

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221889

## 基于相电压差值极性的配电网单相接地故障检测方法

刘丰, 曾祥君, 谢李为, 喻锟, 唐欣, 王有鹏, 邓清波

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对现有配电网自动化设备和方法难以快速准确检测线路单相接地故障的问题, 提出一种基于相电压差值极性的配电网单相接地故障检测方法。通过分析配电网线路单相接地故障时的电压幅值特征, 考虑中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统的区别, 揭示线路单相接地故障时故障相与非故障相的电压幅值关系。利用故障相与非故障相的电压幅值特性, 定义线路的电压差值极性系数 $Q$ , 建立相应的单相接地故障检测判据, 实现线路单相接地故障的快速检测。仿真结果表明, 所提方法能够有效检测线路单相接地故障, 检测结果不受中性点接地方式、负荷波动和故障角度的影响, 具有较好的抗高阻故障能力。现场试验表明, 所提方法可在3 ms内检测线路是否发生单相接地故障, 可有效检测2.5 k $\Omega$ 过渡电阻的单相接地故障, 具有较好的工程适用性。

**关键词:** 配电网; 单相接地故障; 故障检测; 电压差值极性

### Single-phase grounding fault detection method for a distribution network based on phase voltage difference polarity value

LIU Feng, ZENG Xiangjun, XIE Liwei, YU Kun, TANG Xin, WANG Youpeng, DENG Qingbo

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** There are shortcomings in the existing distribution network automation equipment and methods, in that they find it difficult to quickly and accurately detect single-phase grounding fault of lines. Thus a single-phase grounding fault detection method for a distribution network based on phase voltage difference polarity value is proposed. By analyzing the voltage amplitude characteristics of the single-phase ground fault for a neutral point ungrounding system and the neutral point through the arc suppression coil grounding system, the voltage amplitude relationship between the fault phase and the non-fault phase is obtained. From the voltage amplitude law of fault phase and non-fault phase, the voltage difference polarity value  $Q$  is defined. The corresponding single-phase grounding fault detection criterion is established to realize the rapid detection of a single-phase grounding fault of the line. Simulation results show that the proposed method can effectively detect the single-phase grounding fault of the line, and the detection results are not affected by the neutral point grounding mode, load fluctuation and fault angle. It also has good resistance to high-impedance faults. Field tests show that the proposed method can detect single-phase grounding faults within 3 ms, and can effectively detect the single-phase grounding fault with a 2.5 k $\Omega$  resistance. This has good engineering applicability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51737002).

**Key words:** distribution network; single-phase grounding fault; fault detection; voltage difference polarity value

## 0 引言

配电网作为连接电力系统发电侧与用户侧的重要部分, 其运行可靠性与国民经济密切相关。我国

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51737002); 湖南省自然科学基金项目资助(2021JJ30729); 湖南省教育厅项目资助(22A0231)

配电网主要采用中性点非有效接地方式, 当线路发生单相接地故障时, 故障特征量不显著, 导致现有配电网装置难以实现故障的快速检测<sup>[1-6]</sup>。并且, 现有高阻接地故障的检测准确度不足20%<sup>[7-10]</sup>, 若不能及时切除故障, 容易引发人身安全危害和山林火灾<sup>[11-12]</sup>。因此, 快速、准确地检测配电网单相接地故障, 对提高供电可靠性及电力系统安全运行至关重要。

对于小电流单相接地系统单相接地故障, 目前

的检测技术可分为稳态法、暂态时域法和人工智能算法<sup>[13-16]</sup>。

对于稳态法，文献[11]提出单相接地故障时仅根据中性点电压大小及相电压大小直接判断故障相的简化方法，该方法能在不同过渡电阻的情况下准确判别出故障相，但由于故障过程中过渡电阻为未知，使该方法的有效性降低；文献[17]提出了基于故障分量幅值的长时变化趋势进行故障判断的方法，通过解耦零序电流中不平衡分量和故障分量，利用更长时间的多周期测量结果降低测量误差、提升测量精度和可靠性，但无法做到快速检测故障；文献[18]构建等效电路和仿真，分析了早期的故障特征，归纳和对比了故障电压电流信号，为未来进一步开展检测、识别和定位算法研究奠定了理论基础，但离实用性具有一定的距离，但文献[19]根据中性点电压位移检测线路是否发生故障，再通过故障前和故障后的电压(对地相位)来识别故障，该方法可通过下位机装置检测到故障，具有较强的实用性，但很难检测高阻故障。

对于暂态时域法，文献[20]提出了一种采用线路电流波形曲率对故障电流快速识别的方法，采用电流波形曲率作为故障识别判据，曲率反映故障发生时刻线路电流波形的突变，来完成故障检查，但该方法很难检测高阻故障；文献[21]采用线路电流斜率与线路电流瞬时配合的方式，当两者相继达到整定值，判断线路存在故障，仅能判断低阻故障；文献[22]提出一种将变分模态分解和 Teager-Kaiser 能量算子相结合的高阻检测方法，具有更高的故障特征量提取精度、更少的计算时间和更高的判断精度，工程运用难度大。

对于人工智能算法，文献[23]提出了一种基于狄利克雷过程高斯混合模型的故障时刻检测方法，通过对经基于数学形态学增强后的故障特征进行自适应判断，实现故障时刻的快速准确检测。文献[24]提出了一种基于磁场波形相似度分析与 D-S 证据理论结合的配电网架空线故障定位方法，通过采用不同相似度方法从不同角度对磁场波形进行分析，用证据理论进行融合，实现在极端条件下故障判据及定位依然有较高的准确率。文献[25]通过模拟人类对波形的认知过程，将早期故障波形分解为不同的基元，利用分层概率学习方法建立基于特征与故障间的对应关系，实现小样本条件下的早期故障类型辨识。文献[26]提出了一种基于多特征变换与融合的单相接地故障类型识别方法，充分挖掘故障数据中包含的故障类型特征，实现单相接地故障的识别。对于单相接地故障为中低阻故障，此类方法具有较

高的准确性；然而，对于配电网中发生的波形响应及其微弱的高阻故障，这些检测方法有效性大大降低，同时该方法的精度受样本大小的影响。

上述文献通过分析故障信号的特征量实现了线路单相接地故障的判别，但在实际运用中仍存在以下问题：1) 现有利用故障电流信号的方法存在高阻故障盲区，难以准确检测单相接地故障，且故障电流早期特性微弱导致快速检测故障难以实现；2) 现有利用故障暂态数据的方法易受环境和噪声的干扰，单相接地故障检测准确性有待提高；3) 现有利用人工智能算法的方法易受历史数据质量的影响，工程应用难度大。

为此，本文通过分析小电流接地系统单相接地故障时各相电压和中性点电压的幅值特性，引入线路的电压差值与极性，定义了线路的电压差值极性值  $Q$ ，建立了线路的单相接地故障检测判据，实现线路单相接地故障的快速检测。仿真分析和现场试验表明，所提方法可以有效检测线路的单相接地故障，且不易受故障过渡电阻、负荷波动、故障初始角度和故障位置的影响。单相接地故障检测过程无须高采样率装置，利用下位机在 3 ms 内可实现故障判定，具有较好的工程适用性。

### 1 配电网故障电压幅值特性

#### 1.1 中性点不接地系统

如图 1 所示，当线路 A 相发生单相高阻接地故障时，以系统电源 A 相电压  $\dot{E}_A$  为参考向量，可得到中性点电压为

$$\dot{U}_0 = -\frac{z_0}{3R_f + z_0} \dot{E}_A \tag{1}$$

式中： $z_0$  为线路对地阻抗， $z_0 = r_0 - j(1/\omega c_0)$ ， $\omega$  为角频率， $r_0$  和  $c_0$  分别为线路的对地电阻和对地电容； $R_f$  为 A 相故障接地电阻。

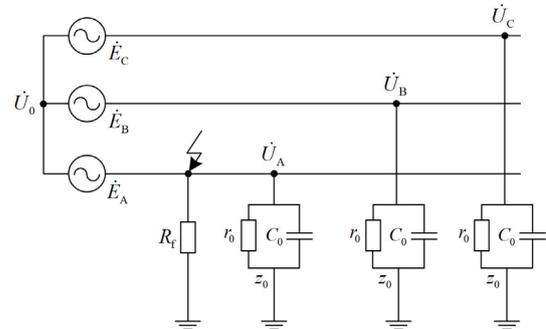


图 1 中性点不接地系统单相接地故障原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of single-phase grounding fault of ungrounded system

通常而言, 配电网线路的对地电阻  $r_0$  远大于  $1/\omega c_0$ , 因此, 在分析过程中可忽略对地电阻  $r_0$  的影响, 可得化简后的中性点电压为

$$\dot{U}_0 = -\frac{1}{j3\omega c_0 R_f + 1} \dot{E}_A \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \frac{1}{\sqrt{(3\omega c_0 R_f)^2 + 1}} |E_A| \angle \theta \\ \theta = \pi + \arctan(-3\omega c_0 R_f) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, 当故障接地电阻  $R_f$  趋近于零时, 此时  $\pi + \arctan(-3\omega c_0 R_f)$  的值趋近于  $\pi$ , 同时  $1/\sqrt{(3\omega c_0 R_f)^2 + 1}$  的值趋近于 1。当故障接地电阻  $R_f$  趋近于无穷时,  $\pi + \arctan(-3\omega c_0 R_f)$  的值趋近于  $\pi/2$ ,  $1/\sqrt{(3\omega c_0 R_f)^2 + 1}$  的值趋近于 0。

因此, 对于中性点不接地系统, 当线路发生 A 相接地故障时, 中性点电压的相位取值范围为  $(\pi/2, \pi)$ , 其幅值范围为  $(0, |E_A|)$ , 结合文献[1]和文献[12], 可得中性点电压与系统电源电压间的关系如图 2 所示。

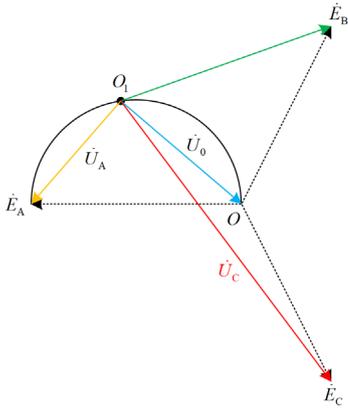


图 2 A 相接地故障电压向量图

Fig. 2 Voltage vector diagram of A-phase-to-ground fault

根据图 2 可知, 线路 A、B、C 三相对地电压幅值与过渡电阻的大小相关。随着故障接地电阻  $R_f$  的增加, 中性点  $O_1$  的运动轨迹逐渐接近  $O$  点, 中性点电压幅值逐渐减少, 故障相的电压幅值逐渐增加, 但线路  $U_A$  相电压幅值始终小于系统电压  $E_A$  的幅值。此时, 线路  $U_C$  相电压幅值始终保持着最大, 且大于系统电压  $E_C$  的幅值;  $U_B$  相电压幅值随着过渡电阻的增加先减少后增加,  $U_B$  相电压存在大于系统电压  $E_B$  幅值和小于系统电压  $E_B$  幅值两种情形。

同理, 当线路其他相发生单相接地故障时, 线路的对地电压幅值与系统电压幅值同样存在故障相

电压降低、非故障相线路一相电压增加的情况。

## 1.2 中性点经消弧线圈接地系统

同理, 分析中性点经消弧线圈接地系统的故障电压幅值特性, 如图 3 所示, 当线路发生单相接地故障时, 可得到中性点电压为

$$\dot{U}_0 = -\frac{1}{1 + R_f(3z_l + z_0)/(z_0 z_l)} \dot{E}_A \quad (4)$$

式中,  $z_l$  为消弧线圈的阻抗值,  $z_l = j\omega L$ ,  $L$  为消弧线圈的电感值。

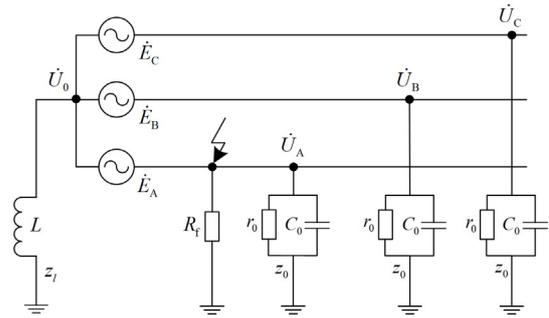


图 3 中性点经消弧线圈接地系统单相故障原理图

Fig. 3 Schematic diagram of single-phase grounding fault of neutral grounding system through arc suppression coil

同理, 中性点电压化简可得

$$\dot{U}_0 = -\frac{1}{1 + jR_f(3\omega c_0 - 1/\omega L)} \dot{E}_A \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \frac{1}{\sqrt{R_f^2(3\omega c_0 - 1/\omega L)^2 + 1}} |E_A| \angle \theta \\ \theta = \pi + \arctan[-R_f(3\omega c_0 - 1/\omega L)] \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知, 当故障接地电阻  $R_f$  趋近于零时,  $\theta$  的值趋近于  $\pi$ ,  $1/\sqrt{R_f^2(3\omega c_0 - 1/\omega L)^2 + 1}$  的值趋近于 1。当电阻  $R_f$  趋近于无穷时,  $1/\sqrt{R_f^2(3\omega c_0 - 1/\omega L)^2 + 1}$  的值趋近于 0。若  $3\omega c_0 \neq 1/\omega L$ ,  $\theta$  的值趋近于  $\pm\pi/2$ , 其中, 当系统处于欠补偿时,  $3\omega c_0 > 1/\omega L$ ,  $\theta$  的值趋近于  $\pi/2$ ; 当系统处于过补偿时,  $3\omega c_0 < 1/\omega L$ ,  $\theta$  的值趋近于  $-\pi/2$ 。

因此, 对于中性点经消弧线圈接地系统, 结合文献[1]和文献[12], 同理可得中性点电压与系统电源电压间的关系如图 4 所示。

根据图 4 可知, 当过渡电阻  $R_f$  增加时, 无论过补偿还是欠补偿, 中性点  $O_1$  的运动轨迹均接近  $O$  点, 中性点电压幅值减少, 故障相的电压幅值增加, 但线路  $U_A$  的相电压幅值始终小于系统电压  $E_A$  的幅值。

当系统处于欠补偿工作状态时, 线路发生单相

接地故障后，非故障相的电压幅值特征与中性点不接地系统类似。当系统处于过补偿工作状态时，线路  $U_B$  的相电压幅值始终保持着最大，且大于系统电压  $E_B$  的幅值；线路  $U_C$  的相电压幅值随着过渡电阻的增加先减少后增加， $U_C$  相电压存在大于系统电压  $E_C$  幅值和小于系统电压  $E_C$  幅值两种情形。

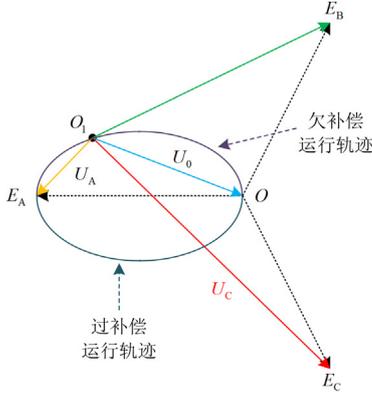


图 4 A 相接地故障电压向量图

Fig. 4 Voltage vector diagram of A-phase grounding fault

同理，当线路其他相发生单相接地故障时，线路的对地电压幅值与系统电压幅值同样存在故障相电压降低、非故障相线路一相电压增加的情况。

因此，通过上述分析可知，对于中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统，当线路发生单相接地故障时，存在故障相电压减少，非故障相至少一相电压增加的情形。

## 2 基于电压差值极性的故障检测方法

根据上述分析可知，当配电网发生单相接地故障时，线路故障相电压幅值将小于其故障前相电压幅值，非故障相电压幅值将存在至少一相电压幅值大于其故障前相电压幅值。因此，定义线路各相电压的差值为

$$\begin{cases} \Delta U_{A(i)} = |U_{A(i)} - (-U_{A(i-T/2)})| \\ \Delta U_{B(i)} = |U_{B(i)} - (-U_{B(i-T/2)})| \\ \Delta U_{C(i)} = |U_{C(i)} - (-U_{C(i-T/2)})| \end{cases} \quad (7)$$

式中： $U_{A(i)}$ 、 $U_{B(i)}$ 和 $U_{C(i)}$ 分别表示 A、B、C 三相采样时刻的电压幅值； $U_{A(i-T/2)}$ 、 $U_{B(i-T/2)}$ 和 $U_{C(i-T/2)}$ 分别表示 A、B、C 三相采样前半个周期时刻所对应的电压幅值； $i$ 为采样点； $T$ 为工频周期； $\Delta U_{A(i)}$ 、 $\Delta U_{B(i)}$ 和 $\Delta U_{C(i)}$ 分别为 A、B、C 三相当前时刻电压幅值与前半个周期时刻电压幅值的差值。

由式(7)可获取线路故障前后各相电压的变化

量，但不能体现故障相电压幅值下降，非故障相电压中存在一相升高的增减特征。为此，引入各相电压差值的极性系数，即

$$\begin{cases} P_{A(i)} = \text{SIGN}(|U_{A(i)}| - |U_{A(i-T/2)}|) \\ P_{B(i)} = \text{SIGN}(|U_{B(i)}| - |U_{B(i-T/2)}|) \\ P_{C(i)} = \text{SIGN}(|U_{C(i)}| - |U_{C(i-T/2)}|) \end{cases} \quad (8)$$

式中， $\text{SIGN}(\ast)$  函数为取某数对应的极性。当函数变量大于 0 时，函数值为 1；当变量小于 0 时，函数值为 -1；当变量等于 0 时，函数值为 0。

联立式(7)和式(8)，定位线路各相电压的差值极性值为

$$\begin{cases} Q_{A(i)} = \Delta U_{A(i)} \times P_{A(i)} \\ Q_{B(i)} = \Delta U_{B(i)} \times P_{B(i)} \\ Q_{C(i)} = \Delta U_{C(i)} \times P_{C(i)} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知，当配电网线路正常运行时，线路各相的电压差值极性系数为 0；当配电网线路发生单相接地故障时，线路故障相的电压差值极性系数为负，线路非故障相的电压差值极性系数至少存在一相为正。因此，可以利用式(9)的波形特征判定配电网线路是否发生故障。

考虑到实际量测过程中环境和设备的影响，建立故障检测启动判据阈值减少误差的干扰。

判据 1：建立式(7)的幅值差值阈值  $\gamma$ ，当式(8)中电压差值大于  $\gamma$  时，则启动故障检测。考虑现有电压互感器的精度为 0.5 级和叠加在互感器二次侧信号上的干扰，本文的阈值  $\gamma$  取 0.6。

判据 2：判断式(9)中各相的极性值是否存在相反相，且当三相存在连续 5 个采样点数值极性相反时，判定线路发生单相接地故障。

因此，所提单相接地故障检测方法的流程如图 5 所示。

具体实施步骤如下。

步骤 1：实时采集线路相电压信号，循环保存半个周波的工频信号；

步骤 2：计算式(7)中各相的电压差值，判断电压差值是否大于阈值  $\gamma$ 。若满足条件，则进行步骤 3，否则返回至步骤 1；

步骤 3：计算式(8)和式(9)中各相的电压差值极性系数；

步骤 4：判断是否存在连续 5 个采样点的极性相反。若满足条件，则判定线路发生单相接地故障，否则返回至步骤 1。

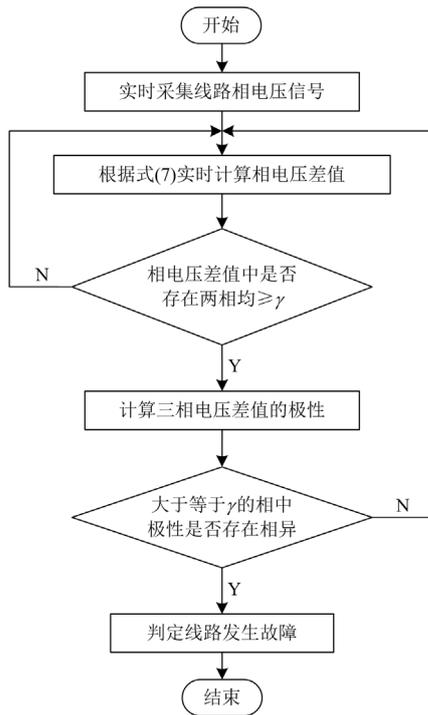


图 5 故障检测方法流程图

Fig. 5 Flow chart of the proposed fault detection method

### 3 仿真分析

为了验证本文所提方法的有效性和可靠性, 搭建如图 6 所示的配电网, 由 4 条 10 km 架空线路和 1 条 5 km 电缆线路组成, 架空线路和电缆均采用 Bergeron 模型<sup>[15]</sup>, 同时在母线处储备一条可调节电容值大小的集中线路, 改变系统对地电容电流值;  $L$  表示消弧线圈,  $S1$  和  $S2$  表示开关, 通过改变中性点的接地方式, 实现中性点不接地系统与消弧线圈系统的转换, 系统参数详见文献[15].

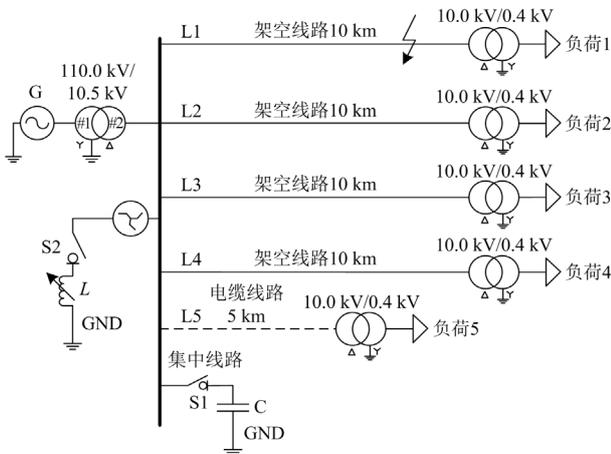


图 6 10 kV 配电网架构图

Fig. 6 Topology of a 10 kV distribution network

### 3.1 中性点不接地系统

分析所提方法在配电网中性点不接地系统的可靠性, 断开图 6 中开关  $S1$  和  $S2$ . 在线路  $L1$  处设置不同过渡电阻的接地故障, 电阻值分别为  $0.1 \Omega$ 、 $500 \Omega$ 、 $1 \text{ k}\Omega$ 、 $5 \text{ k}\Omega$  和  $10 \text{ k}\Omega$ .

线路  $L1$  在  $0.0645 \text{ s}$  时发生  $A$  相接地故障, 过渡电阻为  $0.1 \Omega$ . 此时, 母线处相电压和电压差值极性值波形分别如图 7 和图 8 所示. 故障时的线路电压差值极性值如表 1 所示.

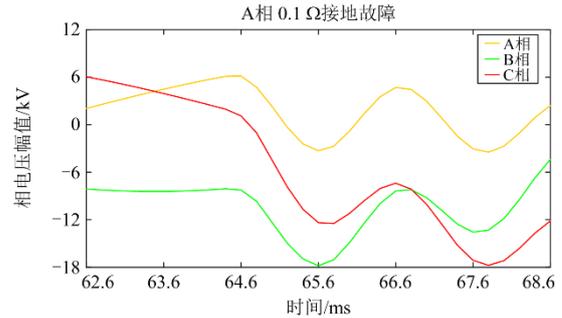


图 7  $0.1 \Omega$  时三相电压波形

Fig. 7 Three-phase voltage waveform with  $0.1 \Omega$

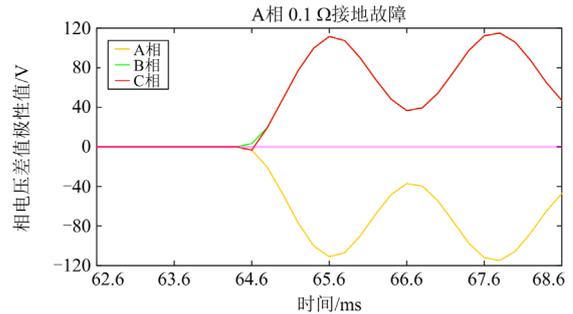


图 8  $0.1 \Omega$  时三相电压差值极性值波形

Fig. 8 Three-phase voltage difference polarity value waveform with  $0.1 \Omega$

表 1  $0.1 \Omega$  时的线路电压差值极性值

Table 1 Line voltage difference polarity value with  $0.1 \Omega$

$t/\text{ms}$	$Q_A$	$Q_B$	$Q_C$	判据 1	判据 2
0.0642	0.00	0.00	0.00	×	×
0.0644	0.00	0.00	0.00	×	×
0.0646	-3.17	3.33	-3.33	√	×
0.0648	-20.48	19.33	19.33	√	×
0.0650	-47.62	48.30	48.30	√	×
0.0652	-77.01	77.36	77.36	√	×
0.0654	-100.24	99.89	99.89	√	√

由图 7 和图 8 可知, 当线路发生  $A$  相接地故障后,  $A$  相的电压差值极性小于 0,  $B$  相的电压差值极性大于 0,  $C$  相的电压差值极性先小于 0 后大于 0.

同时, 根据表 1 可知, 当线路发生故障后, 0.0646 s 时计算 A 相电压差值极性系数为-3.17, B 相电压差值极性系数为 3.33, C 相电压差值极性系数为-3.33, 满足判据 1。并且, 从 0.0646 s 开始, A 相的连续 5 个点极性值小于 0, B 相的连续 5 个点极性值大于 0, 满足判据 2。因此, 在 0.0654 s 时判定线路发生单相接地故障, 相比于故障发生时刻 0.0645 s, 检测时间小于 1 ms, 满足快速检测的要求。

线路 L1 在 0.0645 s 时发生 A 相接地故障, 过渡电阻为 1 kΩ。此时, 母线处相电压和电压差值极性值波形分别如图 9 和图 10 所示。故障时的线路电压差值极性值如表 2 所示。

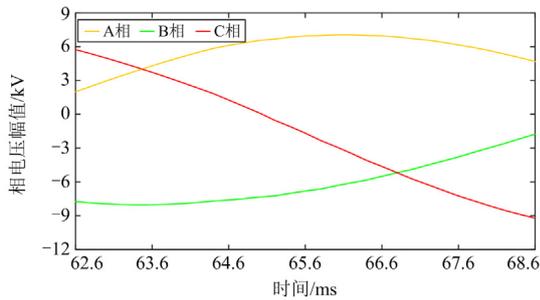


图 9 A 相 1 kΩ 接地故障时时三相电压波形  
Fig. 9 Three-phase voltage waveform with 1 kΩ

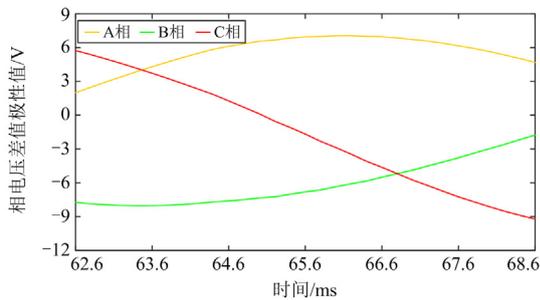


图 10 A 相 1 kΩ 接地故障时三相电压差值极性值波形  
Fig. 10 Three-phase voltage difference polarity value waveform with 1 kΩ of phase A

表 2 A 相 1 kΩ 接地故障时的线路电压差值极性值  
Table 2 Line voltage difference polarity value with 1 kΩ of phase A

t/ms	$Q_A$	$Q_B$	$Q_C$	判据 1	判据 2
0.0642	0.00	0.00	0.00	×	×
0.0644	0.00	0.00	0.00	×	×
0.0646	-0.72	0.79	-0.79	√	√
0.0648	-2.59	2.53	-2.53	√	√
0.0650	-4.02	4.00	-4.00	√	√
0.0652	-5.97	5.98	5.98	√	√
0.0654	-7.73	7.69	7.69	√	√

同理, 由图 9、图 10 和表 2 可知, 过渡电阻为 1 kΩ, 所提方法可有效检查线路发生单相接地故障, 检测时间小于 1 ms, 满足快速检测的要求。

同理, 分别考虑不同过渡故障的情形, 故障检测结果如表 3 所示。

表 3 中性点不接地系统不同过渡电阻的检测结果

Table 3 Detection results of different fault resistances of neutral ungrounded systems

过渡电阻/Ω	故障时刻/ms	检测时刻/ms	判断是否正确
0.1	64.5	65.4	是
500	64.5	65.4	是
1000	64.5	65.4	是
5000	64.5	65.8	是
10 000	64.5	66	是

根据表 3 可知, 在中性点不接地系统中, 所提方法不易受过渡电阻的影响, 在过渡电阻为 10 kΩ 时, 仍能有效检测线路单相接地故障, 所判定的故障时刻为 0.066 s, 故障检测时间小于 2 ms, 满足快速检测的要求。

### 3.2 中性点经消弧线圈接地系统

分析所提方法在配电网中性点经消弧线圈接地系统的可靠性, 闭合图 6 中开关 S1 和 S2, 电路中每相对地电容为 10 μF, 系统的对地电容电流大小约为 39.3 A。分别考虑过补偿和欠补偿两种运行情形。

#### 3.2.1 过补偿运行

过补偿运行按脱谐度为-8%考虑, 图 6 消弧线圈的电感值约为 0.4549 H, 设置过渡电阻分别为 0.1 Ω、1 kΩ 和 5 kΩ。同理, 可得故障检测结果如表 4 所示。

表 4 过补偿运行时不同过渡电阻的检测结果

Table 4 Detection results of different fault resistances on over-compensation operation

过渡电阻/Ω	故障时刻/ms	检测时刻/ms	判断是否正确
0.1	64.5	65.4	是
500	64.5	65.4	是
1000	64.5	65.6	是
5000	64.5	66.6	是

根据表 4 可知, 在过补偿运行情况下, 所提方法的故障检测效果仍不易受过渡电阻影响, 均可以有效检测单相接地故障。当过渡电阻为 5 kΩ 时, 故障检测时间小于 3 ms, 满足快速检测的要求。

#### 3.2.2 欠补偿运行

欠补偿运行按脱谐度为 8%考虑, 图 6 消弧线圈的电感值约为 0.5333 H, 设置过渡电阻分别为 0.1 Ω、

1 kΩ 和 5 kΩ。同理, 可得故障检测结果如表 5 所示。

表 5 欠补偿运行时不同过渡电阻的检测结果

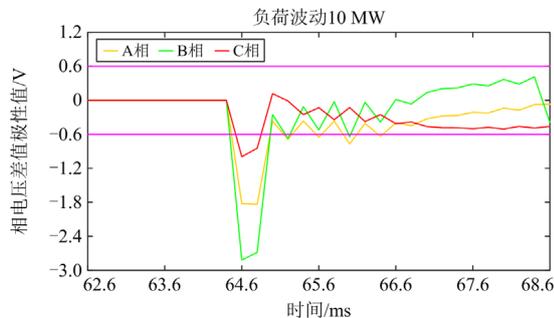
Table 5 Detection results of different fault resistances on under-compensated operation

过渡电阻/Ω	故障时刻/ms	检测时刻/ms	判断是否正确
0.1	64.5	65.4	是
500	64.5	65.4	是
1000	64.5	65.6	是
5000	64.5	66.6	是

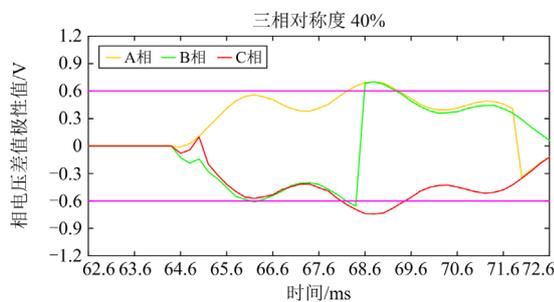
根据表 5 可知, 在欠补偿运行情况下, 所提方法的故障检测效果同样不易受过渡电阻影响, 均可以有效检测单相接地故障。当过渡电阻为 5 kΩ 时, 故障检测时间小于 3 ms, 满足快速检测的要求。

### 3.3 负荷波动的影响

考虑配电网系统负荷波动对所提方法的影响, 通过改变负荷 1 的大小, 分别设置 2.5 MW、5 MW、7.5 MW、和 10 MW 的负荷波动量, 同时设置了三相负荷波动的不对称度负荷波动仿真, 其中, B、C 两相负荷波动大小一致, 调整 A 相负荷波动大小, 100% 代表 A 相负荷波动与 B、C 两相负荷波动大小一致, 90% 表示 A 相负荷波动大小与 B、C 两相负荷波动大小存在 10% 的偏差。负荷波动的介入时间仍为 0.0645 s。当线路负荷发生波动时, 线路的电压差值极性值波形如图 11 所示。



(a) 对称度100% 10 MW 负荷波动



(b) 对称度40% 2.4 MW 负荷波动

图 11 负荷波动时的电压差值极性值波形

Fig. 11 Voltage difference polarity value waveform with load fluctuation

根据表 6 可知, 对于对称负荷波动, 所提方法可以有效区别线路故障与线路对称负荷波动, 检测结果不易受对称负荷波动的影响; 对于不对称负荷波动, 当对称度低于 47% 时, 将会误判线路发生故障, 但大部分负荷波动对称度大于 50%。对于由不对称引起的误判, 仍需进一步研究分析。

表 6 不同负荷波动的检测结果

Table 6 Detection results of different load fluctuation

负荷波动/ MW	三相 对称度/%	负荷波动 时刻/ms	检测时刻/ ms	判断是否 正确
2.5	100	64.5	—	是
5	100	64.5	—	是
7.5	100	64.5	—	是
10	100	64.5	—	是
2.9	90	64.5	—	是
2.8	70	64.5	—	是
2.47	47	64.5	—	是
2.4	40	64.5	68.2	否

### 3.4 故障角度的影响

考虑故障发生角度对所提方法的影响, 分别设置不同的故障角度。线路 L1 发生 A 相接地、过渡电阻为 500 Ω、故障角度分别为 5°、45° 和 90° 的相角故障, 故障时刻对应 62 ms、64.5 ms、67 ms。故障检测结果如表 7 所示。

表 7 不同故障角度的检测结果

Table 7 Detection results of different fault angles

故障角度/(°)	故障时刻/ms	检测时刻/ms	判断是否正确
5	62	63	是
45	64.5	65.4	是
90	67	68	是

根据表 7 可知, 所提方法在不同故障角度下均能有效检测线路单相接地故障, 故障检测结果不易受故障角度的影响。

### 3.5 噪声干扰对方法的影响

考虑配电网系统中干扰对方法的影响, 根据文献[27]分别设置了不同信噪比的白噪声, 设置 A 相接地故障, 过渡电阻位于线路 L1 的阻值为 5 kΩ, 故障时刻仍为 0.0645 s。噪声干扰为 40 dB 的电压差值极性值波形如图 12 所示, 得到如表 8 所示的仿真结果。

根据图 12 可知, 当噪声干扰为 40 dB 时, 干扰信号会导致本文方法中判据 1 启动, 但无法满足判据 2, 未误判, 说明本文方法具有良好的抗干扰性。

根据表 8 可知, 所提方法面对不同信噪比下的影响, 存在误判的情况, 满足基本需求; 当信噪比都小于 30 dB, 将会误判线路发生故障; 不过由于

所提方法所需的采样率较低, 5 kHz 即可采用本文所提方法, 可通过设备的滤波通道或小波变换等方式将采集的信号提前滤波, 可进一步降低干扰; 对噪声的干扰可做进一步的研究分析。

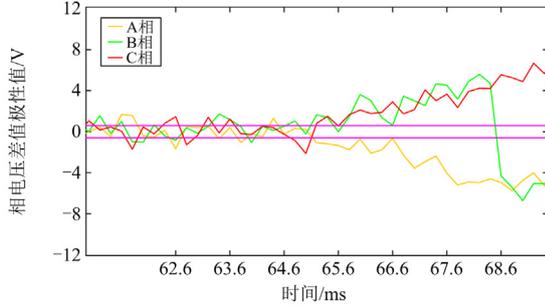


图 12 40 dB 噪声干扰时的电压差值极性值波形  
Fig. 12 Voltage difference polarity value waveform with 40 dB noise interference

表 8 不同噪声干扰下的检测结果

Table 8 Detection results of different noises interference

信噪比/dB	故障时刻/ms	是否误判	检测时刻/ms
50	64.5	否	65.2
40	64.5	否	65.8
30	64.5	是	—

### 3.6 故障位置的影响

考虑不同故障位置对所提方法的影响, 分别在线路 L1、L2、L3 和 L5 处设置 A 相接地故障, 过渡电阻为 500 Ω, 故障检测结果如表 9 所示。

表 9 不同故障位置的检测结果

Table 9 Detection results of different fault locations

故障线路	故障位置/km	故障时刻/ms	检测时刻/ms	判断是否正确
L1	8	67.0	67.8	是
L2	2	67.0	68	是
L3	5	67.0	68	是
L5	2	67.0	68	是

根据表 9 可知, 在不同线路的不同位置发生单相接地故障时, 所提方法均可以有效检测线路是否发生单相接地故障, 检测时间少于 2 ms, 满足快速检测的要求, 检测结果不易受故障位置的影响。

### 3.7 不同方法比较

进一步分析不同方法的单相接地故障检测能力, 分别在线路设置不同的故障事件, 比较文献[25]方法(利用 30 组数据进行小样本训练)和本文所提方法的检测效果。各故障事件设置 5 组故障, 各组故障角度不同; 同时, 还比较了文献[27]中的一种零序电压的检测方法, 故障检测结果如表 10 所示。

表 10 3 种方法的检测结果

Table 10 Detection results of the three methods

事件类型	文献[25]		文献[27]		本文方法	
	正确次数	判断时间/ms	正确次数	判断时间/ms	正确次数	判断时间/ms
0.1 Ω 接地故障	5	> 20	5	> 20	5	≤ 2
1 kΩ 接地故障	5	> 20	5	> 20	5	≤ 2
5 kΩ 接地故障	3	> 20	4	> 20	5	≤ 2
10 kΩ 接地故障	0	—	2	> 20	5	≤ 3
负荷波动 8 MW	4	> 20	5	> 20	5	≤ 3

根据表 10 可知, 文献[25]中低阻检查可靠性较高, 但高阻检查的准确性有待提高, 且需上位机判断, 判断时间远远大于 20 ms。而文献[27]方法对于故障过渡电阻不大于 5 kΩ 的场景, 具有很高的准确性, 对于 5 kΩ 以上的单相接地故障准确性一般, 判断时间需要 1~2 个周波, 该方法对下位机中 MCU 的要求较高。而本文方法能够有效检查 10 kΩ 及以下单相接地故障, 且可在 3 ms 内准确检查线路故障, 对下位机 MCU 要求较低。因此, 本文所提方法具有更好的单相接地故障检测效果和更广泛的实用性。

## 4 现场试验分析

考虑所提方法在实际工程应用中的有效性和可靠性, 在长沙理工大学 10 kV 配电网真型试验场地搭建如图 13 所示的配电网线路, 中性点采用不接地运行方式。在 3-#4 杆处设置 A 相接地故障, 检测点位于母线上, 故障点距离母线长度为 3.2 km, 且电缆线路长度为 0.2 km, 架空线路为 3 km。试验场真型线路图如图 14 所示。试验过程中通过真空接触器控制故障合闸与否, 故障过渡电阻分别设置为 50 Ω、500 Ω、2.5 kΩ 和弧光接地故障, 故障检测结果如表 11 所示。以故障过渡电阻为 50 Ω 为例, 母线处相电压和电压差值极性值波形分别如图 15 和图 16 所示。

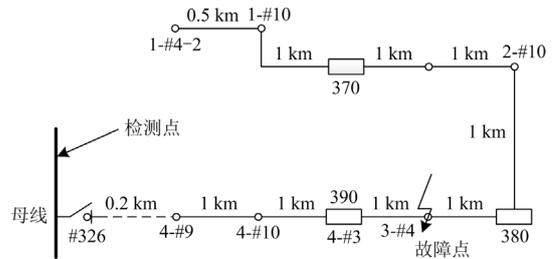


图 13 真型试验场拓扑图

Fig. 13 Topology of real field model

通过真型试验可知,本文所提方法可真实、准确地检测线路的单相接地故障,不易受过渡电阻的影响。适用于 2.5 k $\Omega$  的单相接地故障和弧光接地故障,对故障数据的采样率要求低,下位机即可实现故障的快速检测,具有较好的工程应用价值。



图 14 真型试验场线路图

Fig. 14 Circuit of real field

表 11 真型试验的检测结果

Table 11 Detection results of real field test

故障类型	故障时刻/ms	检测时刻/ms	判断是否正确
50 $\Omega$	4.3	5.2	是
500 $\Omega$	11.9	12.8	是
2.5 k $\Omega$	34.0	35	是
弧光	53.2	55.4	是

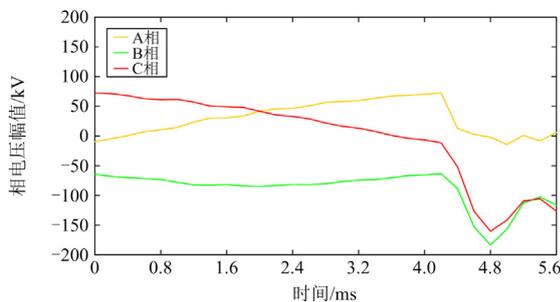


图 15 A 相 50  $\Omega$  接地故障时三相电压波形

Fig. 15 Three-phase voltage waveform with 50  $\Omega$  of phase A

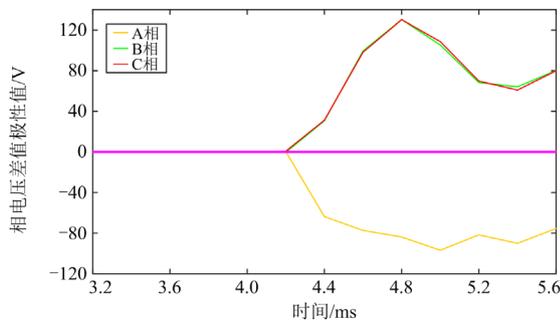


图 16 A 相 50  $\Omega$  接地故障时三相电压差值极性值波形

Fig. 16 Three-phase voltage difference polarity value waveform with 50  $\Omega$  of phase A

## 5 结论

为提升配电网单相接地故障检测的快速性与准确性,本文提出一种基于电压差值极性的配电网单相故障检测方法。相关研究内容与结论如下:

1) 通过分析小电流接地系统单相接地故障时各相电压和中性点电压的幅值特征,证实了小电流接地系统发生单相接地故障,三相电压中必定存在一相电压幅值升高,一相电压幅值降低的情况,为小电流接地系统单相接地故障后快速检测故障提供了理论基础。

2) 利用采样时刻与其前半周期时刻的电压幅值差值,引入电压幅值变量的极性,定义线路的电压差值极性值  $Q$ ,提出单相接地故障的检测判据,实现线路故障的快速准确检测。

3) 根据仿真分析与现场试验可知,所提方法可以实现线路单相接地故障的快速检测,检测结果不易受过渡电阻、故障角度、故障位置和负荷波动的影响。该方法无须高采样率装置,可利用下位机在 3 ms 内实现线路单相接地故障的快速检测,且可检测高达 10 k $\Omega$  的单相接地故障,具有较好的工程应用价值。

未来将继续研究配电网三相电压不平衡时的单相接地故障快速检测方法,全面提升现有方法的实用性、可靠性和准确性。

## 参考文献

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] 王宾,崔鑫,董新洲. 配电网弧光高阻故障检测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 96-107, 377. WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou. Overview of arc high impedance grounding fault detection technologies in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107, 377.
- [3] 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.
- [4] 陈柏宇,喻锟,曾祥君,等. 基于柔性接地装置的不对称配电网接地故障选相选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 1-11. CHEN Boyu, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. A method of phase selection and line selection for grounding faults in an asymmetric distribution network based on a flexible-grounding device[J]. Power System Protection and Control,

- 2022, 50(12): 1-11.
- [5] 陈伟彪, 陈亦平, 姚伟, 等. 基于随机矩阵理论的故障时刻确定和故障区域定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1655-1664, 1902.  
CHEN Weibiao, CHEN Yiping, YAO Wei, et al. A random matrix theory-based approach to fault time determination and fault area location[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1655-1664, 1902.
- [6] GHAEMI A, SAFARI A, AFSHARIRAD H, et al. Situational awareness and deficiency warning system in a smart distribution network based on stacking ensemble learning[J]. Applied Soft Computing, 2022, 128.
- [7] 刘丰, 曾祥君, 谷应科, 等. 基于行波技术的电力线路绝缘预警系统及其现场试验[J]. 南方电网技术, 2019, 13(6): 24-29.  
LIU Feng, ZENG Xiangjun, GU Yingke, et al. Traveling wave based insulation faults early warning system and its field tests[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(6): 24-29.
- [8] 李娜, 江亚群, 黄纯, 等. 线路单相接地故障熄弧时刻捕捉算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1660-1667.  
LI Na, JIANG Yaqun, HUANG Chun, et al. Approach to detect arc extinction time of single-phase transient fault in transmission lines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1660-1667.
- [9] 刘宝稳, 王崇林, 李晓波. 不对称电网不完全接地故障零序电压轨迹及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4959-4967.  
LIU Baowen, WANG Chonglin, LI Xiaobo. Analysis and application of zero-sequence voltage of single-phase ground fault asymmetrical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4959-4967.
- [10] 董立明, 秦苏亚, 张宗熙, 等. 谐振接地系统高阻接地故障能量机理分析[J]. 供用电, 2022, 39(4): 52-58, 83.  
DONG Liming, QIN Suya, ZHANG Zongxi, et al. Analysis of energy mechanism of high resistance grounding fault in resonant grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(4): 52-58, 83.
- [11] 叶远波, 蔡翔, 谢民, 等. 配电网单相接地故障快速选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 96-103.  
YE Yuanbo, CAI Xiang, XIE Min, et al. Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 96-103.
- [12] 刘宝稳, 曾祥君, 马宏忠, 等. 参数不对称配电线路的等效模型与接地故障检测方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 159-167.  
LIU Baowen, ZENG Xiangjun, MA Hongzhong, et al. Equivalent model and grounding fault detection method for distribution lines with asymmetry parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 159-167.
- [13] 李天友, 徐丙垠, 薛永端. 配电网高阻接地故障保护技术及其发展[J]. 供用电, 2018, 35(5): 2-6, 24.  
LI Tianyou, XU Bingyin, XUE Yongduan. High-impedance fault protection of distribution networks and its developments[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(5): 2-6, 24.
- [14] 徐铭铭, 冯光, 张林林, 等. 基于同步波形的配电网故障诊断技术综述[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 138-146.  
XU Mingming, FENG Guang, ZHANG Linlin, et al. Distribution network fault diagnosis technology based on synchronous waveforms[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 138-146.
- [15] 谭振鹏, 龚辉昶, 吴海江, 等. 10 kV 同杆并架线路小电流接地故障仿真分析[J]. 供用电, 2022, 39(2): 48-57, 79.  
TAN Zhenpeng, GONG Huichang, WU Haijiang, et al. Simulation analysis of non-solidly grounding fault in 10 kV multi-circuit distribution lines on the same tower[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 48-57, 79.
- [16] 刘萃萃, 薛永端, 王超, 等. 小电流接地保护跳闸给故障检测与保护带来的机遇与挑战[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 213-220.  
LIU Cuicui, XUE Yongduan, WANG Chao, et al. Opportunities and challenges brought by tripping of small current grounding fault protection to fault detection and protection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 213-220.
- [17] 梁栋, 徐丙垠, 唐毅, 等. 10 kV 架空导线单相触树接地故障模型及其检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5221-5232.  
LIANG Dong, XU Bingyin, TANG Yi, et al. Model and detection method for tree-contact single-phase-to-ground faults on 10 kV overhead lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5221-5232.
- [18] 楚恬歆, 张文海, 瞿科, 等. 小电流接地系统接地型早期故障扰动特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 52-61.  
CHU Tianxin, ZHANG Wenhai, QU Ke, et al. Grounded incipient fault analysis in a non-solidly grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 52-61.
- [19] 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.
- [20] 杨尚瑾, 武守远, 戴朝波. 基于电流波形曲率的短路故障快速识别方法[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 551-556. YANG Shangjin, WU Shouyuan, DAI Chaobo. A method to fast recognize short-circuit fault based on curvature of line current waveform[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 551-556.
- [21] 金雪芬, 戴朝波, 武守远, 等. 根据线路电流斜率快速识别故障信号的方法[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 29-34. JIN Xuefen, DAI Chaobo, WU Shouyuan, et al. Fast fault signal identification method using line current slope[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 29-34.
- [22] WANG Xiaowei, GAO Jie, WEI Xiangxiang, et al. High impedance fault detection method based on variational mode decomposition and Teager-Kaiser energy operators for distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6041-6054.
- [23] 刘硕, 刘灏, 毕天姝, 等. 考虑高阻接地的配电网故障检测方法[J/OL]. 电网技术: 1-12[2023-02-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20221026.1432.005.html>. LIU Shuo, LIU Hao, BI Tianshu, et al. Fault detection method of distribution network considering high impedance faults[J]. Power System Technology: 1-12[2023-02-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20221026.1432.005.html>.
- [24] 郭亮, 杜欢, 王晓卫, 等. 基于磁场检测与多判据融合的架空线路接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 24-34. GUO Liang, DU Huan, WANG Xiaowei, et al. Single phase to ground fault location method of an overhead line based on magnetic field detection and multi-criteria fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 24-34.
- [25] 熊思衡, 刘亚东, 方健, 等. 配电线路早期故障辨识方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3970-3976. XIONG Siheng, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Detection method of incipient faults of power distribution lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3970-3976.
- [26] FAN Min, XIA Jialu, MENG Xinyu, et al. Single-phase grounding fault types identification based on multi-feature transformation and fusion[J]. Sensors, 2022, 22(9): 3521.
- [27] 刘科研, 叶学顺, 李昭, 等. 基于多分辨率小波变换的配电网高阻接地故障检测方法[J/OL]. 高电压技术: 1-12[2022-11-19]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220027>. LIU Keyan, YE Xueshun, LI Zhao, et al. Detection method of high resistance grounding fault in distribution network based on multi-resolution wavelet transform[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-12[2022-11-19]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220027>.
- 
- 收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-03-07
- 作者简介:
- 刘 丰(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 350117159@qq.com
- 曾祥君(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: eexjzeng@qq.com
- 谢季为(1993—), 男, 博士, 通信作者, 研究方向为电力系统保护与控制. E-mail: fengxlw@qq.com
- (编辑 周金梅)