

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200020

基于故障相电压极化量的 谐振接地系统高阻故障方向检测方法

管廷龙¹, 薛永端¹, 徐丙垠²

(1. 中国石油大学(华东) 新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东理工大学智能电网研究院, 山东 淄博 255049)

摘要: 针对谐振接地系统高阻接地故障的发生概率大、零序电压检测难度高的问题, 提出了基于故障相电压极化量的谐振接地系统高阻故障方向检测方法。利用谐振接地系统高阻故障等值电路, 分析了故障暂态时间内故障相电压分别与故障上、下游线路零序电流的极性关系, 发现故障相电压与故障上游线路零序电流波形相似程度较高, 与下游线路零序电流波形相似程度较低。据此, 可以将故障相电压作为极化量, 通过分析故障暂态时间内线路检测点所测零序电流与故障相电压的相似程度来进行故障方向检测。相较于以往的故障检测方法, 所述方法提高了谐振接地系统高阻接地故障检测的可靠性。数字仿真与现场人工试验验证了该方法的可行性。

关键词: 相电压; 极化量; 谐振接地系统; 高阻故障; 方向检测方法

Method for detecting high-impedance fault direction in a resonant grounding system based on voltage polarization of the fault phase

GUAN Tinglong¹, XUE Yongduan¹, XU Bingyin²

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Smart Grid Institution, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: There are problems of high incidence of high-resistance grounding fault in resonant grounding system and major difficulty in zero-sequence voltage detection. Thus a direction detection method for a high-resistance fault of a resonant grounding system based on the voltage polarization of the fault phase is proposed. Using the high-impedance fault equivalent circuit of the resonant grounding system, the polar relationship of zero-sequence current on both sides of the fault point and the fault phase voltage during the transient process is analyzed. It is found that the voltage of the fault phase has a high degree of similarity with the zero-sequence current upstream of the fault point, while it has a low degree of similarity with the zero-sequence current downstream of that point. Given this, the fault phase voltage can be used as the amount of polarization. The direction of the fault can be detected by analyzing the similarity between the current measured at the detection point on the fault line and the voltage of fault phase during the transient process. Compared with previous fault detection methods, this method improves the reliability of the high-resistance grounding fault detection in the resonant grounding system. Digital simulation and field manual tests verify the feasibility of the method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477184).

Key words: phase voltage; polarization amount; resonant grounding system; high impedance fault; direction detection method

0 引言

配电系统受离地面较近、馈入居民区、自然灾害等因素的影响, 导线很容易接触到树枝或发生断线并坠落故障, 此时往往会发生高阻接地故障^[1-3]。

当高阻接地故障发生时, 存在检测难度大、不能快速切除等问题^[4-7], 若故障长期存在, 有可能会导导致两相接地短路故障, 甚至会引发火灾, 对人身、财产安全造成威胁^[8-10]。国家电网公司新修订的《配电网技术导则》提出小电流接地系统的永久性接地故障应实现快速就近隔离^[11], 对小电流接地系统的故障处理能力提出了挑战。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477184)

目前针对小电流接地系统的故障检测方法中有相当一部分需要利用故障零序电压信号^[12-14],通过傅里叶变换^[15-16]、卡尔曼滤波^[17-18]、小波变换^[19-22]、FIR滤波器^[23-24]等对信号进行处理,分析故障信号的零序分量故障特征来进行故障检测。然而,当高阻故障发生时,三相电压和零序电压变化不明显,零序电压幅值大幅降低^[25-26],尤其是对于故障暂态检测方法,因零序电压幅值在高阻故障暂态过渡过程中从零开始缓慢增大,其在装置采样时间窗口内的幅值整体较低,影响暂态检测方法的可靠性。因此零序电压的测量与计算是造成高阻接地故障检测困难的一个重要原因^[27]。

针对上述问题,文献[28]提出了一种基于相电压和相电流突变量的故障定位方法,可以直接通过相电气量信息进行故障检测,但该方法的实现过程比较复杂,且对1 000 Ω以上的高阻故障可靠性尚未可知。与文献[28]相比,文献[29]所提方法不需要电压信息,仅通过比较故障上下游检测点零序电流暂态分量的相似性进行定位,具有更强的适用性。然而上述方法需要将各检测点的故障信号上传主站或者相互交换,不具有自举性,数据传输量大,对通信网络及不同厂家设备之间的配合要求高,而且还要求各检测点时间精确同步,现场实现困难。

利用终端来检测小电流接地故障方向是解决设备通信问题的有效措施,此时主站定位算法类似于双侧电源网络的短路故障定位算法,可以妥善解决时间同步以及不同厂家设备之间的配合问题。本文综合考虑以上问题,分析了故障线路不同检测点处的零序电流与故障相电压在暂态过渡过程(暂态时间)中的波形相似程度,根据相似程度的差异提出了一种将故障相电压作为极化量(参考量)具有自举性的谐振接地系统高阻故障方向检测方法,在不具备通信条件的配网中仍能适用,利用数字仿真数据和现场人工试验数据对故障方向算法进行了验证。

1 故障电气量分析

1.1 等值电路

经过等效得到针对检测点故障方向检测的谐振接地系统高阻接地故障等值电路如图1所示。其中: $u_f = -U_m \sin(\omega_0 t + \phi)$ 为故障点虚拟电源, U_m 为正常运行时故障相电压峰值, ω_0 为工频角频率, ϕ 为故障初相角; u_0 为母线零序电压; R 为3倍的故障点过渡电阻; L_p 为消弧线圈零序等效电感(3倍消弧线圈电感); Q_d 为故障下游检测点,其下游线路对地电容为 $C_{0d,1}$,与故障点之间对地电容为 $C_{0d,f}$; Q_u

为故障上游检测点,其上游线路对地电容与所有健全线路的对地电容共同组成检测点背后线路对地电容 $C_{0u,f}$; Q_u 与故障点之间对地电容为 $C_{0u,1}$; i_{0Lp} 为消弧线圈零序电流, i_{0d} 为故障下游检测点电流; i_{0u} 为故障上游检测点电流。

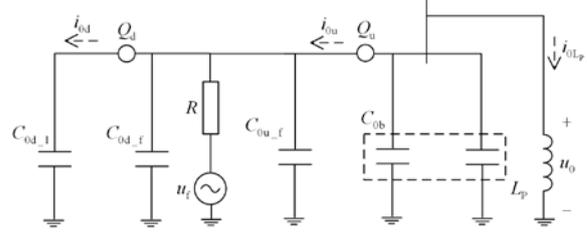


图1 谐振接地系统高阻接地故障等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of high impedance fault in resonant grounding system

设 $C_{0\Sigma}$ 为所有线路对地零序分布电容之和; ν 为消弧线圈失谐度,一般取为-0.08。由图1所示电路建立微分方程,根据过渡电阻大小,认为当满足式(1)时为高阻接地故障,此时系统处于欠阻尼的谐振状态。

$$R > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_p}{C_{0\Sigma}}} = \frac{1}{2\omega_0 C_{0\Sigma} \sqrt{1-\nu}} \quad (1)$$

1.2 故障电气量分析

基于故障等值电路可以得到消弧线圈零序电流 $i_{0Lp}(t)$ 的表达式为

$$i_{0Lp}(t) = I_m \sin(\omega_0 t + \phi - \theta) + e^{-\delta t} [A_1 \cos(\omega_f t) + A_2 \sin(\omega_f t)] \quad (2)$$

式中:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\omega_0 L_p}{R - RL_p C_{0\Sigma} \omega_0^2}\right);$$

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{(R - RL_p C_{0\Sigma} \omega_0^2)^2 + (\omega_0 L_p)^2}};$$

$$A_1 = -I_m \cos \theta;$$

$$A_2 = \frac{-\omega_0 I_m \sin \theta - \delta I_m \cos \theta}{\omega_f}.$$

衰减因子 δ 为

$$\delta = \frac{1}{2RC_{0\Sigma}} \quad (3)$$

自由振荡频率 ω_f 为

$$\omega_f = \sqrt{\omega_0^2 (1-\nu) - \delta^2} \quad (4)$$

当一确定系统发生高阻欠阻尼接地故障时,其振荡频率一般仅仅略高于工频。

母线零序电压 u_0 为

$$u_0(t) = L_p \frac{di_{Lp}}{dt} = L_p \omega_0 B \cos(\omega_0 t + \phi - \theta) + L_p e^{-\delta t} \left[(A_2 \omega_f - A_1 \delta) \cos(\omega_f t) + (-A_1 \omega_f - A_2 \delta) \sin(\omega_f t) \right] \quad (5)$$

其值由一项工频分量与一项衰减正弦分量组成。

故障相电压的值为母线零序电压与故障相电源电动势的叠加, 于是可以得到故障相电压 u_{fp} 为

$$u_{fp} = u_0 + E_f \sin(\omega_0 t + \phi) \quad (6)$$

由于电源电动势中不包含暂态分量, 因此故障相电压与零序电压的暂态分量完全相同, 工频分量为零序电压工频分量与故障相电源电动势的叠加。

故障上游检测点零序电流 i_{0u} 为其背后线路对地零序电容电流 $i_{C_{0b}}$ 与消弧线圈零序电流 i_{0Lp} 的叠加。

$$i_{0u}(t) = -(i_{C_{0b}} + i_{0Lp}) = -(1 - C_{0b} L_p \omega_0^2) B \sin(\omega_0 t + \phi - \theta) - e^{-\delta t} \left[\begin{aligned} & \left(-2L_p C_{0b} \delta \omega_f A_2 + \right. \\ & \left. (L_p C_{0b} \delta^2 - L_p C_{0b} \omega_f^2 + 1) A_1 \right) \cos(\omega_f t) + \\ & \left. \left(2L_p C_{0b} \delta \omega_f A_1 + \right. \right. \\ & \left. \left. (L_p C_{0b} \delta^2 - L_p C_{0b} \omega_f^2 + 1) A_2 \right) \sin(\omega_f t) \right] \quad (7) \end{aligned}$$

其组成成分与零序电压类似, 包括一项工频分量与一项衰减的正弦分量。

故障下游检测点零序电流 i_{0d} 为其下游线路的对地零序电容电流。

$$i_{0d}(t) = -C_{0d} L_p \omega_0^2 B \sin(\omega_0 t + \phi - \theta) + C_{0d} L_p e^{-\delta t} \left[\begin{aligned} & \left(-2A_2 \delta \omega_f + \right. \\ & \left. A_1 \delta^2 - A_1 \omega_f^2 \right) \cos(\omega_f t) + \\ & \left. (2A_1 \delta \omega_f + A_2 \delta^2 - A_2 \omega_f^2) \sin(\omega_f t) \right] \quad (8) \end{aligned}$$

可以发现, 故障点上游与下游检测点所测电流的工频分量相位一致, 由线路流向消弧线圈方向。

2 暂态过渡过程中故障电气量极性关系分析

在谐振接地系统发生高阻接地故障时, 选取一典型情况(系统的对地电容电流为 73 A, 故障接地电阻为 1 500 Ω)下故障相电压、消弧线圈电流(3 倍消弧线圈零序电流)以及故障上游与下游检测点所测电流(3 倍零序电流)的波形对比如图 2 所示。

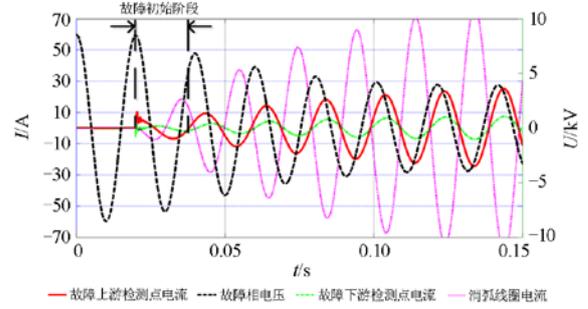


图 2 故障电气量波形对比

Fig. 2 Waveform comparison of fault electrical quantity

2.1 故障电气量极性关系定性分析

2.1.1 故障上、下游检测点零序电流极性关系分析

(1) 故障初始阶段极性关系

根据图 2 可以发现, 因故障暂态为零状态响应, 因此在故障时刻消弧线圈电流为零, 高阻故障时, 衰减因子 δ 的值比较小, 各故障电气量在暂态时间内的变化速度比较慢, 使得消弧线圈电流在故障发生后的初始阶段(如图 2 中标示, 区别于暂态持续时间, 下文与之相同)一直比较小, 系统对地电容电流大部分流入了接地故障点, 只有一小部分流向了消弧线圈支路, 所以故障上、下游检测点电流均为流向接地故障点的方向, 两者近似反极性, 系统中的零序电流流动方向如图 3 中虚线箭头所示, 此时的故障点电流 i_{f-t} 近似等于系统的对地电容电流 $i_{C_{\Sigma,t}}$ 。

$$i_{f-t} \approx i_{C_{\Sigma,t}} \quad (9)$$

(2) 稳态过程的极性关系

故障初始阶段过后, 随着消弧线圈电流 i_{Lp} 不断增大, 过补偿状态下达到稳态时, 系统对地电容电流 $i_{C_{\Sigma,t}}$ 与故障点电流 i_{f-p} 全部都经母线流向消弧线圈支路, 故障上、下游检测点电流均为流向消弧线圈的方向, 极性相同, 系统中的零序电流流动方向如图 3 中实线箭头所示, 此时的 i_{f-p} 为 i_{Lp} 与 $i_{C_{\Sigma,t}}$ 的差值。

$$|i_{f-p}| = |i_{Lp}| - |i_{C_{\Sigma,t}}| \quad (10)$$

其与故障上、下游检测点电流极性相同。

2.1.2 故障相电压与上、下游检测点零序电流极性关系分析

(1) 故障初始阶段极性关系

高阻故障发生时, 无论系统处于暂态阶段或者稳态阶段, 故障相电压 u_{fp} 与故障点电流 i_f 呈阻性约束关系, 极性相同。

在故障后的初始阶段, 上游检测点电流($3i_{0u,t}$)近似等于系统对地电容电流 $i_{C_{\Sigma,t}}$, 结合式(9)可以得到

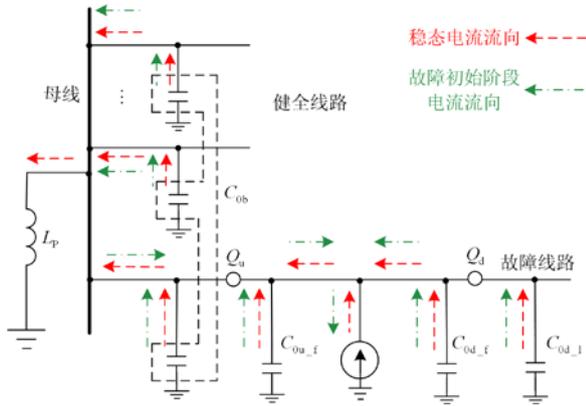


图3 系统零序电流流动方向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of zero-sequence current flow direction of system

$$\frac{u_{fp}}{3i_{0u-f}} \approx \frac{u_{fp}}{i_{C\Sigma-f}} \approx \frac{u_{fp}}{i_{f-l}} = R_f \quad (11)$$

结合 2.1.1 节(1), 在故障后的初始阶段, 故障相电压与上游检测点电流极性近似相同, 而与下游检测点电流极性近似相反。

(2) 后续过程的极性关系

故障初始阶段过后的暂态过程中, 随着消弧线圈电流不断增大, 式(11)中的近似条件不再成立, 此时上游检测点电流与故障相电压的极性关系会出现变化, 上游检测点电流不再近似等于故障点电流, 因此故障相电压与上游检测点不再同极性。

暂态过程结束后, 根据 2.1.1 节(2), 上、下游检测点电流与故障点电流虽然并不相等, 但是极性相同, 根据 2.1.2 节(1), 此时上、下游检测点电流与故障相电压恢复同极性。

2.2 故障电气量极性关系定量分析

2.2.1 故障全电气量波形逼近

通过对式(6)一式(8)进行简化可以发现, 故障相电压、上游与下游检测点电流都可以表示为工频分量与暂态分量相加的形式, 即

$$f(t) = A_p \cos(\omega_0 t + \beta_p) + A_T e^{-\delta t} \cos(\omega_f t + \beta_T) \quad (12)$$

其工频分量与暂态分量振荡频率并不相同, 且暂态分量一直在衰减, 使得对故障全电气量波形的变化规律分析存在困难。

为方便对上述故障全电气量波形进行分析, 本文拟利用正弦函数波形对式(12)所示故障全电气量波形进行逼近。

(1) 逼近波形求解

因在高阻故障下故障暂态电气量的衰减速度较

慢且振荡频率仅稍高于工频, 本文认为在一段足够短的时间段内, 暂态量没有衰减, 且暂态分量与工频量的振荡频率相等, 两者在每个时间段内可以进行相量相加, 成为一项工频振荡、幅值恒定的正弦量, 从而在每个时间段内用该正弦量对故障全电气量波形进行逼近。

函数逼近的范围在故障暂态时间范围内, 取为 $0 \sim t_n$, 并将其等距划分为 n 个区间, 逼近函数 $g(t)$ 表达式为

$$f(t) \approx g(t) = \begin{cases} A_0 \sin(\omega_0 t + \beta_0) & t \in [0, t_1] \\ A_1 \sin(\omega_0 t + \beta_1) & t \in [t_1, t_2] \\ \vdots & \vdots \\ A_k \sin(\omega_0 t + \beta_k) & t \in [t_k, t_{k+1}] \\ \vdots & \vdots \\ A_{n-1} \sin(\omega_0 t + \beta_{n-1}) & t \in [t_{n-1}, t_n] \end{cases} \quad (13)$$

式中, $k = 0, 1, 2, 3, \dots, n$

每个区间的起始时间为 $t_k = t_n \times k / n$, 于是式(12)中的暂态分量可以近似表示为

$$A_T e^{-\delta t_k} \sin(\omega_0 t + \beta_T) \approx A_T e^{-\delta t_k} \sin(\omega_0 t + \beta'_T) \quad (14)$$

在任意一个区间内, 是一个以工频振荡、幅值恒定的正弦量, 其中, β'_T 为实际暂态正弦分量的相角加上由于等效波形的振荡频率 ω_0 与实际谐振频率 ω_f 的差异而在 t_k 时刻处产生的相角误差。

$$\beta'_T = (\omega_f - \omega_0) \times t_k + \beta_T \quad (15)$$

将式(14)的等效表达式代入式(12), 通过相量相加, 可以计算得到

$$A_k = \sqrt{(A_T e^{-\delta t_k} \times \sin(\beta'_T) + A_p \times \cos(\beta_p))^2 + (A_T e^{-\delta t_k} \times \cos(\beta'_T) - A_p \times \sin(\beta_p))^2} \quad (16)$$

$$\beta_k = \arctan \left[\frac{A_T e^{-\delta t_k} \times \sin(\beta'_T) + A_p \times \cos(\beta_p)}{A_T e^{-\delta t_k} \times \cos(\beta'_T) - A_p \times \sin(\beta_p)} \right] \quad (17)$$

(2) 逼近波形仿真实验

利用第 2 节的典型谐振接地系统参数, 取故障过渡电阻为 1500Ω , 取最小逼近区间时间长度 $t_n / n = 0.5 \text{ ms}$, 对故障暂态时间内的波形进行逼近, 将上、下游检测点电流的逼近波形与仿真波形作对比, 得到结果如图 4 所示。

由图 4 可见, 这种逼近方法可以对故障全电气量的波形做出正确估计。

2.2.2 故障全电气量波形极性关系分析

根据式(17), 选取典型谐振接地系统故障参数, 可以证明故障全电气量逼近波形的相位随时间的整体变化趋势如图 5 所示(取 $t_n / n = 0.5 \text{ ms}$)。

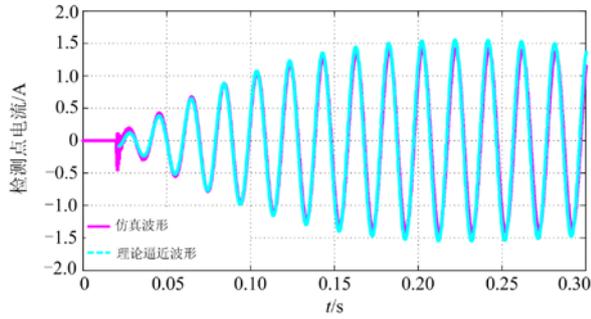


图4 故障电流的逼近波形与仿真波形对比

Fig. 4 Comparison of approximation waveform of fault current and simulated waveform

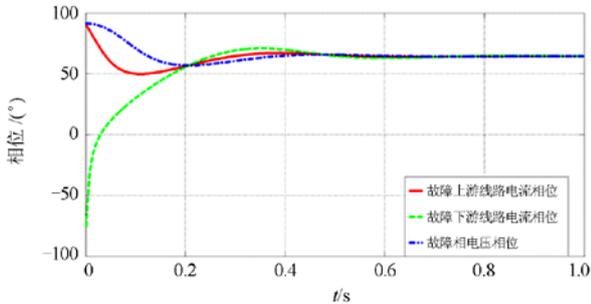


图5 故障全电气量逼近波形相位的时域变化趋势

Fig. 5 Change trend of phase of fault electrical quantity in time domain

由图5可见,在故障发生时刻,故障相电压与上游检测点电流波形的相位近似相同,与下游检测点电流波形的相位相差约 180° ,随着故障继续发展,故障暂态逐渐消失,上述故障电气量逼近波形的相位关系开始发生变化,直至最后趋于与零序工频电气量相位相同。

(1) 故障发生时刻波形相位关系

为探究故障时刻的相位关系是否在不同条件下均能成立,本文证明得到了故障相电压、上游与下游检测点电流的逼近波形在故障发生时刻的相位随不同过渡电阻、系统对地电容的变化规律,如图6所示(对地电容电流为 $20\sim 150\text{ A}$,过渡电阻取值为 $100\sim 3\ 000\ \Omega$)。

在不同的故障条件下,故障时刻的故障相电压与上游检测点电流的相位总是近似相同,与下游检测点电流的相位总是近似相差 180° ,衰减因子 δ 的存在使得不同电气量的相位最终趋向于与工频电气量相位相同。

(2) 故障初始阶段波形相位关系

对式(17)进行分析可得,在高阻故障暂态时间内,故障电气量的相位变化不是单调的,而是在不

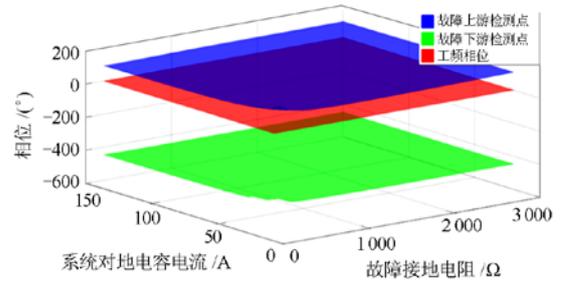


图6 故障电气量在故障时刻的相位随不同条件的变化规律

Fig. 6 Variation law of phase of fault electrical quantity at fault moment under different conditions

断缓慢振荡(振荡频率变化范围为 $\omega_f \sim \omega_0$),高阻故障下振荡周期一般大于 0.5 s ,因此可以认为在故障后的初始阶段,故障电气量相位的变化可以忽略,故障相电压与故障上游检测点电流的逼近波形相位相差较小,波形相似程度较大,与故障下游检测点电流的逼近波形相位相差较大,波形相似程度相对较小。

3 基于故障相电压极化量的故障方向检测方法

3.1 故障方向检测方法

根据第2节对不同故障电气量在故障暂态时间内的波形分析,在不同故障条件下的故障初始阶段,上游检测点电流波形与故障相电压波形的相似程度要始终大于下游检测点电流波形。以此为基础,提出一种新的高阻接地故障方向检测方法。根据对衰减时间常数的分析,高阻故障下的时间常数 τ 一般大于 0.1 s ,消弧线圈电流在 $\tau/10(0.01\text{ s})$ 时间内仅会由0增大到稳态值的 9.5% ,因此为保证消弧线圈电流足够小,不会对上述电压、电流的极性关系产生影响,本文取时间窗口为故障后的半个工频周期。

对于两个电气量波形 u 和 i ,可以利用相关系数 ρ 描述两者之间的相似程度。

$$\rho = \frac{\int_0^T u(t)i(t)dt}{\sqrt{\int_0^T u^2(t)dt \int_0^T i^2(t)dt}} \quad (18)$$

式中, T 为时间窗口长度。相关系数 ρ 的值位于 -1 和 1 之间,两个波形的相关系数越接近于 1 ,则说明两个波形极性越趋于相似,越接近于 -1 ,说明两个波形极性越趋于相反。

本文采用相关系数来描述两个波形之间的相似程度,通过计算故障相电压与检测点零序电流的相关系数来进行故障方向检测,步骤如下。

(1) 采集故障相电压 u_{fp} 和故障馈线各检测点电流 i ，计算各检测点所测电流与故障相电压在故障后首个工频半波内的相关系数 ρ 。

(2) 设定一相关系数的门檻值 ρ_{set} ，若检测点所测电流与故障相电压极化量的相关系数大于 ρ_{set} ，则判断故障点位于该检测点下游，否则判断故障点位于该检测点上游。

根据式(6)一式(8)各故障电气量表达式，可以得到相关系数随不同故障参数(故障初相角、系统对地电容、故障接地电阻、故障位置)的变化范围，故障相电压与故障上游检测点电流的相关系数一直接近于 1，与故障下游检测点电流的相关系数一直小于 0，模值最小时的值为-0.05，考虑到现场杂波的干扰，可以初步取门檻值 ρ_{set} 为 0.3，该门檻值最终还需要根据现场应用的经验进行调整，因此并不是绝对的。

3.2 故障方向检测方法性能分析

本文方法与以往的检测方法相比，利用故障暂态时间内的故障相电压作为极化量，存在一定优势，具体分析如下。

1) 与利用零序电压的故障检测方法相比，利用故障相电压极化量的检测方法具有更高的可靠性。在高阻故障发生时，零序电压从零开始缓慢增大，而故障相电压为故障相电源电动势与零序电压的叠加，在故障暂态时间内的幅值要远大于零序电压幅值，因此利用故障相电压可以大大提高故障暂态检测方法的可靠性。

2) 与利用故障电气量暂态分量的故障检测方法相比，本文方法不需要滤除工频分量，可利用的故障信息更加丰富。因谐振接地系统中工频分量在故障与健全线路中的规律相同，无法被用于故障检测，因此在实际应用中被视为干扰量，往往要被滤除，装置中一般采用数字滤波器滤除工频分量，不仅增加了计算量，而且在暂态信号频率与工频较为接近时，滤除效果将不明显。事实上，故障电气量的工频分量中也包含着丰富的故障信息，因此本文方法可以比较完整地保留故障信息，可利用的故障电气量波形特征更加明显，可提高故障检测的可靠性。同时，因不需要滤波处理，可以简化对波形的处理过程，加快算法的处理速度。

4 仿真验证

图 7 为一典型 10 kV 配电网示意图。系统为架空线电缆混合线路，系统电容电流为 73 A，消弧线圈过补偿度为 8%。第 5 条馈线分段验证故障方向检测方法，区段 1 长 5 km，区段 2 长 3 km，区段 3

长 2 km，区段 4 长 5 km，K1、K2、K3、K4 分别是位于区段 1、2、3、4 上的故障接地点，Q1、Q2、Q3、Q4 是 4 个故障检测点。



图 7 系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of the system

利用图 7 所示的仿真模型，对不同的过渡电阻和故障位置做了多组故障方向检测仿真，相关系数计算的时间窗口为故障后一个工频半波的时间 (10 ms)，结果验证了故障方向检测算法的正确性。

图 8 为在 K2 点发生 1 000 Ω 接地故障后，利用高阻故障数据得到的故障时域波形，其中， $q1$ — $q4$ 分别代表 Q1—Q4 处所测到的零序电流， U_f 代表故障相电压， U_0 代表零序电压。

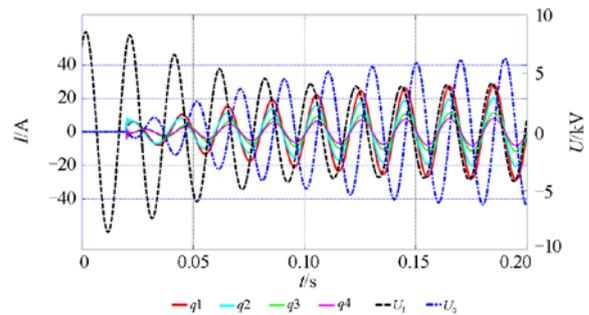


图 8 谐振接地系统高阻故障电气量时域仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of electrical quantity under high impedance fault in resonant grounding system in time domain

由图 8 可见，在故障后的工频半波时间内，故障相电压与上游检测点电流的相似程度较大，与下游检测点电流的相似程度相对较小，同时故障相电压远大于零序电压，因此以故障相电压为极化量，根据故障初始阶段的电流波形与极化量之间的相似程度差异判断故障方向。本文选取过渡电阻为 1 000 Ω 和 2 000 Ω 时，分别以区段 1、2、3、4 上的 A 相高阻故障为例进行了验证，结果如表 1 所示。

可以发现，故障相电压与上游检测点所测电流的相关系数均明显大于下游检测点电流的相关系数，可以判断相关系数大于门檻值(0.3)的检测点为

表 1 高阻接地故障方向检测方法仿真结果

Table 1 Simulation result of fault direction detection in high-impedance fault

过渡电阻/ Ω	故障位置	$\phi/(\circ)$	所测电流与故障相电压的相关系数			
			Q1	Q2	Q3	Q4
1 000 Ω	K1	90	0.75	-0.58	-0.56	-0.55
	K2	60	0.74	0.88	-0.34	-0.33
	K3	30	0.79	0.89	0.94	-0.15
	K4	0	0.85	0.92	0.96	0.98
2 000 Ω	K1	90	0.74	-0.35	-0.35	-0.35
	K2	60	0.74	0.87	-0.35	-0.34
	K3	30	0.79	0.89	0.94	-0.16
	K4	0	0.85	0.96	0.96	0.98

故障上游检测点, 判断相关系数小于阈值(0.3)的检测点为故障下游检测点, 利用电流与电压极化量波形的相似程度差别可以满足故障方向检测的需求。

5 人工试验数据验证

针对谐振接地系统的人工接地试验数据对本文提出的选线方法进行验证, 谐振接地系统实例为某变电站 10 kV 架空线电缆混合线路人工接地试验, 系统对地电容电流约为 50 A, 出线数量为 5 条, 在其中一条 15 km 长的电缆线路上设置不同类型的单相接地故障, 该线路上装设的环网柜编号自出口处依次为 Q1、Q2、Q3、Q4, 人工接地故障试验点位于 Q1 与 Q2 之间的 K1 点, 录波装置的采样频率为 14 kHz, 本文对试验的多组故障数据进行了验证, 结果表明, 利用本文方法可以对故障方向做出正确判断。图 9 所示为在 K1 点发生高阻接地故障时的故障电气量时域波形($q1$ — $q4$ 分别代表 Q1—Q4 处所测电流波形)。

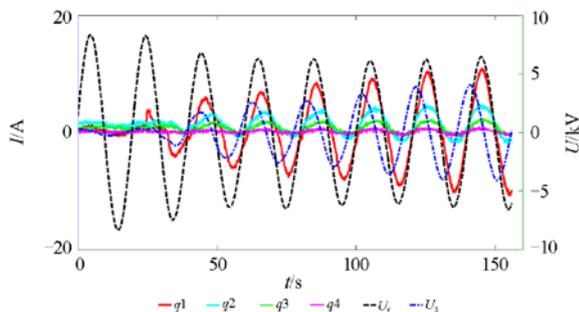


图 9 谐振接地系统高阻故障电气量人工试验波形

Fig. 9 Artificial test waveform of electrical quantity under high impedance fault in resonant grounding system

表 2 给出了部分试验项目的检测结果。

表 2 高阻接地故障现场数据测试结果

Table 2 Field data of fault direction detection under high-impedance fault

接地电阻/ Ω	故障接地方式	所测电流与故障相电压的相关系数				故障位置
		Q1	Q2	Q3	Q4	
500	500 Ω	0.96	-0.67	-0.11	-0.24	K1
100	100 Ω	0.97	-0.30	-0.29	-0.45	K1
200~600	泥土地	0.96	-0.47	-0.17	-0.08	K1
	泥土地	0.94	-0.63	-0.33	-0.26	K1
1 000~2 000	水泥地	0.91	-0.72	-0.40	-0.34	K1
	湿草地	0.89	-0.35	0.11	-0.15	K1
2 000	水塘	0.94	-0.55	-0.34	0.16	K1
	水塘	0.95	-0.04	-0.39	-0.75	K1

根据图 9 及表 2 结果可见, 上、下游检测点电流在故障首工频半波时间内的极性差异明显, 相关系数计算结果差值较大, 利用本文所设置的阈值(0.3)并结合检测点所测电流与故障相电压极化量的相似程度差异可以正确判断故障方向。

6 结论

谐振接地系统发生单相高阻接地故障时, 在故障首工频半波时间内, 故障相电压要明显大于母线零序电压, 其与故障上游检测点零序电流之间呈阻性约束关系, 波形相似程度较大, 与故障下游检测点零序电流波形的相似程度较小, 可以以此为依据进行故障方向检测: 若检测点所测电流波形与故障相电压极化量波形的相关系数大于阈值, 则判断故障点位于该检测点下游, 否则判断故障点位于该检测点上游。该方法可进一步用于故障选线与故障定位。数字仿真与现场数据验证了方法的正确性。

参考文献

- [1] 朱晓娟, 林圣, 张姝, 等. 基于小波能量矩的高阻接地故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 161-168.
ZHU Xiaojuan, LIN Sheng, ZHANG Shu, et al. High-impedance grounding fault detection based on wavelet energy moment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 161-168.
- [2] 王宾, 耿建昭, 董新洲. 配网高阻接地故障伏安特性分析及检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3815-3823.
WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics for high

- impedance faults in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3815-3823.
- [3] 秦浩, 李天友, 薛永端, 等. 基于小波包分析的谐振接地系统高阻故障选线方法[J]. 供用电, 2018, 35(5): 14-18, 13.
QIN Hao, LI Tianyou, XUE Yongduan, et al. High impedance fault line selection method for resonant grounding system based on wavelet packet analysis[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(5): 14-18, 13.
- [4] 方毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.
FANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.
- [5] 陈筱蕾, 薛永端, 王超, 等. 基于同步量测的谐振接地系统高阻接地故障区段暂态定位[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 93-99, 146.
CHEN Xiaoru, XUE Yongduan, WANG Chao, et al. Synchronous measurement based transient high resistance earth fault location in resonant grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 93-99, 146.
- [6] 马杰, 李磊, 李乃永, 等. 基于故障信息的高阻接地故障辨识与定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 74-78.
MA Jie, LI Lei, LI Naiyong, et al. Identification and location of high-resistance grounding fault based on fault records[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 74-78.
- [7] 李震球, 王时胜, 吴丽娜. 一种谐振接地系统电弧高阻接地故障选线新方法及其仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 44-49.
LI Zhenqiu, WANG Shisheng, WU Lina. A new method and simulation for arcing high-impedance-grounding fault line selection in resonant grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 44-49.
- [8] 盛亚如, 丛伟, 卜祥海, 等. 基于中性点电流与零序电流投影量差动的小电阻接地系统高阻接地故障判断方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 17-22, 29.
SHENG Yaru, CONG Wei, BU Xianghai, et al. Detection method of high impedance grounding fault based on differential current of zero-sequence current projection and neutral point current in low-resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 17-22, 29.
- [9] XUE Y, CHEN X, SONG H, et al. Resonance analysis and faulty feeder identification of high-impedance faults in a resonant grounding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1545-1555.
- [10] SANTOS W C, LOPES F V, BRITO S D, et al. High-impedance fault identification on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 23-32.
- [11] 国家电网公司. 配电网技术导则: Q/GDW 10370—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
State Grid Corporation of China. Technical guidelines for distribution network: Q/GDW 10370—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [12] 邱进, 崔鑫, 田野, 等. 小电流接地配电网弧光高阻接地故障电压特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 115-121.
QIU Jin, CUI Xin, TIAN Ye, et al. Analysis of the arc high impedance grounding faults voltage characteristics in non-effective grounding feeders[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 115-121.
- [13] 徐丙垠, 薛永端, 李天友, 等. 小电流接地故障选线技术综述[J]. 电力设备, 2005(4): 1-7.
XU Bingyin, XUE Yongduan, LI Tianyou, et al. Review of line selection of grounding fault in non-effectively grounding network techniques[J]. Electrical Equipment, 2005(4): 1-7.
- [14] 李天友, 王超, 陈敏维, 等. 典型小电流接地故障实例及暂态选线分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 116-122.
LI Tianyou, WANG Chao, CHEN Minwei, et al. Analysis of typical earth faults example and transient feeder selection technology in the non-solidly earthed system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2): 116-122.
- [15] DHARMAPANDIT O, PATNAIK R K, DASH P K. A fast time-frequency response based differential spectral energy protection of AC microgrids including fault location[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 331-358. DOI: 10.1186/s41601-017-0062-0.
- [16] 华敏, 陈剑云. 一种高精度六谱线插值 FFT 谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 9-15.
HUA Min, CHEN Jianyun. A high precision approach for harmonic and interharmonic analysis based on six-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 9-15.
- [17] ALIOUAT S, KORZET W, NACER A, et al. Detection of high impedance faults in electrical power network[C] // 3rd International Conference on Control, Engineering &

- Information Technology (CEIT), May 25-27, 2015, Tlemcen, Algeria: 1-6.
- [18] FUMIN G, XUEMEI R, ZHIJUN L, et al. Kalman filter based fault detection of dual motor systems[C] // 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), July 26-28, 2017: 7133-7137.
- [19] VICENTE T G, HECTOR F R P. High impedance fault detection using discrete wavelet transform[C] // 2011 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, November 15-18, 2011, Cuernavaca, Morelos, Mexico: 325-329.
- [20] COSTA F B, SOUZA B A, BRITO N S D, et al. Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5312-5323.
- [21] 郭小定, 刘伟, 肖华根, 等. 基于经验小波分析的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 73-79.
- GUO Xiaoding, LIU Wei, XIAO Huagen, et al. Single phase grounding fault line selection method based on EWT for small current grounding system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 73-79.
- [22] 王建元, 张崢. 基于注入信号与小波能量的小电流接地故障选线研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(5): 28-32.
- WANG Jianyuan, ZHANG Zheng. Research of fault line selection in small current grounding system based on injected signal and wavelet energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(5): 28-32.
- [23] 裴茂林, 严勤, 汪芙平, 等. 谐波相量测量的 FIR 滤波算法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 1-8.
- PEI Maolin, YAN Qin, WANG Fuping, et al. Harmonic phasor measurement based on FIR filtering algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(12): 1-8.
- [24] 王印峰, 陆超, 李依泽, 等. 一种配电网高精度快响应同步相量算法及其实现[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 753-761.
- WANG Yin Feng, LU Chao, LI Yize, et al. A high-accuracy and fast-response synchrophasor algorithm and its implementation for distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 753-761.
- [25] 严学文, 高伟, 张稳稳, 等. 基于相电压电流突变量的配电网单相接地故障频域定位方法[J]. 供用电, 2019, 36(3): 50-55, 75.
- YAN Xuewen, GAO Wei, ZHANG Wenwen, et al. Frequency domain location method for single-phase grounding fault of distribution network based on break variable of phase voltage and current[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 50-55, 75.
- [26] 王庭华, 薛永端, 赵雪霖, 等. 不同接地电阻下消弧线圈接地系统接地故障暂态特征[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 43-51.
- WANG Tinghua, XUE Yongduan, ZHAO Xuelin, et al. Transient characteristics of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system with different grounding resistance[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 43-51.
- [27] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 272-276.
- [28] 常仲学, 宋国兵, 黄炜, 等. 基于相电压电流突变量特征的配电网单相接地故障区段定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2363-2370.
- CHANG Zhongxue, SONG Guobing, HUANG Wei, et al. Phase voltage and current fault components based fault segment location method under single-phase earth fault in distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2363-2370.
- [29] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.
- XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-04-15

作者简介:

管廷龙(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障监测; Email: guantinglong-1020@163.com

薛永端(1970—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网接地方式与接地故障自愈技术、配电网自动化技术; E-mail: xueyd70@126.com

徐丙垠(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障监测、配电自动化、智能配电网。Email: xuby@china.com

(编辑 许威)