

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200073

基于整数线性规划的配电网故障定位容错算法

孔培¹, 刘建锋¹, 周健², 周勇良¹, 宋子恒¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 为了提高配电网馈线故障定位的速度和容错能力, 提出一种基于整数线性规划模型的配电网故障区段定位容错算法。将各馈线终端单元(Feeder Terminal Unit, FTU)的漏报、误报状况和馈线状态作为决策变量, 基于最小故障诊断集理论, 建立计及 FTU 漏报、误报信息的故障定位模型。针对逻辑运算在求解大规模配电网故障区段时建模复杂、算法受限的问题, 构建基于代数关系运算的开关函数, 并提出一种逻辑关系线性化策略将约束条件线性化。所建模型采用具有良好数值稳定性的常规优化方法进行决策, 以保证解的全局最优性。仿真算例表明, 所提方法定位准确高效、容错性强, 在正确定位故障馈线区段的同时能获取具体节点的漏报、误报状况, 适用于多节点过流信息发生畸变的大型配电网。

关键词: 配电网; 故障区段定位; 高容错性; 整数线性规划

Fault-tolerant algorithm for fault location in distribution network based on integer linear programming

KONG Pei¹, LIU Jianfeng¹, ZHOU Jian², ZHOU Yongliang¹, SONG Ziheng¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Electrical Science Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: In order to improve the speed and fault tolerance of feeder fault location in a distribution network, a fault location method based on an integer linear programming model is proposed. The missing and false information of each Feeder Terminal Unit (FTU) and feeder state are taken as decision variables. Based on the theory of minimum fault diagnosis set, a fault location model considering the missing and false information of the FTU is established. In order to solve the problem of complex modeling and a limited algorithm in a large-scale distribution network fault section by logic operation, a switch function based on an algebraic relation operation is constructed, and a logic relation linearization strategy is proposed to linearize the model constraint. In order to ensure the global optimization of the solution, the conventional optimization method with good numerical stability is adopted in the model. The simulation results show that the proposed method is accurate, efficient and fault-tolerant. It can obtain the status information of missing and false alarms of specific nodes while correctly locating the feeder section. This is suitable for a large-scale distribution network with multi node over-current information distortion.

This work is supported by Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51807114).

Key words: distribution network; fault section location; high fault tolerance; integer linear programming

0 引言

准确高效的故障区段定位有利于故障隔离和供电恢复, 对于维持配电网的稳定运行有着重要作用^[1-4]。随着配电网自动化技术的发展, 馈线终端单

元、智能电表、通信装置等自动化设备广泛应用于配电系统^[5-6], 实现了电流、功率等状态信息的实时采集。相较于阻抗法^[7-9]、Petri 网^[10]、行波法^[11-13]等传统故障定位方法, 基于 FTU 采集的过电流信息进行配电网故障定位的方法具有原理简单、实现便捷、实时性好的优势, 已成为近年来的研究热点。

目前, 基于 FTU 的配电网故障定位方法主要分为两类: 基于矩阵分析的直接方法^[14-16]和采用优化

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目资助(51807114)

算法求解目标函数的间接方法^[17-30]。矩阵直接算法利用配电网拓扑结构和各线路区段 FTU 上传的故障告警信息来构建故障判别矩阵, 定位判据简单、判别速度快, 但容错性能较差, 只适用于健全信息条件下的配电网故障定位。间接方法通常以馈线区段状态作为决策变量来建立配电网故障定位的逻辑关系模型, 所建模型具有较强的容错能力和通用性。文献[19]首次采用遗传算法求解单电源辐射状配电网故障定位模型, 由于目标函数以及算法参数设置的不合理, 导致该模型在节点信息正确时仍存在误判现象。文献[20]在目标函数中引入“最小故障诊断集”理论, 在所有可能的故障定位结果中选取故障区段总数最少的解, 一定程度上改善了模型的容错性能, 同时对遗传算法进行改进, 提高了算法的准确度与求解速度。随着群体智能优化算法的发展, 蚁群算法^[21]、仿电磁学算法^[22]、免疫算法^[23]以及果蝇优化算法^[24]等逐渐用于求解配电网故障定位模型, 在提高故障定位的准确度和求解效率方面均取得一定的成效。对于分布式电源 (Distributed Generation, DG) 并网^[25-26]后故障电流双向流动的问题, 文献[27]通过规定电流单一正方向, 将含分布式电源的主动配电网转换为传统辐射状配电网进行建模, 并首次运用和声算法进行求解。面对日益扩大的配网规模, 故障区段定位建模和求解的复杂程度不断增加, 文献[28-30]提出了划分区域的概念, 按照馈线末端是否接入分布式电源将配电系统分为主干支路以及若干有源树枝和无源树枝, 从而降低单次参与运算参数的维数, 避免出现“维数灾”, 提高了求解效率。

综上, 以智能优化算法为基础的配电网故障定位间接方法已取得了大量成果, 定位准确度和求解效率不断得到改善, 然而现阶段仍存在一些问题: 1) 建模时将馈线区段状态作为唯一决策变量, 构建目标函数时没有考虑到 FTU 节点的漏报和误报; 2) 模型中包含逻辑运算, 应用于大规模配电网时建模复杂; 3) 对于包含逻辑运算的故障定位模型, 现阶段只能依靠智能优化算法求解, 耗时长且求解准确率受到参数设置的影响, 无法保证解的全局最优。因此, 建立计及节点漏报和误报的非逻辑运算的配电网故障定位新模型具有重要意义。

本文将各 FTU 节点上传过流信息的漏报、误报状况和馈线状态作为决策变量, 基于最小故障诊断集理论, 以单一故障假设为前提, 构建配电网故障定位新模型。提出一种逻辑运算线性化的方法, 将模型中的非线性约束条件线性化, 建立不含逻辑运算的配电网故障定位 0-1 整数线性规划模型, 采用

常规线性规划方法进行求解。最后通过仿真算例, 验证本文所提故障定位方法的准确性和高效性。

1 配电网故障区段定位模型分析

1.1 故障信息采集和编码

配电网各分段开关、联络开关、出口断路器等处均配置 FTU 监测装置用于采集所在区段的故障电流信息, 将所测电流与节点预设阈值进行比较, 并通过无线通信通道上传到配电主站。

采取 0-1 编码方式, 对于含 N 节点、 M 条馈线区段的配电网, 定义馈线区段状态向量 $\mathbf{X} = [x(1) \ x(2) \ \dots \ x(i) \ \dots \ x(M)]^T$, 节点过流信息向量 $\mathbf{S} = [S_1 \ S_2 \ \dots \ S_j \ \dots \ S_N]^T$ 。其中, $x(i)$ 表示区段 i 的故障状态, 有

$$x(i) = \begin{cases} 1 & \text{区段 } i \text{ 故障} \\ 0 & \text{区段 } i \text{ 正常} \end{cases} \quad (1)$$

S_j 表示节点 j 处实际上传到配电主站的过流信息, 考虑到分布式电源的接入, 规定网络的正方向为从系统电源流向用户或分布式电源。

$$S_j = \begin{cases} 1 & j \text{ 节点存在正方向过电流} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

若该节点存在正方向的故障电流, 则上传信号为“1”, 若未检测到故障电流或存在反向故障电流, 则上传信号为“0”。

1.2 开关函数

开关函数反映了馈线区段状态与节点过流信息之间的关联关系。在配电网中, 将节点 j 到系统主电源所经过的馈线区段定义为该节点的上游区域, 从该节点到馈线末端或分布式电源所经过的全部馈线区段定义为下游区域。文献[21-24]将开关函数定义为节点下游区域状态值的逻辑“或”运算。

$$S_j^*(\mathbf{X}) = \prod_{n_d=1}^{N_d} x_j(n_d) \quad (3)$$

式中: N_d 为配电网节点 j 下游区域馈线区段数量; $x_j(n_d)$ 为节点 j 下游区域馈线区段状态值。

根据逻辑“或”构建的开关函数可以正确反映节点与下游馈线之间的因果联系^[21-24], 但是逻辑关系建模的求解依赖于智能优化算法, 在处理大规模配电网故障定位问题时存在数值稳定性差、效率不高等问题。本文提出新的开关函数为

$$S_j^*(\mathbf{X}) = \sum_{n_d=1}^{N_d} x_j(n_d) \quad (4)$$

以图 1 含分布式电源配电网为例, 式(1)一式(8)为馈线区段, 节点 1—8 均装有 FTU 装置, 各节

点开关函数为

$$\begin{cases} S_1^*(\mathbf{X}) = x(1) + x(2) + x(3) + x(4) + x(5) + x(6) + \\ \quad x(7) + x(8) \\ S_2^*(\mathbf{X}) = x(2) + x(3) + x(4) + x(5) + x(6) + x(7) + x(8) \\ S_3^*(\mathbf{X}) = x(3) + x(5) + x(6) + x(8) \\ S_4^*(\mathbf{X}) = x(4) + x(7) \\ S_5^*(\mathbf{X}) = x(5) \\ S_6^*(\mathbf{X}) = x(6) + x(8) \\ S_7^*(\mathbf{X}) = x(7) \\ S_8^*(\mathbf{X}) = x(8) \end{cases} \quad (5)$$

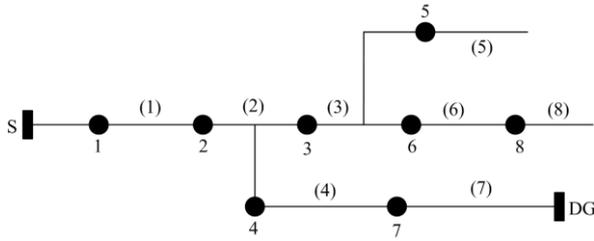


图1 含 DG 的 T 型耦合配电网

Fig. 1 T-type coupling node distribution network with DG

假设区段(4)发生故障, 此时馈线状态向量 $\mathbf{X} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 根据式(5)计算出开关函数向量 $\mathbf{S}^*(\mathbf{X}) = [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。若各 FTU 节点均正确上传该处故障过流信息, 区段(4)上游节点 S_1 、 S_2 、 S_4 均流过正向故障电流, 即 $S_1 = S_2 = S_4 = 1$ 。无源支路节点 S_3 、 S_5 、 S_6 、 S_8 未监测到故障电流, 含 DG 支路节点 S_7 流过反向故障电流, 故 $S_3 = S_5 = S_6 = S_8 = S_7 = 0$, 此时开关函数向量 $\mathbf{S}^*(\mathbf{X})$ 与实际各节点上传的过流信息向量 \mathbf{S} 吻合。

1.3 目标函数

判断配电网中发生故障的区段实际上就是找出一种假设场景, 该场景下的区段状态最能解释所有 FTU 节点上传的故障过流信息。对于 N 节点、 M 条馈线的配电网, 构建如下的目标函数^[31-32]。

$$\min F(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^M |S_j - S_j^*(\mathbf{X})| \quad (6)$$

FTU 节点实际上传的过流信息 S_j 与假设场景下由故障区段所推导出的节点状态 $S_j^*(\mathbf{X})$ 相差越小, 表明假设场景越接近于真实的故障情况, 故障定位结果越准确。由于 FTU 及通信设备大都安装在户外, 易受雷电、外力、电磁等影响, 上传的过流信息存在畸变。本文将“节点上传过流信息为 0,

而实际检测到该节点正向电流超限”定义为漏报, 将“节点上传过流信息为 1, 而实际该节点未检测到正向电流超限”定义为误报。根据文献[30-32], 开关函数 $S_j^*(\mathbf{X})$ 与节点过流信息 S_j 之间差值的和, 实际就是配网中 FTU 节点漏报和误报的总数。当 \mathbf{X} 对应正确故障定位结果时, 若系统中所有节点均未发生漏报或误报, 则 $S_j^*(\mathbf{X})$ 和 S_j 完全吻合, 此时为故障定位的最理想状态, 目标函数值为 0。

式(6)含有绝对值运算, 在求解时要处理绝对值内的正负问题, 增加了决策的复杂程度, 根据上述分析, 将其转换为一般线性优化问题。

$$\min f = N_l + N_m \quad (7)$$

式中: N_l 表示配电网中发生漏报的节点总数; N_m 表示配电网中发生误报的节点总数。为实现差异的量化, 对式(7)的各个部分进行加权, 同时考虑到最小故障诊断集理论, 构建目标函数为

$$\min f = w_1 N_l + w_2 N_m + \mu \sum_{i=1}^M x_i \quad (8)$$

式中, w_1 和 w_2 分别为 FTU 节点漏报数量和误报数量的权重系数, 对于不同的配电网, 根据网络的历史数据估计节点的漏报率和误报率, 参考文献[32], 本文设置 $w_1 = 1$ 、 $w_2 = 1$ 。 μ 的取值与配电网的拓扑结构以及运行方式有关, 对于单一主电源网络, μ 取 0。目标函数消除了绝对值运算, 在保证最优决策的基础上可以提高故障定位的速度。

1.4 约束条件

开关函数反映了馈线区段状态与 FTU 节点过流信息之间的对应关系, 不考虑漏报和误报时, 通过各节点的过流信息可以确定故障区段。若计及漏报和误报因素, 为得到目标函数的最优解, 还需满足以下约束条件。

1.4.1 节点过流信息与开关函数的对应关系

以节点 j 为例, 分别采用二进制变量 l_j 、 m_j 描述其漏报、误报状况: $l_j = 1$ 表示 j 节点过流信息发生漏报, $l_j = 0$ 表示未发生漏报; $m_j = 1$ 表示节点过流信息发生误报, $m_j = 0$ 表示未发生误报。且满足:

$$N_l = \sum_{j=1}^N l_j \quad (9)$$

$$N_m = \sum_{j=1}^N m_j \quad (10)$$

分析发现, 配电主站收到节点 j 的上传信息 $S_j = 1$ 的情况如下。

1) 节点 j 存在正方向故障电流, 且未发生漏报。

2) 节点 j 未监测到故障电流或存在反方向故障电流, 且发生误报。

概括表示 FTU 节点上传到配电主站的过流信息 S_j 与开关函数 $S_j^*(\mathbf{X})$ 的对应关系为

$$S_j = (S_j^*(\mathbf{X}) \otimes (-l_j)) \oplus ((-S_j^*(\mathbf{X})) \otimes m_j) \quad (11)$$

式中: \oplus 表示逻辑求和运算; \otimes 表示逻辑乘法运算; \neg 表示对变量进行逻辑“非”运算。

1.4.2 变量的组合形式

实际上, 并非二进制变量 l_j 、 m_j 、 S_j 和 $S_j^*(\mathbf{X})$ 的任意组合形式都能够为优化模型提供可行的解决方案。现将其组合形式在表 1 中枚举。

表 1 变量组合形式的枚举

Table 1 Enumeration of variable combinations

S_j^*	l_j	m_j	S_j	解释说明
1	0	0	1	节点监测到正向过电流, 正确上报到主站, 收到过流信号为 1
1	1	0	0	节点监测到正向过电流, 发生漏报, 主站收到过流信号为 0
0	0	0	0	节点未监测到正向过电流, 正确上报到主站, 收到过流信号为 0
0	0	1	1	节点未监测到正向过电流, 发生误报, 主站收到过流信号为 1
1	0	1	—	逻辑矛盾
1	1	1	—	逻辑矛盾
0	1	0	—	逻辑矛盾
0	1	1	—	逻辑矛盾

由表 1 可知, FTU 上传的过流信息不可能实现“同时既漏报又误报、有过流又漏报、无过流又误报”。为消除决策变量的不可行组合, 保障故障定位的准确度, 将决策变量组合形式约束为

$$\begin{cases} S_j^*(\mathbf{X}) \otimes m_j = 0 \\ (-S_j^*(\mathbf{X})) \otimes l_j = 0 \\ m_j \otimes l_j = 0 \end{cases} \quad (12)$$

1.4.3 单点故障约束

由于配电系统中发生多点短路故障的概率远远小于单点故障出现的概率, 因此本文对于仅含单一主电源的配电网以及含联络开关的多电源环网中的各个子网, 均以单点故障假设为前提, 形成如下约束。

$$\sum_{i=1}^M x(i) \leq 1 \quad (13)$$

2 配电网故障定位整数线性规划模型

为建立配电网故障定位整数线性规划模型, 现

通过逻辑关系线性化原理将约束条件线性化。

2.1 逻辑关系线性化原理

2.1.1 逻辑求和

对于 n 个变量的逻辑求和运算, 通过式(14)可以转化为线性运算。

$$\begin{aligned} a &= p_1 \oplus p_2 \oplus \dots \oplus p_{n-1} \oplus p_n \\ \Leftrightarrow \begin{cases} a \geq p_i, \forall i \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \\ a \leq p_1 + p_2 + \dots + p_{n-1} + p_n \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, a 和 p_i 均为 0-1 二进制变量。

2.1.2 逻辑乘法

对于 m 个变量的逻辑乘法运算, 通过式(15)可转化为相应的线性运算。

$$\begin{aligned} b &= q_1 \otimes q_2 \otimes \dots \otimes q_{m-1} \otimes q_m \\ \Leftrightarrow \begin{cases} b \leq q_i, \forall i \in \{1, 2, 3, \dots, m\} \\ b \geq q_1 + q_2 + \dots + q_{m-1} + q_m - (m-1) \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, b 和 q_i 均为 0-1 二进制变量。

2.1.3 逻辑“非”运算

对于决策变量的逻辑“非”运算, 通过式(16)可转化为线性运算。

$$\begin{aligned} c &= (\neg r) \\ \Leftrightarrow c &= (1-r) \end{aligned} \quad (16)$$

式中, c 和 r 均为 0-1 二进制变量。

2.2 约束条件线性化

2.2.1 过流信息与开关函数关系线性化

式(11)存在逻辑乘法、逻辑求和以及逻辑“非”三种形式的逻辑运算。首先引入二进制辅助变量 u_j 和 v_j , 满足:

$$u_j = S_j^*(\mathbf{X}) \otimes (-l_j) \quad (17)$$

$$v_j = (-S_j^*(\mathbf{X})) \otimes m_j \quad (18)$$

根据式(15)、式(16), 得到辅助变量的线性表达式为

$$\begin{cases} u_j \leq S_j^*(\mathbf{X}), u_j \leq 1-l_j \\ u_j \geq S_j^*(\mathbf{X}) + (1-l_j) - 1 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} v_j \leq 1-S_j^*(\mathbf{X}), v_j \leq m_j \\ v_j \geq 1-S_j^*(\mathbf{X}) + m_j - 1 \end{cases} \quad (20)$$

从而将原约束条件式(11)等价于

$$\begin{cases} S_j \geq u_j, S_j \geq v_j \\ S_j \leq u_j + v_j \end{cases} \quad (21)$$

2.2.2 变量间组合形式约束线性化

式(12)中存在逻辑乘法和逻辑“非”两种形式

的运算,根据式(15)、式(16),将其转化为

$$\begin{cases} S_j^*(\mathbf{X}) + m_j \leq 1 \\ 1 - S_j^*(\mathbf{X}) + l_j \leq 1 \\ m_j + l_j \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

综上,实现了计及节点漏报和误报的配电网故障定位容错模型的建立以及线性化表达,其形式如式(23)所示。

$$\begin{cases} \text{目标函数: } \min f = w_1 N_l + w_2 N_m + \mu \sum_{i=1}^M x_i \\ \text{s.t. 开关函数约束: 式(4)} \\ \text{过流信息约束: 式(19)一式(21)} \\ \text{变量组合约束: 式(9)、式(10)、式(22)} \\ \text{单一故障约束: 式(13)} \end{cases} \quad (23)$$

2.3 模型求解策略与求解流程

线性规划算法具有全局收敛、求解速度快的优势,现已开发多种商业化软件和工具箱处理线性规划问题。本文算例均通过 Lingo 软件采取分支定界法进行求解。分支定界法的基本思想是通过“分支”对所有可行解空间进行反复分割,形成越来越小的子集。以本文求解最小值问题为例,将每一子集代入目标函数得出一个下界,称之为“定界”。在接下来的运算中,若出现更优的下界,则将其代替原本的界限,保留有价值的分支。凡是界限超出已知下界的子集不再进行分支,通过“剪支”缩小搜索范围,简化运算,直至找出可行解为止。最终得到可行解的值不大于任何子集的界限,即为模型的最优解。

本文求解配电网故障区段的具体步骤如下:

(1) 规定网络正方向,对配电网中开关节点和馈线区段进行编号;

(2) 根据网络拓扑结构生成各个节点开关函数表达式,获取 FTU 节点上传的过流信息,完成信息编码;

(3) 建立计及节点漏报和误报的配电网故障区段定位容错模型,通过线性化策略转化为式(23)所示模型,并通过 Lingo 进行求解;

(4) 输出定位结果,包括故障区段位置以及各个节点的漏报和误报状况。

3 仿真算例

3.1 含分布式电源配电网算例分析

以图 2 所示含分布式电源的 30 节点配电网为例,系统包含主电源 S_1 , 分布式电源 DG_1 、 DG_2 、

DG_3 。配电网中 FTU 节点编号为 1—30, 馈线区段编号为(1)—(30)。

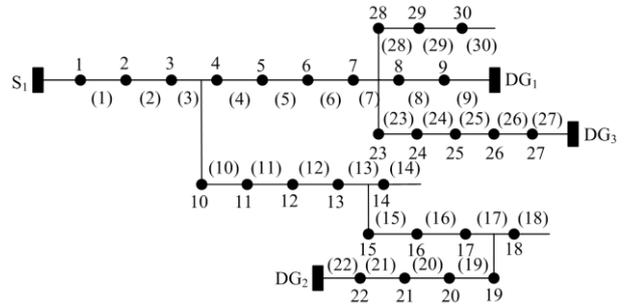


图 2 含 DG 30 节点配电网结构图

Fig. 2 Structural diagram of 30-node distribution network containing DG

为验证所建模型的可行性及求解方法的准确性,在配电网不同 FTU 节点发生漏报或误报以及 DG 不同投切状态下进行仿真。考虑到配电网中 DG 的不同投切形式,对于含 J 个 DG 的配电网,引入开关系数向量 $\mathbf{K} = [k_1 L \ k_r L \ k_j]$, 当 DG_r 接入电网时, $k_r = 1$, 否则 $k_r = 0$ 。仿真结果记录为表 2。

表 2 30 节点配电网仿真结果

Table 2 Simulation results of 30-node distribution network

序号	故障位置	畸变位置	\mathbf{K}	定位结果
1	(3)	无	[1 0 0]	$x(3) = 1$
2	(4)	7,13	[0 1 0]	$x(4) = 1, m_7 = 1, m_{13} = 1$
3	(7)	9	[0 0 1]	$x(7) = 1, m_9 = 1$
4	(13)	20	[1 1 0]	$x(13) = 1, m_{20} = 1$
5	(18)	无	[1 0 1]	$x(18) = 1$
6	(23)	5,11	[0 1 1]	$x(23) = 1, l_5 = 1, m_{11} = 1$
7	(26)	无	[1 1 1]	$x(26) = 1$
8	(28)	无	[0 0 0]	$x(28) = 1$

由表 2 看出,本文所提故障定位方法不仅在所有 FTU 节点正确上报过流信息时能够准确定位故障区段,在 1~2 个节点发生漏报或误报时依然可以准确判别故障区段,同时获取具体节点的漏报和误报状态,具有较强的容错能力。由于模型规定单一正方向,定位结果不受分布式电源投切的影响。

3.2 双电源单环网算例分析

与仅含单一主电源的配电网不同,在处理多电源环网故障区段定位问题时,需考虑联络开关的开闭状态对网络结构以及模型构建的影响。对图 2 进行改动,得到含 S_1 、 S_2 两个主电源以及 5 号节点作为联络开关的双电源环网,如图 3 所示。

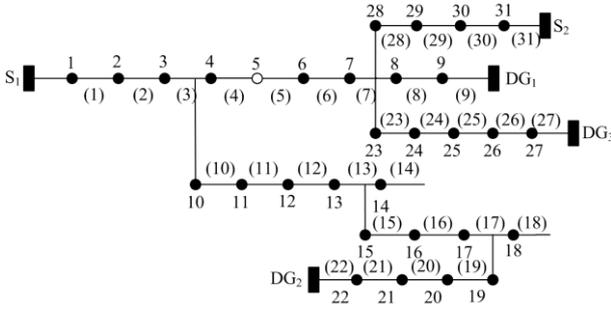


图3 含双电源配电网结构图

Fig. 3 Structural diagram of distribution network with two power sources

联络开关闭合时，选取某一主电源电流流出的方向为正方向，其余电源看作投切系数恒为1的分布式电源处理，代入式(23)进行故障定位，其求解方式与算例1类似。

以图3配电网为例，以主电源 S_1 电流流向为正方向，其闭环运行结果如表3。

表3 双电源环网闭环运行仿真结果

Table 3 Simulation results of close-loop operating distribution network with two power sources

序号	故障位置	畸变位置	目标函数	定位区段
1	(4)	2	1	(4)
2	(7)	无	0	(7)
3	(7)	5,9	2	(7)
4	(14)	3,12,26	3	(14)
5	(17)	无	0	(17)
6	(22)	17	1	(22)
7	(24)	2,7	2	(24)
8	(30)	无	0	(30)

联络开关打开时，采取区域划分^[27]的思想，按照上述故障定位方法分别对各个配电子网进行建模求解，最终得到整个网络的定位结果。

对于图3配电网，现以联络开关5为界，将配电网划分为以 S_1 为主电源的子网1和以 S_2 为主电源的子网2，子网1、子网2的节点数和区段数分别为 N_1 、 N_2 和 M_1 、 M_2 。多电源环网故障定位的目的是找出整个配网系统中的故障区段，反映到模型中即求取满足各个子网目标函数值之和最小的可行解。在式(23)的基础上以子网目标函数之和最小为目的，构造双电源环网开环运行故障定位模型，如式(24)所示。

$$\begin{aligned}
 & \min f = N_{1l} + N_{1m} + N_{2l} + N_{2m} + \mu \sum_{i=1}^M x(i) \\
 & \text{s.t. } l_{ij} = 0/1, m_{ij} = 0/1, t = 1, 2 \\
 & N_{1l} = \sum_{ij=1}^{N_1} l_{ij}, N_{1m} = \sum_{ij=1}^{N_1} m_{ij} \\
 & S_{ij}^*(X_t) - \sum_{n_{id}=1}^{N_{id}} x_{ij}(n_{id}) = 0 \\
 & u_{ij} \leq S_{ij}^*(X_t), u_{ij} \leq 1 - l_{ij} \\
 & u_{ij} \geq S_{ij}^*(X_t) - l_{ij} \\
 & v_{ij} \leq 1 - S_{ij}^*(X_t), v_{ij} \leq m_{ij} \\
 & v_{ij} \geq -S_{ij}^*(X_t) + m_{ij} \\
 & S_{ij} \geq u_{ij}, S_{ij} \geq v_{ij} \\
 & S_{ij} \leq u_{ij} + v_{ij} \\
 & S_{ij}^*(X_t) + m_{ij} \leq 1 \\
 & l_{ij} - S_{ij}^*(X_t) \leq 0 \\
 & m_{ij} + l_{ij} \leq 1 \\
 & u_{ij} = 0/1, v_{ij} = 0/1 \\
 & \sum_{i=1}^{M_t} x_t(i) \leq 1, x_t(i) = 0/1
 \end{aligned} \tag{24}$$

式中： $S_{ij}^*(X_t)$ 为子网 t 的开关函数； l_{ij} 、 m_{ij} 分别为子网 t 漏报和误报的状态变量元素； u_{ij} 、 v_{ij} 为子网 t 的辅助变量。在本例中， t 的可取值为1、2，分别代表子网1和子网2。由于网络中含有多个子网，整个网络中不再只有唯一故障点，此时 μ 取0.5，其开环运行结果见表4。

表4 双电源环网开环运行仿真结果

Table 4 Simulation results of open-loop operating distribution network with two power sources

序号	故障位置	畸变位置	目标函数	定位区段
1	(3)	无	0.5	(3)
2	(4)(24)	无	1	(4)(24)
3	(7)	11	1.5	(7)
4	(8)(13)	20,28	3	(8)(13)
5	(18)	无	0.5	(18)
6	(10)(25)	3,16	3	(10)(25)
7	(26)	无	0.5	(26)
8	(12)(26)	无	1	(12)(26)

仿真结果表明，本文提出的故障区段定位整数线性规划方法，对于发生多点漏报、误报的多电源闭环环网和开环环网均适用。在本算例中，式(24)是针对双电源环网开环运行的故障区段定位表达

式,同时也可以推广应用到含多电源的环网中。

3.3 与其他故障定位方法的比较

3.3.1 容错性能

为验证容错性能,将本文所建故障定位容错模型与其他模型在定位结果上进行比较。

以图3所示含DG的30节点配电网为例,区段(15)发生故障,依次设定3、6、8、12、17、22、7共7个节点的上传信息发生畸变,畸变数量 r 表示上述前 r 个节点出现漏报或误报。将线性规划方法求解本文模型(方法一)、采用遗传算法(GA)求解未考虑漏报和误报的含DG分层故障定位逻辑关系模型^[23](方法二)、采用粒子群算法(PSO)求解未考虑漏报和误报的故障定位非逻辑关系模型^[24](方法三)分别仿真30次。将每种方法在30次仿真中出现次数最多的解作为该方法的最终定位结果记录在表5。

表5 多节点漏报、误报时定位结果对比

Table 5 Comparison of algorithm location results in case of multiple nodes' missing and false alarms

畸变数量	定位结果		
	方法一	方法二	方法三
1	(15)	(15)	(15)
2	(15)	(15)	(15)
4	(15)	(15)	(8)(11)
5	(15)	(8)(11)	(8)(11)
7	(15)	(8)(11)	(8)(11)

由表5可以看出,由于方法二和方法三在建模时没有考虑到节点信息的漏报和误报状况,当30节点配电网中有4个以上节点上传信息发生畸变时,故障定位失败。而本文方法在7个节点出现漏报或误报时依然能够准确判断故障位置,对于处理多节点发生上传信息畸变的配网故障定位问题具有明显的优势。

3.3.2 求解效率

为验证本文所提方法在大规模配电网中的适用性、实时性和准确性,以图3为基础,在30节点之后依次将原配电网拓展为50、100、300节点的配电系统,并设置馈线末端(馈线30、50、100、300)发生故障,同时在300节点配网时设置FTU节点13、50、95、152的上传信息发生畸变。

使用本文方法在Lingo环境下对各个规模配电网独立求解20次,同时建立不考虑节点漏报、误报的逻辑关系故障定位模型^[23],采用GA与PSO分别进行20次迭代求解,记录平均耗时和定位准确次数,如表6所示。

表6 算法平均耗时和准确度对比

Table 6 Comparison of average time and accuracy of algorithm

节点规模	GA		PSO		本文方法	
	耗时/s	准确次数	耗时/s	准确次数	耗时/s	准确次数
30	1.5	20	1.1	20	0.17	20
50	2.2	19	1.9	18	0.29	20
100	4.3	17	3.8	17	0.46	20
300	—	—	—	—	3.27	20

从表6可以看出,本文所用故障定位方法在求解速度上明显优于GA和PSO,实时性较好。对30、50、100节点的仿真结果表明,即使在健全信息条件下,由于GA和PSO自身存在过早收敛的问题,也不能保障故障区段定位的准确性。对于300节点的配电网,在迭代次数限制之内采用两种智能算法均无法得出具体故障区段。由此可见本文所提方法在数值稳定性以及求解效率上都具有显著优势,便于及时找出故障区段,尽快恢复系统供电有利于提高系统可靠性。可用于解决大规模配电网故障定位问题,具有巨大的工程应用价值。

4 结论

1) 本文提出了将非线性逻辑约束线性化的方法,建立了一种新的故障区段定位整数线性规划模型,能准确高效识别配电系统中的故障馈线区段。

2) 新模型将节点信息的漏报和误报状况作为决策变量,大幅度提高了配电网故障定位的容错能力。在得到区段故障信息的同时,能够准确判断各个节点处信息漏报、误报的状况。

3) 针对所建故障区段定位新模型采用常规线性规划方法求解,数值稳定性较好,适用于拓扑结构复杂的大型配电网。

4) 目前本文的研究只适用于求解单一故障的配电网,对于含联络开关的环形电网也只能求解各个子网中的单个故障点。以后的研究将围绕配电网中多重故障定位模型的建立与求解进行展开。

参考文献

- [1] SUN K, CHEN Q, GAO Z. An automatic faulted line section location method for electric power distribution systems based on multisource information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1542-1551.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223.
- YANG Ming, ZHOU Lin, ZHANG Dongxia, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic power plants for the effect of grid impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223.
- [5] 赵江河, 陈新, 林涛, 等. 基于智能电网的配电自动化建设[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 33-36.
- ZHAO Jianghe, CHEN Xin, LIN Tao, et al. Distribution automation construction in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 33-36.
- [6] LI W, WEN C, CHEN J, et al. Location identification of power line outages using PMU measurements with bad data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3624-3635.
- [7] 戴志辉, 王旭. 基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2027-2034.
- DAI Zhihui, WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2027-2034.
- [8] 倪良华, 厉馨, 吕干云, 等. 基于虚拟阻抗的复杂配电网故障区段定位新方法[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(2): 1-8, 14.
- NI Lianghua, LI Xin, LÜ Ganyun, et al. A new approach of fault section location in complicated distribution network based on virtual impedance[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(2): 1-8, 14.
- [9] 周念成, 肖舒严, 虞殷树, 等. 基于质心频率和 BP 神经网络的配网故障测距[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4154-4166.
- ZHOU Niancheng, XIAO Shuyan, YU Yinshu, et al. Fault location in distribution networks based on centroid frequency and BP neural networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4154-4166.
- [10] 周海军, 王飞, 周冬. 含分布式电源配电网故障的 Petri 网诊断方法[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(9): 39-46.
- ZHOU Haijun, WANG Fei, ZHOU Dong. A Petri net diagnosis method for faults of the distribution network with distributed generation[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(9): 39-46.
- [11] 刘晓琴, 王大志, 江雪晨, 等. 利用行波到达时差关系的配电网故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4109-4115, 4290.
- LIU Xiaoqin, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4109-4115, 4290.
- [12] 尤向阳, 葛笑寒, 吴萍. 基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 125-130.
- YOU Xiangyang, GE Xiaohan, WU Ping. Grounding fault location method based on waveform similarity of zero-sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 125-130.
- [13] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
- [14] 闫方果, 李晓明, 杨俊杰, 等. 改进矩阵算法及在实际中的应用[J]. 电测与仪表, 2017, 54(12): 21-27.
- YAN Fangguo, LI Xiaoming, YANG Junjie, et al. Improved matrix-based algorithm and its application in practice[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(12): 21-27.
- [15] 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.
- [16] DŽAFIĆ I, JABR R A, HENSELMEYER S, et al. Fault location in distribution networks through graph marking[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1345-1353.
- [17] 潘晓楠. 基于拟态物理学算法和粗糙集理论的配电网故障区段定位[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- PAN Xiaonan. Fault section location in power distribution network based on artificial physics algorithm and rough set theory[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.
- [18] 严凤, 许海梅. 基于神经网络的配电线路综合故障定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(5): 86-91.
- YAN Feng, XU Haimei. Composite fault location method based on PNN for distribution lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(5): 86-91.
- [19] 杜红卫, 孙雅明, 刘弘靖, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位和隔离[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 52-55.
- DU Hongwei, SUN Yaming, LIU Hongjing, et al. Fault section diagnosis and isolation of distribution network

- based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 52-55.
- [20] 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): 128-131. WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 128-131.
- [21] 陈歆技, 丁同奎, 张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 74-77. CHEN Xinji, DING Tongkui, ZHANG Zhao. Ant colony algorithm for solving fault location in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 74-77.
- [22] 郭壮志, 吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 34-40. GUO Zhuangzhi, WU Jiekang. Electromagnetism-like mechanism based fault section diagnosis for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 34-40.
- [23] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83. ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [24] 王巍璋, 王淳, 敖鑫. 基于果蝇优化算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 108-114. WANG Weizhang, WANG Chun, AO Xin. Fault location of power distribution network based on fruit fly optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 108-114.
- [25] 刘健, 张志华, 黄炜, 等. 分布式电源接入对配电网故障定位及电压质量的影响分析[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 115-121. LIU Jian, ZHANG Zhihua, HUANG Wei, et al. Influence of distributed generation on fault location and voltage quality of distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 115-121.
- [26] 刘鑫, 滕欢, 梁梦可, 等. 基于电流偏差 2-范数的有源配电网故障距离定位[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S2): 720-728. LIU Xin, TENG Huan, LIANG Mengke, et al. Fault distance location of active distribution network based on 2-norm current deviation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 720-728.
- [27] 刘蓓, 汪飒, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 280-284. LIU Bei, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 280-284.
- [28] 严太山, 崔杜武, 陶永芹. 基于改进遗传算法的配电网故障定位[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 255-259. YAN Taishan, CUI Duwu, TAO Yongqin. Fault location for distribution network by improved genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 255-259.
- [29] 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.
- [30] 刘严, 李前进, 周冬. 基于 0-1 整数规划的配电网区段定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(10): 6-11. LIU Yan, LI Qianjin, ZHOU Dong. Distribution network section location method based on 0-1 integer programming[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(10): 6-11.
- [31] 郭壮志, 徐其兴, 洪俊杰, 等. 配电网快速高容错性故障定位的整数线性规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 786-795. GUO Zhuangzhi, XU Qixing, HONG Junjie, et al. Integer linear programming based fault section diagnosis method with high fault-tolerance and fast performance for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 786-795.
- [32] 王秋杰, 金涛, 刘军. 计及 FTU 漏报和误报的配电网故障定位分层解析模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 141-147. WANG Qiujie, JIN Tao, LIU Jun. Hierarchical analytic model for fault location of distribution network considering FTU missing and false positives[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 141-147.

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-04-03

作者简介:

孔培(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障定位; E-mail: 2398671643@qq.com

刘建锋(1968—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为光电互感器、数字化变电站智能装置及电力系统、电气信息检测; E-mail: bansen@sina.com

周健(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网自动化技术与智能电网技术应用。

(编辑 许威)