

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241015

基于幅值比与相位差的灵活接地系统单相高阻故障检测方法

张帆¹, 王晓卫¹, 王新茜¹, 范林慧¹, 王毅钊², 白浩³

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510663)

摘要: 灵活接地系统的保护主要采用小电阻接地系统的定时限零序过电流保护, 适应过渡电阻能力较低, 导致现有方法难以有效检测出故障馈线。针对这一问题, 提出了一种基于零序电流幅值比与相位差的检测方法。首先, 通过时域方程分析小电阻投入后各馈线与中性点的零序电流。其次, 结合配网固有参数, 得出小电阻投入后各馈线幅值比与相位差的具体差异。最后, 通过比较故障馈线与中性点零序电流的幅值比, 发现其明显大于健全馈线, 由此构造判据 1。通过分析故障馈线与中性点零序电流的相位差, 发现其与健全馈线相差 90°, 由此构造判据 2。仿真与实测结果表明, 该方法能够准确实现灵活接地系统的单相高阻接地故障检测, 且不受电流互感器反接、数据缺失、间歇性电弧以及强噪声的影响。

关键词: 灵活接地系统; 单相高阻故障; 幅值比; 相位差

Single-phase high-impedance fault detection method for flexible grounding system based on amplitude ratio and phase difference

ZHANG Fan¹, WANG Xiaowei¹, WANG Xinqian¹, FAN Linhui¹, WANG Yizhao², BAI Hao³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;

2. Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China;

3. Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Protection in flexible grounding systems mainly relies on time-limited zero-sequence overcurrent protection methods used in low-resistance grounding systems, which have limited capability to tolerate transition resistance. As a result, existing methods struggle to effectively detect faulty feeders. Aiming at this problem, a detection method based on the amplitude ratio and phase difference of zero-sequence currents is proposed. First, time-domain equations are used to analyze the zero-sequence currents between each feeder and the neutral point after low-resistance grounding. Then, by incorporating the inherent parameters of the distribution network, the specific differences between the amplitude ratio and phase difference of each feeder after adding the small resistors are obtained. Finally, by comparing the amplitude ratio of the zero-sequence current between the faulty feeder and the neutral point, it is found to be significantly higher than that of healthy feeders, thus forming Criterion 1. Additionally, by analyzing the phase difference of the zero-sequence current between the faulty feeder and the neutral point, it is found to differ by 90° from healthy feeders, thus forming Criterion 2. Simulation and field test results indicate that the proposed method can accurately detect single-phase high-impedance ground faults in flexible grounding systems, and is robust against current transformer polarity reversal, data loss, intermittent arcs, and strong noise.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177114 and No. 61403127).

Key words: flexible grounding systems; single-phase high-impedance fault; amplitude ratio; phase difference

0 引言

随着城市配电网的高速发展, 南方电网公司提出, 对供电可靠性要求较高的 10 kV 配电网系统,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177114, 61403127); 国网陕西省电力有限公司科技项目资助(5226KY23001U)

可采用灵活接地方式^[1-2], 并发布了《消弧线圈并联小电阻接地成套装置技术规范(征求意见稿)》^[3]。灵活接地系统的工作原理为: 配电网正常运行时, 中性点并联小电阻开关 S 断开, 当发生接地故障时, 消弧线圈首先自动补偿故障电流, 小电阻开关 S 进入延时等待阶段。延时到达后, 若故障未消除, S 将自动闭合, 投入小电阻以增大故障电流^[4]。灵活

接地系统充分发挥了消弧线圈补偿故障电流与小电阻抑制暂态过电压的优点^[5-6]。目前,灵活接地系统的保护主要采用小电阻接地系统的定时限零序过电流保护,反映过渡电阻能力为 $90\sim 140\ \Omega$ ^[7]。因而,发生高阻接地故障时,定时限零序过电流保护仍存在灵敏度不足的问题,可能造成保护拒动。针对灵活接地系统单相高阻故障的检测,可分为基于暂态量和稳态量的检测方法。基于暂态量的检测方法主要是利用小电阻投入后产生的暂态电压与电流来实现故障检测,由于小电阻为阻性分量,投入后产生的暂态过程持续时间短,故障特征难以提取,因而,针对灵活接地系统的暂态检测方法研究较少。文献[8]利用小电阻投入后各馈线暂态零序电流与零序电压的比例系数不同实现故障检测;文献[9]通过计算小电阻投入后各馈线暂态零序电流的综合相似系数实现故障检测。文献[8-9]利用暂态信号实现了故障检测,但由于缺乏充分的理论分析,因而该方法不具备普遍适用性。

基于稳态量的检测方法主要是利用小电阻投入后产生的稳态电流与电压实现故障检测,文献[10-11]利用小电阻投入后各馈线零序电流的相位变化实现故障检测;文献[12-13]利用小电阻投入后各馈线零序电流与零序电压的相位差实现故障检测;文献[14]通过计算各馈线零序功率实现故障检测。文献[10-14]的方法不受过渡电阻的影响,但在电流互感器反接时,上述方法易发生误判。文献[15]利用小电阻投入后故障馈线零序导纳模值增大,而健全馈线零序导纳模值不变实现故障检测;文献[16]利用小电阻投入后故障馈线零序阻抗大于 $476.2\ \Omega$,而健全馈线小于该值实现故障检测。文献[15-16]的方法准确率高,不受线路参数影响,但会受零序电压互感器断线影响。文献[17]在小电阻投入后将系统等效为小电阻系统,然后通过构建内积实现故障检测。该方法适应能力强,但小电阻投入前后数据窗的选择缺乏完整的理论依据。

尽管上述文献对灵活接地系统的单相高阻接地故障进行了深入的研究,但仍存在以下问题:

- 1) 现有的高阻接地故障检测判据单一,难以应对复杂多变的故障工况,尤其是发生极端工况时。
- 2) 在小电阻投入后,母线零序电压会显著降低,因而在高阻故障情况下,基于零序电压的方法可能无法准确检测出故障馈线。

1 单相高阻故障特征分析

1.1 单相高阻故障零序网络

配网线路的对地容抗远大于其零序阻抗,为简

化分析,忽略线路阻抗,其零序等效网络如图1所示^[18]。系统共有 n 条馈线,假定第 n 条馈线为故障馈线; i_{0f} 、 C_{0n} 分别为故障馈线首端的零序电流与零序对地电容; $3R_f$ 为故障馈线零序接地电阻; i_{0k} 、 C_{0k} ($k=1,2,\dots,n-1$)分别为健全馈线零序电流与零序对地电容; u_0 为母线零序电压; u_{0f} 为故障点处的虚拟电源,其值等于故障前反相电压; $3L_p$ 为消弧线圈零序电抗; $3R_n$ 为零序并联电阻; i_{0Lp} 和 i_{0Rn} 分别为流过消弧线圈与并联小电阻的零序电流。

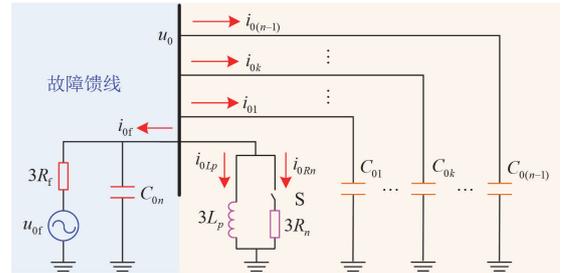


图1 零序等效网络

Fig. 1 Zero sequence equivalent network

1.2 各馈线及中性点零序电流

灵活接地系统发生高阻接地故障约 $10\text{ s}^{[2-3]}$ 后,若故障持续存在,则判定为永久性故障,开关S闭合。根据图1零序网络列写微分方程,如式(1)^[19]所示。

$$\begin{cases} u_{0f} = 3R_f \left(C_{0\Sigma} \frac{du_0}{dt} + i_{0Lp} + \frac{u_0}{3R_n} \right) + u_0 \\ u_0 = 3L_p \frac{di_{0Lp}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C_{0\Sigma} = \sum_{k=1}^{n-1} C_{0k} + C_{0n}$ 。

上述方程的特征根如式(2)所示。

$$\begin{cases} p_1 = -\frac{1}{6R_{\text{eq}}C_{0\Sigma}} + \sqrt{\left(\frac{1}{6R_{\text{eq}}C_{0\Sigma}} \right)^2 - \frac{1}{3L_pC_{0\Sigma}}} \\ p_2 = -\frac{1}{6R_{\text{eq}}C_{0\Sigma}} - \sqrt{\left(\frac{1}{6R_{\text{eq}}C_{0\Sigma}} \right)^2 - \frac{1}{3L_pC_{0\Sigma}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_{eq} 为 R_n 与 R_f 并联的等效阻抗。由于 $R_n = 10\ \Omega$ ^[20],在小电阻投入后系统将呈过阻尼状态。

开关S闭合瞬间,假定故障点处的零序电压为 $U_m \sin(\omega_0 t + \theta)$,消弧线圈电流为 $I_{Lm} \sin(\omega_0 t + \alpha)$,其中: U_m 、 θ 分别为小电阻投入时刻故障点的电压幅值、初相角; I_{Lm} 、 α 分别为小电阻投入时刻消弧线圈的幅值、初相角; ω_0 为工频角频率^[21]。所以,

流经消弧线圈的零序电流可设为

$$i_{0Lp} = B\sin(\omega_0 t + \varphi) + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (3)$$

式中: B 、 A_1 、 A_2 分别为表征稳态和暂态特性的系数, 具体表达式见文献[8]; φ 为小电阻投入后消弧线圈的初相角。

由此可得, 母线零序电压的表达式为

$$u_0 = 3L_p \frac{di_{0Lp}}{dt} = 3\omega_0 L_p B \cos(\omega_0 t + \varphi) + 3L_p (p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}) \quad (4)$$

健全馈线零序电流的表达式为

$$i_{0k} = C_{0k} \frac{du_0}{dt} = -3\omega_0^2 L_p C_{0k} B \sin(\omega_0 t + \varphi) + 3L_p C_{0k} (p_1^2 A_1 e^{p_1 t} + p_2^2 A_2 e^{p_2 t}) \quad (5)$$

故障馈线零序电流的表达式为

$$i_{0f} = - \left[3L_p (C_{0\Sigma} - C_{0n}) p_1^2 + 1 + \frac{L_p p_1}{R_n} \right] A_1 e^{p_1 t} - \left[3L_p (C_{0\Sigma} - C_{0n}) p_2^2 + 1 + \frac{L_p p_2}{R_n} \right] A_2 e^{p_2 t} + [3\omega_0^2 L_p (C_{0\Sigma} - C_{0n}) - 1] B \sin(\omega_0 t + \varphi) - \frac{\omega_0 L_p B}{R_n} \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (6)$$

小电阻投入后, 中性点零序电流 i_{0N} 为消弧线圈与小电阻零序电流之和, 其表达式为

$$i_{0N} = B \sin(\omega_0 t + \varphi) + \frac{\omega_0 L_p}{R_n} B \cos(\omega_0 t + \varphi) + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \frac{L_p}{R_n} (p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}) \quad (7)$$

通过上述分析, 得出了健全馈线、故障馈线及中性点的零序电流表达式。

1.3 各馈线稳态零序电流

健全馈线首端稳态零序电流的表达式为

$$i_{0ks} = -3\omega_0^2 L_p C_{0k} B \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (8)$$

在小电阻投入后, 故障馈线与中性点的稳态零序电流均包含正弦与余弦分量。为简化计算, 本文将进行简化或合并, 将其化为仅包含余弦分量。

1) 定义故障馈线稳态零序电流中余弦分量与正弦分量的幅值比为 k_1 , 如式(9)所示。

$$k_1 = \frac{-(\omega_0 L_p) / R_n}{[3\omega_0^2 L_p (C_{0\Sigma} - C_{0n}) - 1]} = \frac{\omega_0}{\left(\frac{v}{v-1} \frac{1}{L_p} + 3\omega_0^2 C_{0n} \right) R_n} \quad (9)$$

式中: v 为消弧线圈补偿脱谐度, $v = 1 - 1/(3\omega_0^2 L_p C_{0\Sigma})$ 。由式(9)可知, k_1 随着 C_{0n} 和 $v/(v-1)$ 的增大而减小, 随着 L_p 的增大而增大, 当 C_{0n} 和 $v/(v-1)$ 取最大值、 L_p 取最小值时, 可求得 k_1 的最小值。

根据文献[22], 系统电容电流大于 20 A 时, 应装设消弧线圈进行补偿, v 在过补偿状态下的取值约为 $-10\% \sim -5\%$; 通常, 10 kV 配电系统单条馈线对地电容电流不超过 50 A, 系统总对地电容电流不超过 200 A。由此可得消弧线圈电感的变化范围为: $0.0835 \text{ H} \leq L_p \leq 0.875 \text{ H}$; 单条馈线的分布电容变化范围为: $0 \text{ F} \leq C_{0k} \leq 9.188 \times 10^{-6} \text{ F}$; 系统总分布电容变化范围为: $3.676 \times 10^{-6} \text{ F} \leq C_{0\Sigma} \leq 3.676 \times 10^{-5} \text{ F}$ 。

在过补偿状态下, 即 $-10\% \leq v \leq -5\%$, 计算可得 $\max[v/(v-1)] = 1/11$, 取 $L_p = 0.0835 \text{ H}$ 、 $C_{0n} = 9.188 \times 10^{-6} \text{ F}$, 可求得 k_1 的最小值 $k_{1\min} = 8.247$ 。如图 2 所示, 取 $C_{0n} = 9.188 \times 10^{-6} \text{ F}$, 可得 k_1 随 v 及 L_p 的变化范围, 从图中可得出 $k_{1\min} = 8.247$ 。这表明, 故障馈线稳态零序电流中余弦分量所占比重远远大于正弦分量, 所以, 故障馈线稳态零序电流可简化为

$$i_{0fs} = -\frac{\omega_0 L_p}{R_n} B \cos(\omega_0 t + \varphi) = \frac{\omega_0 L_p}{R_n} B \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi) \quad (10)$$

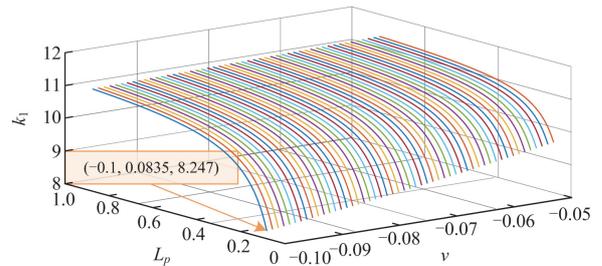


图 2 k_1 随 v 及 L_p 的变化情况

Fig. 2 Variations of k_1 with v and L_p

2) 中性点稳态零序电流的表达式同样由正弦与余弦分量构成。同理, 通过计算余弦分量与正弦分量的幅值比进行化简, 求得其最小值为 2.623, 但这并不能说明余弦分量所占比重远远大于正弦分量。根据三角函数辅助角公式, 将中性点稳态零序电流合并为仅含余弦分量, 其结果为

$$i_{0NS} = \sqrt{1 + (\omega_0 L_p / R_n)^2} B \cos(\omega_0 t + \varphi - \delta) \quad (11)$$

式中: $\delta = \arctan[R_n / (\omega_0 L_p)]$ 。

2 单相高阻故障检测判据

2.1 零序电流幅值比

1) 定义健全馈线与中性点稳态零序电流的幅值比为 k_2 ，如式(12)所示。

$$k_2 = \frac{3\omega_0^2 L_p C_{0k} B}{\sqrt{1 + (\omega_0 L_p / R_n)^2} B} = \frac{3\omega_0 C_{0k}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega_0 L_p}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_n}\right)^2}} \quad (12)$$

由式(12)可知， k_2 随着 C_{0k} 的增大而增大，随着 $1/(\omega_0 L_p)$ 的增大而减小，当 C_{0k} 、 L_p 均取最大值时，可求得 k_2 的最大值 $k_{2\max}$ ，如图3所示。当 $C_{0k} = 9.188 \times 10^{-6}$ F， $L_p = 0.875$ H时，可得： $k_{2\max} = 0.0865$ 。

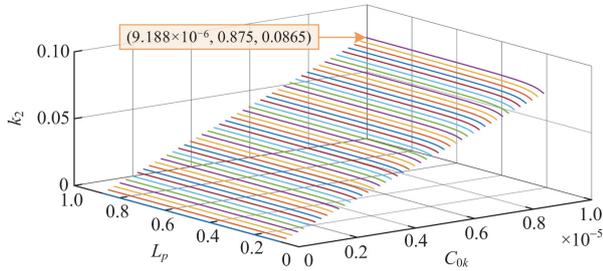


图3 k_2 随 C_{0k} 及 L_p 的变化情况

Fig. 3 Variations of k_2 with C_{0k} and L_p

2) 定义故障馈线与中性点稳态零序电流的幅值比为 k_3 ，如式(13)所示。

$$k_3 = \frac{(\omega_0 L_p B) / R_n}{\sqrt{1 + (\omega_0 L_p / R_n)^2} B} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_n}{\omega_0 L_p}\right)^2 + 1}} \quad (13)$$

分析式(13)可知， k_3 随着 $R_n/(\omega_0 L_p)$ 的增大而减小，所以当 L_p 取最小值时，可求得 k_3 的最小值 $k_{3\min} = 0.934$ 。

综上所述，小电阻投入后故障馈线与中性点零序电流幅值比的最小值远远大于健全馈线与中性点零序电流幅值比的最大值，即 $k_{3\min} \gg k_{2\max}$ 。

2.2 零序电流相位差

由式(10)与式(11)可知，故障馈线与中性点稳态零序电流均为同频余弦函数，因此，将健全馈线稳态零序电流同样化为余弦函数，具体为

$$i_{0kS} = -3\omega_0^2 L_p C_{0k} B \sin(\omega_0 t + \varphi) = 3\omega_0^2 L_p C_{0k} B \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (14)$$

此时，健全馈线、故障馈线与中性点的稳态零序电流均为同频余弦函数，两个同频函数的相位差

等于它们相位直接相减的结果。

1) 健全馈线与中性点稳态零序电流的相位差为 γ_{11} ，如式(15)所示。

$$\gamma_{11} = 90^\circ + \arctan(R_n/(\omega_0 L_p)) \quad (15)$$

2) 故障馈线与中性点稳态零序电流的相位差为 γ_{21} ，如式(16)所示。

$$\gamma_{21} = 180^\circ + \arctan(R_n/(\omega_0 L_p)) \quad (16)$$

由于 $0.0835 \text{ H} \leq L_p \leq 0.875 \text{ H}$ ，所以， γ_{11} 与 γ_{21} 的变化范围分别为： $92.083^\circ \leq \gamma_{11} \leq 110.867^\circ$ 、 $182.083^\circ \leq \gamma_{21} \leq 200.867^\circ$ 。考虑现场操作中，电流互感器受人因素为影响，易发生反接。发生反接时，电流互感器的相位将与正常接线时相差 180° 。基于此，在 γ_{11} 、 γ_{21} 的基础上可推导出健全馈线、故障馈线在电流互感器反接时与中性点零序电流的相位差 γ_{12} 、 γ_{22} ，即 $272.083^\circ \leq \gamma_{12} \leq 290.867^\circ$ 、 $2.083^\circ \leq \gamma_{22} \leq 20.867^\circ$ 。以小电阻投入后中性点稳态零序电流的方向为参考，得到小电阻投入后各馈线与中性点稳态零序电流的相位差关系，如图4所示。

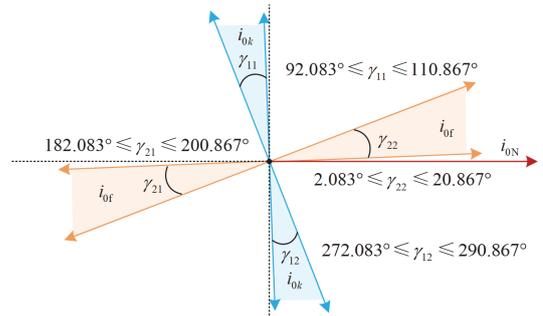


图4 小电阻投入后各馈线与中性点零序电流相位差

Fig. 4 Phase difference of zero sequence current between each feeder and neutral after small resistor inputs

考虑现场测量误差、参数误差等不确定因素的影响，为了确保选线结果的可靠性，将图4中的空白区域以过原点的角平分线为界进行均分，如图5所示。由此可得，健全馈线与中性点零序电流的相位差 γ_1 的变化范围为： $(56.475^\circ, 146.475^\circ)$ 或 $(236.475^\circ, 326.475^\circ)$ ；故障馈线与中性点零序电流的相位差 γ_2 的变化范围为： $(146.475^\circ, 236.475^\circ)$ 或 $(-33.525^\circ, 56.475^\circ)$ 。

2.3 检测判据及流程

综上，通过构造各馈线与中性点零序电流的幅值比与相位差可实现高阻故障检测，具体判据如下。

1) 故障检测判据 1：计算小电阻投入后各馈线与中性点稳态零序电流的幅值比，将幅值比最大的馈线判定为故障馈线。

2) 故障检测判据 2: 计算小电阻投入后各馈线与中性点稳态零序电流的相位差, 若位于 $(146.475^\circ, 236.475^\circ)$ 或 $(-33.525^\circ, 56.475^\circ)$ 范围内, 则为故障馈线; 若位于 $(56.475^\circ, 146.475^\circ)$ 或 $(236.475^\circ, 326.475^\circ)$ 范围内, 则为健全馈线。

综上, 故障检测流程如图 6 所示。

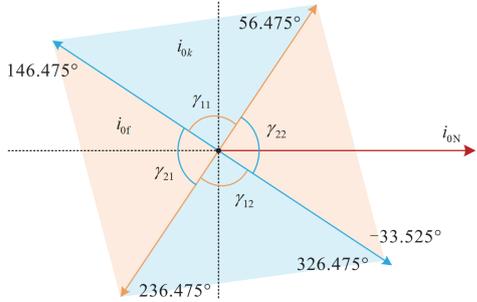


图 5 修改后馈线与中性点零序电流相位差

Fig. 5 Phase difference between the modified feeder current and neutral point zero-sequence current

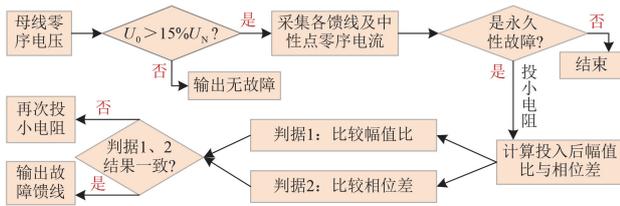


图 6 故障检测流程

Fig. 6 Fault detection process

3 仿真验证

3.1 系统模型及参数

利用 PSCAD 搭建 10 kV 灵活接地系统仿真模型, 如图 7 所示, 线路参数如表 1 所示。系统采样率为 50 kHz, 各馈线首端电流互感器记为 $m_1 - m_4$ 。系统采用过补偿, 过补偿度为 10%。消弧线圈电感为 0.2996 H, 并联小电阻为 10 Ω 。

3.2 典型工况验证

设置 l_3 电缆线发生单相高阻接地故障, 接地电阻为 3000 Ω 。计算各馈线零序电流幅值比与相位差, 如图 8 所示。由图可知, 小电阻投入后, 故障馈线与中性点零序电流的幅值比远远大于健全馈线; 故障馈线、健全馈线与中性点零序电流相位差为 90°。这表明该方法可实现灵活接地系统的故障检测。针对现场发生高阻故障时, 在小电阻投入后, 健全馈线零序电流幅值较小无法被电流互感器采集的问题, 将所提双重判据修改为单一判据。具体为: 在小电阻投入后, 对于未能采集到零序电流信息的馈线, 可将其幅值置为 0, 由于故障馈线与中性点

零序电流引入了阻性电流, 其幅值较大, 此时通过计算幅值比可实现故障检测。

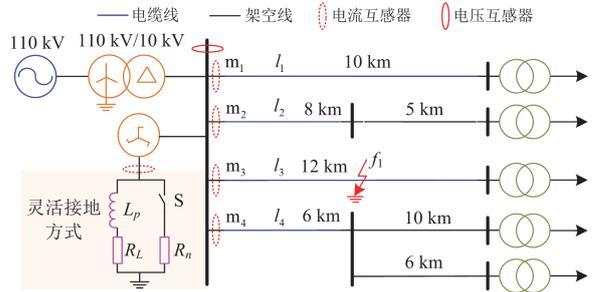


图 7 灵活接地系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of flexible grounding system

表 1 线路参数

Table 1 Line parameters

线路类型	相序	$R/(\Omega/\text{km})$	$C/(\mu\text{F}/\text{km})$	$L/(\text{mH}/\text{km})$
架空线	正序	0.1700	0.0097	1.2100
	零序	0.2300	0.0080	5.4780
电缆线	正序	0.2700	0.3390	0.2550
	零序	2.7000	0.2800	1.0190

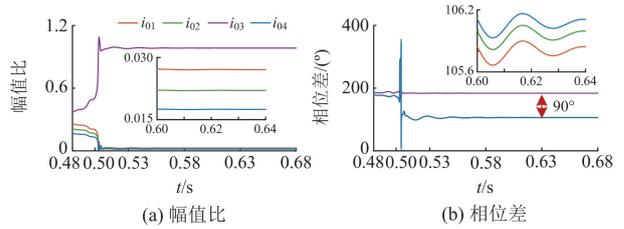


图 8 各馈线与中性点零序电流的幅值比与相位差

Fig. 8 Amplitude ratio and phase difference of zero sequence current between each feeder and neutral

为进一步验证该方法的适应性, 首先针对不同故障位置进行仿真验证。表 2 为不同故障位置时该方法的检测结果, 其中, D 为故障馈线。

表 2 不同故障位置时检测结果

Table 2 Detection results at different fault locations

D/km	R_f/Ω	判据 1、2 计算结果
l_1	500	幅值比: [0.983, 0.022, 0.032, 0.017]
		相位差: [184.04°, 105.98°, 105.63°, 106.10°]
l_2	3000	幅值比: [0.027, 0.982, 0.032, 0.017]
		相位差: [105.85°, 184.32°, 105.65°, 106.12°]
l_3	3000	幅值比: [0.027, 0.022, 0.984, 0.017]
		相位差: [105.85°, 106.01°, 183.73°, 106.12°]
l_4	500	幅值比: [0.027, 0.022, 0.032, 0.981]
		相位差: [105.83°, 105.98°, 105.63°, 184.59°]

根据表 2 可知, 该方法不受故障位置影响, 能够准确实现灵活接地系统高阻故障检测。针对不同

故障初相角、接地电阻以及补偿度进行仿真，并计算各馈线的幅值比与相位差，结果如图 9—图 11 所示。

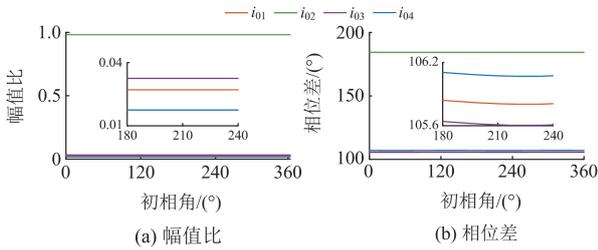


图 9 不同初相角计算结果

Fig. 9 Calculated results of different initial phase angles

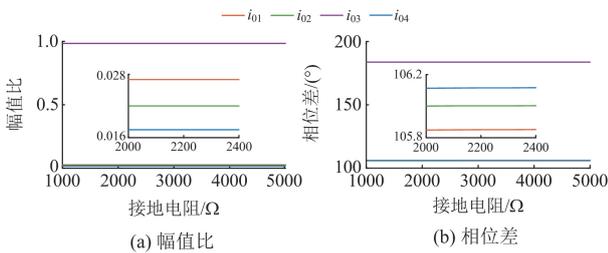


图 10 不同接地电阻计算结果

Fig. 10 Calculated results of different grounding resistances

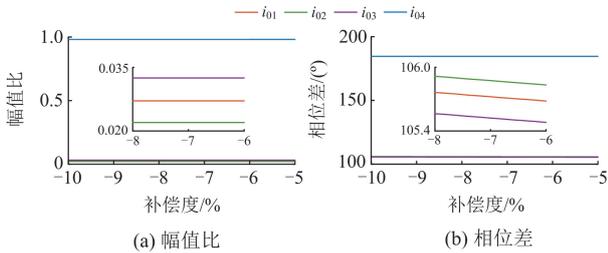


图 11 不同补偿度计算结果

Fig. 11 Calculated results of different compensation degrees

由图 9—图 11 可知，改变故障初相角、接地电阻以及补偿度时，故障馈线与中性点零序电流的幅值比始终在 1 附近，而健全馈线的幅值比远远小于 1；故障馈线、健全馈线与中性点零序电流的相位差始终为 90°。这表明该方法不受初相角、接地电阻以及补偿度变化的影响。

3.3 电流互感器反接与数据缺失

验证电流互感器反接与数据缺失时该方法的鲁棒性，具体的仿真工况如表 3 所示。设置 I_3 线路发生高阻接地故障，接地电阻为 1500 Ω。电流互感器正常工作时，计算幅值比和相位差判据，其结果为：[0.027, 0.022, 0.984, 0.018]、[105.85°, 105.99°, 183.73°, 106.11°]，由此，判定 I_3 为故障馈线。

在相同的接地故障条件下，增加 No. 4 所示的故障工况，结果如图 12 所示。由图 12 可知，馈线 I_3 、

I_4 出现明显的的数据缺失，馈线 I_1 的波形与健全馈线相反。计算图 12 中各馈线与中性点零序电流的幅值比和相位差，结果为：[0.027, 0.022, 0.666, 0.012]、[285.85°, 106.00°, 183.71°, 105.78°]。根据计算结果可知，馈线 I_3 的幅值比远大于其他馈线，相位差位于故障馈线范围内，判定 I_3 为故障馈线，根据馈线 I_1 的相位差可推断其发生反接。这表明该方法在电流互感器反接与数据缺失时可实现故障检测，且根据相位差可推出电流互感器是否反接。

表 3 电流互感器反接与数据缺失

Table 3 CT reverse connection and missing data

工况	电流互感器反接	数据缺失
No. 1	m_4 发生反接	m_1 和 m_2 缺失 10%
No. 2	m_3 发生反接	m_1 和 m_3 缺失 20%
No. 3	m_2 发生反接	m_2 和 m_3 缺失 30%
No. 4	m_1 发生反接	m_3 和 m_4 缺失 40%

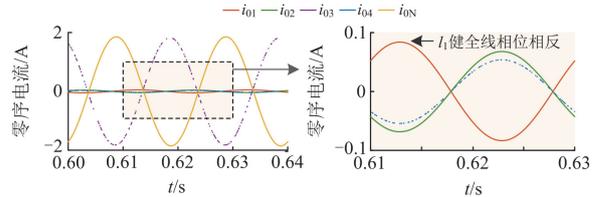


图 12 No. 4 工况下各馈线零序电流

Fig. 12 Zero sequence current for each feeder under No. 4

表 4 为电流互感器反接与数据缺失时，该方法计算幅值比和相位差结果。由表 4 可知，电流互感器发生反接和数据缺失时，综合幅值比与相位差判据可准确实现故障检测。例如，馈线 I_4 在 No. 4 工况下发生单相高阻接地故障，接地电阻为 3000 Ω，计算幅值比与相位差结果为：[0.027, 0.022, 0.021, 0.669]、[285.86°, 106.01°, 105.65°, 184.98°]，根据结果可知，馈线 I_4 的幅值比最大、相位差在故障馈线范围内。因而，综合判据 1 与判据 2，可确定故障馈线为 I_4 。

表 4 电流互感器反接及数据缺失时检测结果

Table 4 CT reverse connection and missing data detection results

D/km	R_f/Ω	工况	判据 1、2 计算结果
I_1	500	No. 1	幅值比：[0.874, 0.020, 0.032, 0.017] 相位差：[184.42°, 105.58°, 105.63°, 286.10°]
I_2	1000	No. 2	幅值比：[0.022, 0.982, 0.026, 0.017] 相位差：[105.59°, 184.33°, 285.38°, 106.11°]
I_3	2000	No. 3	幅值比：[0.027, 0.016, 0.715, 0.017] 相位差：[105.85°, 286.61°, 183.28°, 106.11°]
I_4	3000	No. 4	幅值比：[0.027, 0.022, 0.021, 0.669] 相位差：[285.86°, 106.01°, 105.65°, 184.98°]

3.4 间歇性电弧故障

采用 Emanuel 模型模拟电弧故障, 如图 13(a) 所示, 表 5 为模拟 3 种不同弧光高阻故障时 Emanuel 模型对应的具体参数。由图 13(b) 可以看出, 该模型可以得到电弧电流的所有特性, 例如: 间歇性、非线性、随机性、累积性和不对称性^[23]。该模型由两个直流电源 V_+ 和 V_- 以及相应的二极管 D_+ 和 D_- 组成, 用于形成正、负半周电流路径。

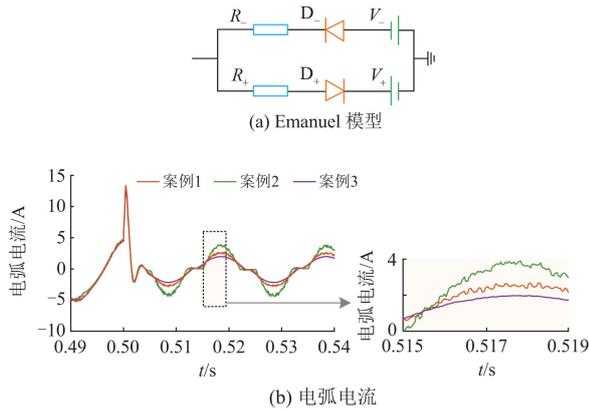


图 13 故障馈线电弧电流

Fig. 13 Arc current of faulty feeder

表 5 不同案例下高阻参数

Table 5 High impedance parameters in different cases

案例	V_+/kV	V_-/kV	R_+/Ω	R_-/Ω	步长/ms
案例 1	2.2±0.45	2.0±0.40	800	750	0.1
案例 2	3.8±0.38	3.6±0.36	400	350	0.1
案例 3	1.2±0.12	1.0±0.10	1200	1100	0.1

表 6 为不同馈线发生不同电弧故障时, 计算幅值比与相位差的结果。由表 6 可知, 发生电弧故障时, 该方法可准确实现故障检测。例如, 馈线 l_1 在案例 1 工况下, 计算幅值比和相位差结果为: $[0.983, 0.022, 0.032, 0.017]$ 、 $[184.02^\circ, 105.77^\circ, 104.98^\circ, 105.79^\circ]$, 馈线 l_1 的幅值比远大于其他馈线, 相位差位于故障馈线范围内, 由此可判定 l_1 为故障馈线。

表 6 电弧故障时检测结果

Table 6 Detection results during arc fault

D/km	工况	判据 1、2 计算结果
l_1	案例 1	幅值比: $[0.983, 0.022, 0.032, 0.017]$
		相位差: $[184.02^\circ, 105.77^\circ, 104.98^\circ, 105.79^\circ]$
l_2	案例 3	幅值比: $[0.027, 0.982, 0.032, 0.017]$
		相位差: $[105.88^\circ, 184.33^\circ, 105.58^\circ, 106.01^\circ]$
l_3	案例 2	幅值比: $[0.027, 0.022, 0.982, 0.018]$
		相位差: $[106.92^\circ, 107.21^\circ, 183.76^\circ, 107.21^\circ]$
l_4	案例 1	幅值比: $[0.027, 0.022, 0.033, 0.980]$
		相位差: $[106.82^\circ, 106.50^\circ, 106.60^\circ, 184.63^\circ]$

3.5 强噪声干扰

本节验证强噪声干扰时, 该方法的有效性。设置 l_1 线路发生高阻接地故障, 接地电阻为 3000Ω 。

图 14(a) 为小电阻投入前后各馈线及中性点零序电流的原始波形, 向其加入 1 dB 强噪声干扰, 结果如图 14(b) 所示。由图 14(b) 可看出, 各馈线零序电流已被强噪声淹没。计算图 14(a) 和图 14(b) 波形的幅值比和相位差, 其结果分别为: $[0.983, 0.022, 0.033, 0.017]$ 、 $[184.04^\circ, 106.04^\circ, 105.69^\circ, 106.15^\circ]$; $[0.937, 0.022, 0.033, 0.017]$ 、 $[184.55^\circ, 106.96^\circ, 105.29^\circ, 106.68^\circ]$ 。根据结果可知, 强噪声干扰和无噪声时, 计算结果变化较小, 可准确判出故障馈线, 表明该方法不受噪声干扰。

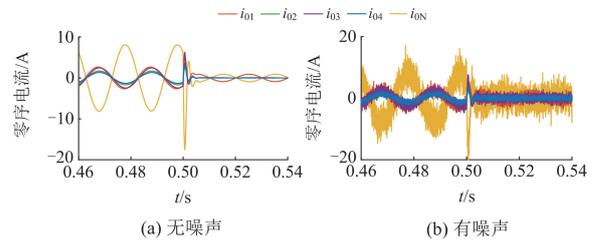


图 14 无噪声和有噪声时零序电流

Fig. 14 Zero-sequence current without and with noise

为进一步验证该方法的抗噪声能力, 分别对各馈线设置高阻接地故障, 并加入不同信噪比的高斯白噪声, 检测结果如表 7 所示。根据表 7 计算结果可知, 该方法不受强噪声影响, 可实现故障检测。

表 7 强噪声干扰时检测结果

Table 7 Detection results at strong noise interference

D/km	R_f/Ω	SNR/dB	判据 1、2 计算结果
l_2	2000	5	幅值比: $[0.028, 1.016, 0.033, 0.018]$
			相位差: $[105.37^\circ, 182.11^\circ, 103.89^\circ, 104.38^\circ]$
l_3	2500	1	幅值比: $[0.027, 0.023, 1.032, 0.017]$
			相位差: $[105.90^\circ, 104.99^\circ, 182.65^\circ, 106.15^\circ]$
l_3	3000	-1	幅值比: $[0.026, 0.021, 0.956, 0.016]$
			相位差: $[109.86^\circ, 107.74^\circ, 187.98^\circ, 110.02^\circ]$
l_4	3000	-5	幅值比: $[0.027, 0.021, 0.031, 0.964]$
			相位差: $[100.45^\circ, 104.16^\circ, 100.56^\circ, 182.96^\circ]$

3.6 三相负载不对称

实际应用中, 各馈线的三相负载并非完全对称, 因此, 验证该方法在该工况下的适应性。图 15(a) 为正常运行时, 三相负载对称情况下馈线 l_1 的三相电流, 图 15(b) 为发生单相高阻接地故障时, 三相负载不对称情况下故障馈线 l_1 的三相电流。计算图 15(b) 情况时各馈线的幅值比与相位差, 其结果为: $[0.983, 0.022, 0.033, 0.017]$ 、 $[184.04^\circ, 105.96^\circ, 105.61^\circ, 106.18^\circ]$, 由此可确定为 l_1 为故障馈线。进一步表明, 即使在三相负载不对称的情况下, 该方法仍能够准

确检测出故障馈线。

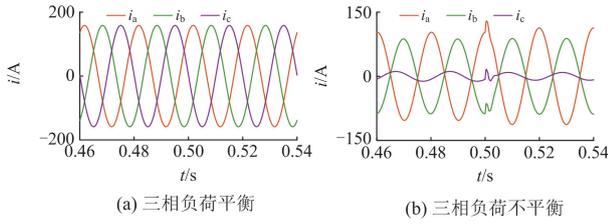


图 15 l_1 的三相电流波形

Fig. 15 Three-phase current waveform of l_1

3.7 两点相继接地故障

配电网发生两点接地故障时，现有的单相故障检测装置无法将故障馈线全部切除，导致故障长期存在。本节将验证该方法在该极端工况下的适应性。

故障检测判据 1 只能检测单一馈线，在两点相继接地故障情况下，可通过设定阈值来实现故障检测。由于 $k_{2\max} = 0.0865$ ，所以可设阈值为 0.1，当幅值比大于该阈值时，判定为故障馈线。如图 16 所示，馈线 l_3 和 l_4 相继发生单相高阻接地故障，接地电阻分别为 $1000\ \Omega$ 和 $1500\ \Omega$ ，计算各馈线零序电流幅值比与相位差，结果为： $[0.027, 0.022, \mathbf{0.598}, \mathbf{0.390}]$ 、 $[105.83^\circ, 105.98^\circ, \mathbf{182.24^\circ}, \mathbf{183.51^\circ}]$ 。结果表明，馈线 l_3 和 l_4 为故障馈线，进一步验证了该方法在修改判据后，能够准确地检测出两点相继接地故障。

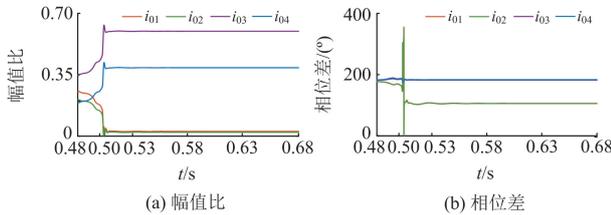


图 16 两点相继接地故障检测结果

Fig. 16 Two successive grounding fault detection results

4 对比分析

本节利用图 7 所示拓扑结构，将所提方法与文献[10, 12]的方法进行对比。针对表 8 所示 4 种极端工况进行仿真验证，计算结果如表 9—表 11 所示。由表 9 和表 10 可知，发生高阻接地故障时，对比文献的方法在某些工况下会发生误判。针对 No. 5 工况，说明对比文献方法的计算过程，如图 17 所示。由图可知，文献[10, 12]通过计算小电阻投入后与投入前的相位差实现故障检测。

由表 11 可知，本文方法在不同工况下，利用幅值比与相位差均能准确检测出故障馈线。其中，在 No. 8 工况时，故障判据 1 和 2 均能准确检测出故障馈线，且利用相位差判据，可推断出馈线 l_4 首端电

流互感器发生反接。

表 8 不同故障工况

工况	$\delta/^\circ$	D_1/km	R_f/Ω	数据缺失	互感器反接
No. 5	0	l_1	1000	m_1 缺失 30%	m_2 反接
No. 6	30	l_2	电弧: 案例 1	—	—
No. 7	60	l_3	3000	—	—
No. 8	90	l_4	电弧: 案例 2	m_3 缺失 60%	m_4 反接

表 9 文献[10]方法检测结果

工况	计算差动系数 μ	$\mu_{\text{set}} = 35.3$	结果	正确?
No. 5	[43.1, 30.9, 16.2, 16.3]	$\mu_1 > \mu_{\text{set}}$	l_1	正确
No. 6	[5.1, 26.6, 7.0, 3.1]	$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4 < \mu_{\text{set}}$	—	错误
No. 7	[12.7, 12.7, 20.8, 12.7]	$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4 < \mu_{\text{set}}$	—	错误
No. 8	[3.0, 2.4, 3.0, 337.9]	$\mu_4 > \mu_{\text{set}}$	l_4	正确

表 10 文献[12]方法检测结果

工况	计算相角差	故障馈线相角差为 $(135^\circ, -41.53^\circ)$	结果	正确?
No. 5	$[-69.1^\circ, -0.2^\circ, -0.2^\circ, -0.1^\circ]$	-69.14°	l_1	正确
No. 6	$[359^\circ, 293^\circ, 360^\circ, 359^\circ]$	293.19°	l_2	正确
No. 7	$[0.7^\circ, 0.7^\circ, -38.9^\circ, 0.7^\circ]$	-38.90°	—	错误
No. 8	$[361^\circ, 362^\circ, 355^\circ, 295^\circ]$	295.48°	l_4	正确

表 11 所提方法检测结果

工况	判据 1、2 计算结果	结果	正确?
No. 5	幅值比: $[0.736, 0.022, 0.033, 0.017]$ 相位差: $[183.57^\circ, 285.99^\circ, 105.64^\circ, 106.11^\circ]$	l_1	正确
No. 6	幅值比: $[0.027, \mathbf{0.982}, 0.032, 0.017]$ 相位差: $[106.21^\circ, \mathbf{184.32^\circ}, 105.67^\circ, 106.19^\circ]$	l_2	正确
No. 7	幅值比: $[0.027, 0.022, \mathbf{0.984}, 0.017]$ 相位差: $[105.79^\circ, 105.95^\circ, \mathbf{183.73^\circ}, 106.06^\circ]$	l_3	正确
No. 8	幅值比: $[0.027, 0.022, 0.018, \mathbf{0.983}]$ 相位差: $[104.43^\circ, 104.02^\circ, 105.02^\circ, \mathbf{4.66^\circ}]$	l_4	正确

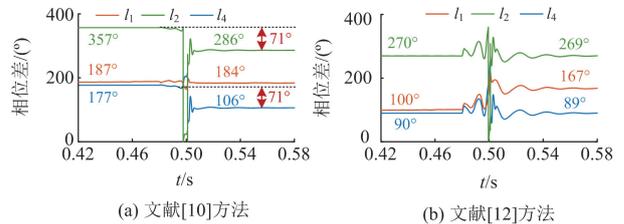


图 17 文献[10]与文献[12]方法计算过程

Fig. 17 Calculation process of methods of Ref. [10] and [12]

5 实测验证

中国江苏省某 110 kV 变电站 10 kV 侧出线发生两次单相接地故障：某日馈线 8 发生 A 相接地故障

和 B 相接地故障。该系统采用消弧线圈并联阻尼电阻接地, 检测装置采样率为 5000 Hz。由文献[17]可知, 灵活接地系统在小电阻投入后可等效为小电阻系统。故障瞬间由于硬件装置影响, 消弧线圈无法及时进行补偿, 可将其等效为小电阻接地系统。针对小电阻接地系统, 将所提判据修改为单一判据: 计算故障后各馈线与中性点暂态零序电流的幅值比, 幅值比最大的馈线即为故障馈线。

图 18(a)、图 18(b)分别为馈线 8 发生 A 相与 B 相接地故障波形。其中, 馈线 1、7 为健全馈线, i_{0N} 为中性点零序电流。由图可知, 接地故障瞬间, 馈线 8 暂态零序电流幅值最大, 极性与其他馈线相反。计算图 18(a)、图 18(b)中各馈线与中性点暂态零序电流的幅值比, 结果分别为: **[0.452, 0.150, 1.075]**、**[0.246, 0.065, 0.724]**。由结果可知, 馈线 8 的幅值比最大, 进而判定为故障馈线。综上可知, 该方法在修改判据后可实现小电阻接地系统的单相高阻故障检测。

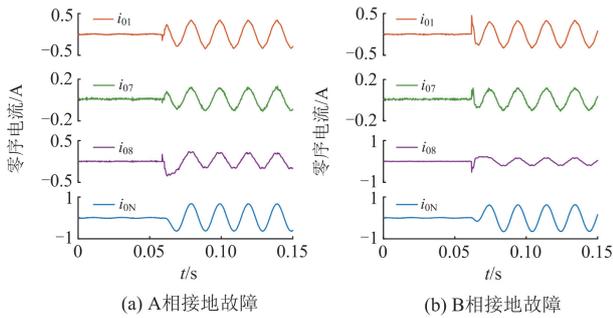


图 18 单相接地故障波形

Fig. 18 Single-phase ground-fault waveform

6 结论

灵活接地系统发生单相高阻接地故障后, 本文利用小电阻投入后, 各馈线与中性点稳态零序电流的幅值比和相位差实现故障检测, 并得出以下结论:

1) 小电阻投入后, 健全馈线与中性点零序电流幅值比 k_2 的最大值约为 0.0865, 而故障馈线的幅值比 k_3 的最小值约为 0.934, 所以, 通过计算各馈线幅值比可准确实现故障检测。

2) 小电阻投入后, 健全馈线与中性点零序电流相位差位于 $(56.475^\circ, 146.475^\circ)$ 或 $(236.475^\circ, 326.475^\circ)$ 范围, 而故障馈线相位差位于 $(146.475^\circ, 236.475^\circ)$ 或 $(-33.525^\circ, 56.475^\circ)$ 范围, 所以, 通过计算各馈线相位差可准确实现故障检测。

参考文献

[1] 刘健, 张薛鸿, 张小庆, 等. 预防电缆沟起火的小电阻接地系统单相接地故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 21-29.

- LIU Jian, ZHANG Xuehong, ZHANG Xiaoqing, et al. Treatment of a single-phase grounding fault in a small current grounding system to prevent fire in a cable trench[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 21-29.
- [2] 中国南方电网有限责任公司. 20 kV 及以下电网装备技术导则: Q/CSG 1203004.3—2017[S]. 2016.
- [3] 中国南方电网有限责任公司. 消弧线圈并小电阻接地装置技术规范(征求意见稿)[EB/OL]. 2017.
- [4] WANG Xiaowei, ZHANG Fan, WEI Xiangxiang, et al. Fault location of flexible grounding distribution system based on multivariate modes and kurtosis calibration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 150.
- [5] 杨帆, 任伟, 沈煜, 等. 消弧线圈并联小电阻系统接地故障灵活处理策略[J]. 供用电, 2019, 36(3): 44-49. YANG Fan, REN Wei, SHEN Yu, et al. Grounding fault processing strategy in Petersen coil paralleled small resistance grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 44-49.
- [6] 廖德辉, 金鑫, 田君杨, 等. 灵活接地配电网单相接地故障全过程特征分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 90-97. LIAO Dehui, JIN Xin, TIAN Junyang, et al. Analysis of the entire process characteristics of single phase-to-ground faults in flexible grounded distribution networks[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 90-97.
- [7] 薛永端, 金鑫, 刘晓, 等. 灵活接地系统中配电网接地保护的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 112-121. XUE Yongduan, JIN Xin, LIU Xiao, et al. Analysis on adaptability of grounding protection for distribution network in flexible grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 112-121.
- [8] 汤涛, 周宇, 曾祥君, 等. 基于过渡电阻评估的灵活接地系统暂态故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 171-179. TANG Tao, ZHOU Yu, ZENG Xiangjun, et al. Transient fault line selection method for flexible grounded system based on transition resistance evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 171-179.
- [9] HE Yu, ZHANG Xinhui, WU Wenhao, et al. Faulty line selection method based on comprehensive dynamic time warping distance in a flexible grounding system[J]. Energies, 2022, 15(2): 471-487.
- [10] 刘朋跃, 邵文权, 弓启明, 等. 利用零序电流相位变化特征的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1830-1838. LIU Pengyue, SHAO Wenquan, GONG Qiming, et al. Fault line detection of flexible grounding system based on phase variation characteristics of zero-sequence current[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1830-1838.

- [11] 黄亚峰, 王浩天, 朱登宝, 等. 基于零序电流特性的中性点灵活接地系统的故障选线方法[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(3): 16-22.
HUANG Yafeng, WANG Haotian, ZHU Dengbao, et al. Fault line selection method for neutral flexible grounding system based on zero sequence current characteristics[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(3): 16-22.
- [12] 李建蕊, 李永丽, 王伟康, 等. 基于零序电流与电压相位差变化的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4847-4855.
LI Jianrui, LI Yongli, WANG Weikang, et al. Fault line detection method for flexible grounding system based on changes of phase difference between zero sequence current and voltage[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4847-4855.
- [13] 叶远波, 汪胜和, 谢民, 等. 高阻接地故障时消弧线圈并联小电阻接地的控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 181-186.
YE Yuanbo, WANG Shenghe, XIE Min, et al. Study on the control method of high impedance faults in the neutral via arc suppression coil paralleled with a low resistance grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 181-186.
- [14] 闫森, 黄纯, 刘映彤, 等. 基于零序功率比的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(3): 46-52.
YAN Sen, HUANG Chun, LIU Yingtong, et al. Flexible fault selection method of grounding system based on zero-sequence power ratio[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3): 46-52.
- [15] 杨帆, 金鑫, 沈煜, 等. 基于零序导纳变化的灵活接地系统接地故障方向判别算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 88-94.
YANG Fan, JIN Xin, SHEN Yu, et al. Discrimination algorithm of grounding fault direction based on variation of zero-sequence admittance in flexible grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 88-94.
- [16] 刘晓, 薛永端, 刘萃萃, 等. 基于电压-电流分区的灵活接地系统故障保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(4): 124-131.
LIU Xiao, XUE Yongduan, LIU Cuicui, et al. Fault protection of flexible grounding system based on voltage-current partition[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(4): 124-131.
- [17] 王晓卫, 刘伟博, 郭亮, 等. 基于不同时段内积投影的灵活接地系统高阻故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 154-167.
WANG Xiaowei, LIU Weibo, GUO Liang, et al. High impedance fault line selection method based on inner product projection of different time periods for flexible grounding systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 154-167.
- [18] 邵文权, 贺雨昕, 关欣, 等. 利用多次扰动电流波形特征的配电网相间永久故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 146-157.
SHAO Wenquan, HE Yuxin, GUAN Xin, et al. Identification method for an interphase permanent fault in a distribution network using waveform characteristics of multiple disturbance currents[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 146-157.
- [19] 薛永端, 李娟, 陈筱霁, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.
- [20] 周宇, 汤涛, 曾祥君, 等. 基于零序电流幅值比倍增系数的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 112-120.
ZHOU Yu, TANG Tao, ZENG Xiangjun, et al. Fault line detection method for a flexible grounding system based on a zero-sequence current amplitude ratio multiplication coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 112-120.
- [21] 李晓波, 张世乐, 彭超红. 基于低频暂态零序电流畸变率的灵活接地系统高阻接地保护[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 171-183.
LI Xiaobo, ZHANG Shile, PENG Chaohong. High-resistance grounding protection for flexible grounded systems based on low-frequency transient zero-sequence current distortion rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 171-183.
- [22] 国家电网有限公司. 配电网技术导则: Q/GDW10370—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [23] 柯亮, 李波, 廖凯, 等. 基于XGBoost的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 88-98.
KE Liang, LI Bo, LIAO Kai, et al. High impedance fault detection method in a distribution network based on XGBoost[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 88-98.

收稿日期: 2024-07-31; 修回日期: 2024-12-16

作者简介:

张帆(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为配电网接地故障处置; E-mail: zhangfan9805@126.com

王晓卫(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、配电网接地故障处理等。E-mail: proceedings@126.com

(编辑 周金梅)