

doi: 10.7690/bgzd.2025.10.007

基于分布式接入配网的单相接地故障定位适应性

胡润武, 蔡雯婷, 马 卫

(国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 为解决分布式电源接入配电网而引起网络拓扑结构改变, 传统单一故障信号难以实现故障区的准确定位问题, 提出一种基于多目标的决策故障区段定位方法。以分布式能源(distribute generator, DG)配电网故障接地电路特征为基础, 建立单向接地故障的多目标评价指标体系, 由期望最小靶心度值来判定故障区段, 减小故障定位误差。仿真实验结果表明: 多目标决策故障区段定位法能较好实现分布式配电网的故障定位。多目标决策树的配电网故障定位实现了多指标的融合, 具有更高的定位准确度, 尤其是在配电网多点故障情况下, 能够同时准确地定位多点故障点。

关键词: 配电网; DG; 故障定位; 单相接地

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A

Adaptability of Single Phase Grounding Fault Location Based on Distributed Access Distribution Network

Hu Runwu, Cai Wenting, Ma Wei

(Changji Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional single fault signal is difficult to accurately locate the fault section due to the change of network topology caused by the access of distributed generation to the distribution network, a fault section location method based on multi-objective decision-making is proposed. Based on the characteristics of fault grounding circuit of distributed generator (DG) distribution network, a multi-objective evaluation index system of one-way grounding fault is established, and the fault section is determined by the expected minimum target value to reduce the fault location error. The simulation results show that the multi-objective decision fault section location method can better realize the fault location of distributed distribution network. The distribution network fault location based on the multi-objective decision tree realizes the fusion of multiple indexes, has higher location accuracy, and can accurately locate multiple fault points at the same time especially under the condition of multiple faults in the distribution network.

Keywords: distribution network; DG; fault location; single-phase grounding

0 引言

传统配电网故障定位依靠馈线终端装置监测并上传故障数据进行快速定位^[1]。现代智能电网中, 随着智能电网的发展, 分布式能源(DG)大量接入配电网系统, 集中式供电结构发生改变, 潮流方向和拓扑结构趋于复杂^[2]。传统的直接法或间接法的故障定位难以适用有源配电网结构, 适用于有源配电网故障定位的新算法得到深入探索^[3]。分布式定位方法能实现统一控制域内只能馈线终端独立判断故障区段, 支持就地控制和终端间交换信息的分布式控制^[4-5]。如利用灰色关联度进行配网中故障定位, 一旦电网中接入 DG 后将导致相似度计算发生改变^[6]; 融合了远程与就地保护能避免互感器等电源器件的干扰, 但保护动作阈值的整定困难^[7]; 基

于支持向量机为分类器, 以故障电压为特征量, 通过线形判别分析来提取故障特征, 实现配电网故障定位的匹配^[8]。

笔者在相关研究基础上, 根据分布式能源配电网结构特征, 提出一种基于多目标决策的配网故障定位方法实现对区段故障的定位, 有效解决有源配电网状态信息多且不确定性。

1 分布式能源配电网单相接地故障分析

1.1 分布式能源配电网结构特征

传统单相接地故障分析中将 DG 作为普通旋转式电源, 输出故障电流由次暂态电势和电抗决定。而逆变型 DG 故障特性与控制策略相关, 可将 DG 等效为一个压控电流源模型进行分析。依托正序、负序、零序构成负荷序网, 运用分量法解决不对称

收稿日期: 2024-10-16; 修回日期: 2024-11-22

第一作者: 胡润武(1975—), 男, 新疆人。

故障, 分析含分布式接入的单相接地故障特征, 图 1 为一个故障点位于分布式电源下游配网模型。

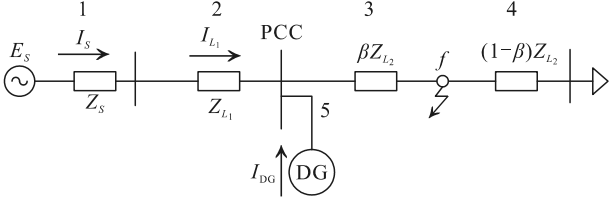


图 1 含 DG 的配电网结构

E_s 为系统电源; Z_s 为等效阻抗; Z_{L1} 为上游线路等效阻抗; $Z_{\Sigma 0}$ 为零模阻抗; Z_f 为故障电阻; βZ_{L2} 为 PCC 点至故障点等值阻抗; $(1-\beta)Z_{L2}$ 为故障点至负荷点等值阻抗, $0 < \beta < 1$ 。

当电网存在不对称故障时, 分布式电源故障电路只输出正序电流, 而负序电流或零序电流均为 0, 此时, 电网单向接地故障满足关系:

$$\left. \begin{aligned} U_f^+ + U_f^- + U_f^0 &= 0 \\ I_f^+ &= I_f^- = I_f^0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: U_f^+ 、 U_f^- 、 U_f^0 为线模和零模电压分量;

I_f^i ($i = +, -, 0$) 为线模和零模电流分量。

1.2 DG 计入是配网故障分析

对于一个含 DG 的配电网复合序网, 通过式(2)、(3)计算接入 DG 的配电网负荷序列公共连接点上下游正序电流。比较含 DG 时的复合序网可以看出: 由于 DG 接入导致正序网络拓扑结构变化, 正序电流突变, 而公共连接点上游正序电流较小, 连接点下游正序电流增大。对于零序分量, 其 PCC 点上下游零序电流保持不变, 与接入后下游正序电流相当。

$$I_{L2,f}^+ = I_{L1,f}^0 = I_{L2,f}^0 = (E_s + I_{DG,f}(Z_{L1} + Z_s)) / (2(Z_{L1} + Z_s + \beta Z_{L2}) + 3Z_f + Z_{\Sigma 0}); \quad (2)$$

$$I_{L1,f}^+ = \frac{E_s - I_{DG,f}(Z_{L1} + Z_s)}{2(Z_{L1} + Z_s + \beta Z_{L2}) + 3Z_f + Z_{\Sigma 0}} \quad (3)$$

当单个分布式电源接入配网时, 可认为仅改变配网的正序拓扑结构, 零序网络并未发生较大变化。

配网发生故障时, 状态量变化, 为准确评估区段状态, 需要选定合适的决策指标。稳态故障下, 对于中性点经小电阻接地故障, 闭合区段流入和流出电流近似相等, 对地电容电流形成差值, 区外故障 I_x 约为零, 可以选择该判据进行区段状态评价^[9]。

配电网在暂态故障下, 零序网络不受 DG 接入

的影响。对于金属性、低阻接地故障, 由于过度电阻较小, 发生金属接地故障时, 故障点上游方向零模电流振幅大, 谐振频率低, 下游则相反, 根据故障区暂态电流波动情况建立判断指标。高阻接地时, 健全区段故障电流接近 0, 故障区段的电阻较高^[10]。

综上所述, 选取区段内暂态零模电流波动和衰减速度、零序电流差、等值电阻为特征指标, 对不同类型单向接地故障定位, 并由决策树建立故障特征的故障区段定位模型。

2 多目标的分布式配电网故障定位

2.1 多目标加权决策评价模型

基于分布式定位特点, 建立多目标加权决策模型进行状态决策, 决策模型计算公式:

$$\left. \begin{aligned} A &= \{a\} \\ K &= \{k_1, k_2, k_3, k_4\} \\ \lambda &= \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\} \\ B &= \{b_1, b_2, b_3\} \\ S_f &= \{s_{11}, s_{12}, s_{13}\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 S_f 为决策方案集。

状态 a 为决策对象, 由 k_1 等值电阻、 k_2 暂态零模电流波动、 k_3 暂态零模电流衰减速度、 k_4 零序电流差构成决策指标集, λ 作为权重集。将配电网划分为健全区段 b_1 、故障点上游区段 b_2 、故障区段 b_3 。 $t_0 \sim t_T$ 为故障经历的时间段, 指标 k_j 的区间灰数为:

$$c_j^i(\otimes) = [c_j^{L_i}, c_j^{U_i}] \quad (5)$$

式中 $c_j^{L_i}$ 、 $c_j^{U_i}$ 分别为指标集最小值、最大值。通过选择决策结果来实现故障区段的定位, 即若决策得到 s_{13} 获得最小区间灰度值, 则认为 s_{13} 为最佳方案, 其对应的区段为故障区段。

由于故障特征量纲不同, 采用式(6)对区段状态评价指标进行归一化处理:

$$g_{ij}^t(\otimes) = [g_{ij}^{L_t}, g_{ij}^{U_t}] = \left[\frac{c_{ij}^{L_t}}{\sum_{i=1}^3 c_{ij}^{U_t}}, \frac{c_{ij}^{U_t}}{\sum_{i=1}^3 c_{ij}^{L_t}} \right] \quad (6)$$

式中: $i=1, 2, 3$ 为 3 种决策结果; $j=1, 2, 3, 4$ 为评价指标。对指标进行归一化处理后, 需确定各指标的权重, 以保证故障定位的准确度和灵敏度。由于熵理论在较短数据窗下就能获取稳定信号, 且具有强的抗噪和抗干扰能力, 因此, 根据熵值算法进行权重赋值, 将各指标综合权重计算靶心度, 信息熵表达式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p(x_{ji}) \ln p(x_{ji})。$$
 (7)

式中： x_{ji} 为指标 j 第 i 个状态值； $p(x_{ji})=x_{ji}/x_{\Sigma j}$ 为指标 j 出现状态 i 的概率。定义第 j 个指标的权重计算公式为：

$$\omega_j = (1 - e_j) / \left(4 - \sum_{j=1}^4 e_j \right)，(j=1, 2, 3, 4)。$$
 (8)

在判定故障区段中，故障定位启动后的 t 阶段内，最优指标序列 $g^{t+} = (g_1^{t+}, g_2^{t+}, g_3^{t+}, g_4^{t+})$ 为状态期望靶心，区段采样值作为状态靶心期望值，不同评估方案对应故障区段指标，确定 $t(t_0, t_T)$ 时间段的状态指标与期望靶心间靶心系数为^[11]：

$$\gamma(\bar{g}_{ij}^t(\otimes), g_j^{t+}(\otimes)) = \frac{\min_j \min_i D + 0.5 \max_i \max_j D}{D + 0.5 \max_i \max_j D}。$$
 (9)

式中 D 为 t 时段平均指标与最优指标间的欧氏距离。方案 s_{1i} 期望靶心度为：

$$\gamma(g_i) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^4 \lambda_j \cdot \gamma(\bar{g}_{ij}^t(\otimes), g_j^{t+}(\otimes))。$$
 (10)

故障定位启动条件选择零序电压幅值波动量，设置 U_{0th} 不平衡电压幅度 10%，当任一相电压下降，零序电压波动量超过 U_{0th} 值时，选择该项作为输入模量，建立多目标灰权决策故障模型，由 STU 采集数据来计算零序电压及相电压波动值，当 $\Delta U_0 > U_{0th}$ ，则计算 $k_1 \sim k_4$ 特征指标数据，归一化处理后生成各类集合，由配电网情况计算方案 s_{1i} 的期望靶心度，比较 3 种决策方案的靶心度大小，获得区段

的状态决策结果。

2.2 模型仿真验证

采用 PSCAD/EMTDC 软件建立 10 kV 线缆混合配电网系统的仿真模型，由图 1 所见。在线路同时模拟负荷波动，容量 0.5 MW 的 DG 设备通过隔离变压器接入在线路 2 和 3 之间，设定系统恒定负载 1 MW+j0.2 Mvar，接地小电阻 $R_0=10 \Omega$ 。选择区段 4 设置单向接地故障仿真，其中故障序号 4 设置为负荷波动类型，不同中性点接地方式下的故障如表 1 所示。

表 1 含 DG 配电网单相接地故障算例

故障序号	DG 接入情况	故障点位置	过渡电阻/ Ω	故障初始相角/($^\circ$)	中性点接地方式
1	DG1	区段 4	10	30	不接地
2	DG1	区段 4	10	30	经小电阻接地
3	DG1	区段 4	10	30	谐振接地
4	DG1	负荷波动	-	-	谐振接地

表 2 为不同接地方式下故障区段定位结果，其中故障序列 4 负荷波动未进入故障定位程序。可以看出：在故障序号 1~3 中，区段 4 对应的 $\gamma(g_3)$ 均小于 $\gamma(g_1)$ 和 $\gamma(g_2)$ ，可得到区段 4 为故障区段，证明该方法在不同中性点接地方式下均能准确定位故障区段。

同样以区段 4 为故障区段，选择零序电流波形法、暂态零序电流比幅法以及本文中方法进行性能比较，获得各决策结果靶心度及定位结果，如表 3 所示，其中期望靶心度最小值对应的决策结果即为该区段状态。

表 2 含 DG 配电网单相接地故障算例

故障序号	故障区段	健全区期望靶心度 $\gamma(g_1)$	故障点上游期望靶心度 $\gamma(g_2)$	故障区段期望靶心度 $\gamma(g_3)$	中性点接地方式	定位结果
1	区段 4	0.853 2	0.743 2	0.135 5	不接地	正确
2	区段 4	0.503 4	0.242 5	0.035 3	经小电阻接地	正确
3	区段 4	0.842 5	0.453 1	0.103 2	谐振接地	正确
4	负荷波动	-	-	-	谐振接地	正确

表 3 不同决策结果靶心度及定位结果

区段	健全区期望靶心度 $\gamma(g_1)$	故障点上游期望靶心度 $\gamma(g_2)$	故障区段期望靶心度 $\gamma(g_3)$	期望靶心度最小值	笔者定位结果	零序电流波形法	暂态零序电流比幅法
1	0.538 4	0.192 6	0.902 4	$\gamma(g_2)=0.192 6$	故障点上游	健全区	故障区
2	0.503 4	0.086 4	0.745 4	$\gamma(g_2)=0.086 4$	故障点上游	故障区	故障区
3	0.733 5	0.172 5	0.303 2	$\gamma(g_2)=0.172 5$	故障点上游	健全区	故障区
5	0.134 0	0.339 5	0.753 4	$\gamma(g_1)=0.134 0$	健全区	故障	健全区

由表 2—3 可以看出：当区段 4 设置单向接地时，区段 4 的 $\gamma(g_3)$ 取得最小值，根据故障判断依据，此时判定区段 4 为故障区域。而区段 5 的 $\gamma(g_1)$ 取得最小值时，则判断区段 5 为健全故障。比较几种故障

定位方法可以看出，当配电网存在多点故障，传统的单一故障特征的故障定位存在一定的误差，而基于多目标决策树的分布式故障定位通过多指标融合，能够准确地定位故障点。

3 结论

配电网分布式能源接入配电网时, 对系统零序电流影响较小, 对正序电流影响较大。基于上述特征, 提出一种基于多目标的决策树的分布式故障定位方法。该方法融合多种单向接地故障特征指标, 实现故障区段的就地判断, 避免了信号传输过程中产生畸变。仿真结果表明: 该方法相较于单一指标判定法, 融合多个故障特征, 具有较高的故障定位准确率, 适用于分布式配的辐射性配网。

参考文献:

- [1] 王华昕, 刘健, 邹龙, 等. 新型电力系统下低压直流配网的接地故障保护方法[J]. 电测与仪表, 2022, 23(5): 1-9.
- [2] 王梓丞. 基于层次分析的配电网供电可靠性评估方法研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(4): 51-54.
- [3] 曲振明, 王宾, 张慧芬. 中性点小电阻接地配网多分支电缆线路单相接地故障测距[J]. 电气应用, 2021, 40(5): 28-33, 38.
- [4] 史可鉴, 陈刚, 吴建军, 等. 基于行波信号注入的配网线路单相故障状态接地诊断方法[J]. 电网与清洁能源,

(上接第 4 页)

- [5] 方伟光, 聂兆伟, 刘宸宁, 等. 数字孪生驱动的武器装备智能保障技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023(4): 1247-1260.
- [6] WANG Z K, JIA W N, WANG K N, et al. Digital twins supported equipment maintenance model in intelligent water conservancy[J]. Computers and Electrical Engineering, 2022, 101: 1-14.
- [7] 曹益铭, 陈悦峰, 麻雄, 等. 基于数字孪生的装甲装备故障与健康参数优化平台研究[J]. 天津理工大学学报, 2022, 38(2): 8-13.
- [8] 胡才旺, 刘治红. 基于数字孪生的质量管控技术研究进展[J]. 兵工自动化, 2023, 42(1): 26-32.
- [9] 丁刚, 崔利杰, 张琳, 等. 基于数字孪生的航空装备保障仿真系统构建与实现[C]. 第三届体系工程学术会议论文集, 2021: 257-264.
- [10] 张宇河, 姜海龙. 基于数字孪生的船机电装备信息动

2022, 38(2): 82-87.

- [5] 肖洪光, 杨璐, 郭永鑫. 基于自适应遗传算法的智能电网继电保护故障识别[J]. 自动化仪表, 2022, 43(7): 51-54.
- [6] 刘江东, 董礼清, 薛晨, 等. 基于零序电压分布特征的小电流接地故障测距初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 59-67.
- [7] 王向阳, 李自良. 基于模糊神经网络的信号维护监测子系统故障预测研究[J]. 自动化仪表, 2022, 43(4): 59-62.
- [8] 王国钰, 范春菊, 李潇. 伪双极接线不同接地方式下直流配电线路故障选极方案[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 1-12.
- [9] 胡浩, 魏华跃, 刘国玉, 等. 220 kV 变电站主变低压侧跳闸典型故障分析与启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 153-161.
- [10] 叶远波, 黄太贵, 谢民, 等. 小电阻接地系统高阻和间歇性弧光接地故障继电保护研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 9-17, 26.
- [11] 陈志华, 张波. 配电网物联网在单相接地故障抢修精准指挥中的应用[J]. 电气技术, 2020, 21(9): 70-76.
- [12] 态匹配模型研究[J]. 设备管理与维修, 2020(17): 31-34.
- [11] 周轩毅. 航空装备保障维修预测关键技术研究与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [12] CHEN Y K, CHEN J, LI C, et al. Research on Application of Digital Twin in Simulation of Equipment Maintenance Support[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 782(3): 1-6.
- [13] 曾国庆, 陈国兵, 王学峰, 等. 基于多领域建模与数字孪生的船舶热力系统应用研究现状[J]. 舰船电子工程, 2022(6): 1-9.
- [14] 侯安生. 基于模型的航空装备服务保障数字化新技术研究[J]. 航空维修与工程, 2019(8): 32-33.
- [15] 侯安生, 平本红, 薛萍. 航空装备维修保障发展研究[J]. 航空维修与工程, 2018(10): 20-24.
- [16] 闫仲秋, 陈义平, 邵奇, 等. 基于数字工程的武器装备发展研究[J]. 兵工自动化, 2023, 42(5): 92-96.