

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201091

# 基于多目标加权灰靶决策的有源配电网故障区段定位方法

程梦竹<sup>1</sup>, 张新慧<sup>1</sup>, 徐铭铭<sup>2</sup>, 薛永端<sup>3</sup>, 吴文浩<sup>1</sup>, 贺宇<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 3. 中国石油大学(华东)信控学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 分布式电源接入配电网后, 现有利用单一故障特征信号的集中式定位方法难以可靠定位故障区段。针对这一问题, 提出一种基于多目标加权灰靶决策的分布式故障区段定位方法。通过分析分布式电源接入对单相接地故障电流的影响, 选取分别归一化的区段内等值电阻、区段暂态零模电流波动量、衰减速度及零序电流差作为区段状态评价指标, 计算各区段采样数据在健全区段、故障点上游区段及故障区段三种决策结果下的靶心度, 判断该区段是否为故障区段。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明, 该方法能够融合多个故障特征, 适用于不同故障条件下含IIDG 辐射型配电网的故障区段定位。

**关键词:** 有源配电网; 故障区段定位; 灰靶决策; 分布式控制; 单相接地故障

## Location method of an active distribution network fault section based on multi-target weighted grey target decision

CHENG Mengzhu<sup>1</sup>, ZHANG Xinhui<sup>1</sup>, XU Mingming<sup>2</sup>, XUE Yongduan<sup>3</sup>, WU Wenhao<sup>1</sup>, HE Yu<sup>1</sup>

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

3. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

**Abstract:** When distributed generators are connected to a distribution network, the existing centralized fault location method based on single-fault-characteristic finds it difficult to locate the fault segment reliably. Thus a distributed fault section location method based on multi-objective weighted grey target decision is proposed to help solve this problem. By analyzing the influence of distributed generation on the single-phase ground fault current, the normalized equivalent resistance and the fluctuation quantities of the transient zero-mode current in the section, the attenuation speed and the difference of zero-sequence current are selected as the evaluation indices of the section state. The target distance of the sampling data of each section under the three decision results of the healthy section, the upstream section of the fault point and the fault section are calculated respectively to determine whether the section is a fault section. PSCAD/EMTDC simulation results show that the proposed method can integrate diverse fault characteristics, and that it is suitable for locating the fault section of a radial distribution network with IIDG under different fault conditions.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGHADK00PJS1900078).

**Key words:** active distribution networks; fault segment location; grey target decision; distributed control; single phase grounding

## 0 引言

我国分布式电源(Distributed Generator, DG)开

启商业化进程, 集成可再生能源的有源配电网将替代传统辐射型配电网<sup>[1]</sup>。但针对有源配电网的故障定位方法研究较少, 且大多是在传统配电网定位方法上改进<sup>[2-4]</sup>。配电网故障定位方法可分为两类<sup>[5]</sup>: 故障信息上传至主站的集中式定位方法<sup>[6]</sup>和基于配电网终端信息实时交互的分布式定位方法<sup>[7-8]</sup>。采用人

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGHADK00PJS1900078)

工智能技术的集中式方法利用信息全面, 但依赖测量终端上传的大量数据缺乏故障特征分析, 对主站数据处理能力要求高。文献[9-10]分别提出利用多种群遗传和免疫算法解决有源配电网故障定位问题, 提高了计算速度和容错性, 但信号传输距离远、干扰多, 现场很难实现仿真中的定位效果。

分布式定位方法可以实现同一控制域内智能馈线终端(Smart Terminal Unit, STU)独立判断故障区段。与常规配电网终端相比, STU除传统的“四遥”功能外, 还支持基于本地测量信息的就地控制和基于终端之间对等交换信息的分布式控制<sup>[11]</sup>。因此该类方法既能适应拓扑变化, 也能降低数据传输中畸变的概率, 提高定位准确性<sup>[12]</sup>。文献[13]利用灰色关联度对相关系数法进行改进, 可实现传统配网中的故障定位, 但DG接入会对相似度计算产生影响。文献[14]提出了远方保护与就地保护相互配合的保护方案, 能够避免DG接入及互感器受到干扰等影响, 但有源配电网状态信息多, 保护动作阈值整定困难。可见, 运用单一判据的定位方法难以可靠解决有源配网中不同故障条件下的区段定位问题。

本文提出一种基于多目标加权灰靶决策的分布式故障定位方法, 建立了考虑故障稳态及暂态特征的灰靶评估模型, 通过比较不同决策结果的综合靶心度判断各区段是否为故障区段。灰靶决策模型可用于解决非确定性问题, 且能够融合多种判据<sup>[15-16]</sup>, 解决有源配电网状态信息多且不确定, 单一判据的定位方法难以实现准确定位等问题。

## 1 分布式电源对故障电流的影响

接入配电网的DG多为逆变型电源(Inverter Interfaced Distributed Generation, IIDG), 在发生故障时, 其输出特性由控制方式决定。根据国家电网公司《分布式电源接入系统典型设计》规定: 容量不大于6 MW的IIDG, 一般采用变压器升压后接入中压配电系统。因此IIDG对配电网故障电流的影响与隔离变压器中性点的接地方式有关。

发生故障时, IIDG输出电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量将迅速跟踪有功、无功电流指令, 可近似忽略其暂态过程<sup>[17]</sup>。具备低电压穿越运行能力的IIDG, 其故障电流向量如图1所示。根据图1可知, 在发生单相接地故障时, 向故障点注入的故障电流为

$$\dot{I}_{\text{IIDG-f}} = (I_{\text{IIDG-f-}d^+} \cos \delta + I_{\text{IIDG-f-}q^+} \sin \delta) + j(I_{\text{IIDG-f-}d^+} \sin \delta - I_{\text{IIDG-f-}q^+} \cos \delta) \quad (1)$$

式中:  $I_{\text{IIDG-f-}d^+}$ 和 $I_{\text{IIDG-f-}q^+}$ 分别为故障时IIDG实际输出的正序有功电流和无功电流幅值;  $\delta$ 为公共连接点

电压的相角。

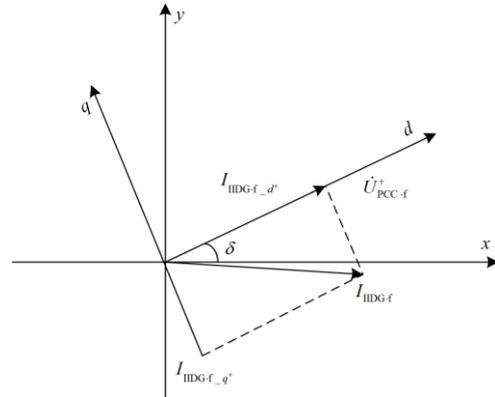


图1 具备低电压穿越运行能力的IIDG故障电流向量图

Fig. 1 Fault current vector diagram of IIDG with low voltage ride-through capability

根据图1, 故障后IIDG输出电流特性可表示为

$$\dot{I}_{\text{IIDG-f}} = f(\dot{U}_{\text{PCC-f}}^+) \quad (2)$$

对含IIDG的配电网进行故障分析时, IIDG可等效为恒定正序电流源<sup>[17]</sup>,  $\dot{I}_{\text{IIDG-f}}$ 为IIDG提供的正序故障电流。

由图1可见, 发生单相接地故障时, IIDG接入对故障电流有助增作用。中性点经小电阻接地的配电网中, 当隔离变压器中性点为大电流接地方式时, 若故障点位于主网与IIDG间, 接地点与母线之间线路中的零序电流将大幅减小, 导致原有接地保护拒动。另外, 传统小电流接地配电网中, 可以根据线路上相邻两遥测点是否只有其中一点流过故障电流, 进行故障区段定位, 当隔离变压器中性点为小电流接地方式时, 则可能导致故障区段两侧均有故障电流<sup>[18]</sup>, 上述故障处理方法将不再适用。

## 2 有源配电网区段状态评价指标

配电网发生故障导致多个状态量变化, 为了实现区段状态评估, 需要选取全面的故障特征量作为决策指标。

### 2.1 稳态故障决策指标的选取

中性点经小电阻接地及不接地系统中, 正常运行或故障点位于区外时: 流入与流出本闭合区段的电流近似相等, 差值为本区段对地电容电流。

图2中, 规定主电源流向母线的方向为正方向, 区段I~III以分段开关为边界划分, 分段开关处安装STU<sup>[11]</sup>, 分别用数字1~7表示。STU采用逐级查询的方法自动识别馈线拓扑结构, 划分区段并确认边界STU在各区段的位置<sup>[19]</sup>。

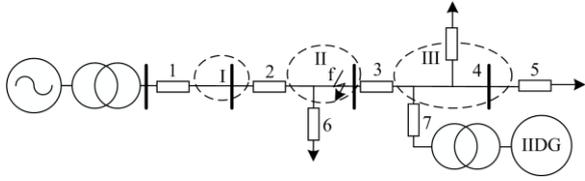


图2 简单辐射状 10 kV 配电网模型

Fig. 2 10 kV simple radial distribution network model

正常运行时，STU采集的电流信号满足<sup>[20]</sup>：

$$\begin{cases} I_I = |\dot{I}_1 - \dot{I}_2| \approx 0 \\ I_{II} = |\dot{I}_2 - \dot{I}_3 - \dot{I}_6| \approx 0 \\ I_{III} = |\dot{I}_3 - \dot{I}_7 - \dot{I}_4 - \dot{I}_5| \approx 0 \end{cases} \quad (3)$$

f点发生故障时区段II的电流关系将发生变化：

$$\begin{cases} I_I = |\dot{I}_1 - \dot{I}_2| \approx 0 \\ I_{II} = |\dot{I}_2 - \dot{I}_3 - \dot{I}_6| > 0 \\ I_{III} = |\dot{I}_3 - \dot{I}_7 - \dot{I}_4 - \dot{I}_5| \approx 0 \end{cases} \quad (4)$$

定义  $I_x$  ( $x=I, II, III$ ) 为区段  $x$  的零序电流差幅值，其值由区段上游与下游 STU 采集电流向量差取模得到， $\dot{I}_n$  为 STU 处采集到的电流向量。在小电阻接地系统或不接地系统中，区内故障时该值为故障电流，区外故障或正常运行时  $I_x$  约等于零，可以借助该判据对线路区段状态进行评价。但在谐振接地系统或高阻故障下故障电流微弱<sup>[21]</sup>，导致判据失效，需要结合其他指标提高状态评估的可靠性。

## 2.2 故障暂态决策指标的选取

在谐振接地系统中，暂态高频分量不受消弧线圈影响且故障特征显著，同时零序网络基本不受 IIDG 接入的影响。配电网谐振接地系统单相接地故障等值模型<sup>[22]</sup>如图 3 所示。

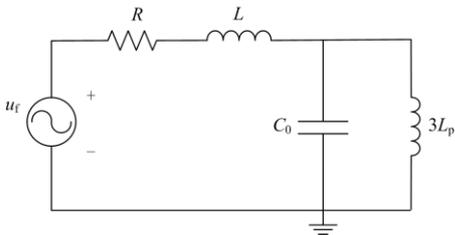


图3 谐振接地配电网单相接地故障暂态分析等值电路

Fig. 3 Single-phase ground fault transient analysis equivalent circuit for resonant grounded distribution network

图 3 中， $R$  为接地过渡电阻、线模电阻及零模电阻的等效电阻，其值为  $R=3R_f+(R_1+R_{IIDG})+R_1+R_0$ ； $L_p$ 、 $L$  分别为消弧线圈并联等效电感及电路等效电感；由于线模网络中系统阻抗远小于分布电容容抗， $C_0$  为全系统零序等效电容。

### 2.2.1 金属性、低阻接地故障等值电路分析

过渡电阻较小时，发生金属性或低阻接地故障时， $R$  较小， $C_0$  充电速度快，主谐振频率高， $3L_p$  可以忽略，对简化后电路模型列 KVL 方程为

$$u_f = Ri_f + L \frac{di_f}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_f dt \quad (5)$$

解得故障点暂态电流的振荡衰减分量如式(6)所示。

$$i_f' = -\frac{U_m}{R+1/j\omega_0 C_0} \left[ \left( \frac{\omega_0}{\omega_f} \sin \varphi + \frac{\delta_1}{\omega_f} \cos \varphi \right) \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right] e^{-\delta_1 t} \quad (6)$$

式中： $\delta_1$  为该系时间常数的倒数，其值为  $R/2L_0$ ； $\omega_f = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_1^2}$  为振荡角频率，根据式(6)可知  $\delta_1$  越大衰减速度越快。故障接地电阻越大，暂态电流的幅值越小但衰减得越快，两个特征可以互为补充，提高定位方法灵敏性。故障点上游方向零模电流谐振频率低、幅值大，而下游方向零模电流谐振频率高、幅值小，二者差异较大，根据流过故障区段的暂态电流衰减速度和电流波动量的大小构造故障判断指标。

### 2.2.2 高阻接地故障等值电路分析

发生高阻接地故障时，图 3 所示电路中， $R$  值大， $C_0$  充电速度慢，主谐振频率低， $L$  可以忽略<sup>[23]</sup>。对简化后电路模型列写 KVL、KCL 方程组。

$$\begin{cases} u_f = Ri_f + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_{C_0} dt = Ri_f + 3L_p \frac{di_{L_p}}{dt} \\ i_f = i_{L_p} + i_{C_0} \end{cases} \quad (7)$$

解得流经故障点的电流如式(8)所示。

$$\begin{aligned} i_f = e^{-\delta_2 t} [ & A_1 \cos(\omega_f t) + A_2 \sin(\omega_f t) ] (1 + L_p C_0 \delta_2^2) + \\ & B (1 - L_p C_0 \delta_2^2) \sin(\omega_0 t + \varphi) + \\ & L_p C_0 e^{-\delta_2 t} [ - (2\delta_2 \omega_f A_1 + \omega_f^2 A_2) \sin(\omega_f t) + \\ & (2\delta_2 \omega_f A_2 + \omega_f^2 A_1) \cos(\omega_f t) ] \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $\delta_2 = 1/2RC_0$ ；振荡频率  $\omega_f = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_2^2}$ 。

根据式(8)可知：在过渡电阻较大时，故障电流极小，根据暂态电流特性构造的故障判据易漏判。

根据能量守恒定律，围成任意健全区段 STU 采集的能量损耗  $\Delta W_x$  为线路电阻消耗的能量。

$$\Delta W_x = i^2 (R_l) t \quad (9)$$

故障区段发生高阻接地故障时，过渡电阻也产生能量损耗，于是根据能量的定义，可得实际测量区段消耗的电能及过渡电阻消耗的电能满足：

$$\begin{cases} \Delta W_x > i^2 (R_l) t \\ \Delta W_{R_g} = \int_{t_0}^{t_1} i_r^2(t) R_g dt \end{cases} \quad (10)$$

通过计算区段内等值电阻  $R_x$  的大小, 可以判断区段是否发生高阻接地故障。

$$R_x = \frac{\Delta \bar{P}_x}{(i_r')^2} \quad (11)$$

当发生单相接地故障时, 健全区段故障电流值近似为 0, 此时计算得到  $R_x$  将近似于无穷大; 高阻故障时, 故障区段对应  $R_x$  数值较高; 低阻故障时, 故障区段对应  $R_x$  数值约为线路电阻阻值。

综上, 选取区段内等值电阻、区段暂态零模电流波动量、暂态零模电流衰减速度及区段零序电流差作为决策指标。利用以上四个故障特征, 能够满足定位方法对不同单相接地故障定位的适用性, 借助灰靶决策模型融合四种故障特征指标, 达到不必根据整个系统所有终端上传的电气量信息, 仅对该区段周围 STU 的实测量进行简单的处理, 即可实现故障区段定位的目的。

### 3 多目标加权灰靶决策定位原理

#### 3.1 多目标加权灰靶决策模型

基于分布式定位方法的特点, 构建多目标加权灰靶决策模型<sup>[24]</sup>对各区段进行状态决策。根据决策方案表达式, 故障区段定位模型中的决策方案集为  $S_f$ 。

$$\begin{cases} A = \{a\} \\ K = \{k_1, k_2, k_3, k_4\} \\ \lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\} \\ B = \{b_1, b_2, b_3\} \\ S_f = \{s_{11}, s_{12}, s_{13}\} \end{cases} \quad (12)$$

本区段状态  $a$  为决策对象, 决策对象集为  $A$ 。决策对象通过 4 个指标来综合判断是否为故障区段, 决策指标集为  $K$ , 由区段内等值电阻  $k_1$ 、区段暂态零模电流波动量  $k_2$ 、暂态零模电流衰减速度  $k_3$  及区段零序电流差  $k_4$  构成, 分别对应  $\lambda_j (j=1, 2, 3, 4)$  构成权重集  $\lambda$ 。决策对象为健全区段、故障点上游区段或故障区段分别作为决策结果  $b_i (i=1, 2, 3)$ , 构成决策结果集  $B$ 。区段实时信息取样点为故障发生  $t_0$  后的一段时间  $t(t_0, t_T)$  内, 对于指标  $k_j$  的实际值用区间灰数表示:

$$c_j'(\otimes) = [c_j^{Lr}, c_j^{Ur}] \quad (13)$$

式中:  $c_j^{Lr}$  为指标最小值;  $c_j^{Ur}$  为指标最大值。

至此故障区段的定位问题转化为事件集下三种

决策结果的选择, 若进行决策得到  $s_{13}$  为最佳方案, 则说明该区段为故障区段; 反之, 则为健全区段。

#### 3.2 故障状态评价标准

##### 3.2.1 指标归一化

由于不同故障特征量的性质和量纲不同, 需要对区段状态评价指标进行归一化处理。评价指标可以分为效益型指标和成本型指标<sup>[24]</sup>。根据上文分析, 决策指标集  $K$  中  $k_2, k_3$  和  $k_4$  为效益型评价指标。效益型指标的归一化公式为

$$g_{ij}'(\otimes) = [g_{ij}^{Lr}, g_{ij}^{Ur}] = \left[ \frac{c_{ij}^{Lr}}{\sum_{i=1}^3 c_{ij}^{Ur}}, \frac{c_{ij}^{Ur}}{\sum_{i=1}^3 c_{ij}^{Lr}} \right] \quad (14)$$

式中:  $i=1, 2, 3$  为三种决策结果;  $j=2, 3, 4$  对应三个效益型指标。  $k_1$  为成本型指标, 指标归一化公式为

$$\begin{cases} g_{i1}'(\otimes) = [g_{i1}^{Lr}, g_{i1}^{Ur}] = \left[ \frac{y_{i1}^{Lr}}{\sum_{i=1}^3 y_{i1}^{Ur}}, \frac{y_{i1}^{Ur}}{\sum_{i=1}^3 y_{i1}^{Lr}} \right] \\ y_{i1}^{Ur} = \max_{1 \leq i \leq 3} c_{i1}^{Ur} - c_{i1}^{Ur} + \min_{1 \leq i \leq 3} c_{i1}^{Ur} \\ y_{i1}^{Lr} = \max_{1 \leq i \leq 3} c_{i1}^{Lr} - c_{i1}^{Lr} + \min_{1 \leq i \leq 3} c_{i1}^{Lr} \end{cases} \quad (15)$$

##### 3.2.2 评价指标权重设置

决策问题求解过程中, 不同指标的权重制定对故障定位的准确性和灵敏度有重要影响<sup>[25]</sup>。选取层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和熵值法计算主、客观权重<sup>[26-27]</sup>, 再进行综合赋权, 将各指标综合权重用于靶心度计算。

中性点接地方式为已知信息, 在不接地系统及经小电阻接地系统中提高  $k_4$  权重, 降低  $k_2, k_3$  权重, 反映不接地系统故障状态; 在谐振接地系统中提高  $k_2, k_3$  权重, 降低  $k_4$  权重, 反映经谐振地系统故障状态; 在易发生高阻接地故障的线路中提高  $k_1$  权重。根据九度法对四个指标列判断矩阵  $X_{4 \times 4}$ 。

$$X_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{bmatrix} \quad (16)$$

由 AHP 分析得到主观权重  $\omega_{1j}$  为

$$\omega_{1j} = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (17)$$

对于某一指标, 不同状态下差异程度越大, 信息熵越小, 则该指标的权重越大; 反之, 该项指标

值的差异程度越小, 信息熵越大, 则该指标的权重越小<sup>[28]</sup>。线路区段运行状态有  $m$  组历史数据, 分别在 4 个指标下的指标数据矩阵为  $\mathbf{X}_{4 \times m}$ 。

$$\mathbf{X}_{4 \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1i} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & \cdots & x_{2i} & \cdots & x_{2m} \\ x_{31} & \cdots & x_{3i} & \cdots & x_{3m} \\ x_{41} & \cdots & x_{4i} & \cdots & x_{4m} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中第 1 列数据为正常运行区段指标数据, 根据不同故障类型发生概率, 列写剩余  $m-1$  列故障区段指标数据矩阵。四项指标中第 2 行之后的元素与第 1 行元素相差较大的第  $j$  行可视为故障特征明显, 则该指标  $k_j$  在综合评价中所起的作用就越大; 反之, 作用越小。信息熵的表达式为

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p(x_{ji}) \ln p(x_{ji}) \quad (19)$$

式中:  $x_{ji}$  为  $j$  指标的第  $i$  个状态值(总共有  $m$  个状态);  $p(x_{ji}) = x_{ji}/x_{\Sigma j}$  为  $j$  指标出现第  $i$  个状态值的概率。

第  $j$  个指标对应的客观权重计算公式为

$$\omega_{2j} = \frac{1 - e_j}{4 - \sum_{j=1}^4 e_j}, (j = 1, 2, 3, 4) \quad (20)$$

为了体现主客观相结合的思想, 综合权重为

$$\omega_j = \frac{\omega_{2j} \cdot \omega_{1j}}{\sum_{j=1}^4 \omega_{2j} \cdot \omega_{1j}} \quad (21)$$

### 3.2.3 灰色相对靶心度的计算

在区段状态判断中对于故障定位启动后的阶段  $t$ , 最优指标序列  $g^{t+} = (g_1^{t+}, g_2^{t+}, g_3^{t+}, g_4^{t+})$  为该状态期望靶心, 将实际区段采样值信息作为期望靶心值, 三种区段状态指标值序列作为待评估方案, 分别计算三种状态的期望靶心度。阶段  $t(t_0, t_T)$  的三种状态指标序列与期望靶心关于指标  $k_j$  的靶心系数<sup>[24]</sup>为

$$\gamma(\bar{g}_{ij}^t(\otimes), g_j^{t+}(\otimes)) = \frac{\min_i \min_j D + 0.5 \max_i \max_j D}{D + 0.5 \max_i \max_j D} \quad (22)$$

式中,  $D$  表示阶段  $t$  各指标平均值与最优指标序列的欧式距离。待选方案  $s_{li}$  的期望靶心度为

$$\gamma(g_i) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^4 \lambda_j \cdot \gamma(\bar{g}_{ij}^t(\otimes), g_j^{t+}(\otimes)) \quad (23)$$

### 3.3 故障区段定位方法

将零序电压幅值的波动量作为故障定位的启动条件,  $U_{0th}$  设置为 10% 最大不平衡电压, 若零序电压一周期的波动量超过故障阈值  $U_{0th}$  且任意一相相

电压降低, 记录此相进入定位程序。基于多目标加权灰靶决策的故障区段定位流程如图 4 所示。

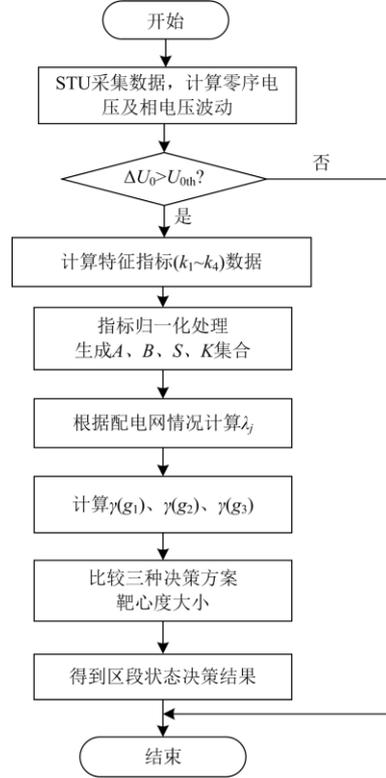


图 4 故障定位方案流程图

Fig. 4 Flowchart of the fault location scheme

## 4 算例分析

在 PSCAD/EMTDC 中进行仿真试验, 对所提故障区段定位方法进行验证。仿真模型如图 5 所示。

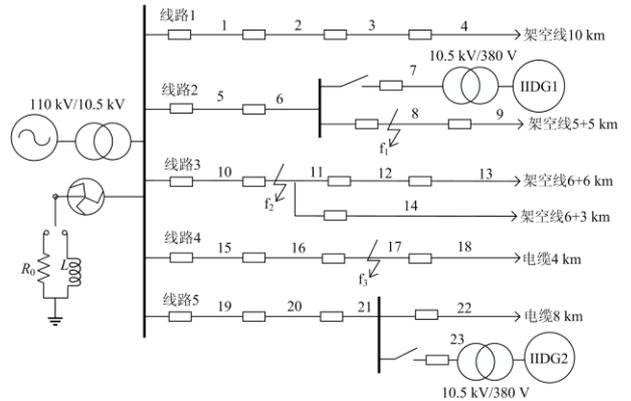


图 5 10 kV 线缆混合配电网仿真模型

Fig. 5 10 kV cable hybrid distribution network simulation model

系统为 10 kV 混合线路配电网, 恒定负载为  $1 \text{ MW} + j0.2 \text{ Mvar}$ , 线路 2、4 中设置可变负荷模拟负荷波动, 在线路 2、5 中经变比为 10.5 kV/380 V

的隔离变压器接入具备低电压穿越功能的 IIDG, 容量为 0.5 MW, 渗透率为 16.7%。其中, 谐振接地系统采用脱谐度为 7% 的过补偿方式, 小电阻接地系统中性点接地电阻取  $R_0=10 \Omega$ 。

根据中性点接地方式、过渡电阻大小、负荷波动、故障初相角、故障位置及 IIDG 接入数量不同, 对多种故障情况进行多组仿真, 表 1 为具有代表性的 16 组故障参数设置情况。

表 1 含 IIDG 配电网单相接地故障仿真算例

Table 1 Single-phase ground fault simulation example of distribution network with IIDG

故障序号	故障点位置	过渡电阻/ $\Omega$	中性点接地方式	故障初相角( $^\circ$ )	IIDG 接入情况
1	$f_1$	10	不接地	30	DG1
2	$f_1$	10	经小电阻接地	30	DG1
3	$f_1$	10	谐振接地	30	DG1
4	$f_2$	10	谐振接地	30	DG1
5	$f_3$	10	谐振接地	30	DG1
6	$f_1$	10	谐振接地	0	DG1
7	$f_1$	10	谐振接地	90	DG1
8	$f_1, f_3$	10	谐振接地	30	DG1、2
9	$f_1$	0	谐振接地	30	DG1、2
10	$f_1$	500	谐振接地	30	DG1、2
11	$f_1$	1 000	谐振接地	30	DG1、2
12	$f_1$	500	不接地	30	DG1
13	$f_1$	1 000	不接地	30	DG1、2
14	$f_1$	1 000	经小电阻接地	30	DG1、2
15	负荷波动	—	谐振接地	—	DG1、2
16	负荷波动	—	不接地	—	DG1、2

#### 4.1 不同故障条件下定位结果仿真验证

为验证该方法是否受中性点接地方式、过渡电阻、接地位置、故障初相角等因素的影响, 将仿真结果按控制变量原则分组, 如表 2—表 5 所示。

表 2 不同接地方式下故障区段定位结果

Table 2 Location results with different neutral grounding modes

接地方式	故障序号	故障区段期望靶心度最小值	故障区段	定位结果
不接地	1	$\gamma(g_3)=0.0927$	区段 8	正确
经小电阻接地	2	$\gamma(g_3)=0.0832$	区段 8	正确
谐振接地	3	$\gamma(g_3)=0.0910$	区段 8	正确
	15	—	—	正确
不接地	16	—	—	正确

由表 2 可知, 负荷波动时未进入定位程序。序号 1—3 故障情况下, 皆有区段 8 对应  $\gamma(g_3)$  值小于

对应的  $\gamma(g_1)$ 、 $\gamma(g_2)$  值, 得到区段 8 对应为决策结果 3 (即故障区段), 故在不同的中性点接地方式下均能实现故障区段定位。

表 3 不同故障位置下区段定位结果

Table 3 Location results of different fault point settings

故障位置	故障序号	故障区段期望靶心度最小值	故障区段	定位结果
$f_1$	3	$\gamma(g_3)=0.0910$	区段 8	正确
$f_2$	4	$\gamma(g_3)=0.0307$	区段 11	正确
$f_3$	5	$\gamma(g_3)=0.0413$	区段 17	正确
		$\gamma(g_3)=0.1343$	区段 8	
$f_1, f_3$	8	$\gamma(g_3)=0.0957$	区段 17	正确

表 4 不同故障初相角下故障区段定位结果

Table 4 Location results under different fault initial phase

故障初相角( $^\circ$ )	故障序号	故障区段期望靶心度最小值	故障区段	定位结果
0	6	$\gamma(g_3)=0.1736$	区段 8	正确
30	3	$\gamma(g_3)=0.0910$	区段 8	正确
90	7	$\gamma(g_3)=0.0736$	区段 8	正确

由表 3、表 4 可见, 设置发生故障的区段对应  $\gamma(g_3)$  值皆为最小值, 故障位置、初相角不同不影响定位方法的准确性, 两点故障时也能分别选择故障区段。最小期望靶心度的灵敏性随故障参数设置变化略有变化, 但本文方法仍可实现故障区段定位。

表 5 不同过渡电阻下故障区段定位结果

Table 5 Location results under different grounding resistance

过渡电阻/ $\Omega$	故障序号	接地方式	故障区段期望靶心度最小值	故障区段	定位结果
0	9	谐振接地	$\gamma(g_3)=0.1049$	区段 8	正确
10	3	谐振接地	$\gamma(g_3)=0.0910$	区段 8	正确
500	10	谐振接地	$\gamma(g_3)=0.1310$	区段 8	正确
1 000	11	谐振接地	$\gamma(g_3)=0.2307$	区段 8	正确
500	12	不接地	$\gamma(g_3)=0.2031$	区段 8	正确
1 000	13	不接地	$\gamma(g_3)=0.0923$	区段 8	正确
1 000	14	经小电阻接地	$\gamma(g_3)=0.0792$	区段 8	正确

由表 5 可得: 过渡电阻为单一变量时, 故障区段  $\gamma(g_3)$  数值随过渡电阻大有增大的趋势, 但其值仍为  $\gamma(g_i)$  中最小值, 虽然定位灵敏性随过渡电阻阻值增大有降低的趋势, 但总体不影响故障区段的定位。

#### 4.2 不同方法的定位结果对比

为验证本文定位方法的优势, 与零序电流波形相关法、暂态零序电流比幅法、稳态零序电流幅值法在故障 8 条件下定位结果进行对比。受篇幅限制, 仅列出故障 8 的部分区段仿真结果见表 6。



表 6 故障 8 对应各决策结果靶心度及定位结果

Table 6 Locating results and the target distance under each decision result in case 8

区段	健全状态 期望靶心度 $\gamma(g_1)$	故障点上游状 态期望靶心度 $\gamma(g_2)$	故障状态 期望靶心度 $\gamma(g_3)$	区段期望 靶心度 最小值	本文方法 定位结果	零序电流 波形相关法 定位结果	暂态零模 电流比幅 法定位结果	稳态零序电 流幅值法定 定位结果
5	0.538 5	0.192 7	0.903 2	$\gamma(g_2)=0.192 7$	故障点上游区段	健全区段	故障区段	
6	0.503 2	0.083 2	0.745 5	$\gamma(g_2)=0.083 2$	故障点上游区段	故障区段	故障区段	
15	0.733 4	0.173 6	0.303	$\gamma(g_2)=0.173 6$	故障点上游区段	健全区段	故障区段	
16	0.461 7	0.073 6	0.702 4	$\gamma(g_2)=0.073 6$	故障点上游区段	健全区段	故障区段	健全区段
17	0.509 9	0.334 3	0.095 7	$\gamma(g_3)=0.095 7$	故障区段	故障区段	故障区段	
21	0.131	0.339 7	0.785 5	$\gamma(g_1)=0.131$	健全区段	故障区段	健全区段	

根据三种不同区段故障后的特征确定标准指标值序列,采集待决策区段故障后各指标并归一化,按式(23)分别计算三种决策结果下的期望靶心度 $\gamma(g_i)$ ,比较期望靶心度,最小值对应决策结果为该区段状态。例如故障 8 分别在区段 8、17 设置单相接地故障,根据表 6 数据可以得到区段 8 对应 $\gamma(g_3)$ 为 $\gamma(g_i)$ 中的最小值,因此判断区段 8 为故障区段;同理,区段 1 对应 $\gamma(g_1)$ 为 $\gamma(g_i)$ 中最小值,因此可以判断区段 1 为健全区段。由此可见,多点故障时,利用单一故障特征定位不准确,本文方法能综合多故障特征的指示性,对区段进行就地判断。

### 4.3 典型场景算例仿真验证

考虑农村有源电网典型算例<sup>[29]</sup>中光伏接入的特点,将线路 3 设置为分布式电源渗透率为 52.26% 的多 IIDG 接入馈线,结构如图 6 所示。

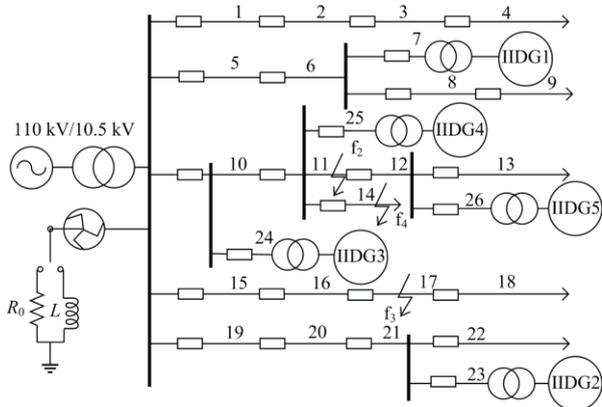


图 6 IIDG 高渗透率下配电网仿真模型

Fig. 6 Simulation model of distribution network with IIDG high penetration

进行多组接地故障仿真以进一步验证方法,列出具有代表性的三组故障,配电网中性点接地方式自上而下分别为不接地、经小电阻接地和谐振接地,定位结果如表 7 所示。

根据仿真结果,本文所提方法在 IIDG 高渗透率、不同接地方式、过渡电阻、接地故障位置、故

表 7 IIDG 高渗透率下接地故障区段定位结果

Table 7 Location results under IIDG high penetration

故障情况	故障区段期望 靶心度最小值	故障 区段	定位 结果
$f_2$ : 线路 3 干线 2.1 km 处、A 相电压相角 30°、过渡电阻 500 $\Omega$	$\gamma(g_3)=0.025 6$	区段 11	正确
$f_3$ : 线路 4 距母线 2.5 km 处、A 相电压相角 90°、过渡电阻 1 k $\Omega$	$\gamma(g_3)=0.117 9$	区段 17	正确
$f_4$ : 线路 3 支线末端、A 相电压相角 0°、过渡电阻 10 $\Omega$	$\gamma(g_3)=0.021 3$	区段 14	正确

障初相角及 IIDG 接入的情况下,能通过靶心度计算和比较判断出设置故障所在的区段为故障区段。

## 5 结论

针对配电网单相接地故障区段判定问题,提出一种基于多目标加权灰靶决策的分布式故障区段定位方法。该方法通过区段边界 STU 对等交换并处理故障信息定位故障,将故障定位由“搜索和选择”转化为各个区段的“就地判断”,处理数据量减少,避免了大量信号上传至主站易产生畸变的问题。故障定位灰靶决策模型能够融合多种单相接地故障特征指标,提高定位准确性。仿真结果表明该方法适用性较单一判据定位方法高,可定位两个同时发生故障的区段,适用于含多 IIDG 的辐射型配电网。该方法在多分段、多联络及单环网中的定位效果有待于进一步验证。

## 参考文献

- [1] 国网能源研究院有限公司. 国内外电网发展信息报告 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [2] JAMALI S, BAHMANYAR A, RANJBAR S. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 174-182. DOI: 10.1186/s41601-020-00162-y.
- [3] 王巍璋, 王淳, 尹发根. 基于可达矩阵和贝叶斯定理

- 的含分布式电源的配电网故障区段定位[J/OL]. 中国电力: 1-8[2021-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200326.1627.016.html>.
- WANG Weizhang, WANG Chun, YIN Fagen. Reachability matrix and bayes'theorem based fault section location of power distribution network with distributed generation [J/OL]. Electric Power: 1-8[2021-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200326.1627.016.html>.
- [4] 倪泽宇, 季亮, 施佳斌, 等. 基于 PQMS 电压信息的有源配电网故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 51-56.
- NI Zeyu, JI Liang, SHI Jiabin, et al. Fault location method of active distribution network based on voltage information of PQMS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 51-56.
- [5] 韩国政, 陈羽, 徐丙垠. 基于 IEC 61850 的配电网故障检测与保护信息模型[J]. 供用电, 2019, 36(7): 8-12.
- HAN Guozheng, CHEN Yu, XU Bingyin. Information model for distribution network fault detection and protection based on IEC 61850[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 8-12.
- [6] 张孟琛, 牛益国, 宣文华. 含 DG 配电网分层分区协同故障定位隔离技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 115-121.
- ZHANG Mengchen, NIU Yiguo, XUAN Wenhua. Hierarchical zoning collaborative fault location and isolation technology for distribution networks containing DG[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 115-121.
- [7] 高孟友, 徐丙垠, 范开俊, 等. 基于实时拓扑识别的分布式馈线自动化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 127-131.
- GAO Mengyou, XU Bingyin, FAN Kaijun, et al. Distributed feeder automation based on automatic recognition of real-time feeder topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 127-131.
- [8] BARIK M A, GARGOOM A, MAHMUD M A, et al. A decentralized fault detection technique for detecting single phase to ground faults in power distribution systems with resonant grounding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2462-2473.
- [9] 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.
- [10] 陈奎, 张云, 王洪寅, 等. 基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 57-62.
- CHEN Kui, ZHANG Yun, WANG Hongyin, et al. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 57-62.
- [11] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [12] 宋伊宁, 李天友, 薛永端, 等. 基于配电自动化系统的分布式小电流接地故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 102-109.
- SONG Yining, LI Tianyou, XUE Yongduan, et al. Distributed small-current grounding fault locating method based on power distribution network automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 102-109.
- [13] 童晓阳, 张绍迅. 基于灰色关联度的配电网故障区段定位与类型识别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 113-118, 145.
- TONG Xiaoyang, ZHANG Shaoxun. Grey relational degree based fault section location and type recognition method for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 113-118, 145.
- [14] 金能, 梁宇, 邢家维, 等. 提升配电网线路保护可靠性的远方保护及其与就地保护优化配合方案研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(24): 5221-5233.
- JIN Neng, LIANG Yu, XING Jiawei, et al. Research on remote protection and the optimized coordination scheme of local-remote protection to enhance the protection reliability of the line in distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5221-5233.
- [15] 杨欢红, 丁宇涛, 周敬嵩, 等. 基于最优权重和区间灰数动态灰靶的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 66-74.
- YANG Huanhong, DING Yutao, ZHOU Jingsong, et al. A condition assessment method of transformers based on optimal weight and dynamic grey target with interval grey number[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 66-74.
- [16] WANG Yuanyuan, HUANG Yuhao, ZENG Xiangjun, et al. Faulty feeder detection of single phase-earth fault using grey relation degree in resonant grounding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 55-61.

- [17] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74, 13.  
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74, 13.
- [18] 李卫国, 刘柏岑, 卢广旗. 含分布式电源的配电网单相接地故障精确定位方法[J]. 供用电, 2020, 37(9): 58-63.  
LI Weiguo, LIU Baicen, LU Guangqi. Method for precise location of single-phase grounding fault in distribution network with distributed generation[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(9): 58-63.
- [19] 王日宁, 武一, 魏浩铭, 等. 基于智能终端特征信号的配电网台区拓扑识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 83-89.  
WANG Rining, WU Yi, WEI Haoming, et al. Topology identification method for a distribution network area based on the characteristic signal of a smart terminal unit[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 83-89.
- [20] 李娟, 高厚磊, 朱国防. 考虑逆变类分布式电源特性的有源配电网反时限电流差动保护[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 74-83.  
LI Juan, GAO Houlei, ZHU Guofang. Inverse-time current differential protection in active distribution network considering characteristics of inverter interfaced distributed generations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 74-83.
- [21] 朱占春, 闻生学, 唐金锐, 等. 计及配电线路参数影响的有源消弧算法分析与改进[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 149-158.  
ZHU Zhanchun, WEN Shengxue, TANG Jinrui, et al. Analysis and improvement of active arc suppression algorithm considering effect of distribution line parameters[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 149-158.
- [22] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5703-5714.  
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5703-5714.
- [23] 薛文君. 小电流接地故障暂态机理分析[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.  
XUE Wenjun. The analysis of transient mechanism in single phase grounding fault[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [24] 闫书丽. 灰靶决策方法及应用研究[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [25] 王韶, 邓先芳, 谢青洋, 等. 考虑电压权重的配电网分布式电源优化配置[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 38-44.  
WANG Shao, DENG Xianfang, XIE Qingyang, et al. Optimal allocation of distributed generation in distribution network considering voltage weighting factor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 38-44.
- [26] 王鑫. 基于层次分析法的继电保护专家系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
WANG Xin. Study on expert system of relay protection based on analytic hierarchy process[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [27] 周薇, 李筱菁. 基于信息熵理论的综合评价方法[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(23): 5839-5843.  
ZHOU Wei, LI Xiaojing. A comprehensive evaluation method based on information entropy[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(23): 5839-5843.
- [28] 许光, 刘漫雨, 王兴念, 等. 基于多信息融合的自适应单相接地故障在线定位研究与应用[J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 64-72.  
XU Guang, LIU Manyu, WANG Xingnian, et al. Research and application of adaptive single phase ground fault online locating based on multi-information fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(12): 64-72.
- [29] 孙充勃, 李敬如, 罗凤章, 等. 考虑分布式电源接入的配电系统典型算例设计[J]. 电力建设, 2020, 41(10): 47-62.  
SUN Chongbo, LI Jingru, LUO Fengzhang, et al. Typical case design of distribution system considering DG integration[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(10): 47-62.

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2021-04-15

作者简介:

程梦竹(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网接地故障定位; E-mail: 15215330373@163.com

张新慧(1971—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能配电网保护与控制等; E-mail: zhxh626@126.com

徐铭铭(1985—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能配电网故障。Email: xu\_ming\_ming@vip.sina.com

(编辑 许威)