

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.226433

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

黄飞¹, 陈纪宇², 戴健¹, 欧阳金鑫², 刘佳¹, 范昭勇³

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 2. 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; 3. 国网重庆市电力公司, 重庆 400015)

摘要: 含分布式电源的配电网是新型电力系统的重要组成部分, 但分布式电源接入导致配电网的故障形态变得复杂, 特别是使得中性点经消弧线圈接地的配电网单相故障特征进一步被弱化, 配电网单相故障定位变得愈加困难。现有方法存在灵敏度不足或特征量提取与处理困难的问题, 通过解析有源配电网单相故障暂态过程中零模电流的分布特点, 发现故障点上游和非故障区段的暂态零模电流始终呈振荡衰减且极性相反的特征。进而引入偏态系数刻画暂态零模电流的振荡衰减特征, 构造了基于特征暂态零模电流偏态系数的单相故障定位判据, 并提出了有源配电网单相故障区段的灵敏定位方法。理论分析和仿真结果表明, 该方法在显著降低故障特征量提取及处理难度的基础上, 仍能可靠实现有源配电网单相故障区段定位, 具有整定计算简单和抗通信干扰能力强等优点, 为新一代配电网单相故障快速定位提供理论依据。

关键词: 分布式电源; 有源配电网; 暂态零模电流; 偏态系数; 单相故障定位

Single-phase fault location method for an active distribution network based on the skewness coefficient of characteristic transient zero-mode current

HUANG Fei¹, CHEN Jiyu², DAI Jian¹, OUYANG Jinxin², LIU Jia¹, FAN Zhaoyong³

(1. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China;
3. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China)

Abstract: A distribution network with distributed generation is an important component of the new power system. However, the access of distributed generation leads to complex fault patterns. In particular, the single-phase fault characteristics are further weakened under the neutral via arc suppression coil grounded system, resulting in the serious difficulty of single-phase fault location. To address the problems of insufficient sensitivity or difficulty in extracting and processing the characteristics posed by existing methods, the zero-mode current and its distribution characteristics in the transient process of a single-phase fault in the active distribution network are analyzed. It is found that the transient zero-mode currents are always oscillating and decaying with opposite polarity upstream of the fault and in the non-faulted section. Then, the skewness coefficient is introduced to characterize the oscillating and decay of the transient zero-mode current. A single-phase fault location criterion based on the skewness coefficient of the characteristic transient zero-mode current is constructed, and a sensitive location method of the single-phase fault section in the active distribution network is proposed. The theoretical analysis and simulation results show that the method is able to locate single-phase faults in active distribution networks on the basis of significantly reducing the difficulty of fault feature extraction and processing. It has the advantages of simple setting calculation and strong anti-communication interference ability, providing a theoretical basis for the rapid and safe disposal of single-phase faults in the new generation of distribution networks.

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

Key words: distributed generation; active distribution network; transient zero-mode current; skewness coefficient; single-phase fault location

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877018); 国网重庆市电力公司科技项目资助(SGQDK00DWJS2100189)

0 引言

随着清洁能源发电效率的提高和配套设备成本的不断下降, 包括风能、光能等在内的分布式电源(distributed generation, DG)凭借其供电灵活、低碳绿色的特点, 已成为新一代配电网的核心组成^[1-3]。分布式电源带来红利的同时也对配电网故障定位提出了新的挑战。随着分布式电源渗透率的不断提高, 配电网拓扑日趋多源化, 受外力和绝缘老化等因素影响, 事故频发, 其中又以单相故障最为突出。DG出力具有波动性、随机性, 在分布式电源影响下配电网单相故障的等效电路和参数变得十分复杂^[4-7], 使得有源配电网单相故障特征进一步被弱化。特别是在中性点经消弧线圈接地方式下, 单相故障定位存在灵敏度不足的问题^[8-11], 电气设备和人身安全问题日益凸显。

国内外学者针对常规配电网单相故障定位展开了大量研究, 定位方法及应对措施已较为成熟。文献[12]提出了基于零序电流有功分量的定位方法, 但基于稳态量的故障定位准确性易受接地方式、故障形式以及系统运行方式的影响, 常常面临灵敏度不足的问题。随着配电监控技术的发展, 基于暂态量的故障定位方法^[13-14]研究得到突破, 文献[13]提出了利用离散均方根距离度量暂态零序电流相似性, 进而实现故障定位的方法, 但未考虑通信同步及噪声对信号传输的影响。文献[14]从频域角度提出了基于零模电流暂态分量频率差异的故障定位方法, 从原理上克服了消弧线圈的影响, 但对数字处理芯片的运算性能提出了较高要求。除利用自然故障响应特征外, 文献[15]提出通过控制接地晶闸管通断, 注入幅相和频率可控的扰动信号, 实现了多种故障场景下的定位, 具有较强耐过渡电阻能力, 但需要投入额外设备。近年来, 通过综合多种定位判据或借助故障数据训练, 以提高定位准确性的思路受到关注, 文献[16-18]通过模拟学习行为或自然过程, 从而实现故障选线或定位。但是, 基于智能算法的故障定位方法较为复杂, 物理解释性较差, 尚未得到推广应用。

由于受DG故障输出特性的影响, 现有单相故障定位方法大多适用于常规配电网, 在有源配电网中的灵敏度受限^[19-21]。研究人员针对有源配电网单相故障定位开展了研究。文献[22]利用初始行波到达时刻构造故障矩阵从而确定故障位置, 文献[23]提出基于暂态零序电流峭度和初始凹凸性的数学形态学故障定位判据, 但两种方法的有效性 with 定位精度受故障暂态信息窗口获取准确性的直接影响。文

献[24]通过逻辑运算各开关和区段的状态信息序列构造目标函数, 进而提出基于果蝇优化算法的故障定位方法, 该方法仅需逻辑信号通信, 提高了抗干扰能力, 但数据处理量较大。有源配电网的单相故障定位还存在一定的技术空白。

本文以经消弧线圈接地的有源配电网为对象, 提出了基于特征暂态零模电流偏态系数的单相故障定位方法。通过解析不同故障位置下的暂态零模电流, 发现了故障点上游和非故障区段的暂态零模电流始终呈振荡衰减且极性相反的特征; 设置合理特征频段滤波器提取特征暂态零模电流, 并引入偏态系数刻画其振荡衰减特征, 构造了基于特征暂态零模电流偏态系数的故障定位判据, 提出了有源配电网单相故障区段定位方法; 最后, 通过仿真验证了定位方法的准确性。仿真结果表明, 该方法在显著降低故障特征量提取及处理难度的基础上, 仍能可靠地实现故障定位, 具有整定计算简单和抗通信干扰能力强等优点。

1 有源配电网单相故障暂态解析

DG 并网变压器高压侧通常采用 Δ 接线或Y接线^[25-26]。不同故障位置的有源配电网单相故障如图1(a)所示。图中: T_1 为主变压器; T_2 为接地变压器; L_p 为消弧线圈; T_{DG} 为DG 并网变压器。根据故障点与DG公共并网点(point of common coupling, PCC)的位置关系, 有源配电网的单相故障分为3类: 1) 故障点 f_1 位于PCC点上游; 2) 故障点 f_2 位于PCC点下游; 3) 故障点 f_3 位于非DG接入馈线。

DG 并网变压器高压侧不接地, 因此可建立3类故障下的附加模网络, 如图1(b)所示。图中: $i=1,2,3$ 分别表示故障点 f_1 、 f_2 和 f_3 点的附加模网络; U_{fi} 为故障点附加电源; $3R_{fi}$ 为故障点等效过渡电阻; i_{fi} 为故障电流; $Z_{11,m}^1, Z_{11,m}^0$ ($m=1,2,3,4$)分别为馈线1第 m 部分的线模阻抗、零模阻抗; $Z_{12,n}^1, Z_{12,n}^0$ ($n=1,2$)分别为馈线2第 n 部分的线模阻抗、零模阻抗; $Z_{Load,1}^1, Z_{Load,2}^1$ 分别为馈线1、2的负荷线模阻抗; $C_{1,1}^0, C_{1,2}^0$ 分别为馈线1、2的等效零模分布电容; Z_T^1 为主变压器的线模阻抗; Z_{DG}^1 为DG及其并网变压器的等效线模阻抗; $3L_p$ 为消弧线圈等效电感。

由于DG支路的并联分流作用, 单相故障附加模网络的等效线模阻抗相较于常规配电网有所减小, 但线模网络中线路阻抗仍远小于对地电容容抗。将1模和2模网络等效为电阻串联电感的形式^[27-28], 可得有源配电网单相故障暂态等效电路如图1(c)所

示。图中， R_1 和 L_1 分别为考虑 DG 等值参数后的线模网络电阻、电感； R_0 和 L_0 分别为零模网络电阻、电感，与 DG 接入前一致； C_Σ 为等效零模分布电容。

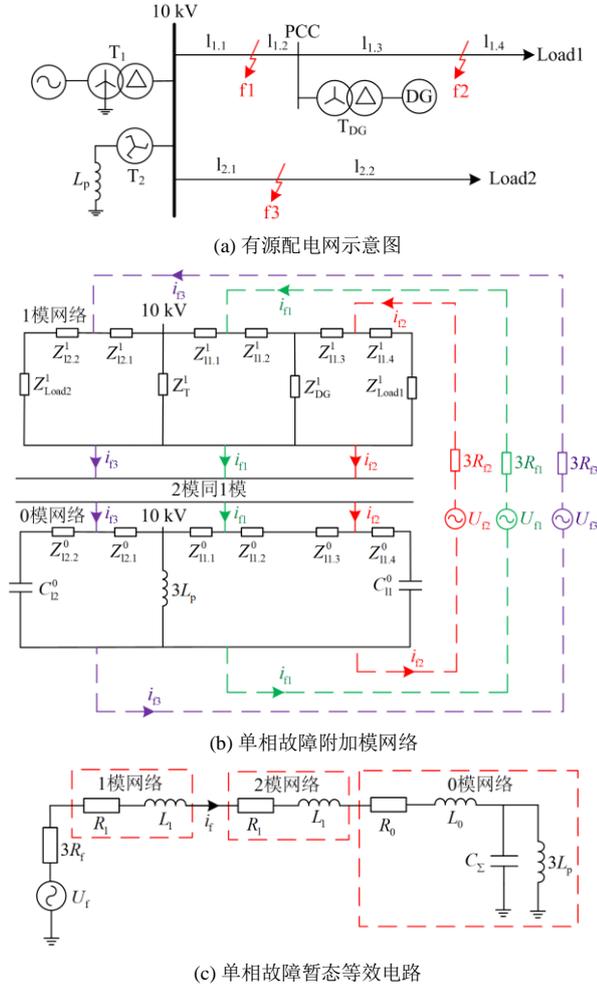


图 1 有源配电网单相故障

Fig. 1 Single phase fault of active distribution network

当有源配电网发生单相故障时，零模分布电容充电速度快，暂态故障电流频率较高，可以忽略消弧线圈的影响^[29]。根据图 1(c)，可建立关于暂态零模电流的二阶微分方程。

$$(3R_f + 2R_1 + R_0)i_f + (2L_1 + L_0)\frac{di_f}{dt} + \frac{1}{C_\Sigma} \int i_f dt = U_f \quad (1)$$

令 $R = R_f + 2R_1 + R_0$ 、 $L = 2L_1 + L_0$ ，即 R 通常小于 $2\sqrt{L/C_\Sigma}$ ，式(1)对应的特征方程有一对共轭复根，可解得暂态零模电流为

$$i_f = U_m \omega C_\Sigma \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t} + U_m \omega C_\Sigma \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中： U_m 为故障相电压； φ 为故障初始角； ω 为工

频角频率； $\omega_f = \sqrt{1/(LC_\Sigma) - \delta^2}$ 为振荡衰减分量角频率； $\delta = R/2L$ 为衰减因子。

暂态零模电流包括振荡衰减分量和工频稳态分量。当有源配电网发生单相故障时，振荡衰减分量频率为 300~3000 Hz^[27]，故振荡衰减分量幅值远大于工频稳态分量。暂态过程中零模电流主要以振荡衰减分量为主，具有高频振荡衰减的特点，其衰减速度与衰减因子大小呈正相关。

2 有源配电网暂态零模电流分布特征

与常规配电网单相故障电流仅有经配电网电源侧 1 条回路不同，有源配电网中暂态零模电流还通过 DG 送出线路形成回路。当单相故障发生在 DG 接入馈线时，暂态零模电流分布如图 2 所示。图中：实线箭头表示经配电网电源侧构成的容性电流回路，将该容性电流记作 $i_{C,grid}$ ，其由故障点经等效电源流向非故障相零模分布电容形成回路；虚线箭头表示经 DG 送出线路构成的容性电流回路，该容性电流记作 $i_{C,DG}$ ，其由故障点流入 DG 送出线路，从 DG 非故障相送出线路流出后，流入本回非故障相线路，或经非故障相母线流向非故障线路的零模分布电容形成回路；点划线箭头表示经消弧线圈的感性电流回路，将该感性电流记作 i_L ，电流流向与 DG 未接入前一致，由故障点指向母线。

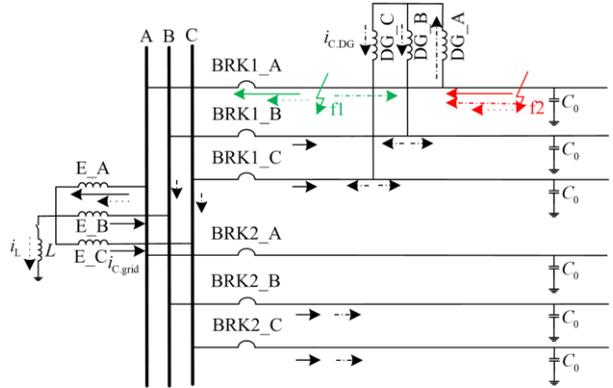


图 2 故障点位于 DG 接入馈线时的暂态零模电流

Fig. 2 Transient zero-mode of current when DG is connected to the fault feeder line

当单相故障发生于 PCC 点上游时，故障点电流的分布情况如图 2 中绿色箭头所示。相较于常规配电网，新增的容性电流分量 $i_{C,DG}$ 和原有容性电流分量 $i_{C,grid}$ 在故障点附近的流向相反，但经 DG 送出线路的容性电流 $i_{C,DG}$ 也可分为非故障线路对地电容电流和故障线路对地电容电流。因此，非故障线路和故障点下游的暂态零模电流仍为线路自身对地电

容电流, 即非故障区段暂态零模电流由母线流向线路。故障点上游的暂态零模电流仍等于非故障线路对地电容电流和消弧线圈感性电流相量和, 忽略消弧线圈对高频暂态零模电流的补偿作用, 故障点上游暂态零模电流(容性)由故障点流向母线。当单相故障发生于 PCC 点下游时, $i_{C,DG}$ 和 $i_{C,grid}$ 在故障点上游流向一致, 如红色箭头所示, 其余暂态零模电流分布特征与故障发生在 PCC 点上游时完全相同。即当故障点位于 PCC 点下游时, 故障点上游暂态零模电流极性与非故障区段依旧相反。

当单相故障发生在非 DG 接入馈线时, 部分故障电流通过 DG 形成回路, 暂态零模电流分布如图 3 所示。故障线路的暂态零模电流同样可分解为消弧线圈感性电流、经配电网等效电源的容性电流和经 DG 送出线路的容性电流。流过非故障区段的暂态零模电流仍为线路自身对地电容电流, 故障暂态阶段流过故障点上游任一截面的零模电流仍可近似等于非故障线路对地电容电流相量和。综上分析, DG 的接入改变了暂态零模电流分布, 但并未影响故障点上游、下游和非故障线路的暂态零模电流关系。

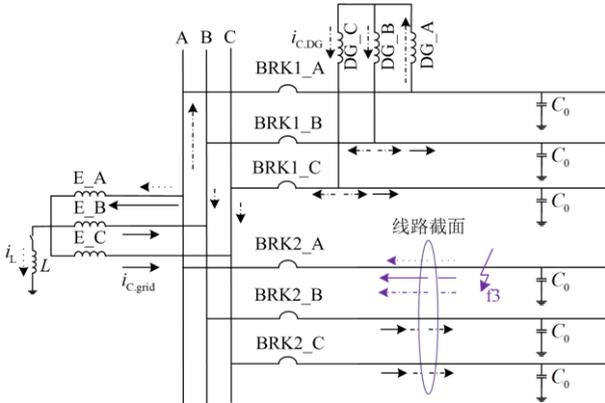


图 3 故障点位于非 DG 接入馈线时的暂态零模电流
Fig. 3 Transient zero-mode current at fault point
on non-DG access feeder line

3 有源配电网单相故障定位方法

3.1 故障定位特征量

当有源配电网发生单相故障时, 线路暂态零模电流呈振荡衰减特征, 后半波模极大值总是小于前半波模极大值, 此外故障点上游与非故障区段暂态零模电流极性相反。为此, 引入偏态系数用以刻画暂态零模电流振荡衰减且在故障点上游与非故障区段极性相反的特点, 暂态零模电流的偏态系数(skewness coefficient, SK)定义为

$$S_k = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (i_j - \bar{i})^3}{\left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (i_j - \bar{i})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

式中: i_j 为第 j 次采样时的暂态零模电流瞬时值; \bar{i} 为暂态零模电流采样平均值; n 为采样次数。

由于任意周期内暂态零模电流瞬时值的概率分布不对称, 随着采样时长增加, 暂态零模电流采样平均值逐步向模值较大一侧偏斜。以正半波为模值较大侧为例, 正半波第 x 次 ($x=1, 2, L, n/2$) 采样值 $i_{p,x}$ 与负半波第 y 次 ($y=1, 2, L, n/2$) 采样值 $i_{n,y}$ 满足式(4)。

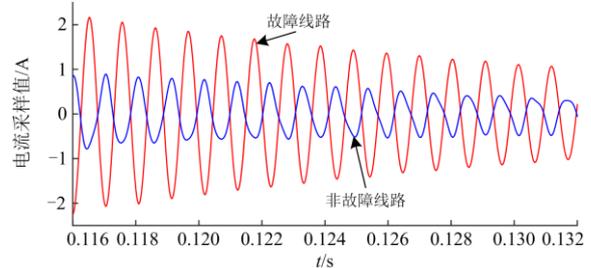
$$|i_{p,x} - \bar{i}| < |i_{n,y} - \bar{i}| \quad (4)$$

式(3)分子部分可进一步表示为正负半波采样偶的形式, 即

$$S_k = \frac{\frac{1}{n} \sum_{\substack{x=1 \\ y=1}}^{\substack{x=n/2 \\ y=n/2}} [(i_{p,x} - \bar{i})^3 + (i_{n,y} - \bar{i})^3]}{\left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (i_j - \bar{i})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

联立式(4)可知, 式(5)分母恒为正数, 分子的值偏向负数一侧, 故 $S_k < 0$ 。此外, 故障点上游与非故障区段暂态零模电流极性相反, 即暂态零模电流采样值向异侧偏斜, 一侧正偏分布, 一侧反偏分布; 而非故障区段暂态零模电流方向均由母线指向线路, 即非故障线路的偏态分布类型与故障点下游相同。暂态零模电流瞬时值的偏态分布特征包含着故障信息。

图 4 为有源配电网发生单相故障时故障线路与非故障线路的暂态零模电流特征。故障线路与非故障线路的暂态零模电流采样值均呈偏态分布, 二者拖尾方向相反。进一步分析可知, 故障点上游的暂态零模电流采样值频次分布高峰在右侧, 长尾位于众数左侧, 数据服从负偏分布, $S_k < 0$; 非故障区段的暂态零模电流采样值频次分布高峰在左侧, 长尾位于众数右侧, 数据服从正偏分布, $S_k > 0$ 。



(a) 暂态零模电流采样序列

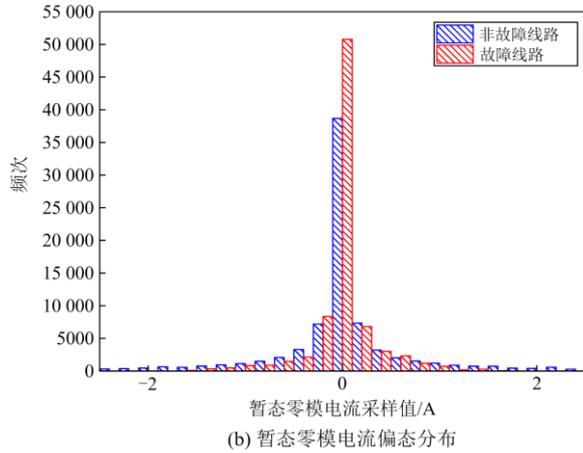


图 4 暂态零模电流特征

Fig. 4 Characteristics of transient zero-mode current

3.2 故障区段定位原理

基于暂态零模电流偏态系数的故障定位流程如图 5 所示。当变电站母线零序电压大于零序电压整定值时，启动故障定位算法。零序电压整定值按照躲过系统不对称的影响整定。借助馈线智能终端 (smart terminal unit, STU) 采集暂态零模电流瞬时值，并就地计算偏态系数，通过比较相邻 STU 间的暂态零模电流偏态系数来确定故障区段。

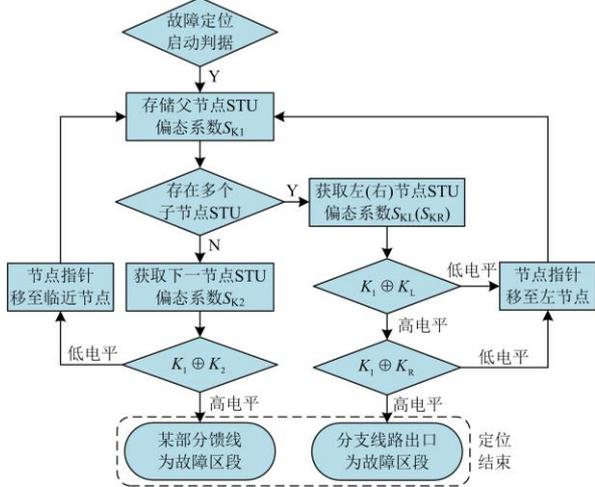


图 5 基于暂态零模电流偏态系数的故障定位流程
Fig. 5 Fault location process skewness coefficient of characteristic transient zero-mode current

规定由母线指向线路为正方向，区段内 STU 关系遵循正方向原则，即相对靠母线者为父 (节点)STU，其下游为子 (节点)STU。当馈线无分支时，父 STU 对应的左右子 STU 不同时存在，此时从首个 STU 开始搜索，至第一个偏态系数异号 STU 为止，相邻 2 个偏态系数异号的 STU 之间区段即为故

障区段。配电网单相故障定位原理如图 6 所示。首个父 STU 仅有 1 个子 STU，且 STU1 的偏态系数与 STU2 同号，故障不在区段①内，应继续向下搜索，如图 6(a)所示。以 STU2 为父 STU，获取下一级子 STU3 的偏态系数，若 f 点发生 A 相接地故障(A→G)，STU2 的偏态系数与 STU3 异号，可判定区段②为故障区段，并不再继续搜索。

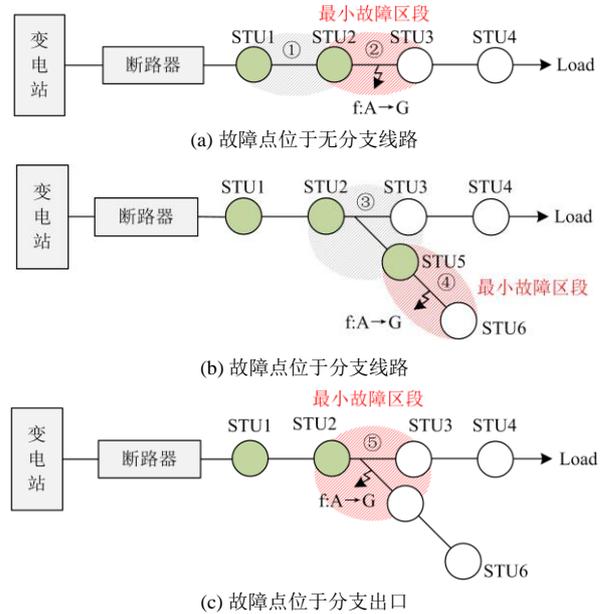


图 6 配电网单相故障定位原理

Fig. 6 Single-phase fault location principle of distribution network

若存在分支线路，父 STU 对应 2 个及以上子 STU，仅利用两端暂态零模电流偏态系数异号无法判断单相故障发生位置。当故障点位于分支线路或分支出口位置时，STU2 与 STU3 均异号。此时应联合判断父 STU 及其所有子 STU 的暂态零模电流偏态系数。若所有子 STU 均与父 STU 偏态系数异号，即可判断故障区段为分支出口位置。否则继续向与父 STU 偏态系数同号的子 STU 一侧搜索。图 6(b)中，父 STU2 含 STU3、STU5 两个子 STU，父 STU 与子 STU3 偏态系数异号，与子 STU5 同号，因此应继续在同号 STU 支路向下搜索。以 STU5 为父 STU，子 STU6 与其偏态系数异号，则可判定区段④为故障区段。图 6(c)中，子 STU3、STU5 均与父 STU2 偏态系数异号，由此可判定故障区段为分支出口位置即区段⑤。

4 有源配电网故障定位整定方法

4.1 故障定位判据

正常运行时，STU 仅采集稳态潮流数据。故障

定位算法启动后, 以暂态零模电流模极大值时刻为采样窗口开启时刻 t_0 , 利用特征频段滤波器采集时长 T 内的特征暂态零模电流, 并就地计算特征暂态零模电流偏态系数, 进而通过逻辑运算实时比较相邻STU的偏态特性, 其判据为

$$S = \prod_{m=1}^M K_{\text{par}} \oplus K_{\text{fil},m} \quad (6)$$

式中: M 为区段内子STU个数; K_{par} 为父STU偏态特性; $K_{\text{fil},m}$ 为第 m 号子STU偏态特性。当父或第 m 号子STU偏态系数大于0时, 对应的 K_{par} 或 $K_{\text{fil},m}$ 等于1, 否则 K_{par} 或 $K_{\text{fil},m}$ 等于0。

若运算 S 为“0”, 即表示父STU至少与一侧子STU的暂态零模电流偏态特性一致, 故障点不位于本次搜索区段; 若运算结果 S 为“1”, 即父STU与其子STU的暂态零模电流偏态特性均不一致, 本次搜索区段为故障区段。

4.2 特征频段滤波器整定

考虑分布参数的有源配电网单相故障零模网络如图7所示。另外, 考虑到零模电阻远小于零模电感, 可得线路等效零模阻抗, 如式(7)所示。

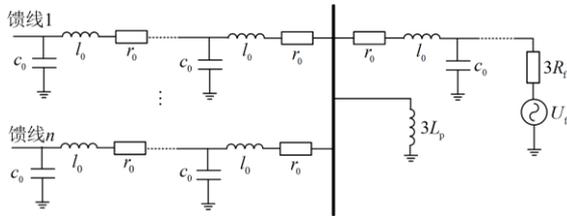


图7 考虑分布参数的有源配电网单相故障零模网络

Fig. 7 Single-phase fault zero-mode network considering distribution parameters

$$Z(f) = -j\sqrt{l_0/c_0} \cot(2\pi f L \sqrt{l_0 c_0}) \quad (7)$$

式中: r_0 、 l_0 、 c_0 为线路单位零模电阻、零模电感和对地电容; L 为线路长度; f 为零模电流频率。

实际暂态零模电流由主谐振分量和其他频率分量叠加而成, 由式(7)可知, 部分频段不遵循容性约束, 即故障线路与非故障线路不能同时等效为容性元件, 在时域上表现出故障线路和非故障线路的暂态零模电流极性关系不确定, 可能影响故障定位的准确性。为此, 本文利用带通滤波器提取满足容性约束的特征暂态零模电流。令 $Z(f)=0$, 由式(7)可求解得非故障线路首次串联谐振频率, 如式(8)所示。

$$f_s = \frac{1}{4L\sqrt{l_0 c_0}} \quad (8)$$

当暂态零模电流分量位于 $(0, f_s)$ 频段时, 非故障线路等效阻抗呈容性, 可以用集中参数电容表示。

由于线路长度与首次串联谐振频率呈负相关, 因此为保证所有非故障线路均可用集中参数电容表示, 特征频段滤波器的上限截止频率 $f_{\text{H.set}}$ 可整定为

$$f_{\text{H.set}} = K_{\text{H}} \min\{f_{s,1}, f_{s,2}, \dots, f_{s,k}, \dots, f_{s,n}\} \quad (9)$$

式中: K_{H} 为修正系数; $f_{s,k}$ 为线路 k 的首次串联谐振频率; $k=1, 2, \dots, n$, n 为配电网馈线数量。考虑逼近馈线首次串联谐振频率时, 线路等效零模电容数值趋于无穷大的影响^[30], 取 $K_{\text{H}}=0.8$ 。

由于消弧线圈提供的感性零模电流只流过故障线路, 因此在 $(0, f_{\text{H.set}})$ 频段内, 非故障线路等效零模阻抗可用集中参数电容表示, 故障线路等效零模阻抗可用表示为

$$Y(f) = j(2\pi f C_{\text{eq}} - \frac{1}{6\pi f L_p}) \quad (10)$$

式中, C_{eq} 为非故障线路的等效零模电容。令 $Y(f)=0$, 可得故障线路首次串联谐振频率为

$$f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{3L_p C_{\text{eq}}}} \quad (11)$$

由式(11)可知, 故障线路零模阻抗相频特性与非故障线路类似, 在 $(0, f_L)$ 频段内, 故障线路等效零模阻抗呈感性, 在 (f_L, f_s) 频段内, 故障线路等效零模阻抗呈容性。为保证任一馈线发生单相故障时均可等效为容性元件, 特征频段滤波器的下限截止频率 $f_{\text{L.set}}$ 按可能故障线路的串联谐振频率最大值整定。

4.3 采样窗口选取

采样窗口由窗口开启时刻和采样维持时间两部分确定。故障点上游与非故障区段暂态零模电流偏态特性是经滤波后的暂态零模电流始终存在极性相反且呈振荡衰减的特性。因此, STU无需保持同步, 采样窗口开启时刻 t_0 可按式(12)确定。

$$\begin{cases} t_0 = t_{j-1}, & |i_j| < |i_{j-1}| \\ t_0 = t_j, & |i_j| \geq |i_{j-1}| \end{cases} \quad (12)$$

式中, t_{j-1}, t_j 分别为STU第 $j-1, j$ 次采样时刻。

若STU第 j 次采集的暂态零模电流 i_j 小于第 $j-1$ 次采集的暂态零模电流 i_{j-1} , 则 t_{j-1} 时刻为模极大值时刻, 采样窗口开启, 即采样窗口开启时刻 t_0 取为 t_{j-1} 。否则, 将 t_j 时刻数据赋值给 t_{j-1} 时刻, 判断覆盖后的 t_{j-1} 时刻瞬时值与 t_j 时刻瞬时值, 直至本次采集的暂态零模电流瞬时值的绝对值小于上一次采集的暂态零模电流瞬时值的绝对值。

故障暂态过程持续时间受线路参数、过渡电阻

等影响,一般为3~4个工频周期。特征暂态零模电流不包含工频稳态分量,即特征频段内的暂态零模电流分量持续呈振荡衰减特征。因此采样维持时间取 $T = 4T_0$,尽可能多地保留故障暂态信息。

5 算例分析

利用 Matlab/Simulink 搭建 10 kV 有源配电网模型,验证所提出方法的正确性。仿真系统如图 8 所示,共有 6 条馈线、19 处 STU,消弧线圈容量为过补偿 10%。DG1 接入 PCC1 点,PCC1 点距离母线 15 km;DG2 接入 PCC2 点,PCC2 点距离母线 3 km;DG1、DG2 容量分别为 1 MW、2 MW。DG3(1 MW)、DG4(1 MW)预期分别接入 PCC3、PCC4 点,PCC3、PCC4 点分别距离母线 7.5 km、12.5 km;DG5 (2 MW)、DG6 (2 MW)预期分别接入 PCC5、PCC6 点,PCC5 点距离母线 6 km,PCC6 点距离分支线路出口 3.5 km。馈线正序参数分别为 $r_1 = 0.175 \Omega/\text{km}$, $l_1 = 1.21 \text{ mH}/\text{km}$, $c_1 = 0.0097 \mu\text{F}/\text{km}$;零序参数分别为 $r_0 = 0.23 \Omega/\text{km}$, $l_0 = 5.478 \text{ mH}/\text{km}$, $c_0 = 0.008 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

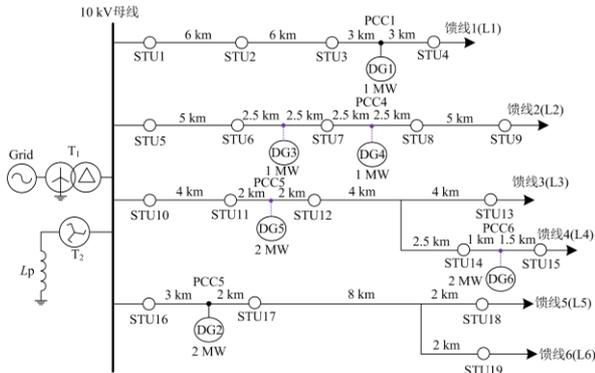
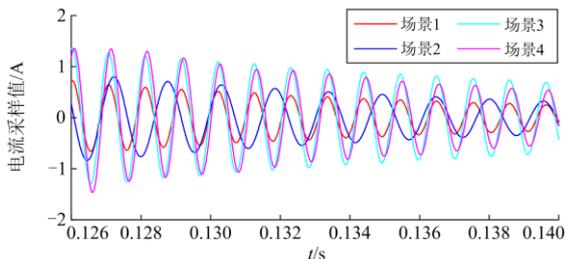


图 8 仿真系统

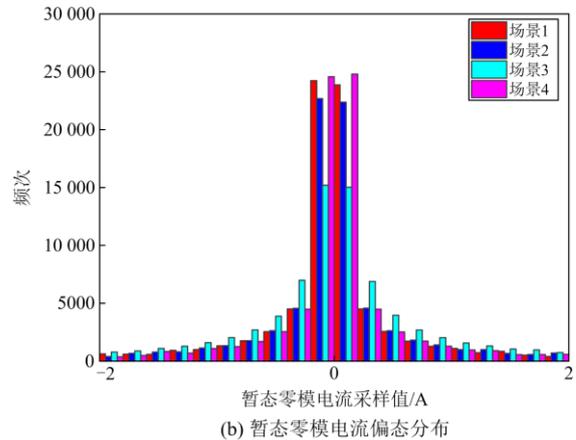
Fig. 8 Simulation system

5.1 暂态零模电流偏态特性

设置场景 1(对照组)的故障初始角 0° ,金属性短路发生在馈线 L2 的 30%位置,在不同故障位置(场景 2)、经不同过渡电阻(场景 3)、不同故障初始角(场景 4)发生单相故障时的暂态零模电流采样值如图 9(a)所示,故障场景 1—4 对应的采样序列分布



(a) 暂态零模电流采样序列



(b) 暂态零模电流偏态分布

图 9 不同场景下暂态零模电流特征

Fig. 9 Transient zero-mode current characteristics under different fault scenarios

直方图如图 9(b)所示。由仿真可以验证,不同故障场景下暂态零模电流均呈现振荡衰减特征,其电流采样值分布关于 $i = 0$ 是不对称的,即单相故障后暂态零模电流满足偏态分布特性,与理论分析一致。为后文基于特征暂态零模电流偏态系数的故障定位判据及方法奠定理论基础。

5.2 不同过渡电阻的故障定位

为验证所提方法在不同过渡电阻下的适用性,设在馈线 L2 的 30%处发生单相故障,故障初始角为 0° 。过渡电阻从 1Ω 至 300Ω 变化,仿真可得故障馈线各 STU 的偏态系数,如表 1 所示。

表 1 不同过渡电阻下的 STU 偏态系数和故障定位结果

Table 1 Fault location results under different fault resistances

过渡电阻/ Ω	偏态系数				定位结果
	STU5	STU6	STU7	STU8	
1	0.15	0.06	-0.15	-0.16	STU6—7
10	2.25	1.69	-1.53	-1.09	STU6—7
100	-1.57	-0.53	2.61	2.32	STU6—7
300	-0.21	-0.11	0.96	2.73	STU6—7

当过渡电阻为 10Ω 时,以此为例说明故障定位过程:首先以 STU5 为父 STU,直接搜索下一级子 STU6,二者偏态系数均为正值,根据式(6)可知,故障定位判据运算结果为“0”,则判断故障不在当前判断区段内;然后以 STU6 为父 STU,搜索下一级子 STU7,父 STU 与其子 STU 的暂态零模电流偏态系数异号,即相邻 STU 偏态特性相反,定位判据运算结果为“1”,可判断单相故障发生在 STU6 与 STU7 区段内。

尽管暂态零模电流的数值受过渡电阻的影响,但其振荡衰减特征始终存在。由于偏态系数反映的

是数据分布特点, 而非数值大小, 因此所提出的方法可以有效避免因过渡电阻变化而失去灵敏性, 具有较强的耐过渡电阻能力。

5.3 不同故障初始角下的故障定位

理论上暂态零模电流振荡衰减分量受故障初始角影响^[31], 有必要通过改变故障发生时刻以改变故障初始角, 研究所提方法的适用性。设单相故障发生在线路 L2 的 30% 处, 以 45° 为步长, 故障初始角从 0° 变化到 180° 时的故障馈线各 STU 的偏态系数及故障定位结果如表 2 所示。

表 2 不同故障初始角下的 STU 偏态系数和故障定位结果

Table 2 STU skewness coefficients and fault location results under different initial fault angles

故障初始角/(°)	偏态系数				定位结果
	STU5	STU6	STU7	STU8	
0	2.25	1.69	-1.53	-1.09	STU6—7
45	1.07	1.01	-2.22	-0.19	STU6—7
90	0.97	0.84	-2.05	-0.15	STU6—7
135	0.87	0.53	-1.84	-0.12	STU6—7
180	-0.22	-1.63	0.42	0.47	STU6—7

随着故障初始角变化, 暂态零模电流偏态系数随之变化。但无论在何种故障初始角下, 非故障区段内 STU 的暂态零模电流偏态特性始终一致, 故障点异侧暂态零模电流的偏态系数始终异号。可见基于特征暂态零模电流偏态系数的单相故障定位方法不受故障初始角变化的影响, 可有效定位有源配电网单相故障。

5.4 不同故障位置下的故障定位

当分布式电源均工作在额定状态时, 设故障初始角为 0°, 故障过渡电阻为 10Ω, 改变故障点位置。在上述算例的基础上探讨故障分别位于分支线路出口(馈线 L4 20% 位置)、分支线路(馈线 L4 80% 位置)时的定位方法适应性, STU 偏态系数及故障定位结果如表 3 所示。

表 3 不同故障位置下的 STU 偏态系数和故障定位结果

Table 3 STU skewness coefficients and fault location results under different fault sites

故障位置/%	偏态系数				定位结果
	STU12	STU13	STU14	STU15	
20	1.44	-0.84	-0.33	—	STU12—14
80	0.80	-0.68	0.97	-3.38	STU14—15

设故障位于分支线路出口时, 馈线 L3 中 STU10—STU12 的偏态特性相同且该区段内无分支, 可判断单相故障不位于上述区段。父 STU12 与子 STU13、STU14 均异号, 由式(6)可判断故障区

段为分支线路出口位置, 故障定位正确。设故障位于分支线路时, 子 STU14 与父 STU13 偏态系数同号, 进一步以 STU14 为父 STU, 子 STU15 与其偏态系数异号, 则可判定 STU14 与 STU15 所构成区段为故障区段。所提方法在故障点位于无分支线路、分支线路出口、有分支线路时均能实现准确定位。

5.5 不同分布式电源接入场景下的故障定位

进一步讨论分布式电源渗透率不断提高下的定位方法可靠性, 分别设置 3 组不同的 DG 接入组合, 以模拟 DG 接入配电网部分馈线(1,2,3,4)、接入配电网所有馈线但渗透率不高(1,2,3,5)以及接入配电网所有馈线且渗透率较高(1—6)的场景。设单相故障发生在线路 L2 的 30% 处, 故障馈线各 STU 的偏态系数及故障定位结果如表 4 所示。

表 4 不同分布式电源接入场景下的 STU 偏态系数和故障定位结果

Table 4 STU skewness coefficients and fault location results under different DG access

DG 接入组合 (总容量)	偏态系数				定位结果
	STU5	STU6	STU7	STU8	
1,2,3,4(5 MW)	0.51	0.53	-0.13	-0.13	STU6—7
1,2,3,5(6 MW)	0.41	0.44	-0.45	-0.41	STU6—7
1—6(9 MW)	-0.17	-0.15	0.46	0.42	STU6—7

随着分布式电源渗透率的不断增加, STU 测得的偏态系数虽因采样窗口选择等存在波动, 但 STU6 与 STU7 的暂态零模电流偏态系数始终异号, 即故障点异侧暂态零模电流的偏态特性始终相反。这表明暂态零模电流的偏态特性仅与故障位置有关, 而不受 DG 渗透率的影响。所提方法能可靠实现不同 DG 渗透率场景下的单相故障区段定位。

综上所述, 利用偏态系数刻画单相故障后暂态零模电流的振荡衰减特征, 进而实现故障定位。其定位精度不受故障位置、故障初始角和分布式电源渗透率的影响, 且具有较好的耐故障过渡电阻能力。

6 结论

本文根据故障点上游与非故障区段暂态零模电流极性相反且均呈振荡衰减的特征, 提出了一种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, 得出以下结论:

1) 所提方法引入偏态系数用以刻画暂态零模电流振荡衰减且在故障区段两侧极性相反的特征, 通过比较相邻 STU 的偏态特性, 实现有源配电网单相故障定位;

2) 定位方法中 STU 独立确定特征频段滤波器

的采样窗口开启时刻,就地完成特征暂态零模电流采集及其偏态系数计算,实时拓扑相邻的智能终端间仅需交互简单逻辑信号,抗通信干扰能力强;

3) 所提方法计算量小,既充分挖掘了故障暂态信息,也克服了暂态特征量采样及处理的困难,且定位判据与系统参数无关,具有灵敏度高、整定计算简便的优点。

本文针对分布式电源采用外特性等效,后续将结合分布式电源常规控制策略以及故障穿越控制下的控保协同开展研究。

参考文献

- [1] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [2] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2015.
National Development and Reform Commission Energy Research Institute. China 2050 high proportion of renewable energy development scenarios and path research[R]. Beijing: National Development and Reform Commission Energy Research Institute, 2015.
- [3] ZHANG C, LI J, ZHANG Y J. 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.
- [4] ZHANG F, MU L. A fault detection method of micro grids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the PQ control strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(5): 4816-4826.
- [5] 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.
- [6] 崔子轩,袁婉玲,郝正航,等. 基于电流幅值关系与制动系数相配合的有源配电网差动保护方案[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12): 1-7.
CUI Zixuan, YUAN Wanling, HAO Zhenghang, et al. Differential protection scheme of active distribution network based on current amplitude relation and braking coefficient[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 1-7.
- [7] 李瀚霖,靳维,梁睿,等. 基于故障信息自同步的有源配电网纵联保护[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 121-126, 133.
LI Hanlin, JIN Wei, LIANG Rui, et al. The pilot protection for active distribution network based on fault information self-synchronizes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 121-126, 133.
- [8] SINGH M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources - a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 294-310.
- [9] 程梦竹,张新慧,徐铭铭,等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 124-132.
CHENG Mengzhu, ZHANG Xinhui, XU Mingming, et al. Location method of an active distribution network fault section based on multi-target weighted grey target decision[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 124-132.
- [10] GALVEZ C, ABUR A. Fault location in active distribution networks containing distributed energy resources (DERs)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 3128-3139.
- [11] LI Zhenxing, WAN Jialing, 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.
- [12] 庄伟,牟龙华. 基于零序电流有功分量的配电网接地故障定位[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 468-473.
ZHUANG Wei, MU Longhua. Active component of zero-sequence current based single-phase ground fault location in distribution grid[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(3): 468-473.
- [13] 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. Ground fault location method based on waveform similarity of zero-sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 125-130.
- [14] 张林利,葛珍珍,张世栋,等. 利用暂态频率比较的配电网单相接地定位方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(12): 135-138.
ZHANG Linli, GE Zhenzhen, ZHANG Shidong, et al. Location approach for single phase-to-earth fault in distribution network by comparing transient frequencies[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(12): 135-138.
- [15] 徐嘉伟. 基于可控信号注入的小电流接地系统单相接地故障定位方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
XU Jiawei. Research on single-phase ground fault location method based on controllable signal injection in small current grounding system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [16] 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.
- [17] 高湛军, 李思远, 彭正良, 等. 基于网络树状图和改进 D-S 证据理论的配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 65-71.
- GAO Zhanjun, LI Siyuan, PENG Zhengliang, et al. Fault location method of distribution network based on tree structure diagram and improved D-S evidence theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 65-71.
- [18] 林梅芬, 陈婷, 王秋杰, 等. 一种配电网基于模型诊断的最小碰集改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 25-33.
- LIN Meifen, CHEN Ting, WANG Qiujie, et al. An improved minimum set algorithm for model-based diagnosis of a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 25-33.
- [19] LIANG J, JING T, NIU H, et al. Two-terminal fault location method of distribution network based on adaptive convolution neural network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 54035-54043.
- [20] 曾祥君, 陈磊, 喻锴, 等. 基于配电网双端信息融合的单相断线故障实时监测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 12-18.
- ZENG Xiangjun, CHEN Lei, YU Kun, et al. A real time monitoring method for the single-line break fault based on dual-terminal information in the distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 12-18.
- [21] 司新跃. 逆变型分布式电源故障建模与配电网保护[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- SI Xinyue. Fault model of inverter based distributed generation and distribution system protection[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [22] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- [23] 李卫国, 许文文, 乔振宇, 等. 基于暂态零序电流凹凸特征的配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 164-173.
- LI Weiguo, XU Wenwen, QIAO Zhenyu, et al. Fault section location method for a distribution network based on concave and convex characteristics of transient zero sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 164-173.
- [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] FENG Bo, JIA Yong, CHEN Yan, et al. Influence analysis of neutral point grounding mode on the single-phase grounding fault characteristics of distribution network with distributed generation[C] // 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), June 4-7, 2020, Chengdu, China: 1834-1840.
- [26] 薛永端, 郭丽伟, 张林利, 等. 有源配电网中性点接地方式的选择问题[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 129-136.
- XUE Yongduan, GUO Liwei, ZHANG Linli, et al. Selection problems of neutral grounding mode in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 129-136.
- [27] 秦苏亚, 薛永端, 刘砾钲, 等. 有源配电网小电流接地故障暂态特征及其影响分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 655-666.
- QIN Suya, XUE Yongduan, LIU Lizheng, et al. Transient characteristics and influence of small current grounding faults in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 655-666.
- [28] WANG Xuewen, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients energy analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 774-785.
- [29] 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.
- [30] 李嘉沛. 基于暂态录波型故障指示器系统的小电流接地定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- LI Jiawei. Research on fault location of small current grounding based on transient recording fault indicator system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [31] 吕哲, 王增平. 基于暂态电流波形特征的快速差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1534-1545.
- LÜ Zhe, WANG Zengping. A transient current waveform feature based novel high-speed differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1534-1545.

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-03-01

作者简介:

黄飞(1987—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为智能配电网技术; E-mail: huangfei_87@163.com

陈纪宇(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: chenjiyu@163.com

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

(编辑 姜新丽)