

融合 FTU 和配变告警信息的有源配网故障定位方法

郭上华^{1,2}, 王钢¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 河南许继仪表有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对含分布式电源的有源配网相间短路故障定位问题, 提出了一种融合 FTU 和配变告警信息的有源配网故障定位方法。首先, 考虑配网故障后 FTU 和配变告警信息的不同特征, 根据配网拓扑, 动态生成不同告警信息对应的反映故障区段和告警信息关系的关联矩阵, 并据此构造新的开关函数, 有效避免了繁琐的逻辑运算。然后, 根据两种信息源收到的实际告警信息分别建立优化模型, 利用遗传算法求解, 计算对应信息源下各区段的故障概率。最后, 利用证据融合理论将两种信息源下的结果进行融合, 得到最终的故障定位结果。以修改后的 IEEE 33 节点为例进行验证, 结果表明, 所提方法可对单点和双重故障实现定位, 且具有较高的容错性。

关键词: 有源配网; 故障定位; 信息融合; 遗传算法; 配网自动化

An active distribution network fault location method based on FTU and transformer alarm information

GUO Shanghua^{1,2}, WANG Gang¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Henan Xuji Instrument Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: A fault location method for active distribution networks based on FTU and transformer alarm information fusion is proposed to solve the phase-to-phase short-circuit fault location of active distribution network with DG. First, by considering the different characteristics of FTU and distribution transformer alarm information after a distribution network fault, the corresponding matrices reflecting the relationship between fault zones and alarm information are built according to the distribution network topology, and a new switching function is developed which effectively avoids tedious logical operations. Then, an optimization model is established from the actual alarm information of the two information sources respectively and analyzed using a genetic algorithm to calculate the fault probability of each zone under the corresponding information source. Finally, the results from the two information sources are fused using evidence fusion theory to obtain the final fault location results. The modified IEEE 33-bus distribution grid is used as an example for simulation verification, and the results show that the proposed method can not only realize the location of single point and double faults, but also has high fault tolerance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51477057).

Key words: active distribution network; fault location; information fusion; genetic algorithm; distribution automation

0 引言

配网是电力系统的重要组成部分和配送电能的重要环节。配网发生故障后, 如果不能准确快速定位故障, 将严重降低抢修效率, 延长用户停电时间, 直接影响用户生产秩序和生活质量, 甚至对人民生命财产造成严重损失。

随着配网自动化的发展, 馈线终端(feeder terminal unit, FTU)在配网中得到了广泛应用。当线

路发生故障时, FTU 可及时上传过流等故障告警信息, 经配电主站处理分析后完成故障定位。国内外学者对基于 FTU 告警信息的配电网故障区段定位算法开展了大量研究。其中, 最早提出的矩阵类算法是利用告警信息和网络描述矩阵, 通过矩阵运算实现故障定位^[1-3], 定位结果的可靠性依赖于告警信息的准确性。然而, FTU 工作环境恶劣, 再加上产品质量和运维水平等因素的影响, 实际告警信息存在一定的误报、漏报情况, 导致这类方法在实际应用中的准确率较低。

为了提高故障定位算法的容错能力, 基于优化

思想的故障定位方法相继被提出。该类方法的共同点是將故障定位转化为优化问题, 不同之处主要表现在: 1) 目标函数中的开关函数构造方法不同, 文献[2,4]构造的开关函数只适用于无源网络, 无法应用于含分布式电源(distributed generator, DG)或多端闭环供电的配电网, 文献[5-10]分别提出了不同的开关函数, 可适用于含分布式电源或多端闭环供电的配电网, 但这些开关函数不仅需要区分节点的上下游拓扑结构, 而且还要进行繁琐的逻辑运算; 2) 优化问题的求解方法, 由于原模型通常为离散非线性非凸模型, 难以直接求解, 因此文献[11-13]通过升维、松弛或数据驱动的方法, 将非凸模型转化为线性模型, 进而利用成熟的求解器进行求解。文献[4-5,10,14-16]则采用诸如蝙蝠算法、Lambda 算法、遗传算法、粒子群算法和量子算法等现代智能算法对原始非凸模型进行求解, 并在容错性方面取得了较好的效果。此外, 基于概率推理的故障定位方法也被应用于配网中, 文献[17-18]提出了一种基于贝叶斯模型的分布式故障定位方法, 在有源配网适应性和容错性方面均有良好效果, 但该方法依赖于分布式通信和计算, 而且需要提前获取贝叶斯推理中的先验概率。

受投资限制, 实际配网自动化程度参差不齐, FTU 的覆盖率和可靠性难以保证, 故障后的告警信息不仅数量有限, 而且质量较差。为了克服单一信息源的信号质量问题, 一些融合了跨部门多源信息的新型故障定位方法应运而生。文献[9,19]除利用 FTU 信息之外, 还利用计量自动化系统中的台变告警信号进行辅助定位。但是文献[9]需要提前通过仿真分析确定分布式电源的支撑范围, 结果受仿真模型精度影响较大, 而文献[19]则没有考虑台变告警信号存在畸变的情况。文献[20]结合配电自动化、调度自动化、计量、计划/故障停电、95598 客户报修、用户欠费及台区低压设备拓扑等更多系统的信息, 给出了客户报修、线路跳闸、配变停电等 3 类停电事件的定位流程。所提方法重在体现不同系统的信息与不同故障层级之间的对应关系, 各层级内的故障定位过程依然只采用了一种信息, 没有深入考虑不同信息之间的融合与校验原则, 以及各系统信息可能存在畸变的情况。

本文提出一种融合 FTU 和配变告警信息的有源配网故障定位方法。该方法在分析 FTU 告警信息和配变失压告警信息不同特征的基础上, 根据配网拓扑结构, 动态生成不同告警信息对应的反映故障

区段和故障信息之间关系的关联矩阵, 并构造一种新的开关函数获得配网故障时不同信息源对应的期望告警信息, 有效避免繁琐的逻辑运算。根据两种信息源的期望信息和实际告警信息分别建立优化模型, 利用遗传算法求解, 计算对应信息源下各区段的故障概率。利用证据融合理论将两种信息源下的结果进行融合, 得到最终的故障定位结果。最后以修改后的 IEEE 33 节点为例进行仿真, 验证了所提方法对于单点故障和双重故障的定位能力及容错性。

1 有源配网故障定位流程

1.1 故障定位信息的来源与特点

配网发生相间短路故障后, 配电自动化系统的 FTU 产生过流告警信息, 计量系统中的配变终端也会产生相应的供电异常告警信息, 这两类告警信息可共同作为故障定位的依据。两类告警信息分别来自不同的独立系统, 对于同一故障会呈现不同的特征, 具体如表 1 所示。单一电源供电时, 配网发生故障后, FTU 告警信息主要产生于故障点的上游, 但是 FTU 覆盖范围有限, 且可能存在漏报和误报现象。配变的供电告警信息产生于故障点的下游, 覆盖了非自动化线路, 但是也存在掉线的情况, 且配变告警信息来自于计量系统, 需要通过网络接口进行转发, 相对于 FTU 告警信息, 会有延迟现象。

表 1 两类故障告警信息的特征

Table 1 Characteristics of two types of fault alarm information

类别	时效性	信号质量	覆盖范围	与故障点关系
FTU 告警信息	高	低	有限	上游
配变告警信息	中	中	全面	下游

1.2 故障定位流程

工程现场中, 两个系统中的告警信息均可能存在误报和漏报等现象。为了尽可能实现准确的故障定位, 可以充分利用两个系统间的独立性和信息间的冗余性, 先根据两系统提供的告警信息进行第一阶段的故障定位; 再依据信息融合理论将第一阶段的定位结果进行综合, 得到最终故障区段位置。

本文所提故障定位方法整体流程如图 1 所示, 分为 3 个步骤。第 1 步根据配网拓扑结构, 动态建立故障定位模型, 主要包含: 1) 反映配网故障区段和故障信息之间关系的关联矩阵; 2) 开关函数。第 2 步将故障定位问题转化为优化问题, 利用遗传算法进行求解。第 3 步将第二步中两个故障定位结果按照 D-S 证据融合理论进行综合分析, 并输出最终的定位结果。

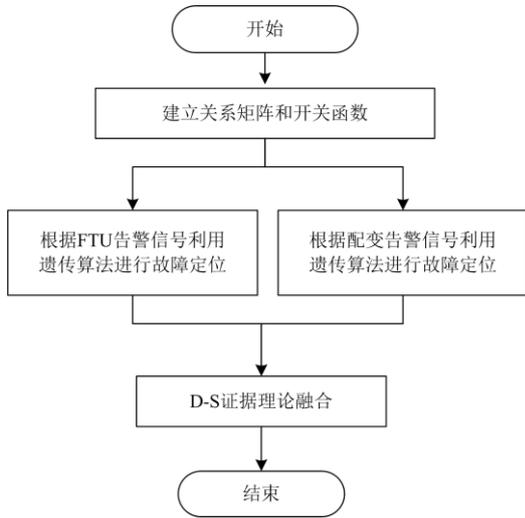


图 1 故障定位流程示意图

Fig. 1 Flow chart of fault location

2 故障定位模型

2.1 关联矩阵的建立

典型有源配网结构如图 2 所示。以安装有 FTU 设备的开关为节点，用数字 1—11 表示；以节点之间的区段为支路，用 L_1 — L_{11} 表示；配变连接在各区段上，用 T_1 — T_{11} 表示；分布式电源用 DG_1 — DG_3 表示；节点 1 与系统主电源(变电站 10 kV 母线)相连。分布式电源的接入点不纳入编号，也不在图中显示，此时，网络的节点数与区段数相等。规定每个区段的首端为靠近系统主电源侧的一端。各区段的状态采用 0-1 编码，正常时为 0，故障时为 1。对于一个具体的有源配网，某一区段发生故障后，各节点处 FTU 和配变的实际信号不仅与故障位置有关，而且与分布式电源接入位置、容量大小和控制策略有关。但整体而言，各节点 FTU 只可能出现 3 种情况：1 表示产生正向过流告警信号，0 表示正常，-1 表示反向过流信号，其中正向表示从主电源指向故障区段，否则为反向。各区段的配变供电异常告警信号只出现两种情况：0 表示正常，1 表示异常。

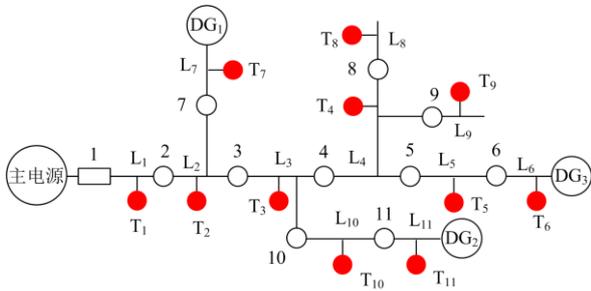


图 2 典型的有源配网结构

Fig. 2 Typical active distribution network structure

由于接入 K 个分布式电源的有源配网中包含 N 个节点和 N 个区段，且故障后 FTU 告警信号和配变告警信号的特征不同，因此对于主电源和各分布式电源，针对两种告警信号分别可以建立 $K+1$ 个反映故障区段和故障告警信息之间关系的 $N \times N$ 关联矩阵，两类告警信号对应的关联矩阵分别记为 A_k 和 T_k ($k=0$ 表示只有主电源工作时对应的关联矩阵， $k=1, 2, \dots, K$ ，表示只有第 k 个 DG 工作时对应的关联矩阵)，矩阵中第 i 行，第 j 列的元素分别记为 $A_k(i, j)$ 和 $T_k(i, j)$ ，其取值如式(1)和式(2)所示。

$$A_k(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{区段 } j \text{ 故障引起 FTU } i \text{ 正向过流告警} \\ 0, & \text{区段 } j \text{ 故障不引起 FTU } i \text{ 告警} \\ -1, & \text{区段 } j \text{ 故障引起 FTU } i \text{ 反向过流告警} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_k(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{区段 } j \text{ 故障引起配变 } i \text{ 告警} \\ 0, & \text{区段 } j \text{ 故障不引起配变 } i \text{ 告警} \end{cases} \quad (2)$$

以图 2 为例，说明 A_k 和 T_k 的构建方法。其中计算 A_k 分为 3 个步骤。

1) 构造过渡矩阵 B_k

如果节点 i 位于电源 k 到区段 j 所经过的路径上，则将 B_k 中第 i 行第 j 列元素置为 1。例如，主电源到区段 2 经过节点 1 和 2，则 $B_0(1,2)$ 和 $B_0(2,2)$ 为 1，第 2 列的其他元素为 0，而 DG_1 到区段 2 只经过节点 7，所以 B_1 中只有 $B_1(7,2)$ 为 1，其他元素为 0。

2) 构造对角矩阵 F_k

对于主电源， F_0 即为一个 $N \times N$ 的单位阵；对于分布式电源，如果节点 i 存在于主电源到分布式电源的路径上，则将 F_k 中第 i 行第 i 列元素置为 -1，否则置为 1。例如，主电源到 DG_1 经过节点 1、2 和 7，因此 $F_1(1,1)$ 、 $F_1(2,2)$ 和 $F_1(7,7)$ 均为 -1，其余对角线元素全为 1。

3) 计算关联矩阵 A_k ($A_k = F_k \times B_k$)

需要说明的是，在建立 A_k 的过程中认为各分布式电源单独作用时对配网的影响程度与主电源是等效的，而实际分布式电源的容量往往是比较小的。如图 2 中，当 DG_3 单独作用且容量较小时，由于 L_2 距离 DG_3 的电气距离较远，该区段故障时，未必会引起过流，此时节点 3—6 处的 FTU 未必会产生反向过流信号。所以在构造 B_k 时需要结合电源 k 的实际情况进行修正，如果根据电源 k 的容量和线路参数计算区段 j 发生故障时，不能引起节点 i 过流，则需要将 $B_k(i, j)$ 由 1 修正为 0。

配变供电异常告警信号不具有方向性，且故障

后, 失压告警信号产生于故障点的下游, 因此在建立关联矩阵 T_k 时有 2 个基本原则: 1) 当 $i = j$ 时, $T_k(i, j) = 1$; 2) 当 $i \neq j$ 时, 若电源 k 到节点 i 时经过了区段 j , 则 $T_k(i, j) = 1$ 。如对于 DG₁ 和节点 3, 则 $T_1(3, 2) = 1$, $T_1(3, 3) = 1$ 和 $T_1(3, 7) = 1$, 第 3 行其他元素为 0。当计及分布式电源自身的容量限制时, 如果分布式电源 k 单独作用时, 其容量难以满足系统功率需求, 则将 T_k 全部元素置 0。

2.2 开关函数的构建

开关函数的作用是确定有源配网中的区段发生故障时各节点告警信号的期望值。传统的开关函数不仅需要进行繁琐的逻辑运算, 而且还需要严格区分各节点上下游所包含的电源和区段。为了克服上述缺陷, 基于 2.1 节中建立的关联矩阵, 构造仅包含代数运算的开关函数, 改进后的开关函数分别如式(3)和式(4)所示。

$$C_1(\mathbf{X}) = \text{sign}\left(\sum_{k=0}^K A_k\right) \mathbf{X} \quad (3)$$

$$C_2(\mathbf{X}) = \text{sign}\left(\sum_{k=0}^K T_k\right) \mathbf{X} \quad (4)$$

式中, \mathbf{X} 表示配网各区段故障状态的列向量, 当区段 j 为故障区段时 $\mathbf{X}(j) = 1$, 否则 $\mathbf{X}(j) = 0$; $C_1(\mathbf{X})$ 和 $C_2(\mathbf{X})$ 分别表示当配网区段状态向量为 \mathbf{X} 时, FTU 和配变的期望告警信息列向量; $\text{sign}(\cdot)$ 表示符号函数, 取矩阵中对应元素值的符号, 当 $x > 0$ 时, $\text{sign}(x) = 1$; 当 $x = 0$ 时, $\text{sign}(x) = 0$; 当 $x < 0$ 时, $\text{sign}(x) = -1$ 。

3 基于遗传算法的区段故障定位

为了改善区段故障定位方法的容错性, 基于第 2 节中的开关函数, 针对 FTU 和配变的告警信息分别建立如式(5)所示的优化模型。

$$\min G_p(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N (R_p^i * C_p^i(\mathbf{X})) + w \sum_{i=1}^N \mathbf{X}(i) \quad (5)$$

式中: $p = 1$ 对应 FTU 告警信息的模型, $p = 2$ 对应配变告警信息的模型; i 表示节点编号; “*” 表示异或运算; w 表示权重系数, 本文取 0.7。

式(5)中目标函数的第一项用于计算期望告警信息向量 $C_p(\mathbf{X})$ 与实际收到的故障告警信息向量 R_p 之间的相似性; 第二项用于限制故障的区段数量。

考虑到 FTU 告警信息存在 0、1 和 -1 共 3 种状态, 如果直接计算期望告警信息与实际告警信息的差值, 则当信号由 1 误报为 -1 或 -1 误报为 1 时, 对应节点的差值为 2 或 -2, 对目标函数值的影响程度

与 0 误报为 1 或 -1 以及漏报的节点不同。因此, 在目标函数中采用异或运算, 即两个列向量中对应元素相同时为 0, 不同时为 1。

区段故障定位优化模型中含有符号函数, 是一个非凸的 0-1 规划问题, 采用遗传算法进行求解, 具体步骤如下所述。

1) 随机生成包含 M 个个体的初始种群, 种群中的每个个体为配网各区段状态组成的列向量。实际配网中, 双重故障发生的概率远小于单点故障, 因此本文根据故障点数量, 分成单点、两点和两点以上 3 种故障类型, 3 种故障对应的个体数量分别按照 70%、25% 和 5% 的比例分配。

2) 计算个体的适应度, 即将式(3)和式(4)代入式(5)中的目标函数并取相反数, 作为个体的适应度。适应度越大表示目标函数值越小, 对应个体所表示的区段故障状态产生的期望告警信号与实际故障告警信号越接近, 越能反映配网的真实故障情况。

3) 判断是否达到终止条件, 若没有达到, 则进入步骤 4), 否则转入步骤 8)。本文将终止条件设置为迭代 100 次。

4) 选择父代染色体, 将适应度的大小转换成对应的概率值, 按照轮盘赌策略, 选择同样数量的个体作为父代。

5) 交叉, 每两个父代个体作为双亲染色体, 随机产生两个交叉点位, 交换这两个点位之间的染色体片段。

6) 变异, 对每个子代个体随机产生变异点位, 变异点位对应的值取反, 变异点位数量限制在 3 个以下。

7) 返回步骤 2), 计算新一代的个体适应度。

8) 根据最后一代种群, 计算配网各区段的故障概率。随着迭代次数的增加, 种群在整体上将表现为逐步趋近最优解, 种群中包含实际故障区段的个体的数量将远大于包含非故障区段的个体数量。基于该现象, 配网各区段的故障概率如式(6)所示。

$$P_p(j) = \frac{\sum_{q=1}^M \mathbf{X}_{p,q}(j)}{\sum_{q=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{X}_{p,q}(j)}, \quad j = 1, 2, L, N \quad (6)$$

式中: j 为个体的第 j 位, 表示第 j 个区段; N 表示区段的数量; q 表示种群中个体的编号; $\mathbf{X}_{p,q}(j)$ 表示根据信息源 p 提供的告警信息, 区段 j 发生故障的概率。

基于遗传算法的区段故障定位整体流程如图 3 所示, 分别根据 FTU 和配变告警信息得到的每个区

段的故障概率作为下一步融合的两项证据体。

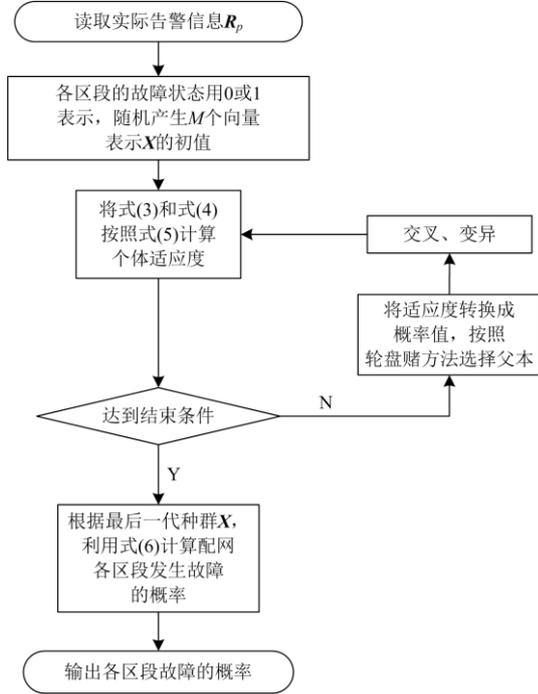


图3 采用遗传算法的故障定位流程

Fig. 3 Fault location flow by BPSO

4 证据融合

针对每一个配网区段, 本文将上一步得到的两个故障概率值作为两项独立的证据体, 利用 D-S 证据理论进行融合分析, 改善定位结果的可靠性^[21]。两项证据体对应的两个基本概率分配函数为 $m_{p,j}: 2^{U_{p,j}} \rightarrow [0,1]$, $U_{p,j}$ 为信息源 p 在配网区段 j 对应的识别框架, 物理含义为信息源 p 对应的配网区段 j 的状态, 分为故障和正常两种。 $m_{p,j}$ 为识别框架中的元素(即区段状态)对应的概率, 满足式(7)的约束。

$$m_{p,j}(0) + m_{p,j}(1) = 1 \quad (7)$$

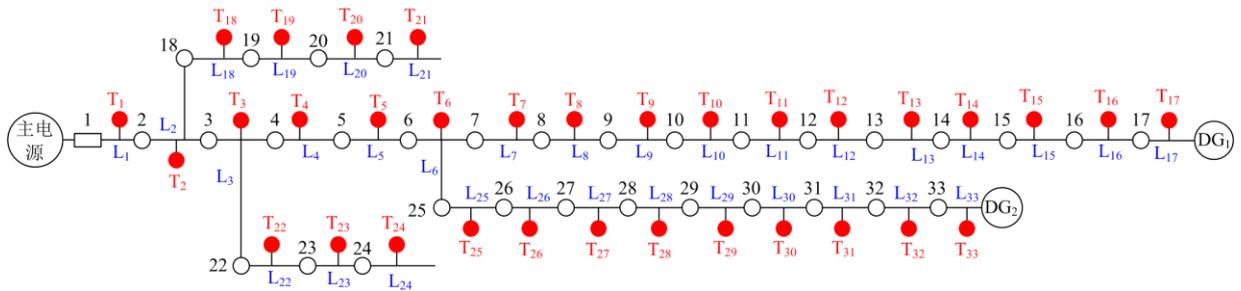


图4 修改后的 IEEE 33 节点系统拓扑结构

Fig. 4 Topology of modified IEEE 33-bus system

式中, $m_{p,j}(0)$ 和 $m_{p,j}(1)$ 分别表示根据信息源 p , 区段 j 正常和发生故障的概率, 其中的故障概率为第3节中对应的计算结果。

因为两个信息源相互独立, 所以这两个证据体可以按照式(8)的规则进行合成。

$$M_j(l) = \frac{1}{1-H} \prod_{p=1,2} m_{p,j}(l), \quad l=0,1 \quad (8)$$

式中: $M_j(l)$ 表示区段 j 状态为 l 的概率; H 表示证据冲突系数, 如式(9)所示。

$$H = 1 - \prod_{p=1,2} m_{p,j}(0) - \prod_{p=1,2} m_{p,j}(1) \quad (9)$$

H 反映了各证据间的冲突程度, 介于 0 和 1 之间, H 越大代表冲突程度越高, 反之表示冲突程度越小。融合结果中 $M_j(1)$ 即区段 j 最终的故障概率。所有区段按故障概率从大到小排序, 序列中的前一个或若干个即为故障定位结果。

5 算例分析

5.1 算例介绍

本文以修改后的 IEEE 33 节点系统为例, 验证所提方法的有效性。算例的拓扑结构如图 4 所示, 图中 L_{17} 和 L_{33} 区段分别接入两个分布式电源 DG_1 与 DG_2 。配电自动化系统中的 FTU 设备通常安装在开关或分支线处, 因此图中的节点即为 FTU 安装点, 将线路分为 33 段, 对应的节点编号为 1—33, 其中节点 1 对应的是主电源处的断路器, L_1 — L_{33} 为馈线区段的编号, T_1 — T_{33} 为配变的编号。

结合图 4, 根据关联矩阵的建立规则, 分别得到两种信号对应的系统主电源和各分布式电源的关联矩阵 A_0 、 A_1 、 A_2 和 T_0 、 T_1 、 T_2 。为了简化仿真, 将图 4 中各分布式电源对配网的影响与主电源作等价处理, 不需要修正 A_0 和 T_k ($k=0,1,2$)。首先分别设置 4 种单点故障位置(L_3 、 L_{16} 、 L_{19} 和 L_{28}), 分别代表线路首端、末端以及无源和有源支路。然后设

置 $[L_9, L_{19}]$ 、 $[L_{10}, L_{28}]$ 和 $[L_{19}, L_{23}]$ 等 3 种主干线、有源支路与无源支路组合的双重故障情形。针对这 7 种故障情况, 在故障告警信息完全准确和存在误报漏报的两种条件下, 分别采用本文方法进行故障定位。算法参数设置方面, 遗传算法的种群规模 $M = 200$, 最大迭代次数为 100。

5.2 告警信号准确时的仿真分析

告警信息完全准确时的故障定位结果如表 2 所示。表中下标表示区段编号, 括号内数字表示对应

表 2 告警信息准确时的定位结果

Table 2 Location results with accurate alarm signals

故障区段	信号源	融合前结果	融合后结果
L ₃	FTU	L ₃ (0.96)	L ₃ (0.97)
	配变	L ₃ (0.94)	
L ₁₆	FTU	L ₁₆ (0.91)	L ₁₆ (0.98)
	配变	L ₁₆ (0.97)	
L ₁₉	FTU	L ₁₉ (0.92)	L ₁₉ (0.96)
	配变	L ₁₉ (0.95)	
L ₂₈	FTU	L ₂₈ (0.93)	L ₂₈ (0.95)
	配变	L ₂₈ (0.87)	
L ₉ 和 L ₁₉	FTU	L ₉ (0.43), L ₁₉ (0.40)	L ₉ (0.47), L ₁₉ (0.44)
	配变	L ₉ (0.42), L ₁₉ (0.40)	
L ₁₀ 和 L ₂₈	FTU	L ₁₀ (0.39), L ₂₈ (0.41)	L ₂₈ (0.45), L ₁₀ (0.44)
	配变	L ₁₀ (0.42), L ₂₈ (0.40)	
L ₁₉ 和 L ₂₃	FTU	L ₁₉ (0.44), L ₂₃ (0.45)	L ₂₃ (0.48), L ₁₉ (0.46)
	配变	L ₁₉ (0.40), L ₂₃ (0.41)	

区段发生故障的概率(例如, L₃(0.96) 表示故障发生在区段 L₃ 的概率为 0.96)。需要注意的是, 当有多个故障区段时, 概率值将被稀释, 但各区段发生故障的概率之和依然为 1, 表 2 中的结果只呈现了概率大于 0.1 的故障区段。从表 2 可以看出, 当信息完全正确时, 不进行证据融合也能实现准确的故障定位, 表明本文提出的开关函数和优化模型能够用于单点故障和多点故障的定位。但是, 由于遗传算法属于群体性启发式优化方法, 最后一次迭代的结果中依然存在个别误判情况, 导致表 2 中融合前故障区段的故障概率之和不为 1。

5.3 告警信号存在畸变时的仿真分析

表 3 为告警信息存在误报或漏报等畸变情况下的故障定位结果。从表 3 中可以看出, 当故障告警信息存在畸变时, 依靠单一信息源的定位准确性显著下降, 容易出现故障区段误判。特别的, 当其他支路末端(如故障点 L₁₆ 算例下对应的 FTU 畸变信号, 故障点 L₂₈ 算例下对应的配变畸变信号)或连续相邻位置(如故障点 L₁₉ 算例下对应的 FTU 畸变信号)发生故障告警信息畸变时, 利用单一信息源往往无法实现正确故障定位。但对两个定位结果进行融合处理后, 不仅可准确定位故障区段, 而且还提高了各区段之间故障概率的区分度, 更能凸显实际的故障区段, 验证了该方法相对单一信息源的方法具备更优的容错能力和准确度。

表 3 信号存在误报漏报时的定位结果

Table 3 Fault location results under signal distortion conditions

故障区段	信号源	畸变信号	融合前结果	融合后结果
L ₃	FTU	10, 19, 21, 27	L ₃ (0.45), L ₁₉ (0.43)	L₃(0.73) , L ₂₀ (0.12), L ₁₉ (0.10)
	配变	T ₂₀ , T ₁₄ , T ₂₆	L ₂₀ (0.43), L ₃ (0.42)	
L ₁₆	FTU	8, 21, 27	L ₂₁ (0.47), L ₁₆ (0.46)	L₁₆(0.84) , L ₂₁ (0.11)
	配变	T ₇ , T ₉ , T ₂₀	L ₁₆ (0.45), L ₂₀ (0.41)	
L ₁₉	FTU	7, 8, 13, 29	L ₁₉ (0.34), L ₇ (0.30), L ₈ (0.31)	L₁₉(0.80) , L ₇ (0.12)
	配变	T ₅ , T ₁₁ , T ₂₈ , T ₂₃	L ₁₉ (0.75), L ₂₃ (0.19)	
L ₂₈	FTU	5, 11, 15, 20	L ₂₈ (0.72), L ₂₀ (0.21)	L₂₈(0.85) , L ₂₄ (0.10)
	配变	T ₅ , T ₂₄	L ₂₄ (0.47), L ₂₈ (0.44)	
L ₉ 和 L ₁₉	FTU	14, 28	L ₉ (0.40), L ₁₉ (0.38)	L₉(0.42) , L₁₉(0.39) , L ₂₂ (0.11)
	配变	T ₁₂ , T ₂₂ , T ₃₁	L ₉ (0.35), L ₁₉ (0.32), L ₂₂ (0.20)	
L ₁₀ 和 L ₂₈	FTU	5, 13, 30	L ₁₀ (0.26), L ₂₉ (0.21), L ₃₀ (0.21), L ₂₈ (0.20)	L₁₀(0.40) , L₂₈(0.37)
	配变	T ₇ , T ₁₉ , T ₂₄	L ₂₄ (0.33), L ₁₀ (0.31), L ₂₈ (0.29)	
L ₁₉ 和 L ₂₃	FTU	10, 21, 29	L ₂₃ (0.35), L ₁₉ (0.30), L ₂₀ (0.25)	L₁₉(0.41) , L₂₃(0.40)
	配变	T ₇ , T ₉	L ₁₉ (0.37), L ₂₃ (0.36), L ₇ (0.17)	

5.4 算法容错能力分析

为了分析本文方法的容错能力, 针对单点故障和双重故障, 分别仿真告警信号存在不同畸变率时的定位准确性。仿真中, 发生信号畸变的 FTU 和配

变的编号随机产生, 畸变信号的数量从 0 按照步长 1 线性增加到 6 个, 共对应 7 种不同的畸变率, 其中最大畸变率约为 18.2%。由于图 4 中共有 33 个节点, 所以单点故障有 33 种情况, 双重故障有 1056

种情况。对这两类共计 1089 种情况分别按照不同的畸变率, 利用本文所提的故障定位方法各计算 100 次, 统计不同畸变率下单点故障和双重故障定位正确的总次数, 并转换为百分比, 得到图 5 所示的结果。从图 5 可以看出, 当畸变信号数量小于等于 3(对应的信号畸变率约为 9.1%)时, 单点故障的定位正确率在 90% 以上, 双重故障的定位正确率在 80% 以上。随着信号畸变率的增加, 单点和双重故障的定位准确率均下降, 而且下降速度逐渐增加。当畸变信号数量为 6 个(对应的信号畸变率约为 18.2%)时, 双重故障的定位准确率为 54%, 单点故障的定位正确率约 63%。上述仿真分析表明本文所提方法具备较高的容错能力。

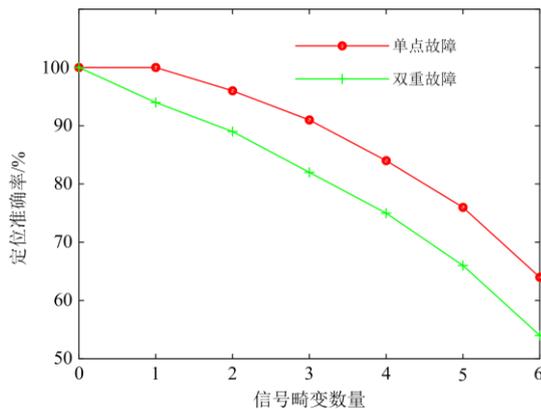


图 5 不同信号畸变率时的定位准确度

Fig. 5 Location accuracy under different signal distortion rates

6 结论

本文面向含分布式电源的有源配网, 针对单一故障信息源在准确性与完整性上存在不足的问题, 提出了一种融合 FTU 和配变告警信息的故障定位方法。该方法具有以下特点:

1) 在多源信息利用方面, 综合了来自配电自动化系统的 FTU 告警信息和计量系统的配变告警信息, 能够更大程度地改善单一系统告警信息误报、漏报的不利影响, 提升配网故障定位的容错性和准确性。

2) 在故障定位建模方面, 考虑 FTU 告警信息和配变告警信息的不同特征, 分别建立反映配网故障区段和故障信息之间关系的关联矩阵, 并据此构造一种新的开关函数, 不仅无需区分节点的上下游, 而且避免了繁琐的逻辑运算。

3) 在多源信息融合方面, 将故障定位问题转化为优化问题, 在采用遗传算法求解的同时, 以配网各区段故障的概率值, 代替确定性的故障区段组合, 可以进一步提高算法的容错能力。利用 D-S 证据理

论融合两个独立系统的定位结果, 解决了不同信息源由于畸变而导致定位结果之间冲突的问题。

算例分析结果表明, 本文方法不仅可对单点和双重故障实现精确定位, 而且具有较高的容错性。

参考文献

- [1] 马腾飞, 高亮. 含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 64-68.
MA Tengfei, GAO Liang. Fault location algorithm for active distribution network with multi micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 64-68.
- [2] 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): 152-158.
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): 152-158.
- [3] YAN H, WU X, LIN C, et al. A modified matrix algorithm dichotomy for distribution network fault location[C] // 2020 International Conference of Recent Trends in Environmental Sustainability and Green Technologies (ICRTEG 2020), October 16-18, 2020, Ottawa, Canada: 1-9.
- [4] 许峻宁, 陈璟华, 荣泽成, 等. 基于改进蝙蝠算法的配电网故障区段定位[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(5): 62-67.
XU Junning, CHEN Jinghua, RONG Zecheng, et al. Fault section location of distribution network based on improved bat algorithm[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2020, 37(5): 62-67.
- [5] 韦翔, 梁艳, 郭立, 等. 基于 Lambda 算法的配电网故障定位方法研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-7[2022-02-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210907.1505.004.html>.
WEI Xiang, LIANG Yan, GUO Li, et al. Research on fault location method of distribution network based on Lambda algorithm[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-7[2022-02-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210907.1505.004.html>.
- [6] TENG J, HUANG W, LUAN S. 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.
- [7] 李明阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 含分布式电源的主动配电网分层故障定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(8): 79-87.

- LI Mingyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Hierarchical fault location method for active distribution network with distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(8): 79-87.
- [8] WANG C, PANG K, SHAHIDEHPOUR M, et al. MILP-based fault diagnosis model in active power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3847-3857.
- [9] 程云祥, 李阳, 卢芳, 等. 多源信息辅助分区的主动配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 147-154.
- CHENG Yunxiang, LI Yang, LU Fang, et al. Fault-section location for active distribution networks assisted by multi-source information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 147-154.
- [10] PANG Q, YE L, GAO H, et al. Multi-timescale-based fault section location in distribution networks[J]. IEEE Access, 2021, 9: 148698-148709.
- [11] 李振钊, 王增平, 张玉玺, 等. 基于升维线性规划的主动配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24):122-132.
- LI Zhenzhao, WANG Zengping, ZHANG Yuxi, et al. Fault section location method for active distribution network based on linear programming with ascending dimension[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 122-132.
- [12] 孔培, 刘建锋, 周健, 等. 基于整数线性规划的配电网故障定位容错算法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 27-35.
- KONG Pei, LIU Jianfeng, ZHOU Jian, et al. Fault-tolerant algorithm for fault location in distribution network based on integer linear programming[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 27-35.
- [13] JIANG Y Z. Data-driven probabilistic fault location of electric power distribution systems incorporating data uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4522-4534.
- [14] 赵乔, 王增平, 董文娜, 等. 基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 83-89.
- ZHAO Qiao, WANG Zengping, DONG Wenna, et al. Research on fault location in a distribution network based on an immune binary particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 83-89.
- [15] HUANG X L, XIE Z Y, HUANG X Y. Fault location of distribution network based on improved cuckoo search algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 2272-2283.
- [16] HU C H, WU Y J, CHEN Q J. Fault section location for distribution networks based on membrane computing and fusion of multi-source information[C] // 2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE), November 22-24, 2019, Shenyang, China: 282-286.
- [17] LIN S, CHEN X, WANG Q. Fault diagnosis model based on Bayesian network considering information uncertainty and its application in traction power supply system[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(5): 671-680.
- [18] JIANG K, WANG H, SHAHIDEHPOUR M, et al. Block-sparse Bayesian learning method for fault location in active distribution networks with limited synchronized measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3189-3203.
- [19] 于安迎, 程云祥, 卢芳, 等. 考虑多源信息的配电网故障定位容错方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(4): 373-378.
- YU Anying, CHENG Yunxiang, LU Fang, et al. Fault tolerant algorithm for fault location in distribution network considering multi-source information[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(4): 373-378.
- [20] 耿俊成, 田琪, 李晓露, 等. 基于多源信息的配电网停电故障研判[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(6): 572-576.
- GENG Juncheng, TIAN Qi, LI Xiaolu, et al. Fault location based on multisource information in distribution networks[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2018, 34(6): 572-576.
- [21] WANG B, JIA J Y, DENG Z H, et al. A state monitoring method of gas regulator station based on evidence theory driven by time-domain information[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 694-702.

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-05-20

作者简介:

郭上华(1977—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为配电网自动化、自动化仪器仪表技术; E-mail: gshhmail@163.com

王钢(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、电力系统规划与可靠性分析。 E-mail: wangg@scut.edu.cn

(编辑 姜新丽)