

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230847

## 基于模型识别的有源配电网单相接地故障定位方法

许守东, 欧阳金鑫, 陈宇捷, 陈纪宇, 王建, 熊小伏

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 分布式电源(distributed generation, DG)大量接入使配电网继电保护面临严峻挑战。单相接地故障发生概率大, 但故障信息十分微弱, 特别是在 DG 多样化故障输出特性的影响下, 有源配电网单相接地故障定位的准确性常难以保证。为此, 提出了一种基于模型识别的有源配电网单相接地故障定位方法。分析了配电网单相接地故障下 DG 的输出特性, 建立了在不同故障位置下有源配电网的正序增广网络, 构建了故障位置关于馈线出口以及 DG 输出电流的函数, 建立了配电网单相接地故障位置模型, 利用不同故障位置下短路电流矢量占比系数的差异性构建了新的故障定位判据。通过将单相接地故障定位问题转化为故障位置模型系数的求解问题, 提高了故障定位的准确性和实用性。理论和仿真分析表明, 在不同故障位置、不同过渡电阻下均能准确定位单相接地故障, 具有原理清晰、故障特征量采集便捷、灵敏性和可靠性高的优点。

**关键词:** 配电网; 分布式电源; 单相接地故障; 故障区段定位; 故障测距

### A fault location method for a single-phase fault for a distribution network with DGs based on model recognition

XU Shoudong, OUYANG Jinxin, CHEN Yujie, CHEN Jiyu, WANG Jian, XIONG Xiaofu

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology

(Chongqing University), Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The large-scale integration of distributed power generation (DG) poses a serious challenge to the relay protection of distribution networks. The probability of single-phase ground fault occurrence is high, but the fault information is very weak, especially under the influence of the diverse fault output characteristics of DG. The accuracy of single-phase fault location in a distribution network with DGs is often difficult to guarantee. To this end, a model recognition-based single-phase grounding fault location method for a distribution network with DGs is proposed. The output characteristics of DG under single-phase to ground faults in the distribution network is analyzed, and a positive sequence augmented network of distribution network with DGs at different fault locations is established. A function of fault location on the feeder outlet and DG output current vector is constructed and a single-phase to ground fault location model in the distribution network is established. A new fault location criterion is constructed based on the difference in the proportion coefficient of a short-circuit current vector in different fault locations. The accuracy and practicality of fault location have been improved by transforming the problem of single-phase grounding fault location into the problem of solving the coefficients of the fault location model. Theoretical and simulation analysis shows that single-phase grounding faults can be accurately located at different fault locations and transition resistances, with the advantages of clear principles, convenient fault feature collection, and high sensitivity and reliability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877018).

**Key words:** distribution network; distributed generation (DG); single phase ground fault; fault section positioning; fault location

## 0 引言

以风电、光伏为代表的分布式电源(distributed

generation, DG)占比持续上升, 有源配电网迅速发展, 并逐渐向以 DG 为核心的新型配电网方向发展<sup>[1-3]</sup>。DG 在运行机理、拓扑结构、控制模式等方面均有别于同步发电机, 使其在电网发生故障时呈现出与同步发电机完全不同的输出特性, 给配电网

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877018)

故障保护带来严峻挑战<sup>[4-6]</sup>。特别是在配电网单相接地故障下，DG 使微弱的故障特征信息变得多样化，故障边界愈加模糊，单相接地故障的准确识别和定位变得更加困难<sup>[7]</sup>。

不含 DG 的传统配电网单相接地故障的定位原理较多，主要分为测距法和定段法。测距法包含阻抗法、行波法和 S 信号注入法。阻抗法基于线芯阻抗与线长的正比关系确定测量点到故障点的距离<sup>[8]</sup>。行波法基于行波折返过程中的时间间隔实现故障点的定位<sup>[9]</sup>。S 信号注入法将特定信号电流注入配电网，通过对电流路径的检测和跟踪，实现故障的定位<sup>[10]</sup>。然而，阻抗法存在伪故障点的问题，行波法面临行波难以采集的问题，S 信号注入法需额外设备且不适用于间歇性故障定位<sup>[11]</sup>。定段法主要依靠配电网馈线的故障特征量实现单相接地故障定位<sup>[12]</sup>。文献[13]提出了一种基于故障方向测度的配电网故障区段定位方法，但暂态相电流的采集较为困难；文献[14]利用电压暂降构造故障定位判据，但该方法受过渡电阻的影响较大。受限于特征量采集能力和通信水平，定段法在配电网中的应用还存在不足<sup>[15]</sup>。

DG 的接入影响配电网潮流分布，且风电、光伏等 DG 的输出功率具有随机性，因此针对传统配电网的单相接地故障定位方法难以应用于有源配电网。文献[16-17]对有源配电网单相接地故障展开了一定研究。文献[18]指出在限制 DG 容量条件下可在传统定位方式的基础上根据故障电流信息实现短距离架空线路单相接地故障的定位，而对于长距离架空线路则需要改进定位方法。随着配电自动化系统的广泛应用，基于多端电气量的故障定位受到关注。故障指示器法利用电流幅值差动原理实现故障定位，但在含 DG 的配电网中幅值差动的弱馈问题难以解决，且 DG 控制响应应对工频故障电流幅值和相角影响较大，可能造成故障指示器法难以正常工作<sup>[19]</sup>。文献[20]依据暂态零模电流的振荡衰减特性和极性相反特性构建了定位判据，但是该方法无法适应不同的中性点接地方式。文献[21]将分层模型和改进免疫算法结合，提高了有源配电网故障定位的精度，但对通信的要求也相对较高。现有的有源配电网单相接地故障定位方法仍存在一定局限性。

本文提出了一种基于模型识别的有源配电网单相接地故障定位方法。通过构建有源配电网单相故障位置模型，将故障区段定位问题转化为故障位置模型的函数求解问题，提高了有源配电网单相故障定位的适应性和可靠性。首先，分析了有源配

网单相接地故障下 DG 的输出特性，建立了不同单相接地故障位置下有源配电网的正序增广网络；进而解析了故障位置关于馈线出口及 DG 输出短路电流的函数关系，构建了有源配电网单相接地故障位置模型；分析了不同故障位置模型中短路电流矢量占比系数的差异，提出了有源配电网单相接地故障新的定位方法。仿真表明，该方法能够在不同故障位置、不同过渡电阻和不同负荷功率条件下实现单相接地故障的准确定位，且原理清晰、整定方便。

## 1 有源配电网单相接地故障分析

DG 主要为光伏、直驱风电和燃料电池等逆变型电源。逆变型 DG 的输出性能主要取决于逆变器控制响应。逆变器控制系统调节 DG 有功和无功电流从而控制输出功率跟踪参考值。为了避免损坏电力电子器件，DG 最大电流一般不超过逆变器额定电流的 2 倍<sup>[22]</sup>。根据并网要求，DG 需要具备低电压穿越能力，在并网电压跌落一定时间内保持并网运行，并为电网提供无功支撑<sup>[23]</sup>。另外，为了降低电流谐波、提高电能质量，DG 通常采用负序电流抑制策略<sup>[24]</sup>。控制器暂态响应时间远小于故障时间，故可近似认为 DG 功率无差跟踪控制参考值变化<sup>[25]</sup>。在电网不对称短路故障下，复合序网不存在 DG 的负序、零序通路，而在 DG 的正序通路中，变压器等效短路阻抗不影响受控电流源输出的短路电流。因此，在分析有源配电网单相故障时，可以忽略变压器等效短路阻抗，DG 可等值为受并网点正序电压控制的正序电流源<sup>[26]</sup>。

根据故障点与 DG 并网点的关系，可将有源配电网单相接地故障分为母线至上游 DG 并网点之间、DG 并网点之间、下游 DG 并网点至馈线末端 3 类，如图 1 所示。图中： $f_1$ 、 $f_2$  和  $f_3$  分别为故障点； $DG_1$  和  $DG_2$  分别为上游 DG 和下游 DG； $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  分别为变电站母线三相电压； $u_{g1f_A}$ 、 $u_{g1f_B}$ 、 $u_{g1f_C}$  分别为  $DG_1$  并网点三相电压； $u_{g2f_A}$ 、 $u_{g2f_B}$ 、 $u_{g2f_C}$  分别为  $DG_2$  并网点三相电压； $i_{g1f_A}$ 、 $i_{g1f_B}$ 、 $i_{g1f_C}$  分别为  $DG_1$  输出三相电流； $i_{g2f_A}$ 、 $i_{g2f_B}$ 、 $i_{g2f_C}$  分别为  $DG_2$  输出三相电流； $Z_g$  为中性点对地支路的阻抗，采用中性点不接地时， $Z_g$  趋近于无穷大，采用中性点经消弧线圈接地时， $Z_g$  为消弧线圈的感抗，采用中性点经小电阻接地时， $Z_g$  等于接地电阻； $R_f$  为过渡电阻； $i_f$  为故障点对地电流； $i_m$  为故障点下游馈线电流； $u_f$  为故障点电压。

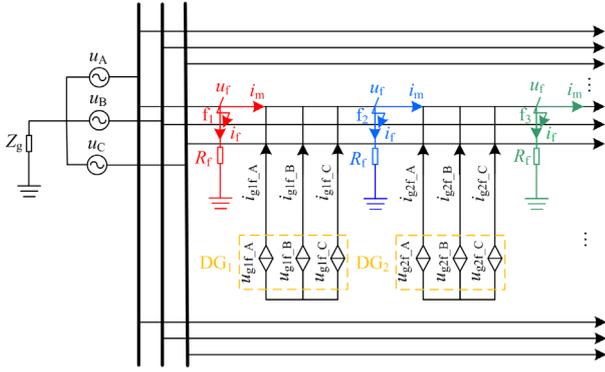
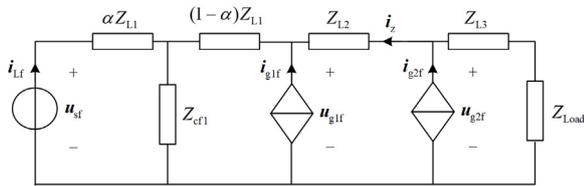


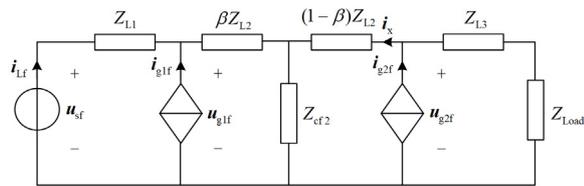
图 1 有源配电网单相接地故障示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase faults in active distribution network with DGs

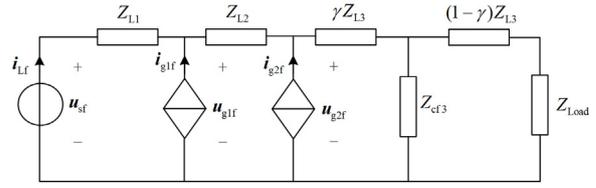
空间矢量随时间变化, 在三相静止坐标系中, 工频空间矢量等于旋转工频稳态相量, 而工频空间矢量的投影等于三相余弦量, 能够刻画电气量的瞬时值<sup>[27]</sup>。因此, 利用三相静止坐标系下的支路电压和电流空间矢量, 并根据单相接地故障的边界条件, 可构建不同故障位置下的工频正序增广矢量网络, 如图 2 所示<sup>[28]</sup>。图中:  $\alpha$  为故障点距母线的距离与母线距 DG<sub>1</sub> 并网点的距离之比;  $\beta$  为故障点距 DG<sub>1</sub> 并网点的距离与 DG 之间的距离之比;  $\gamma$  为故障点距 DG<sub>2</sub> 并网点的距离与 DG<sub>2</sub> 并网点距馈线末端的距离之比;  $i_{Lf}$  为故障馈线出口的正序短路电流矢量;  $i_{g1f}$  和  $i_{g2f}$  分别为 DG<sub>1</sub> 和 DG<sub>2</sub> 输出的正序短路电流矢量;  $u_{sf}$  为变电站母线电压矢量;  $u_{g1f}$  和  $u_{g2f}$  分别为 DG<sub>1</sub> 和 DG<sub>2</sub> 并网点电压矢量;  $Z_{L1}$ 、 $Z_{L2}$ 、 $Z_{L3}$  分别为 DG<sub>1</sub> 并网点至母线之间、DG<sub>1</sub> 和 DG<sub>2</sub> 并网点之间、DG<sub>2</sub> 并网点至馈线末端的线路阻抗;  $Z_{cf1}$ 、 $Z_{cf2}$ 、 $Z_{cf3}$  分别为 3 种故障下的附加阻抗;  $Z_{Load}$  为馈线负荷阻抗。



(a) 故障点位于DG并网点上游馈线



(b) 故障点位于DG并网点之间



(c) 故障点位于DG并网点至馈线末端

图 2 不同故障位置下的正序增广矢量网络

Fig. 2 Positive sequence incremental vector network under Different fault location

附加阻抗  $Z_{cf}$  为过渡电阻和负序、零序网络的串联等效阻抗<sup>[29]</sup>, 3 种故障下均可写为

$$Z_{cf} = 3R_f + Z_{2n} + Z_{0n} \quad (1)$$

式中:  $Z_{2n}$  为负序网络等效阻抗;  $Z_{0n}$  为零序网络等效阻抗, 等于中性点接地阻抗与对地电容的并联阻抗。

求解图 2 的正序增广矢量网络, 可得 DG<sub>1</sub> 并网点至母线之间发生单相接地故障时母线及 DG 并网点的故障电压和电流的关系为

$$\begin{cases} u_{sf} = i_{Lf} \alpha Z_{L1} + (i_{Lf} + i_{g1f} + i_z) Z_{cf1} \\ u_{g1f} = (i_{g1f} + i_z)(1 - \alpha) Z_{L1} + (i_{Lf} + i_{g1f} + i_z) Z_{cf1} \\ u_{g2f} = u_{g1f} + i_z Z_{L2} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $i_z$  为流过  $Z_{L2}$  上的正序短路电流矢量。

DG<sub>1</sub> 与 DG<sub>2</sub> 并网点之间发生单相接地故障时母线及 DG 并网点的故障电压和电流的关系可写为

$$\begin{cases} u_{sf} = i_{Lf} Z_{L1} + (i_{Lf} + i_{g1f}) \beta Z_{L2} + (i_{Lf} + i_{g1f} + i_x) Z_{cf2} \\ u_{g1f} = (i_{Lf} + i_{g1f}) \beta Z_{L2} + (i_{Lf} + i_{g1f} + i_x) Z_{cf2} \\ u_{g2f} = i_{g2f} (1 - \beta) Z_{L2} + (i_{Lf} + i_{g1f} + i_x) Z_{cf2} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $i_x$  为流过  $(1 - \beta) Z_{L2}$  上的正序短路电流矢量。

DG<sub>2</sub> 并网点至馈线末端发生单相接地故障时变电站出口及 DG 并网点的故障电压和电流的关系可写为

$$\begin{cases} u_{sf} = i_{Lf} Z_{L1} + (i_{Lf} + i_{g1f}) Z_{L2} + (i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}) \cdot \\ \quad [\gamma Z_{L3} + Z_{cf3} \parallel (Z_{Load} + (1 - \gamma) Z_{L3})] \\ u_{g1f} = (i_{Lf} + i_{g1f}) Z_{L2} + (i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}) \cdot \\ \quad [\gamma Z_{L3} + Z_{cf3} \parallel (Z_{Load} + (1 - \gamma) Z_{L3})] \\ u_{g2f} = (i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}) \cdot \\ \quad [\gamma Z_{L3} + Z_{cf3} \parallel (Z_{Load} + (1 - \gamma) Z_{L3})] \end{cases} \quad (4)$$

分别求解式(2)一式(4), 可得故障位置比值  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  关于馈线出口正序短路电流矢量  $i_{Lf}$ 、DG<sub>1</sub> 输出的正序短路电流矢量  $i_{g1f}$ 、DG<sub>2</sub> 输出的正序短路电流矢量  $i_{g2f}$  的函数关系。当故障点位于 DG<sub>1</sub> 并网点上游馈线时, 故障点至母线的距离与母线至 DG<sub>1</sub> 并网点的距离之比为

$$\alpha = \frac{u_{sf} - u_{g1f}}{Z_{L1}} \frac{1}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} + \frac{i_{g1f}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} - \frac{i_{g2f}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} \quad (5)$$

当故障点位于 DG<sub>1</sub> 与 DG<sub>2</sub> 并网点之间馈线时, 故障点至 DG<sub>1</sub> 并网点的距离与 DG<sub>1</sub> 和 DG<sub>2</sub> 间馈线距离之比为

$$\beta = \frac{u_{sf} - u_{g2f}}{Z_{L2}} \frac{1}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} - \frac{Z_{L1}}{Z_{L2}} \frac{i_{Lf}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} + \frac{i_{g2f}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} \quad (6)$$

当故障点位于 DG<sub>2</sub> 并网点至馈线末端时, 故障点至 DG<sub>2</sub> 并网点的距离与 DG<sub>2</sub> 并网点至馈线末端的距离之比为

$$\gamma = \frac{u_{sf}}{Z_{L3}} \frac{1}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} - \frac{Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{cf3} \parallel Z_{Load}}{Z_{L3}} \frac{i_{Lf}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} - \frac{Z_{L2} + Z_{cf3} \parallel Z_{Load}}{Z_{L3}} \frac{i_{g1f}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} - \frac{Z_{cf3} \parallel Z_{Load}}{Z_{L3}} \frac{i_{g2f}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} \quad (7)$$

## 2 基于模型识别的单相接地故障定位方法

### 2.1 单相接地故障位置模型

式(5)一式(7)中,  $i_{Lf}/(i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f})$  为馈线出口正序短路电流矢量在短路电流矢量之和中的占比;  $i_{g1f}/(i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f})$  为 DG<sub>1</sub> 输出正序短路电流矢量在短路电流矢量之和中的占比;  $i_{g2f}/(i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f})$  为 DG<sub>2</sub> 输出正序短路电流矢量在短路电流矢量之和中的占比。由式(5)一式(7)中的函数关系可知, 不同故障位置下仅正序短路电流矢量占比的系数不同。因此, 建立有源配电网单相接地故障位置模型为

$$\xi = x \cdot \frac{1}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} + y \cdot \frac{i_{Lf}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} + z \cdot \frac{i_{g1f}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} + w \cdot \frac{i_{g2f}}{i_{Lf} + i_{g1f} + i_{g2f}} \quad (8)$$

式中:  $\xi$  为故障位置参数;  $x$  为正序短路电流矢量系数;  $y$  为馈线出口正序短路电流矢量占比系数;  $z$  为上游 DG 输出正序短路电流矢量占比系数;  $w$  为下游 DG 输出正序短路电流矢量占比系数。

结合式(5)一式(8)可知, 不同故障位置下短路电

流矢量占比系数不同。当故障点位于母线至上游 DG 并网点之间时有

$$y = 0; z = 1; w = -1 \quad (9)$$

故障点位于 DG 之间时有

$$y \neq 0; z = 0; w = 1 \quad (10)$$

故障点位于下游 DG 并网点至馈线末端时有

$$y \neq 0; z \neq 0; w \neq 1 \quad (11)$$

当母线至上游 DG 并网点之间发生单相接地故障时, 系数  $y$  等于 0,  $z$  等于 1,  $w$  等于 -1。而当系数  $y$  等于 0,  $z$  等于 1,  $w$  不等于 0 时, 故障位置参数正好为故障点至母线的距离与母线至上游 DG 并网点的距离之比。当 DG 并网点之间馈线发生单相接地故障时, 系数  $y$  不等于 0,  $z$  等于 0,  $w$  等于 1, 故障位置参数为故障点至上游 DG 并网点的距离与 DG 之间的距离之比。当下游 DG 至馈线末端发生单相接地故障时, 系数  $y$  不等于 0, 系数  $z$  不等于 0, 系数  $w$  不等于 1, 故障位置参数等于故障点至下游 DG 并网点的距离与下游 DG 并网点至馈线末端的距离之比。当 DG 并网点发生单相接地故障时, 系数  $y$  不等于 0, 系数  $z$  不等于 0, 系数  $w$  等于 1。故障位置模型短路电流占比系数的差异可反映不同的故障位置。

### 2.2 故障定位原理

不同时刻的电流矢量不同, 因此在故障后采集不同时刻的馈线出口正序电流和各 DG 输出正序电流, 可构建满足单相接地故障位置模型的方程组。短路电流矢量占比系数与故障位置参数为未知量。其中, 实数解以及满足  $0 < \xi \leq 1$  的解为可行解。电流矢量集合构建的故障位置模型方程组与电网结构一一对应。不同故障位置下馈线出口正序电流不同, 而 DG 输出正序电流决定于并网点电压, 不同故障位置下的 DG 并网点电压也不相同, 因此不同故障位置下的电流矢量集合具有唯一性, 故障位置模型方程组的可行解唯一。利用故障位置模型方程组计算短路电流矢量占比系数, 即能够根据短路电流矢量占比系数的差异定位故障位置。故障定位问题可转化为故障位置模型系数的求解问题。因此, 本文提出一种基于模型识别的有源配电网单相接地故障区段定位方法。利用系数  $y$ 、 $z$  与 0 之间的绝对误差以及  $w$  与 1 之间的绝对误差判断故障区段, 判据如式(12)一式(14)所示。

$$|y| \leq K'_{rel} \quad (12)$$

$$|z| \leq K''_{rel} \quad (13)$$

$$|w - 1| \leq K'''_{rel} \quad (14)$$

式中,  $K'_{rel}$ 、 $K''_{rel}$ 、 $K'''_{rel}$  均为可靠系数。

基于模型识别的有源配电网单相接地故障定位流程如图 3 所示。若馈线接有  $n$  个 DG,  $n$  个 DG 将整

条馈线分为  $n+1$  个区段, 分别记为区段 0、1、2、 $\dots$ 、 $n$ 。区段 0 为母线至第 1 个 DG 并网点之间的区段; 区段  $n$  为第  $n$  个 DG 并网点至馈线末端的区段。将馈线前  $a$  个 DG 等效为上游 DG, 将剩余  $n-a$  个 DG 等效为下游 DG, 其中  $a$  小于  $n$ , 单相接地故障位置模型为

$$\xi_a = x_a \cdot \frac{1}{i_L + \sum_{i=1}^n i_{DGi}} + y_a \cdot \frac{i_L}{i_L + \sum_{i=1}^n i_{DGi}} + z'_a \cdot \frac{\sum_{i=1}^a i_{DGi}}{i_L + \sum_{i=1}^n i_{DGi}} + w'_a \cdot \frac{\sum_{i=a+1}^n i_{DGi}}{i_L + \sum_{i=1}^n i_{DGi}} \quad (15)$$

式中:  $\xi_a$  为故障位置参数;  $i_L$  为馈线出口正序短路

电流矢量;  $i_{DGi}$  为第  $i$  个 DG 输出正序短路电流矢量;  $x_a$  为正序短路电流矢量系数;  $y_a$  为馈线出口正序短路电流矢量占比系数;  $z'_a$  为上游等效 DG 输出正序短路电流矢量占比系数;  $w'_a$  为下游等效 DG 输出正序短路电流矢量占比系数; 下标  $a$  表示上游等效 DG 由馈线前  $a$  个 DG 构成、下游等效 DG 由馈线剩余  $n-a$  个 DG 构成。组合式(12)一式(14)中的判据即可得到适用于含  $n$  个 DG 接入馈线的故障定位判据, 如式(16)一式(19)所示。

$$|y_a| \leq K'_{rel} \cap |z'_a| > K''_{rel} \quad (16)$$

$$|y_a| > K'_{rel} \cap |z'_a| \leq K''_{rel} \cap |w'_a - 1| \leq K'''_{rel} \quad (17)$$

$$|y_a| > K'_{rel} \cap |z'_a| > K''_{rel} \cap |w'_a - 1| > K'''_{rel} \quad (18)$$

$$|y_a| > K'_{rel} \cap |z'_a| > K''_{rel} \cap |w'_a - 1| \leq K'''_{rel} \quad (19)$$

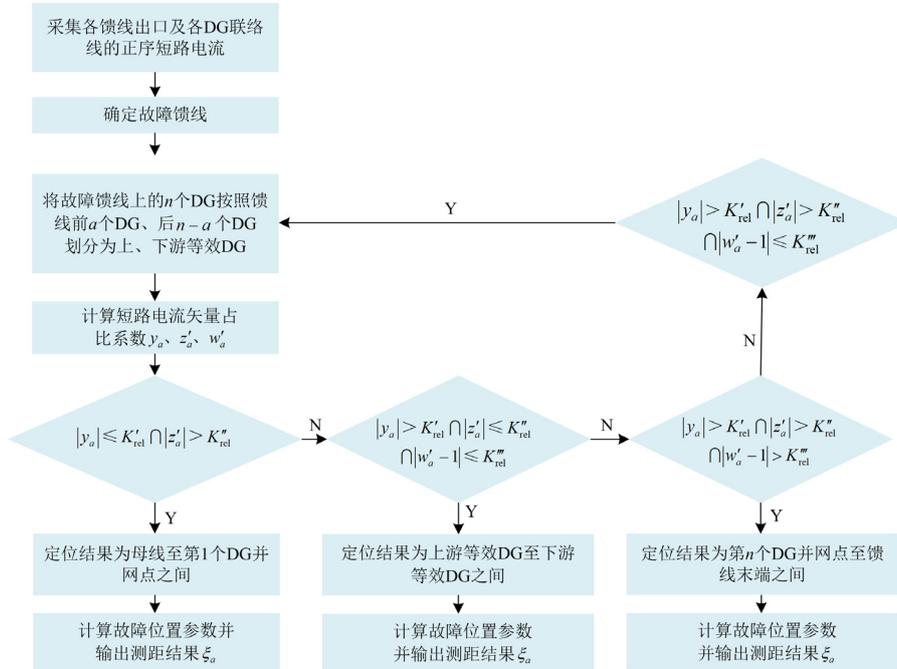


图 3 基于模型识别的单相接地故障定位流程

Fig. 3 Fault location process based on model recognition

当配电网发生故障并完成故障选线后, 启动故障定位, 采集故障馈线出口的正序电流以及故障馈线所接入各 DG 输出的正序电流。首先, 取  $a=1$ , 将故障馈线出口及其接入 DG 输出的正序电流矢量代入式(15)计算得到馈线出口、上游等效 DG 和下游等效 DG 输出正序短路电流矢量占比系数  $y_1$ 、 $z'_1$ 、 $w'_1$  以及故障位置参数  $\xi_1$ 。若系数  $y_1$ 、 $z'_1$  满足式(16), 则可判定故障点位于母线至第 1 个 DG 并网点之间的区段, 即区段 0。若系数  $y_1$ 、 $z'_1$ 、 $w'_1$  满足式(17), 则可判定故障点位于第 1 个 DG 并网点

与下游等效 DG 之间区段, 即第 1 个 DG 并网点与第 2 个 DG 并网点之间区段, 也即区段 1。若系数  $y_1$ 、 $z'_1$ 、 $w'_1$  满足式(18), 则可判定故障点位于第  $n$  个 DG 并网点与馈线末端之间的区段, 即区段  $n$ 。若系数  $y_1$ 、 $z'_1$ 、 $w'_1$  满足式(19), 表明故障点位于下游等效 DG 内部。此时, 进一步取  $a=2$ , 重新划分上游等效 DG 和下游等效 DG, 并重新计算馈线

与下游等效 DG 之间区段, 即第 1 个 DG 并网点与第 2 个 DG 并网点之间区段, 也即区段 1。若系数  $y_1$ 、 $z'_1$ 、 $w'_1$  满足式(18), 则可判定故障点位于第  $n$  个 DG 并网点与馈线末端之间的区段, 即区段  $n$ 。若系数  $y_1$ 、 $z'_1$ 、 $w'_1$  满足式(19), 表明故障点位于下游等效 DG 内部。此时, 进一步取  $a=2$ , 重新划分上游等效 DG 和下游等效 DG, 并重新计算馈线

出口、上游等效 DG 和下游等效 DG 输出正序短路电流矢量占比系数  $y_2$ 、 $z'_2$ 、 $w'_2$  以及故障位置参数  $\xi_2$ 。若系数  $y_2$ 、 $z'_2$ 、 $w'_2$  满足式(17)，则可判定故障点位于第 2 个 DG 并网点与第 3 个 DG 并网点之间，即区段 2， $\xi_2$  为故障点距第 2 个 DG 并网点的距离与第 2 个 DG 并网点距第 3 个 DG 并网点的距离之比。

若系数  $y_2$ 、 $z'_2$ 、 $w'_2$  满足式(19)，则按  $a = a + 1$  重新等效上、下游 DG，并计算系数  $y_a$ 、 $z'_a$ 、 $w'_a$  以及故障位置参数  $\xi_a$ 。若系数  $y_a$ 、 $z'_a$ 、 $w'_a$  满足式(17)，则可判定故障点位于第  $a$  个 DG 并网点与第  $a + 1$  个 DG 并网点之间，即区段  $a$ ， $\xi_a$  为故障点距第  $a$  个 DG 并网点的距离与第  $a$  个 DG 并网点距第  $a + 1$  个 DG 并网点的距离之比。当  $a = n - 1$  时，若系数  $y_a$ 、 $z'_a$ 、 $w'_a$  满足式(17)，则可判定故障点位于第  $n - 1$  个 DG 并网点与第  $n$  个 DG 并网点之间，即区段  $n - 1$ 。此时，若系数  $y_a$ 、 $z'_a$ 、 $w'_a$  满足式(18)，则可判定故障点位于第  $n$  个 DG 并网点与馈线末端之间，即区段  $n$ ， $\xi_{n-1}$  为故障点至第  $n$  个 DG 并网点的距离与第  $n$  个 DG 并网点至馈线末端的距离之比。

### 3 算例分析

搭建如图 4 所示的 10 kV 典型辐射状配电网模

型验证所提保护方法的正确性。配电网共有 5 条馈线，馈线单位长度正序电阻  $r_1$  为  $0.031 \Omega/\text{km}$ ，馈线单位长度正序电感  $L_1$  为  $0.096 \text{ mH}/\text{km}$ ，馈线单位长度正序对地电容  $C_1$  为  $0.338 \mu\text{F}/\text{km}$ ，馈线单位长度零序电阻  $r_0$  为  $0.234 \Omega/\text{km}$ ，馈线单位长度零序电感  $L_0$  为  $0.355 \text{ mH}/\text{km}$ ，馈线单位长度零序对地电容  $C_0$  为  $0.265 \mu\text{F}/\text{km}$ 。中性点经  $10 \Omega$  小电阻  $R_0$  接地。DG 参数及馈线负荷见表 1。式(16)一式(19)中， $K'_{\text{rel}}$ 、 $K''_{\text{rel}}$ 、 $K'''_{\text{rel}}$  均整定为 0.05。

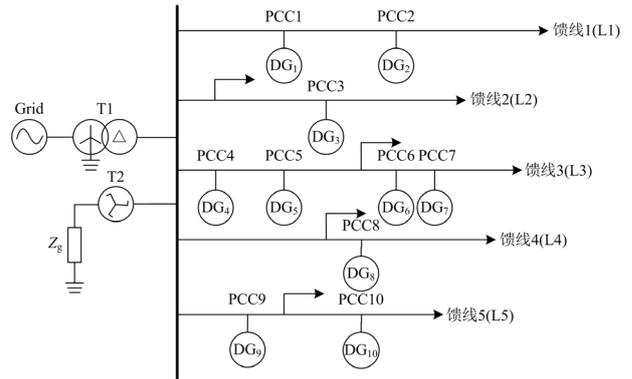


图 4 10 kV 配电网仿真示意图

Fig. 4 Simulation diagram of 10 kV distribution network

表 1 分布式电源及负荷参数

Table 1 Distributed power and load supply parameters

馈线编号	馈线长度/km	分布式电源			负荷	
		有功功率参考值/MW	无功功率参考值/var	位置/km	功率/MW	位置/km
1	10	1,1	0,0	3,6	6	10
2	7	2	0	4	5,8	2,7
3	9	1,1,2,2	0,0,0,0	1,3,6,7	3,9	5,9
4	8	2	0	5	3,4	4,8
5	6	1.5,1	0,0	2,5	3,7	3,6

#### 3.1 不同故障位置

设置故障过渡电阻大小为  $10 \Omega$ ，馈线 1 不同位置发生单相接地故障。采集馈线 1 出口及  $DG_1$  和  $DG_2$  输出正序短路电流，计算故障发生于馈线 1 不同位置下的系数  $|y_1|$ 、 $|z'_1|$  和  $|w'_1 - 1|$ ，如图 5 所示。当馈线 1 距母线 1 km、2 km、3 km 处发生故障时， $|y_1|$  分别为 0.021、0.032、0.039， $|z'_1|$  分别为 0.985、0.977、0.972， $|w'_1 - 1|$  分别为 0.988、0.992、0.981，计算结果均满足判据  $|y_1| \leq 0.05$  和  $|z'_1| > 0.05$ ，因此可判定故障点位于  $DG_1$  并网点至母线之间，定位结果与实际相符。由式(15)可计算故障点至母线的距离与母线至  $DG_1$  并网点的距离之比分别为 0.336、

0.658、0.991，计算距离与实际故障位置的绝对误差仅分别为 0.003、0.008、0.009。

当故障发生于馈线 1 的 4、5、6 km 处时，计算可得系数  $|y_1|$  分别为 0.987、0.976、0.969，系数  $|z'_1|$  分别为 0.041、0.033、0.028，系数  $|w'_1 - 1|$  分别为 0.035、0.031、0.026，判据  $|y_1| \leq 0.05$  不成立但判据  $|z'_1| \leq 0.05$  和判据  $|w'_1 - 1| \leq 0.05$  成立，因此可定位故障点位于  $DG_1$  并网点至  $DG_2$  并网点的区段，定位结果与实际相符。由式(15)计算可得故障点至  $DG_1$  并网点的距离与  $DG_1$  之间的距离之比分别为 0.335、0.676、0.993，计算位置的绝对误差仅分别为 0.002、0.009、0.007。如图 5 所示，当故障分别

发生于馈线 1 的 7、8、9、10 km 处时, 判据  $|y_1| \leq 0.05$ 、判据  $|z_1'| \leq 0.05$  以及判据  $|w_1' - 1| \leq 0.05$  均不成立, 因此可定位故障点位于 DG<sub>2</sub> 并网点至馈线 1 末端, 与实际相符。计算可得故障点至 DG<sub>2</sub> 并网点的距离与 DG<sub>2</sub> 并网点至馈线末端的距离之比分别为 0.249、0.490、0.757、0.997, 计算绝对误差分别为 0.001、0.010、0.007、0.003。不同故障位置上, 本文所提出的方法均能可靠实现故障定位。

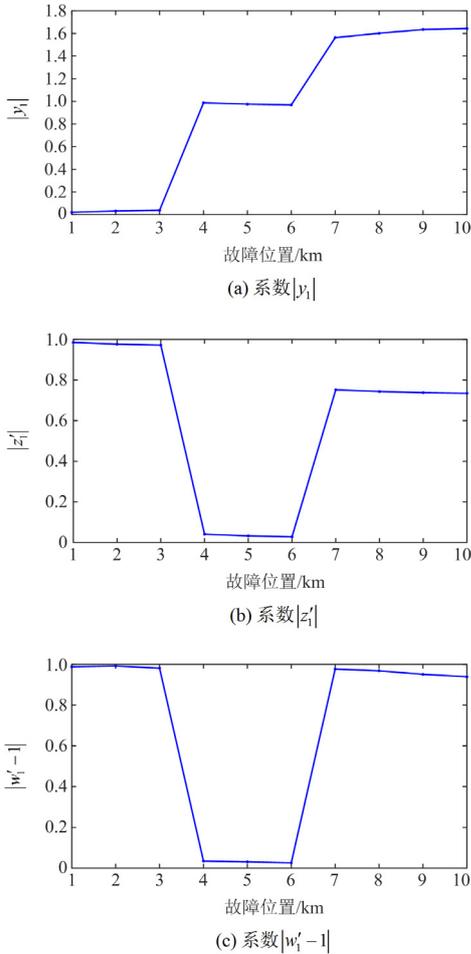


图 5 不同故障位置下的模型系数

Fig. 5 Model coefficients under different fault locations

### 3.2 不同过渡电阻

馈线 1 的 4 km 处发生单相接地故障。改变过渡电阻大小, 分别计算馈线 1 系数  $|y_1|$ 、 $|z_1'|$  和  $|w_1' - 1|$ , 如图 6 所示。当过渡电阻为 0 Ω 时,  $|y_1| = 0.991$ 、 $|z_1'| = 0.039$ 、 $|w_1' - 1| = 0.033$ , 此时判据  $|y_1| \leq 0.05$  不成立, 判据  $|z_1'| \leq 0.05$  和  $|w_1' - 1| \leq 0.05$  均成立, 可判定故障点位于 DG<sub>1</sub> 和 DG<sub>2</sub> 并网点之间, 定位结果与实际相符。随着过渡电阻的增加,  $|y_1|$  呈减小趋势而  $|z_1'|$ 、 $|w_1' - 1|$  呈增大趋

势, 但判据  $|y_1| \leq 0.05$  始终不成立, 判据  $|z_1'| \leq 0.05$  和  $|w_1' - 1| \leq 0.05$  均始终成立, 所提出的方法均能够准确定位故障位置。不同过渡电阻下, 由式(15)计算可得故障点至 DG<sub>1</sub> 并网点的距离与 DG 之间的距离之比分别为 0.333、0.335、0.334、0.335、0.335、0.336、0.335、0.335, 故障位置计算绝对误差均在 0.003 以下。仿真表明, 所提出的方法具有较好的耐过渡电阻能力。

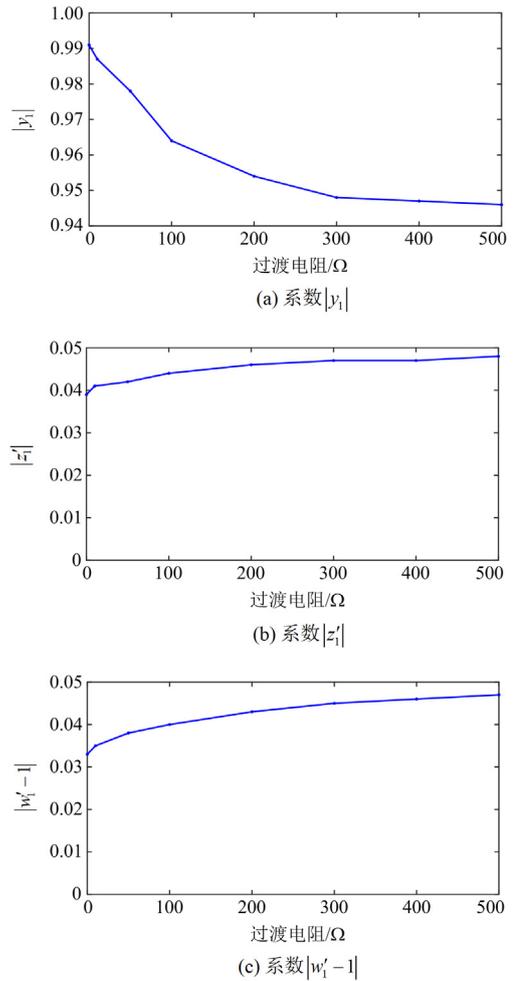


图 6 不同故障过渡电阻下的模型系数

Fig. 6 Model coefficients under different transition resistances

### 3.3 不同负荷功率

馈线 1 的 4 km 处发生单相接地故障。改变馈线 1 负荷功率, 采集馈线出口及 DG 输出的正序电流数据, 计算可得系数  $|y_1|$ 、 $|z_1'|$  以及  $|w_1' - 1|$  如图 7 所示。当馈线 1 负荷功率为 2 MW 时,  $|y_1|$ 、 $|z_1'|$ 、 $|w_1' - 1|$  分别为 0.992、0.038 和 0.031, 此时判据  $|y_1| \leq 0.05$  不成立, 判据  $|z_1'| \leq 0.05$  和  $|w_1' - 1| \leq 0.05$  均成立, 可判定故障点位于 DG<sub>1</sub> 并网点至 DG<sub>2</sub> 并网

点之间,故障区段定位准确。由图 7 可见,随着负荷功率的增加,  $|y_1|$  减小而  $|z'_1|$ 、 $|w'_1-1|$  增大。7 种负荷情况下,判据  $|y_1| \leq 0.05$  均不成立,判据  $|z'_1| \leq 0.05$  和  $|w'_1-1| \leq 0.05$  均成立,因此均可正确定位故障区段。在馈线 1 负荷不同的情况下,计算可得故障点至 DG<sub>1</sub> 并网点的距离与 DG 之间的距离之比分别为 0.331、0.333、0.330、0.334、0.332、0.334、0.335,故障位置计算绝对误差均小于 0.004。仿真表明,所提出的方法适用于不同负荷大小的有源配电网。

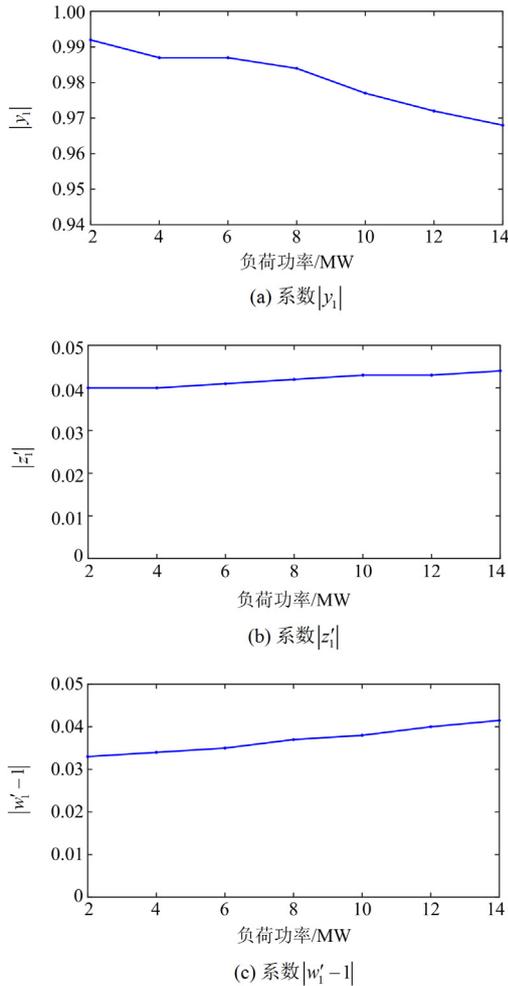


图 7 不同负荷功率下的模型系数

Fig. 7 Model coefficients under different loads power

### 3.4 不同 DG 数目

设置馈线 3 距母线 6.5 km 处发生单相接地故障,故障过渡电阻为 10 Ω。采集馈线出口及 DG<sub>4</sub>—DG<sub>7</sub> 输出的正序短路电流,按照图 3 所示的流程将 DG<sub>4</sub>—DG<sub>7</sub> 划分为上游、下游等效 DG,并根据式(15)计算出相应的模型系数  $|y_a|$ 、 $|z'_a|$  以及  $|w'_a-1|$ ,然后根据模型系数的判断对故障位置进行搜索,定位结果如表 2 所示。

表 2 多 DG 接入馈线下的模型系数及测距结果

Table 2 Model coefficients under multi-DG access

and location results				
$a$	$ y_a $	$ z'_a $	$ w'_a-1 $	$\xi_a$
1	0.623	1.171	0.036	0.921
2	0.898	0.963	0.038	0.653
3	0.966	0.038	0.040	0.492

由表 2 可知,首先划分 DG<sub>4</sub> 等效为上游 DG、DG<sub>5</sub>—DG<sub>7</sub> 等效为下游 DG,计算可得系数  $|y_1|$ 、 $|z'_1|$ 、 $|w'_1-1|$  分别为 0.623、1.171、0.036,判据  $|y_1| \leq 0.05$  和判据  $|z'_1| \leq 0.05$  不成立,而  $|w'_1-1| \leq 0.05$  成立,可判定故障点位于下游等效 DG 内部。进一步将 DG<sub>4</sub> 和 DG<sub>5</sub> 等效为上游 DG、DG<sub>6</sub> 和 DG<sub>7</sub> 等效为下游 DG,计算可得系数  $|y_2|$ 、 $|z'_2|$ 、 $|w'_2-1|$  分别为 0.898、0.963、0.038,  $|y_2| \leq 0.05$  和  $|z'_2| \leq 0.05$  不成立,判据  $|w'_2-1| \leq 0.05$  仍然成立,可判定故障点仍位于下游等效 DG 内部。进一步将 DG<sub>4</sub>—DG<sub>6</sub> 等效为上游 DG, DG<sub>7</sub> 等效为下游 DG,计算可得系数  $|y_3|$ 、 $|z'_3|$ 、 $|w'_3-1|$  分别为 0.966, 0.038, 0.040, 此时判据  $|y_3| \leq 0.05$  不成立,  $|z'_3| \leq 0.05$  和  $|w'_3-1| \leq 0.05$  均成立,判定故障位于等效 DG 并网节点之间,即区段 3 发生故障,定位结果与实际相符。此时,故障位置参数为 0.492,与实际故障位置的绝对误差仅为 0.008。

## 4 结语

针对有源配电网单相接地故障识别与定位困难的问题,提出了一种基于模型识别的单相接地故障定位方法。通过解析故障位置关于馈线出口处的正序短路电流矢量和 DG 输出的正序短路电流矢量函数关系,建立了有源配电网单相接地故障位置模型,利用不同故障位置下短路电流矢量占比系数的差异性构建了新的故障定位判据。该方法将故障定位问题转化为模型求解问题,具有判据清晰、原理简单、适应性强等优点,能够在不同 DG 数量、不同故障位置、不同过渡电阻下可靠定位故障区段。尽管需要采集 DG 输出电流,但是随着配电自动化系统的推广应用以及 DG 监控系统的逐渐完善,该方法仍具有较好的实用性。

## 参考文献

[1] ZHANG Chaorui, LI Jiayong, ZHANG Yingjun, et al. Optimal location planning of renewable distributed generation units in distribution networks: an analytical approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2742-2753.

- [2] CHENG Liang, WANG Tao, WANG Yi. A novel fault location method for distribution networks with distributed generations based on the time matrix of traveling-waves[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 698-708.
- [3] 王婷, 陈晨, 谢海鹏. 配电网对分布式电源和电动汽车的承载力评估及提升方法综述[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 12-24.  
WANG Ting, CHEN Chen, XIE Haipeng. Review on evaluation and promotion methods of carrying capacity for distributed generation and electric vehicles in distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 12-24.
- [4] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 184-192.  
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Key issues of fault analysis on distribution system with high-density distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 184-192.
- [5] 王瑞梅, 丛伟, 王泽乾, 等. 基于工作电压相位比较的智能配电网故障判断方法[J]. 供用电, 2023, 40(6): 26-33.  
WANG Ruimei, CONG Wei, WANG Zeqian, et al. Fault judgment method of smart distribution network based on phase comparison of working voltage[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(6): 26-33.
- [6] 唐海国, 张帝, 刘成英, 等. 计及拓扑变换的主动配电网故障风险智能预警[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 193-201, 226.  
TANG Haiguo, ZHANG Di, LIU Chengying, et al. Intelligent forecast of fault risk in active distribution networks considering network reconfiguration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 193-201, 226.
- [7] LI Zhenxing, WAN Jialin, WANG Pengfei, et al. A novel fault section locating method based on distance matching degree in distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 253-263.
- [8] 尹慧阳, 舒恋. 配电网单相接地故障定位综述[J]. 智慧电力, 2012, 40(10): 35-39, 47.  
YIN Huiyang, SHU Lian. A review of single-phase grounding fault location in distribution network[J]. Smart Power, 2012, 40(10): 35-39, 47.
- [9] 束洪春, 刘佳露, 田鑫萃. 基于故障行波沿线突变和模型匹配的辐射状配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 158-163.  
SHU Hongchun, LIU Jialu, TIAN Xincui. Fault location of radial distribution network based on sudden changes of fault traveling wave along line and model matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 158-163.
- [10] JMALI 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.
- [11] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 7-13.  
TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Survey of fault location technology for distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 7-13.
- [12] 齐郑, 黄朝晖, 陈艳波. 基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 54-62.  
QI Zheng, HUANG Chaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [13] 贾清泉, 郑旭然, 刘楚, 等. 基于故障方向测度的配电网故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5933-5941.  
JIA Qingquan, ZHENG Xuran, LIU Chu, et al. A method of fault section location in distribution networks based on fault direction measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5933-5941.
- [14] BUZO R F, BARRADAS H M, LEO F B. A new method for fault location in distribution networks based on voltage sag measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, PP(99): 1-1.
- [15] 陈燕擎, 刘涛, 韩文建, 等. 考虑配电网分布式零序电流关系的单相接地故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 118-126.  
CHEN Yanqing, LIU Tao, HAN Wenjian, et al. Single-phase-to-earth fault location in distribution networks considering the distributed relations of the zero-sequence currents[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 118-126.
- [16] 高生凯, 曹炜, 张旭航, 等. 一种改进型配电网自适应过流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 110-119.  
GAO Shengkai, CAO Wei, ZHANG Xuhang, et al. A novel adaptive overcurrent protection method for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 110-119.
- [17] 周放歌, 肖仕武. 基于零序电流分布的有源配电网接地故障定位[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1820-1832.  
ZHOU Fangge, XIAO Shiwu. Grounding fault location of active distribution network based on zero sequence

- current distribution[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1820-1832.
- [18] 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.  
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, TONG Xiangqian, et al. Fault location for distribution systems with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 36-42, 48.
- [19] 晁晨栩, 郑晓冬, 高飘, 等. 含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6968-6978.  
CHAO Chenxu, ZHENG Xiaodong, GAO Piao, et al. High frequency impedance differential protection with high proportion of photovoltaic power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6968-6978.
- [20] 黄飞, 陈纪宇, 戴健, 等. 基于特征暂态零模电流偏态系数的有源配电网单相故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 12-21.  
HUANG Fei, CHEN Jiyu, DAI Jian, et al. Single-phase fault location method for an active distribution network based on the skewness coefficient of characteristic transient zero-mode current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 12-21.
- [21] 李卫彬, 童欣, 黄超, 等. 基于分层定位模型的含 DG 配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 160-166.  
LI Weibin, TONG Xin, HUANG Chao, et al. A fault location method for a distribution network with DG based on a hierarchical location model[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 160-166.
- [22] 吴争荣, 王钢, 李海锋, 等. 计及逆变型分布式电源控制特性的配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 92-96, 108.  
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault characteristics analysis of distribution networks considering control scheme of inverter interfaced distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 92-96, 108.
- [23] 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.  
ONG Xiangping, ZHANG Zhe, YING 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.
- [24] 陈琪蕾, 范析蓉, 张沛超, 等. 逆变型分布式电源的灵活正负序电流控制方法与等值序网模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 57-62.  
CHEN Qilei, FAN Xinrong, ZHANG Peichao, et al. Flexible positive and negative sequence current control strategy and equivalent sequence network model of inverter interfaced distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 57-62.
- [25] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.  
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [26] 杨杉, 同向前, 刘健, 等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1977-1982.  
YANG Shan, TONG Xiangqian, LIU Jian, et al. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1977-1982.
- [27] 汤蕴璆. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [28] 欧阳金鑫, 熊小伏. 双馈风力发电系统电磁暂态分析[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [29] 方万良, 李建华, 王建学. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

收稿日期: 2023-07-04; 修回日期: 2023-10-24

#### 作者简介:

许守东(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制、分布式能源与微电网; E-mail: 741698897@qq.com

欧阳金鑫(1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: jinxinoy@163.com

陈宇捷(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制、信息物理系统. E-mail: 1009178764@qq.com

(编辑 周金梅)