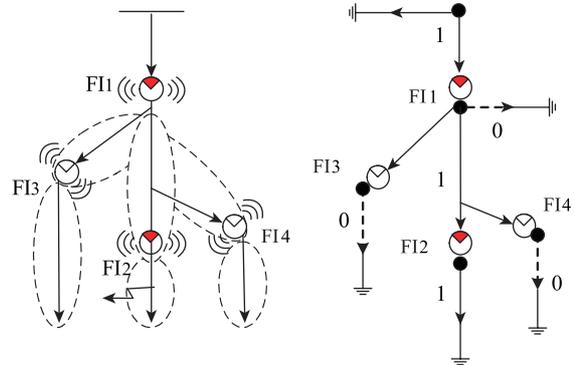


图 5 配电网分段示意图

当配电网中发生单故障时, 部分线路上的故障指示器动作, 设故障电流流过这些线路的电流值为 1, 其它线路的电流值为 0, 所有线路的电流值就可组成一个向量。图 5 所示故障情况下, 线路电流向量为

$$\mathbf{i}_b = [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T \quad (6)$$

再根据式(5)和节-支关联矩阵(3)可计算出各节点的注入电流 \mathbf{i}_c , 若某节点的注入电流为 1, 则

表示该节点后方区段存在短路点，区段的范围一直延伸到下一个没有动作的故障指示器前。同时，其它点的注入电流必不为 1。将(2, 6)式代入式(4)后，可得故障区段向量：

$$i_c = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \quad (7)$$

分析故障区段向量：第 2 个元素为 1，即第 2 个区段(FI₂后方区段)为故障区段，定位结果与图 5 所示的故障位置相符。

3.2 多重故障的定位方法

当配电网中发生多重故障时，电流方向依然从树根电源点流向短路点，电流也必然遵循 KCL 定律，定位区段的划分方法和定位原理与单故障相同。如图 6 所示的配电网发生两个故障，此时 FI₁、FI₃、FI₄ 动作，主站根据收集到的故障指示器动作信息后，得到线路电流向量：

$$i_b = [1 \ 0 \ 1 \ 1]^T \quad (8)$$

代入(5)式后得故障区段向量：

$$i_c = [-1 \ 0 \ 1 \ 1]^T \quad (9)$$

注入电流为 1 的节点下方区段即故障区段，亦即区段 3 和区段 4 为故障区段。

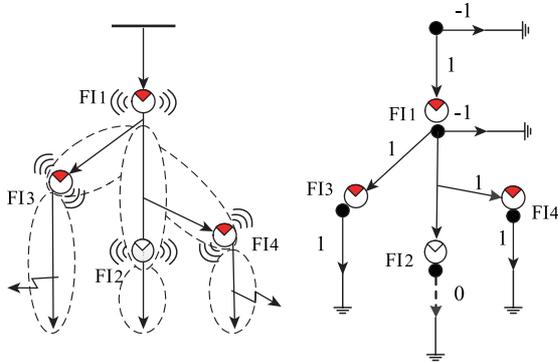


图 6 多故障区段定位示意图

需特别指出，若某一故障的短路电流路径完全落在另一个故障短路电流的路径内，处于线路较末端的故障必可快速定位，其余故障从理论上则无法判定。如图 7 所示的多故障情况，便可识别 FI₆ 后方区段上的故障，另一故障则不能被识别。然而，在配电网中，单故障的概率明显高于多重故障，路径重合的故障更为少见，因此，本文定位方法的整体效果几乎不受影响。

3.3 含分布式电源的故障定位方法

以光伏发电为代表的分布式能源接入配电网时，电流已不再单一地由树根电源点单向流往负

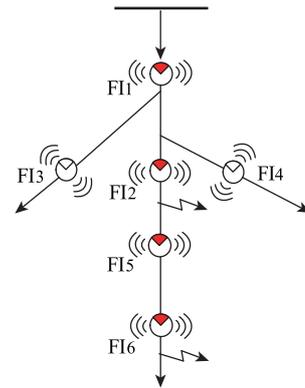


图 7 两个路径重合的故障

荷。当发生短路故障时，除了树根处的电源向故障点提供短路电流外，分布式电源也可能向故障点输出短路电流。从有向图的角度上看，有向图中边的方向已不能确定。为此必须借助于带方向信息的故障指示器(FIs with directional information, DFI)检测出短路电流的方向，根据短路电流方向进行相应的动作，进而生成线路电流向量，再由(4)式计算故障状态向量，确定故障区段。

然而，配电网中 DG 通常为逆变型，它所提供的短路电流比较小，可能不足以触发故障指示器动作，为此需要构造一种容错机制。

① 通过简单分析可知，触发故障指示器动作的短路电流中必定有很大一部分来自树根处的电源点，从树根到故障点的路径必是唯一的，故可假定故障处的短路电流全部由树根电源点提供，并以此为参考方向。节-支关联矩阵对应图中边的方向仍取单电源时电流的辐射方向为正。这样，系统中电源数量虽然增加了，但无需对节-支关联矩阵进行规格化调整。

② 当故障指示器动作，且方向与参考方向一致，上传动作信息，设该线路的电流值为 1；当故障指示器动作但方向与参考方向相反或故障指示器不动作时，不上传动作信息，设该线路的电流值为 0。

如图 8 所示的一个简单网络，分布式电源也向负荷供电，为此，由 DG 提供的反向电流经过的故障指示器带检测电流方向功能。图中，FI₁、FI₃ 正向动作，DFI₄ 反向动作，因此仅 FI₁、FI₃ 上传动作状态，得到线路的故障电流向量为

$$i_b = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (10)$$

根据网络拓扑，得到线路节-支关联矩阵：

$$A_b = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(10)和(11)代入式(5)后得故障区段向量:

$$i_c = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (12)$$

由此可准确定位故障位于 FI₃ 后方区段, 这一结果与 DFI₄ 的状态没有任何关系, 这也意味着无论 DFI₄ 是否动作都不会影响故障定位。

上述定位方式仅上传故障指示器的正向信息, 减少了需处理的动作信息量。更重要的是它回避了分布式电源提供的故障电流太小而导致的一些故障指示器拒动的窘境, 具有较强的容错性。

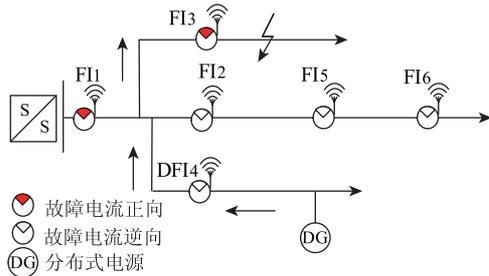


图8 含DG的故障区段定位

3.4 含弱环配电网的故障定位方法

为了保证某些重要负荷的供电可靠性, 配电网在局部地区可能存在闭环运行的情况。当发生故障时, 将从两个方向朝短路点提供电流, 短路点在环的位置不同, 环中各边的电流方向也会不同, 这也导致了有向图中有些边的方向不能确定。为此, 环中安装的故障指示器需具备检测故障电流方向的能力, 为节省投资, 非环中的故障指示器无需具备此功能。如图9所示的配电网, 存在两个电源点同时向负荷供电, 主干线上装设的故障指示器必须有检测电流方向的能力, 而FI₃、FI₄不必具备此功能。

含弱环配电网的故障定位具体方法:

①设定电源S1的供电方向为参考方向, 将环网按照辐射型的拓扑结构考虑, 得到节-支关联矩阵为式(11)。

②若故障指示器动作且电流方向与参考方向一致, 则上传故障信息, 设相应线路的故障电流为1; 否则不上传故障信息, 设为0。图9的故障电流向量:

$$i_b = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (13)$$

③由式(11), (13)代入(5)计算得到故障区段向量:

$$i_c = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (14)$$

根据故障区段向量的元素值, 判断故障发生在DFI₂与DFI₅之间。同含DG的配电网故障定位方式类似, 这种故障定位的方式既可以减少上传信息的量, 又具有较好的容错能力。

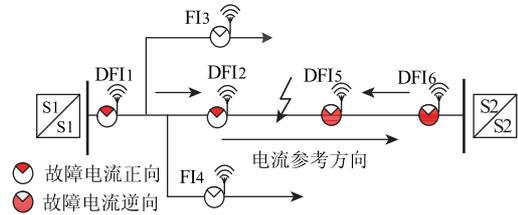


图9 含环网故障区段定位示意图

4 提高故障定位方法的容错能力

配电网中, 由于通信或电磁干扰问题, 偶尔会导致主站收到的故障指示器状态为拒动或误动作。如果依然按照上述判定原则, 可能会将单一故障识别成多重故障。如图10所示的FI₂拒动, 第3节所提的故障定位方法会将FI₁后方区段和FI₆后方区段判为两个故障, 这显然与实际情况不符, 为此需要进一步进行识别。

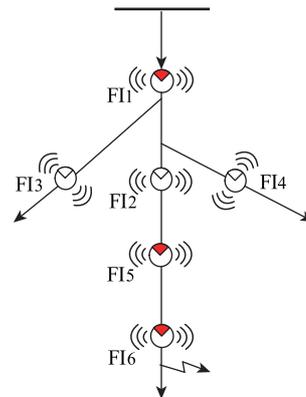


图10 通信故障后的示意图

本文采用先定位, 后识别的方法, 依据基本故障信息, 计算得到可能的故障区间, 并分别进行逆运算, 得到每种故障情况对应的故障电流信息, 将其与实际的故障触发信息对比, 构造评价指标进行识别, 以减小误判的概率。识别的依据有两个: ①主站收到单个故障指示器错误状态的可能性比较大, 而几个故障指示器同时出错的概率会相对较

小，数量越多，概率越小；②配电网单个故障发生的概率较大，多重故障发生的概率较小，故障数越多，发生的概率越小。

结合上述识别依据，以图 10 为例，导出含容错校正的故障定位具体步骤。

①先根据第 3 节的故障定位方法求出 i_c ，初步获得可能的故障位置。主站根据收集到的故障动作状态信息得到故障电流向量：

$$i_b = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]^T \quad (15)$$

再由式(4)及(15)得到故障区段向量：

$$i_c = [1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (16)$$

分析可知：故障区段向量中共有 2 个元素 1，故可能的故障情况有 $2^n - 1$ 种， n 为元素 1 的个数，此时 $n=2$ 。具体为：(a) FI_1 后方区段；(b) FI_6 后方区段；(c) 上述两种故障同时发生。

② 根据可能的故障情况列出相应的新故障状态向量 i_{ck} ，在每个新故障状态向量中，故障区段位置元素置 1，其余置为 0。

如情况(a)中， FI_1 后方区段对应的故障状态向量为 i_{c1}

$$i_{c1} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (17)$$

③再根据(5)式求出所有情况下的故障指示器状态向量 i_{bk} ，其中 $k = \{1, \dots, 2^n - 1\}$ 。

与 i_{c1} 对应的故障电流向量 i_{b1} 为

$$i_{b1} = -A_b^{-1} i_{c1} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (18)$$

④ 将 i_{bk} 与原有的故障指示器状态 i_b 进行比较，重合度越高，则这种故障情况的可能性就越大。

为了描述重合度，定义重合度向量 s ：

$$s = i_b \odot i_{bk} \quad (19)$$

再以 s 中元素的和为重合度指标， f 越大，重合度越高：

$$f = \sum_{i=1}^N s_i \quad (20)$$

式中：其中 N 为故障指示器的个数。

图 10 中，3 种情况的重合度为

$$(f_2 = \sum_{i=1}^N s_i = 3) = (f_3 = \sum_{i=1}^N s_i = 3) > (f_1 = \sum_{i=1}^N s_i = 1) \quad (21)$$

即情况(2)和情况(3)的重合度最高，情况(2)是单故障概率最高，即可定位故障在 FI_6 后方区段，

这与图 10 的故障情况相符。

5 仿真测试及结果分析

5.1 系统概述

图 11 为某地区 10kV 配电网，共有 116 个 10/0.4kV 中压负荷配变和 30 个 FI_s 。

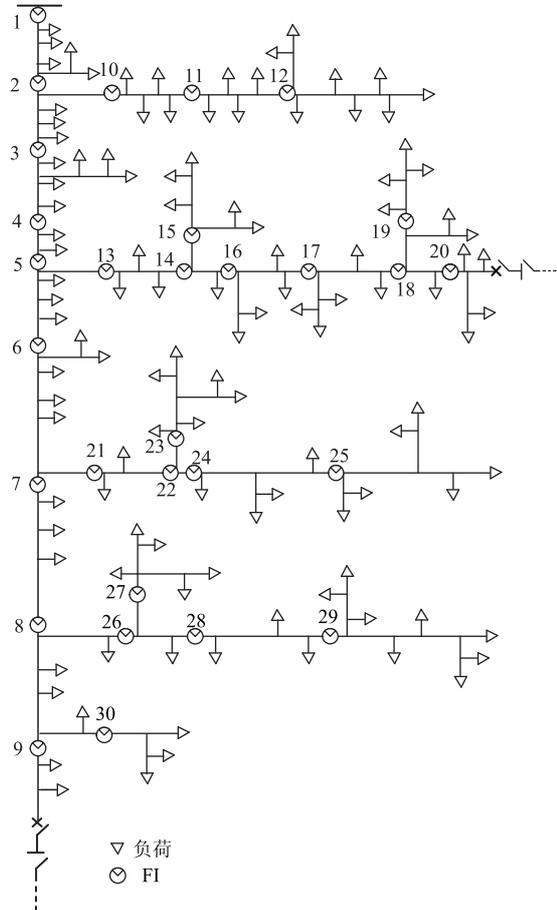


图 11 仿真配电网

根据所提故障定位方法，在 Matlab 平台上实现主站程序，分别模拟该配电网双电源闭环运行(图 12)、含分布式电源环网(图 13)和接入分布式电源(图 14)时的多重故障，测试极端复杂情形下故障定位的有效性。其中后者还考虑了故障指示器的拒动、误动情况，以校验定位方法的容错能力。为描述方便和显示清楚，图 12、13、14 在图 11 中忽略负荷的基础上进行简化。

5.2 闭环运行配电网的多重故障定位

如图 12 所示，将 DFI_9 后方区段连接于变电站 S_2 ，构成两端供电环网。为了能够检测故障电流方向并节约成本，仅在环网主干线装设 DFI_s ，支路全部采用不具备检测方向能力的 FI_s 。

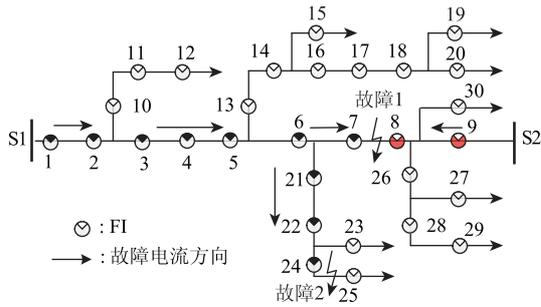


图12 环网故障仿真图

设电源 S1 的供电方向为电流正方向, 根据故障指示器的安装位置得到节-支关联系数矩阵 A_b 。模拟故障发生在 FI₂₄ 后方区段及 DFI₇ 后方区段, 故障指示器的触发状态情况见表 1。依照本文的定位方法, 所得的故障电流向量 i_b 和故障区段向量 i_c 的值也列在表 1 中。通过故障区段向量 i_c , 即可确定故障发生在 FI₂₄ 后方区段及 DFI₇ 后方区段, 定位结果与图 12 所示故障位置相符。

表 1 环网故障信息表

编号	状态	i_b	i_c	编号	状态	i_b	i_c	编号	状态	i_b	i_c
1	1	1	0	11	0	0	0	21	1	1	0
2	1	1	0	12	0	0	0	22	1	1	0
3	1	1	0	13	0	0	0	23	0	0	0
4	1	1	0	14	0	0	0	24	1	1	1
5	1	1	0	15	0	0	0	25	0	0	0
6	1	1	-1	16	0	0	0	26	0	0	0
7	1	1	1	17	0	0	0	27	0	0	0
8	-1	0	0	18	0	0	0	28	0	0	0
9	-1	0	0	19	0	0	0	29	0	0	0
10	0	0	0	20	0	0	0	30	0	0	0

注: 状态列“1”代指触发,“0”代指未触发,“-1”指故障电流反向。

5.3 含分布式电源环网的多故障定位

如图 13 所示, 在系统中 DFI₉ 后方区段与变电站 S₂ 相连, 构成两端供电的闭环系统, 在 DFI₂₅ 和 DFI₂₉ 区段后各接入有分布式电源。为了能够检测故障电流方向并节约成本, 在环网主干线和有接入分布式电源的支线上装设 DFI_s, 其余支路全部采用不具备检测方向能力的 FI_s。

设电源 S1 的供电方向为正方向, 确定节-支关联系数矩阵 A_b 。模拟故障发生在 FI₁₅ 后方区段、DFI₂₁ 后方区段和 DFI₂₆ 后方区段, 故障指示器的触发状态情况见表 2。

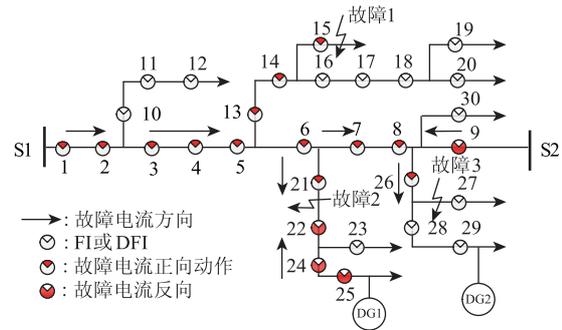
图13 含 DG_s 环网故障仿真图

表 2 含 DG 环网故障信息表

编号	状态	i_b	i_c	编号	状态	i_b	i_c	编号	状态	i_b	i_c
1	1	1	0	11	0	0	0	21	1	1	1
2	1	1	0	12	0	0	0	22	-1	0	0
3	1	1	0	13	1	1	0	23	0	0	0
4	1	1	0	14	1	1	0	24	-1	0	0
5	1	1	-1	15	1	1	1	25	-1	0	0
6	1	1	-1	16	0	0	0	26	1	1	1
7	1	1	0	17	0	0	0	27	0	0	0
8	1	1	0	18	0	0	0	28	0	0	0
9	-1	0	0	19	0	0	0	29	0	0	0
10	0	0	0	20	0	0	0	30	0	0	0

注: 状态列“1”代指触发,“0”代指未触发,“-1”指故障电流反向。

通过本文的定位方法处理, 确定故障电流向量 i_b 和故障区段向量 i_c 的元素值于表 2 所列。根据判定故障区段向量 i_c 的元素值, 确定故障发生在 FI₁₅ 后方区段、DFI₂₁ 后方区段和 DFI₂₆ 后方区段, 定位结果与图 13 所示故障位置一致。

5.4 含分布式电源的多故障定位容错能力测试

如图 14 所示, 系统中 25 号和 29 号故障指示器后方区段分别接入分布式电源, 节-支关联系数矩阵 A_b 不变。设图中的故障指示器全部具有检测故障电流方向的能力, 模拟故障发生在 DFI₁₈ 后方区段及 DFI₂₃ 后方区段, DFI₉ 误动、DFI₂₁ 拒动。此时故障指示器的动作状态情况如表 3 的状态列所示。

根据本文定位方法, 得到的基本故障区段信息详见表 3 的 i_c 列。通过分析可知, 故障发生的位置可能为 DFI₆、DFI₉、DFI₁₈、DFI₂₃ 后方区段。因此, 可能的故障情况共有 $2^4 - 1 = 15$ 种, 依次进行容错校正, 每种情况的故障区段向量 i_{ck} ($k=0, 1, \dots, 15$) 详见附录 A。通过(18)式逆计算出 15 种不同的故障电流向量 i_{bk} , 再根据(19)式分别与表 3 中

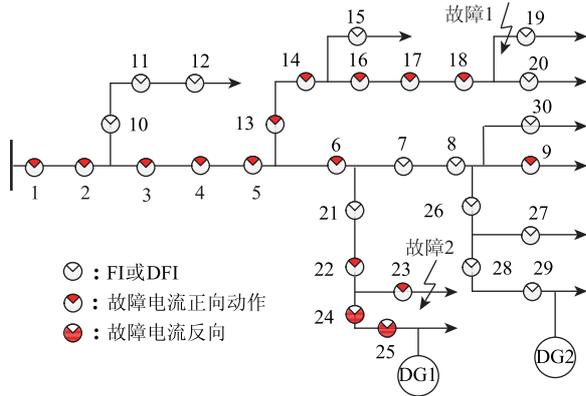


图 14 通信失灵、误动作的故障仿真图

的实际故障电流向量元素 i_b 进行重合度分析处理，得到如表 4 所示的 15 种故障组合情况的重合度指标。从表 4 中可看出，重合度指标最高值为 28，即第 10 组和第 13 组的重合度最高，根据附录 A 的区段组合情况，即：①DFI₁₈、DFI₂₃ 后方区段同时故障；②DFI₆、DFI₁₈、DFI₂₃ 后方区段同时故障。①、②两种情况同时发生的可能性最大。根据识别依据，发生多故障的概率较小，即判断故障发生在 DFI₁₈、DFI₂₃ 后方区段可能性最大，也与图 13 故障所示情况一致。

表 3 含分布式电源的配电网故障信息表

编号	状态	i_b	i_c	编号	状态	i_b	i_c	编号	状态	i_b	i_c
1	1	1	0	11	0	0	0	21	0	0	-1
2	1	1	0	12	0	0	0	22	1	1	0
3	1	1	0	13	1	1	0	23	1	1	1
4	1	1	0	14	1	1	0	24	-1	0	0
5	1	1	-1	15	0	0	0	25	-1	0	0
6	1	1	1	16	1	1	0	26	0	0	0
7	0	0	0	17	1	1	0	27	0	0	0
8	0	0	-1	18	1	1	1	28	0	0	0
9	1	1	1	19	0	0	0	29	0	0	0
10	0	0	0	20	0	0	0	30	0	0	0

表 4 重合度信息表

组合	重合度	组合	重合度	组合	重合度
1	22	6	27	11	26
2	21	7	23	12	22
3	26	8	26	13	28
4	23	9	22	14	27
5	21	10	28	15	27

6 结 论

本文基于有向图提出了一种配电网故障定位的

新方法。通过理论分析和仿真测试表明该方法有以下优点：

- ① 克服了传统故障定位需要装设昂贵 FTU 或复杂定位算法的缺点，理论严谨，原理简单，不需规格化处理，亦不必将复杂电网拆分成多个子网分析诊断；
- ② 能对含分布式电源和弱环的配电网进行多故障的快速区段定位，并且容错能力强，对故障指示器的拒动和误动具有一定的判定能力；
- ③ 要求上传的信息量少，定位速度快。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64-66.

[3] 严凤, 杨奇逊, 齐郑, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 37-43.

[4] 贾惠彬, 赵海峰, 方强华, 等. 基于多端行波的配电网单相接地故障定位方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 96-100.

[5] 倪广魁, 鲍海, 张利, 等. 基于零序电流突变量的配电网单相故障带电定位判据 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 118-122.

[6] 张林利, 徐丙垠, 薛永端, 等. 基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 110-115.

[7] Fernanda C L Trindade, Walmir Freitas, Jose C M Vieira. Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1), 251-260.

[8] 马士聪, 徐丙垠, 高厚磊, 等. 检测暂态零模电流相关性的小电流接地故障定位方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 48-52.

[9] Wanshui Ling, Dong Liu, Yiming LU, et al. IEC 61850 Model Expansion Toward Distributed Fault Localization, Isolation, and Supply Restoration [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 977-984.

[10] 李静一, 肖保明, 周正贵. 配电网故障区段诊断改进矩阵算法研究 [J]. 现代电力, 2004, 21(1): 50-54.

[11] 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.
- [12] 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.
- [13] Chin-Ying Ho, Tsung-En Lee, Chia-Hung Lin. Optimal Placement of Fault Indicators Using the Immune Algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 38-45.
- [14] Teng Jen-Hao, Huang Wei-Hao, Luan Shang-Wen. Automatic and Fast Faulted Line-Section Location Method for Distribution Systems Based on Fault Indicators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4), 1653-1662.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 朱发国, 孙德胜, 姚玉斌, 等. 基于现场监控终端的线路故障定位优化矩阵算法 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(15): 42-44.
- [18] 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, 28(19): 60-63.
- [19] 黄佳乐, 杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 41-45.
- [20] 郭谋发, 杨振中, 杨耿杰, 等. 基于 ZigBee Pro 技术的配电线路无线网络化监控系统 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 105-110.
- [21] 张伯明, 严正, 陈寿孙. 高等电力网络分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

收稿日期: 2015-04-12

作者简介:

李佩杰(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为最优化理论在电力系统小干扰稳定中的应用, E-mail: beyondpeijie@163.com;

刘乾(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优运行与规划, E-mail: 1021753079@qq.com;

白晓清(1969—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统最优化, E-mail: baixq@gxu.edu.cn.

(责任编辑: 杨秋霞)

附录 A

表 A1 故障区段组合情况

组合	区段																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	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
2	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
3	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
4	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
5	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	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	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	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
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0