

基于零序电流包络线拟合斜率的 配电网故障选线方法

赵建文, 范文璐, 胡雨佳

(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:配电网发生高阻接地故障时,传统的选线方法可靠性不高。对健全线路与故障线路在高阻接地条件下暂态零序电流的差异性进行分析,发现健全线路与故障线路的暂态零序电流趋势不同,两者对应趋势的斜率正负相反。因此提出了一种基于暂态零序电流包络线拟合斜率的故障选线方法。首先对暂态零序电流利用牛顿插值算法求取包络线;然后通过可变遗忘因子递推最小二乘法计算各条线路的拟合斜率,利用健全线路与故障线路包络线拟合斜率值正负相反的特点构建出选线判据;最后大量仿真结果表明:提出的选线方法适用于各种故障条件。

关键词:高阻接地故障;故障选线;包络线拟合斜率;牛顿插值法;可变遗忘因子递推最小二乘法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.014 中图分类号:TM76 文章编号:1673-9140(2022)03-0117-09

A distribution network fault line selection method based on zero-sequence current envelope fitting slope

ZHAO Jianwen, FAN Wenlu, HU Yujia

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: When a high-resistance ground fault occurs in the distribution network, the traditional route selection method is not sufficiently reliable. The difference of transient zero-sequence current under the condition of high resistance grounding while between the normal operated and fault lines is analyzed. The major difference is that the slopes of the corresponding trends of those two types of current are opposite. Therefore, a fault line selection method based on the slope of transient zero-sequence current envelope curve fitting is proposed. Firstly, the envelope curve of the transient zero-sequence current is obtained by the Newton interpolation algorithm, and then the fitting slope of each curve is calculated by the variable forgetting factor recursive least square method, and the resulting positive and negative characteristics of the slope values fitted by the envelope curves of the operating and the fault line can be utilized to construct the proposed fault line selection criterion. A large number of simulation results show that the route selection method proposed in this paper is suitable for various fault conditions.

Key words: high resistance ground fault; fault line selection; slope of envelope curve; Newton interpolation; recursive least square method with a variable forgetting factor

中国配电网多为小电流接地系统(中性点不接地系统或谐振接地系统)^[1]。在谐振接地系统中,低阻接地故障的问题已基本解决,而高阻接地故障利用传统的保护方法难以可靠选出故障线路^[2]。因此研究高阻接地故障选线成为小电流接地系统单相接地故障处理的关键。

在高阻接地情况下,故障信号微弱,检测难度大,故障选线较为困难。高阻接地故障占配电网故障总次数的10%以上,因此快速可靠地选出高阻接地故障对于电力网安全运行有重要意义。针对高阻接地,许多文献给出了有价值的研究,文献[3]提出利用零序电流波形畸变凹凸性的高阻接地故障检测方法,该方法具有较高的灵敏性,但在故障电流很小或噪声很大的情况下可能会失效;文献[4]计算出各条线路故障相的重心频率与相间相关系数作为选线特征量,这种方法在线路高阻接地故障时选线较为可靠,但在母线故障和接地电阻较小时可靠性有待提高;文献[5]提出一种基于电容电流极性 & 直流分量能量的选线方法,这种方法在小故障角情况下可以准确选线,但在高阻接地情况下,健全线路及故障线路电容电流的极性差异不明显,选线的准确性有待提高;文献[6]利用小波变换提取出故障突变特征量进行选线,这种方法在小故障角条件下有较高的准确率,但高阻条件下各频段的故障信号特征非常微弱,可能会出现误选的情况;文献[7]利用相关性原理选取小波相关系数最小的故障线路,但在高阻接地情况下零序电流振荡幅度很大,波形极其复杂,选线准确性有待提高;文献[8]通过判别零序功率方向来进行选线,这种方法在高阻接地时,零序电流、电压极性检测较困难。

高阻接地时线路暂态零序电流波形复杂,现有的选线方法存在误选的可能。本文提出一种基于暂态零序电流包络线拟合斜率的单相接地故障选线方法,这种方法不受零序电流波形复杂程度的影响。此方法引入零序电流信号包络线的概念,包络线反映的即为零序电流的变化趋势,利用牛顿插值法求取包络线,再通过可变遗忘因子递推最小二乘法计算得到包络线拟合斜率,从而构建选线判据。此方法对暂态零序电流包络线进行斜率拟合,使得其斜

率特征明显,减小故障特征的辨识难度。经仿真验证,该方法可以准确选出故障线路,且不受故障角及过渡电阻等条件的影响。

1 高阻接地故障零序电流特征分析

配电网谐振接地系统单相接地故障等值电路如图1所示^[9-11]。

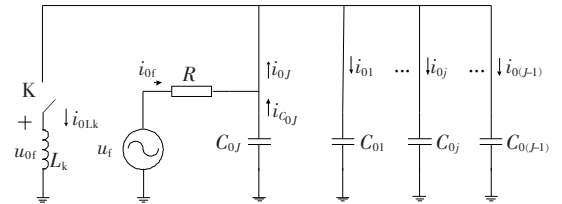


图1 配电网谐振接地系统单相高阻接地故障等值电路

Figure 1 Single-phase ground fault equivalent circuit of resonant grounding system in a distribution network

图1中共有 J 条馈线, $u_f = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$ 为故障点的虚拟电源, U_m 为故障相电压幅值, ω_0 为工频角频率, $\varphi + \pi$ 为故障初相角, u_{of} 为母线零序电压, C_{0j} ($j=1, 2, \dots, J$)为第 j 条线路的对地零序电容, L_k 为消弧线圈零序等效电感, R 为等效电阻,其等于线路等效电阻与3倍的接地点过渡电阻 R_f 之和, i_{0j} ($i_{C_{0j}}$)为第 j 条线路的零序电流(对地零序电容电流), i_{of} 为故障点零序电流, i_{0Lk} 为流经消弧线圈的零序电流。当开关 K 闭合时为谐振接地系统,打开时为中性点不接地系统。

根据图1可知,健全线路与故障线路暂态零序电流方向相反,由此可得流过健全线路零序电流 i_{0j} 及故障线路零序电流 i_{0j} 如下^[12]:

$$i_{0j} = I_0 e^{\frac{-t}{\tau}} + L_k C_{0j} (\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f) e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) + L_k C_{0j} \cdot (\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 - 2\delta A_1 \omega_f) e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (1)$$

$$i_{0j} = -I_0 e^{\frac{-t}{\tau}} - [A_1 + L_k (C_{0\Sigma} - C_{0j})] (\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f) e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) - [A_2 + L_k (C_{0\Sigma} - C_{0j})] (\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 + 2\delta A_1 \omega_f) e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (2)$$

$$\begin{cases} A_1 = -B \sin \varphi \\ A_2 = \frac{-\delta B \sin \varphi - \omega_0 B \cos \varphi}{\omega_f} \end{cases} \quad (3)$$

$$B = -U_m / |Z| (1 - \omega_0^2 L_k C_{0\Sigma}) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \delta = 1/2RC_{0\Sigma} \\ \omega_f = \sqrt{1/L_k C_{0\Sigma} - (1/2RC_{0\Sigma})^2} \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、(5)中 Z 为从故障点输入系统阻抗; ω_f 为电流自振角频率; $C_{0\Sigma}$ 为所有线路的对地零序电容之和。对式(1)、(2)求解关于时间 t 的一阶导数, 可得到健全线路及故障线路暂态零序电流的斜率表达式, 即

$$i'_{0j}(t) = -\frac{1}{\tau} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + L_k C_{0j} (\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f) \cdot [-\delta e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) - \omega_f e^{-\delta t} \sin(\omega_f t)] + L_k C_{0j} (\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 - 2\delta A_1 \omega_f) \cdot [-\delta e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) + \omega_f e^{-\delta t} \cos(\omega_f t)] \quad (6)$$

$$i'_{0j}(t) = \frac{1}{\tau} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} - [A_1 + L_k (C_{0\Sigma} - C_{0j}) \cdot (\delta^2 A_1 - A_1 \omega_f^2 - 2\delta A_2 \omega_f)] [-\delta e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) - \omega_f e^{-\delta t} \sin(\omega_f t)] - [A_2 + L_k (C_{0\Sigma} - C_{0j}) \cdot (\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2 + 2\delta A_1 \omega_f)] \cdot [-\delta e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) + \omega_f e^{-\delta t} \cos(\omega_f t)] \quad (7)$$

根据式(6)、(7)可知, 当发生高阻接地时, 健全线路与故障线路暂态零序电流的变化趋势相反。

谐振接地系统故障点处暂态等值电路如图 2 所示。

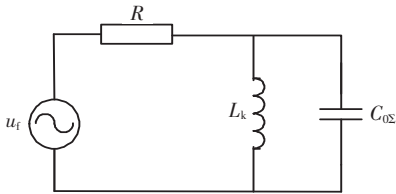


图 2 谐振接地系统单相接地故障点暂态等值电路

Figure 2 Transient equivalent circuit of single-phase ground fault point in a resonance grounding system

当过渡电阻较大时, R 可近似等于 3 倍的故障点过渡电阻 R_f , 此时流过线路的电流较小, 电容的充放电速度较慢, 主谐振频率相对较低^[13]。

流过故障点的零序电流为

$$i_{0f} = -\frac{L_k}{R} (A_2 \omega_f - \delta A_1) e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) - \frac{L_k}{R} (-A_1 \omega_f - \delta A_2) e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (8)$$

由式(1)、(2)、(8)可知, 发生高阻接地故障后暂态零序电流含有衰减的高频正弦分量。由于各种谐振状态的存在, 导致暂态零序电流的波形复杂, 并且

高阻接地情况下信号微弱, 因此特征辨识难度大。现有对高阻接地故障的研究用现代信号处理的方法, 通常采用幅值、极性、能量等作为选线特征量, 容易受到复杂波形的影响, 导致暂态零序电流信号幅值较小; 且由于衰减直流分量的影响, 存在两者零序电流极性相同的情况, 健全线路与故障线路的能量、极性特征差异不明显^[14], 因此现有方法在高阻接地故障条件下选线时可能会出现误选的情况。

根据式(6)、(7)可知, 当发生高阻接地时, 健全线路与故障线路暂态零序电流的变化趋势相反, 由于故障暂态过程零序电流的数值非常大, 且故障发生后的暂态过程非常短, 一般仅为 $2\tau \sim 3\tau$, 所以暂态零序电流变化速率很大, 其整体趋势对应的斜率数值很大, 因此本文先对各条线路的暂态零序电流利用局部极大值的定义进行包络线的求取, 包络线反映的即为暂态零序电流的趋势, 再对包络线的斜率进行估计, 将拟合出的包络线斜率作为选线特征量。在高阻接地情况下, 此斜率特征显著, 不受暂态零序电流波形复杂程度的影响。

发生单相接地故障后各条线路的暂态零序电流波形如图 3 所示。当发生高阻单相接地故障时, 故障信号较微弱且复杂, 但健全线路与故障线路都需要经历暂态衰减过程最终趋于平稳进入稳态过程, 且由图 3 可知, 健全线路与故障线路在暂态过程中将从 2 个不同的方向分别向稳态过程过渡, 因此两者暂态零序电流对应趋势的斜率正负相反。同理, 当过渡电阻较小时, 健全线路与故障线路的趋势也存在同样的特征。由上述分析可知发生低阻接地及高阻接地时都存在健全线路与故障线路包络线斜率正负相反的特征, 因此可根据这一差异进行单相接地故障选线。

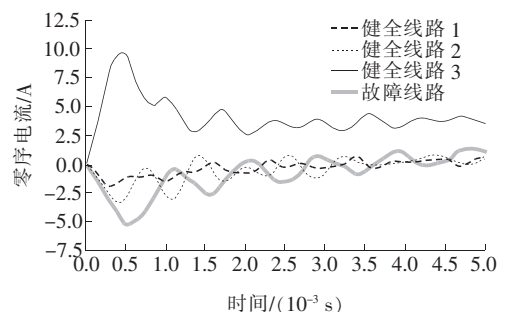


图 3 各出线暂态零序电流

Figure 3 Transient zero-sequence current of each branch

2 基于可变遗忘因子递推最小二乘法的包络线拟合

由于发生单相接地故障后,暂态零序电流的主谐振频率较高,暂态零序电流存在振荡现象,暂态零序电流中每个采样点对应的斜率都不相同,若直接用原始暂态零序电流信号来求取其趋势斜率,则会使得健全线路与故障线路的斜率数值较小,甚至会出现同正或同负的情况,特征差异不明显,因此不能直接利用暂态零序电流原始信号来求取斜率值。为了解决这一问题,此处先采用牛顿插值法对各条线路的暂态零序电流利用局部极大值的定义进行包络线的求取,这种算法实际计算时间短,计算量小,求出的插值多项式是唯一的,且不易出现过拟合的现象,得到的包络线与原始数据的趋势更接近,求出的包络线信号频率较低,不存在振荡现象。再对包络线利用可变遗忘因子递推最小二乘法进行拟合,此时求得的健全线路与故障线路暂态零序电流信号趋势的斜率正负一定相反,不会出现前述的问题。

2.1 牛顿插值法包络线求取

为获取暂态零序电流的包络线需要先对暂态零序电流采样值进行筛选,即挑选出暂态零序电流的极大值 i_{0m} ($m=1,2,\dots,M$),其中 m 表示暂态零序电流极大值的个数,再通过牛顿插值法^[15-17]求取暂态零序电流包络线。

根据牛顿插值法可得到关于采样时刻及采样值的均差,即

$$i[t_1, t_k] = \frac{i(t_k) - i(t_1)}{t_k - t_1} \quad (9)$$

$$i[t_1, t_2, \dots, t_k] = \frac{i[t_2, t_3, \dots, t_k] - i[t_1, t_2, \dots, t_{k-1}]}{t_k - t_1} \quad (10)$$

其中, $t_1 \sim t_k$ 为 k 个不同的采样时刻,式(9)为零序电流采样值 $i(t)$ 关于 t_1, t_k 的一阶均差,式(10)为采样值 i 的 k 阶均差, $i(t_k)$ 为暂态零序电流的极大值 i_{0m} 。对极大值 i_{0m} 进行筛选,求取每个极值点两侧相邻 2 个极值的均值,并对该均值设置一定的裕

度,按照中间极值点在该均值裕度范围内保留的原则进行筛选。

由式(10)可以写出零序电流包络线的插值公式,即

$$N(t) = i(t_1) + i[t_1, t_2](t - t_1) + \dots + i[t_1, t_2, \dots, t_k, t](t - t_1) \dots (t - t_{k-1})(t - t_k) \quad (11)$$

根据式(11)可求得暂态零序电流包络线。

2.2 可变遗忘因子递推最小二乘法的包络线拟合

最小二乘算法可以对参数进行估计,其中递推形式的最小二乘算法在有新的数据加入后,不需要对大矩阵进行求逆运算,只需要对原有的估计值进行修正,即可得到新的估计值。本文采用可变遗忘因子的递推最小二乘法对参数进行估计,这种算法在数据量较大时可以防止“数据饱和”现象发生,且算法精度较高^[18-21]。

可变遗忘因子的递推最小二乘法目标函数为

$$T = \sum_{n=1}^L \lambda^{L-n} [i_n - t_n^T k]^2 \quad (12)$$

式中 L 为总迭代次数; i_n 为零序电流原始信号值; t_n ($n=1,2,\dots,N$) 为采样时刻; k 为待估计的斜率参数; λ 为遗忘因子, $0 < \lambda \leq 1$ 。根据式(12)可以得到可变遗忘因子的递推最小二乘法参数估计迭代公式为

$$k_n = k_{n-1} + Q_n [i_n - t_n^T k_{n-1}] \quad (13)$$

$$P_n = \frac{1}{\lambda} [I - Q_n t_n^T] P_{n-1} \quad (14)$$

$$Q_n = \frac{P_{n-1} t_n}{\lambda + t_n^T P_{n-1} t_n} \quad (15)$$

$$e_n = i_n - t_n^T k_n^T \quad (16)$$

式(16)中 e_n 为误差。遗忘因子 λ 在取值范围内, λ 的取值越小,数据遗忘的速度越快, λ 越接近 1,则算法精度高。为了平衡这 2 种性能,可变遗忘因子 λ 的取值为

$$\lambda[k] = \min \left\{ \frac{\sigma_u \sigma_v}{\xi + |\sigma_e - \sigma_v|}, \lambda_{\max} \right\} \quad (17)$$

式中 ξ 为一个很小的常数,防止分母为零; σ_e^2 为误差信号的功率; σ_v^2 为系统噪声功率。

因此本文引入特征参量 k 来表示暂态零序电

流包络线趋势的斜率,并利用可变遗忘因子递推最小二乘法对暂态零序电流包络线进行拟合,并估计拟合出的直线斜率,此斜率 k 即为包络线的拟合斜率。

3 基于暂态零序电流包络线拟合斜率的故障选线方法

根据前文分析可知,健全线路与故障线路暂态零序电流波形复杂,但两者的变化趋势完全不同,其趋势对应的斜率正负相反。本文所用的包络线反映的即为暂态零序电流的趋势,因此健全线路与故障线路包络线的斜率正负相反。依据这个结论即可构造出适用于高阻接地故障的基于暂态零序电流包络线拟合斜率的小电流接地系统单相接地故障选线方法。

当小电流接地系统发生单相接地故障时,提取各条出线 1/4 周波暂态零序电流 $i_{0j} (j = 1, 2, \dots, J)$,并求取其包络线,利用包络线进行拟合斜率的计算,从而消除暂态过程中零序电流振荡现象对拟合的影响,使得利用可变遗忘因子递推最小二乘法求出的健全线路与故障线路暂态零序电流包络线拟合斜率数值 k_j 更大,差别更显著更易被系统辨识。各条出线 1/4 周波时间窗内的暂态零序电流包络线拟合斜率为

$$k_{jn} = k_{jn-1} + Q_{jn} (i_{0jn} + i_{0j}(0) - t_{jn}^T k_{jn} - 1) \tag{18}$$

式中 $i_{0j}(0)$ 为 0 时刻的零序电流值。由各条出线的拟合斜率构造出故障选线向量,即

$$\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_j] \tag{19}$$

由此可得到故障选线判据:若故障选线向量 \mathbf{K} 中只有第 j 条出线对应的暂态零序电流包络线拟合斜率 k_j 与其他出线的暂态零序电流包络线拟合斜率正负相反,则该条出线为故障线路;如果所有出线的暂态零序电流包络线拟合斜率 k_j 正负都相同,则母线发生单相接地故障。

故障选线方法的流程如图 4 所示。

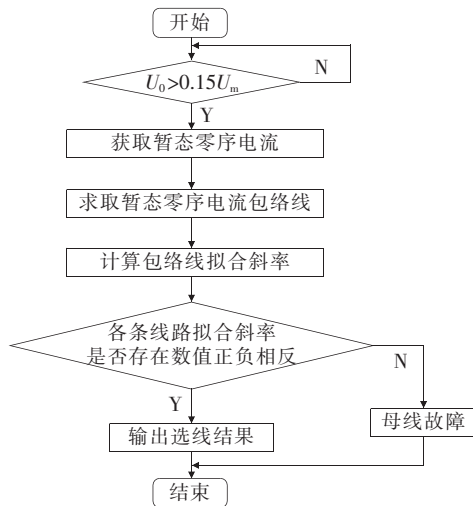


图 4 故障选线方法流程

Figure 4 The flow chart of fault line selection method

4 仿真分析及实验验证

4.1 仿真模型

利用仿真软件 Matlab/Simulink 搭建如图 5 所示的 10 kV 配电网系统仿真模型,共有 4 条馈出线路,长度分别为 $L_1 = 8 \text{ km}$ 、 $L_2 = 12 \text{ km}$ 、 $L_3 = 16 \text{ km}$ 、 $L_4 = 20 \text{ km}$,线路参数如表 1 所示。

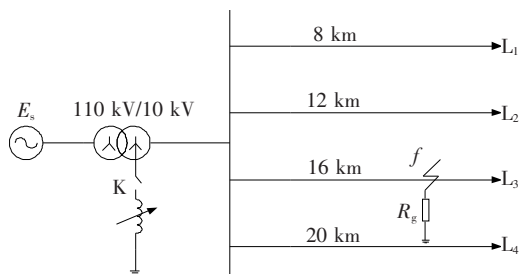


图 5 系统仿真模型

Figure 5 Diagram of the simulation system

表 1 线路模型参数

Table 1 Parameters of the line model

架空线路	电阻/ (Ω/km)		电感/ (mH/km)		电容/ ($\mu\text{F}/\text{km}$)	
	R_1	R_0	L_1	L_0	C_1	C_0
LGJ-240	0.17	0.23	1.21	5.48	0.061	0.038

4.2 仿真算例

在馈出线 L_3 距离母线 10 km 处,设置单相接地故障,系统采用谐振接地过补偿方式运行,补偿度

为 $P=10\%$, 故障点高阻过渡电阻为 $R_g=1\ 000\ \Omega$, 故障初相角为 $\varphi=45^\circ$ 。设置各采样点的仿真采样频率为 $10\ \text{kHz}$ 。各条线路的波形分别如图 6~9 所示。

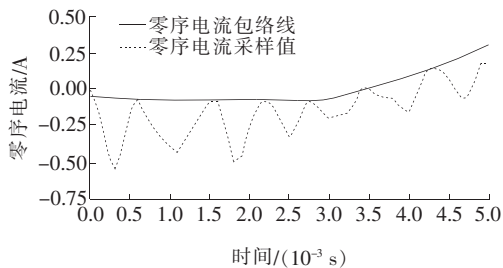


图 6 线路 L_1 暂态零序电流及包络线

Figure 6 Transient zero sequence current and envelope curve of L_1

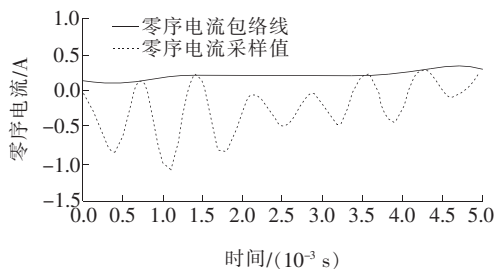


图 7 线路 L_2 暂态零序电流及包络线

Figure 7 Transient zero sequence current and envelope curve of L_2

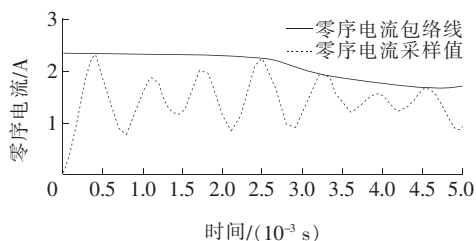


图 8 线路 L_3 暂态零序电流及包络线

Figure 8 Transient zero sequence current and envelope curve of L_3

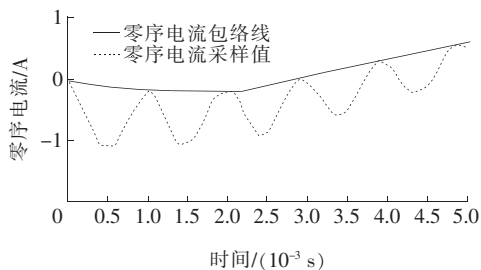


图 9 线路 L_4 暂态零序电流及包络线

Figure 9 Transient zero sequence current and envelope curve of L_4

图 6~9 中, 虚线为各条出线的暂态零序电流波形, 实线为用牛顿插值法求出的零序包络线波形。

利用可变遗忘因子递推最小二乘法计算各条馈出线的包络线拟合斜率, 并构造出故障选线向量 $\mathbf{K}=[46.10, 144.64, -213.76, 158.97]$, 由选线向量可以看出, 线路 L_3 的拟合斜率与其他线路的拟合斜率正负相反, 则线路 L_3 发生了单相接地故障, 因此该方法可以准确选出高阻接地故障。

4.3 方法适应性分析

为验证此方法能够在各种条件下都适用, 尤其是经高阻接地时, 此处设置不同的过渡电阻 R_g 、故障角 φ 、系统运行方式(中性点不接地、谐振接地欠补偿 $P=-20\%$ 、过补偿 $P=10\%$)、故障位置及加入不同信噪比的噪声进行仿真验证。 L_{3-15} 为故障点位于线路 L_3 距母线 $15\ \text{km}$ 处, k_j ($j=1, 2, 3, 4$) 为各条线路的暂态零序电流包络线拟合斜率。线路及母线故障选线结果如表 2~6 所示。

表 2 不同过渡电阻故障选线结果

($\varphi=30^\circ, P=10\%, L_{3-10}$)

Table 2 Fault line selection results of different transition resistances($\varphi=30^\circ, P=10\%, L_{3-10}$)

R_g/Ω	$\mathbf{K}=[k_1, k_2, k_3, k_4]$	选线结果
100	[604.56, 1361.70, -2385.65, 721.61]	L_3
500	[46.78, 176.11, -299.76, 87.98]	L_3
1000	[69.09, 98.58, -213.01, 168.42]	L_3
2000	[41.61, 43.15, -88.54, 83.62]	L_3
3000	[36.98, 33.04, -60.67, 53.97]	L_3
4000	[10.69, 26.17, -37.10, 39.73]	L_3

表 3 不同故障角故障选线结果

($R_g=1\ 000\ \Omega, P=10\%, L_{3-10}$)

Table 3 Fault line selection results of different fault angles($R_g=1\ 000\ \Omega, P=10\%, L_{3-10}$)

$\varphi/(\circ)$	$\mathbf{K}=[k_1, k_2, k_3, k_4]$	选线结果
0	[-23.86, -25.82, 56.87, -58.97]	L_3
30	[43.05, 98.58, -139.92, 104.42]	L_3
90	[45.30, 150.24, -538.69, 122.87]	L_3

表 4 不同运行方式故障选线结果

 $(\varphi=30^\circ, R_g=1\ 000\ \Omega, L_{3-10})$ Table 4 Fault line selection results of different system operation modes($\varphi=30^\circ, R_g=1\ 000\ \Omega, L_{3-10}$)

系统运行方式	$\mathbf{K}=[k_1, k_2, k_3, k_4]$	选线结果
谐振接地过补偿	[43.05, 98.58, -139.92, 104.42]	L ₃
谐振接地欠补偿	[40.45, 90.36, -168.82, 105.00]	L ₃
不接地	[16.23, 42.11, -320.96, 67.19]	L ₃

表 5 不同故障位置故障选线结果($\varphi=30^\circ, P=10\%$)Table 5 Fault line selection results of different fault locations($\varphi=30^\circ, P=10\%$)

R_g/Ω	故障位置	$\mathbf{K}=[k_1, k_2, k_3, k_4]$	选线结果
1 000	L ₃₋₁₀	[43.05, 98.58, -139.92, 104.42]	L ₃
1 000	L ₃₋₁₅	[63.21, 80.89, -106.66, 139.52]	L ₃
1 000	母线	[50.83, 74.78, 110.08, 83.44]	母线

表 6 不同信噪比故障选线结果($\varphi=30^\circ,$ $R_g=1\ 000\ \Omega, P=10\%, L_{3-10}$)Table 6 Fault line selection results of different signal-to-noise ratios($\varphi=30^\circ, R_g=1\ 000\ \Omega, P=10\%, L_{3-10}$)

信噪比	$\mathbf{K}=[k_1, k_2, k_3, k_4]$	选线结果
10	[34.52, 260.96, -154.61, 7.72]	L ₃
20	[5.70, 365.31, -162.18, 97.48]	L ₃
30	[24.26, 201.01, -158.94, 52.74]	L ₃

由表 2~5 可知,当线路发生单相接地故障时,健全线路与故障线路的包络线拟合斜率数值正负相反,且此数值的正负不受过渡电阻、故障角、运行方式及故障位置的影响,在最不利的故障条件下(故障角 $\varphi=0^\circ$,高阻 $R_g=4\ 000\ \Omega$),健全线路与故障线路包络线拟合斜率正负仍相反。表 6 为加入不同信噪比噪声的仿真结果,由表 6 数据可看出,当原始信号受到噪声干扰时,选线结果不会受到影响。由此可见本方法可以准确选出故障线路。当母线发生单相高阻接地故障时,各条出线的包络线拟合斜率正负相同,由此可见本方法可以准确判别出母线故障。

4.4 实验验证

将本文所提出的选线方法在具有 4 条馈出线的配电网模拟系统中进行实验验证,在不同接地电阻

条件下可准确选出故障线路。例如当模拟系统采用谐振接地过补偿 10%,设置线路 L₁ 发生单相接地故障,过渡电阻为 1 000 Ω 。通过计算得到的包络线拟合斜率向量为 $\mathbf{K}=[-58.97, 13.75, 6.57, 5.66]$,根据本文选线判据,故障线路 L₁ 与其余 3 条健全线路包络线拟合斜率正负相反,具有明显的故障特征。

5 结语

本文提出了一种基于暂态零序电流包络线拟合斜率的单相高阻接地故障选线方法。

1)该方法利用发生单相高阻接地故障后,健全线路与故障线路暂态零序电流趋势不同,其对应的斜率正负相反的特点进行故障选线,在不同故障条件下选线的结果不受影响。

2)由于高阻接地条件下,故障特征不明显,因此本文采用包络线拟合的方法使得拟合斜率值更大,从而使得高阻接地条件下健全线路和故障线路的特征差异更显著,减小了故障特征的辨识难度。

参考文献:

- [1] 程路,陈乔夫.小电流接地系统单相接地选线技术综述[J].电网技术,2009,33(18):219-224.
CHENG Lu, CHEN Qiaofu. A survey on faulty line selection technology for single-phase grounded transmission line in small current neutral grounded system[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 219-224.
- [2] 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.
- [3] 耿建昭,王宾,董新洲,等.中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J].电力系统自动化,2013,37(16):85-91.
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault

- in neutral point effectively grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16):85-91.
- [4] 刘谋海,王媛媛,曾祥君,等.基于暂态相电流特征分析的故障选线新方法[J].电力系统及其自动化学报, 2017,29(1):30-36.
LIU Mouhai, WANG Yuanyuan, ZENG Xiangjun, et al. Novel method of fault line selection based on characteristic analysis of transient phase-current[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(1):30-36.
- [5] 魏科文,张靖,何宇,等.基于VMD和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J].电力系统保护与控制, 2021,49(22):105-113.
WEI Kewen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Single-phase grounding fault line selection in a resonant grounding system based on VMD and correlation clustering[J]. Power system protection and control, 2021, 49 (22): 105-113.
- [6] 王栋,邱志斌,魏巍,等.220 kV某变电站GIS单相接地故障分析及处理措施[J].高压电器, 2020,56(11):259-265.
WANG Dong, QIU Zhibin, WEI Wei, et al. Single-phase Grounding Fault Analysis of a GIS in a 220 kV Substation and Treatment Measures[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11):259-265.
- [7] 魏向向,温渤婴.基于2阶累加生成相关性的谐振接地系统故障选线方法[J].电网技术, 2017,41(5):1674-1682.
WEI Xiangxiang, WEN Boying. A novel fault line detection method based on 2-order accumulated generating operation correlation analysis for resonant earthed system[J]. Power System Technology, 2017, 41(5):1674-1682.
- [8] 郑康霖,耿增玮,王红霞,等.基于同步量测大数据的配网单相接地故障检测及定位方法[J].电网与清洁能源, 2020,36(9):50-56.
ZHENG Kanglin, GENG Zengwei, WANG Hongxia, et al. Single-phase grounding fault detection and localization based on big data from synchronized phasor measurement[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9):50-56.
- [9] 杨帆,刘鑫星,沈煜,等.基于零序电流投影系数的小电阻接地系统高阻接地故障保护[J].电网技术, 2020,44(3):1128-1133.
YANG Fan, LIU Xinxing, SHEN Yu, et al. High resistance ground fault protection of low resistance grounding system based on zero sequence current projection coefficient[J]. Power System Technology, 2020, 44(3):1128-1133.
- [10] 高俊青,李题印,胡晓琴,等.考虑频段筛选的配电网单相接地选线方法研究[J].智慧电力, 2020,48(2):92-97+118.
GAO Junqing, LI Tiying, HU Xiaoqin, et al. Line detection methods for single-phase grounding fault in distribution network considering frequency band selecting [J]. Smart Power, 2020, 48(2):92-97+118.
- [11] PAUL P D. Phase-ground fault current analysis and protection of a high-resistance grounded power system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(4):3306-3314.
- [12] 束洪春,龚振,田鑫萃,等.基于故障特征频带及形态谱的单相接地故障选线[J].电网技术, 2019,43(3):1041-1053.
SHU Hongchun, GONG Zhen, TIAN Xincui, et al. Single line-to-ground fault line selection based on fault characteristic frequency band and morphological spectrum[J]. Power System Technology, 2019, 43(3):1041-1053.
- [13] 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 earth fault in arc suppression coil grounded system with different grounding resistances[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9):43-51.
- [14] 李福志,郑卫宾,张文海.基于回路直流电阻测量的输电线路单相接地故障离线故障定位[J].中国电力, 2021,54(2):140-146.
LI Fuzhi, ZHENG Weibin, ZHANG Wenhai. Fault path direct-current resistance based off-line single-phase-to-ground fault location [J]. Electric Power, 2021, 54(2):140-146.
- [15] ZHANG Y, SHANG C. Combining newton interpola-

- tion and deep learning for image classification[J]. Electronics Letters, 2015, 51(1): 40-42.
- [16] 宋智威,熊成林,黄路,等. 基于牛顿插值的单相整流器功率前馈无差拍控制[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3623-3629.
SONG Zhiwei, XIONG Chenglin, HUANG Lu, et al. Power feedback-forward and deadbeat control of single-phase rectifier based on newton interpolation[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3623-3629.
- [17] 盛立程,曾喆昭,李莎. 基于代数多项式模型的用电量预测研究[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 34-40.
SHENG Lizheng, ZENG Zhezhaoh, LI Sha. Research on electricity consumption prediction with the algebraic polynomial model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 34-40.
- [18] BEZA M, BONGIORNO M. Application of recursive least squares algorithm with variable forgetting factor for frequency component estimation in a generic input signal[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1168-1176.
- [19] 尹良震,李奇,洪志湖,等. PEMFC 发电系统 FFRLS 在线辨识和实时最优温度广义预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3223-3235+3378.
YIN Liangzhen, LI Qi, HONG Zhihu, et al. FFRLS online identification and real-time optimal temperature generalized predictive control method of PEMFC power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3223-3235+3378.
- [20] 范忠,史明明,张宸宇,等. 基于三点筛选法与偏最小二乘法的系统谐波阻抗估计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(17): 34-38.
FAN Zhong, SHI Mingming, ZHANG Chenyu, et al. Estimation of system harmonic impedance based on three-point screening and partial least squares[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(17): 34-38.
- [21] 荀倩,王培良,李祖欣,等. 基于递推最小二乘法的永磁伺服系统参数辨识[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 161-169.
XUN Qian, WANG Peiliang, LI Zuxin, et al. PMSM parameters identification based on recursive least square method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 161-169.
- (上接第 108 页 Continued from page 108)
- [12] 刘幸蔚,李永丽. 逆变型电源 T 接电网后对纵差保护的影响及准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1595-1600.
LIU Xingwei, LI Yongli. Effect of IIDG connected to grid as a teed line on longitudinal differential protection and maximum penetration capacity[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1595-1600.
- [13] 黄河,朱磊,高松,等. 提升分布式电源消纳的配网快速遍历重构方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 166-172.
HUANG He, ZHU Lei, GAO Song, et al. Reconfiguration method of distribution system for increasing the penetration of distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 166-172.
- [14] 郭小强,邬伟扬,漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 22-28+19.
GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 22-28+19.
- [15] 韩伟,刘素梅,肖超,等. 计及发电单元故障特性差异的光伏电站短路电流计算模型[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 129-135.
HAN Wei, LIU Sumei, XIAO Chao, et al. Steady short-circuit calculation model for a photovoltaic station considering different generation units' fault characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 129-135.