

基于 S 变换时频特性的谐振接地系统 故障选线新方法

蔡 军¹, 周 波¹, 黄 跃¹, 曾祥君²

(1. 国网湖南省电力有限公司长沙供电分公司, 湖南 长沙 410015; 2. 长沙理工大学
智能电网运行与控制湖南重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要:谐振接地系统在不同故障条件下发生单相接地故障时,故障信息十分微弱,给故障检测带来了极大的困难。但故障馈线与健全馈线的短时窗暂态零序电流时频域分布特性存在差异,利用 S 变换强大的时频分析能力对单相接地故障下零序电流的暂态特性进行了分析,以各馈线中暂态零序电流在不同频率下不同时刻的特征差异为依据,构造零序电流幅值时频矩阵,在综合考虑多种频率信息、突显时频局部特征的基础上,提出了一种基于 S 变换时频特性的故障选线新方法。该方法弥补了传统选线方法仅基于单一特征频带涵盖信息不足以及各馈线特征频带不一致的缺陷,结合图像处理相似度原理,通过综合相关系数实现配电网谐振接地系统单相接地故障选线。仿真结果表明该方法受故障位置、故障电阻、故障初始角、网络结构的影响较小,对不同故障接地类型都能进行有效判别,故障边界明显,可靠性好,抗干扰能力强,适用性更广。

关 键 词:配电网;谐振接地系统;故障选线;S 变换;时频特性

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.013 中图分类号:TM773 文章编号:1673-9140(2022)03-0109-08

A fault line selection method based on time-frequency characteristics in S-transform for resonant grounded systems

CAI Jun¹, ZHOU Bo¹, HUANG Yue¹, ZENG Xiangjun²

(1. Changsha Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410015, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: When single-phase grounding fault occurs in resonant grounded system in different fault conditions, the fault signals are very weak, which makes it difficult to detect the fault. According to the differences in characteristics of transient zero sequence current of short-time window time-frequency, the transient characteristics of the zero sequence current of single-phase earth fault is utilized and analyzed in this paper by S transform, where the zero-sequence current amplitude time-frequency matrix can be constructed based on these differences in characteristics. On the basis of multiple frequency information and local characteristics of time-frequency, a new method of fault line selection based on S-transform time-frequency characteristics is proposed in this paper. This method can be applied in the scenarios

收稿日期:2018-07-08;修回日期:2019-11-20

基金项目:国家自然科学基金(52037001)

通信作者:蔡军(1990-),男,硕士,主要从事电力系统保护与控制研究;E-mail:1127254786@qq.com

with the lack of information coverage in a single feature band and the inconsistent band characteristics of each feeder. Combined with the similarity assessment of image processing, the single-phase ground fault line selection for a resonant grounding system of a distribution network can be achieved by comprehensive correlation coefficients. The simulation results show that the new method will be less affected by fault initial angle, fault resistance, fault location and network structure. It can effectively distinguish different fault grounding types, and has obvious fault boundary, high reliability, strong anti-interference ability, and more extensive applicability.

Key words: distribution network; resonant grounding system; fault line selection; S-transform; time frequency characteristics

配电网具有分布面积广、结构错综复杂的特点,尤其对于谐振接地系统的架空与电缆线路的混合线路,单相接地故障信息微弱,电弧不稳定,导致采用稳态量的故障选线方法效果不理想,而对于导线坠地以及树枝引起的高阻接地故障经常有误选与漏选的情况。因此,采用数值更大的故障暂态量作为判据进行故障选线成为近年来研究的热点^[1-2]。

目前,许多学者已提出了基于暂态零序电流能量、极性、幅值、突变量的多种故障选线方法^[3-4]。文献[5]将故障暂态零序电流进行小波包分解,以能量最大的原则选择特征频带,以特征频带下能量的大小为判据进行故障选线;文献[6]通过小波包分解得到故障暂态零序电流的特征频带,以特征频带下相似度的大小为判据进行故障选线,但存在各频率信号混叠现象,易造成干扰;文献[7]利用S变换得到故障信号的主导特征频率,以主导特征频率下各线路暂态能量和零序无功方向为判据来判别故障线路,但可靠性不高;文献[8]采用小波包分解,按照分解系数突变量最大值的原则来选取特征频带进行故障判别。现有的研究主要是利用故障特征频带信息,对于故障信号的时变特性没有很好的考虑,如果能突出频带系数做时频局部化特征,将更好地刻画出故障信号特征。而暂态零序电流是一种非平稳且非线性的信号,由不同频率分量组成,为了有效地提取谐振接地系统微弱的暂态信号,通常采用小波变换的多分辨率特性来提取信号的特征频带进行故障判别,但该方法仅考虑了特征频带信号,而未考虑其余频段信号,损失了原始信号的部分重要信息,并且特征频带内又存在各频率信号混叠的现象,导致故障边界不明显,容易造成误判、漏判的问题,此外各线路特征频带不一致的问题也给选线带来极大的干

扰。采用小波包分解最致命的问题就是小波分析的效果与小波基函数的选取密切相关,具有多解性,且小波重构会产生信息的丢失。假如小波基函数选择不恰当或分解尺度不同,将导致故障选线结果发生很大偏差,甚至造成误判。因此该选线方法有待进一步改进^[9]。

为进一步提高小电流接地系统故障选线的可靠性,突显出故障线路与健全线路之间的特征差异,本文在综合考虑多种频率信息、突显时频局部特征的基础上,提出一种基于S变换时频特性的故障选线方法。通过对各馈线的暂态零序电流进行分析,利用S变换构造幅值时频矩阵,计算馈线间幅值时频矩阵的综合相关系数来判别故障线路。

1 谐振接地系统单相接地故障时频特征

谐振接地系统的暂态接地电流主要由暂态电容和电感电流组成^[10],其暂态接地电流的数学表达为

$$i_d = i_C + i_L = (I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{Lm} \cos \varphi e^{-t/\tau_L} + I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin(\omega t) - \cos \varphi \cos(\omega_f t) \right) e^{-t/\tau_C} \quad (1)$$

式中 $(I_{Cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi)$ 为接地故障电流稳态分量; $I_{Cm} \left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin(\omega t) - \cos \varphi \cos(\omega_f t) \right) e^{-t/\tau_C}$ 和 $I_{Lm} \cos \varphi e^{-t/\tau_L}$ 分别为电容电流的暂态自由振荡分量和电感电流的暂态直流分量,统称为接地故障的暂态分量。

由式(1)可知,暂态零序电流的时频特征由故障条件的不同而差异很大,当谐振接地系统在电压零

点接地时,暂态零序电流中的高频暂态分量较小而感性分量更为明显,消弧线圈产生的感性衰减直流分量一般只流过故障线路,导致故障线路的衰减直流分量较大,而正常线路的衰减直流分量较小;在电压峰值产生接地时,容性高频暂态分量占主导地位;当线路发生单相高阻接地时,暂态高频特征不明显,且衰减较快。在中性点经消弧线圈接地系统中,暂态零序电流的频率一般在 0~3 kHz 之间,其中配电网中馈线的容抗远大于其零序阻抗,则零序阻抗可忽略不计,其简化的单相接地故障零序网络如图 1 所示。

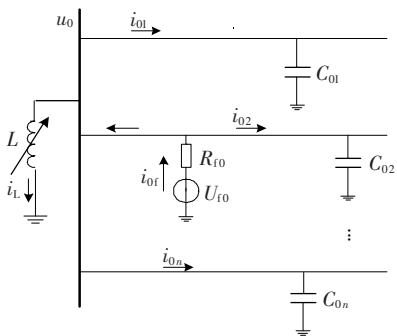


图 1 谐振接地系统零序网络

Figure 1 Simplified zero-sequence network of resonant earthed system

由图 1 可简化得到健全线路零序电流与电压的关系为

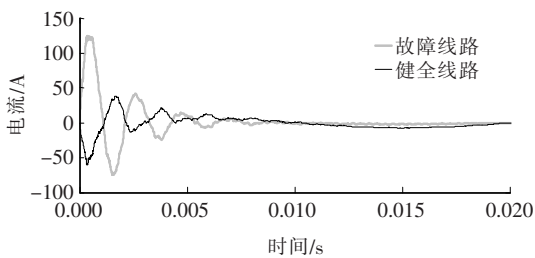
$$i_{0k} = C_{0k} \frac{du_0}{dt}, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

而故障线路零序电流与电压的关系为

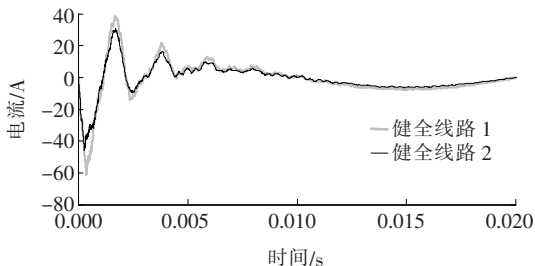
$$i_{0k} = -C_{0k} \frac{du_0}{dt}, k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式(2)、(3)中 i_{0k} 为流过第 k 条线路的零序电流; C_{0k} 为第 k 条线路的零序分布电容; u_0 为母线零序电压; n 为配电网总的馈线数量。

由式(2)、(3)可知,母线处检测到故障线路与健全线路的暂态零序电流波形差异较大,且相位相反;而健全线路之间的暂态零序电流波形相似,相位大致相同,其相似性与零序电流的幅值与相位密切相关,其幅值主要取决于零序分布电容。当相电压过峰值时发生金属性接地故障,其中故障线路与正常线路以及两条正常线路的暂态零序电流波形如图 2 所示。



(a)故障馈线与健全馈线的暂态零序电流



(b)健全馈线与健全馈线的暂态零序电流

图 2 金属性接地时暂态零序电流

Figure 2 Transient zero-sequence current of metal grounding fault

2 基于 S 变换时频特性的故障选线方法

暂态零序电流是一种非平稳且非线性的信号,由不同频率分量组成,而 S 变换具有无损、可逆、且与频率一一对应的时频局部化特性,可以将信号分解成一系列所需频率点信号的叠加,更好地刻画出故障暂态信号某频率点的时频特性,能够综合考虑并突显出零序电流的衰减直流分量与各次谐波分量的特征差异,是一种能够有效地分析非平稳信号并提取暂态突变以及微弱特征的处理方法。

2.1 幅值时频矩阵构造

暂态零序电流经过 S 变换后,会产生一个复时频幅值矩阵,该矩阵中任意元素均以复数形式构成,为刻画每一个频率下各馈线的幅值、相位随时间的变化特性,本文采用复时频幅值矩阵的实部进行展开分析。为突显故障信号的时频局部化特性,综合考虑各个频率点信息,将 S 变换后得到的各频率下幅值向量进行细分,每个频率有 N 个采样点,将其等分成 M 个块,定义第 i 个频率下第 n 个时段块所对应的幅值为

$$E_i^n = \sum_{j=1+(n-1) \cdot N/M}^{n \cdot N/M} \text{real}[S(i, j)] \quad (4)$$

按照式(4)求取时频矩阵中所有的时频小块,得

到反映暂态零序电流信号的幅值时频矩阵为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1^1 & E_1^2 & \cdots & E_1^j & \cdots & E_1^M \\ E_2^1 & E_2^2 & \cdots & E_2^j & \cdots & E_2^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_i^1 & E_i^2 & \cdots & E_i^j & \cdots & E_i^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{\frac{N}{2}+1}^1 & E_{\frac{N}{2}+1}^2 & \cdots & E_{\frac{N}{2}+1}^j & \cdots & E_{\frac{N}{2}+1}^M \end{bmatrix} \quad (5)$$

时频谱矩阵 \mathbf{E} 的具体构造方法如下。

1) 采样频率设置为 10 kHz, 为避免电流互感器的干扰, 本文将重点对故障后五分之一周期的数据进行分析, 则五分之一周期的时间窗内含有 40 个采样点, 经过 S 变换分析处理后, 将得到相对应的复时频矩阵, 再通过对复时频矩阵取实部数据, 利用 MATLAB 软件分析出各馈线零序电流的幅值时频特性图, 其故障馈线 1 与健全馈线 2 的零序电流幅值时频特性如图 3 所示。

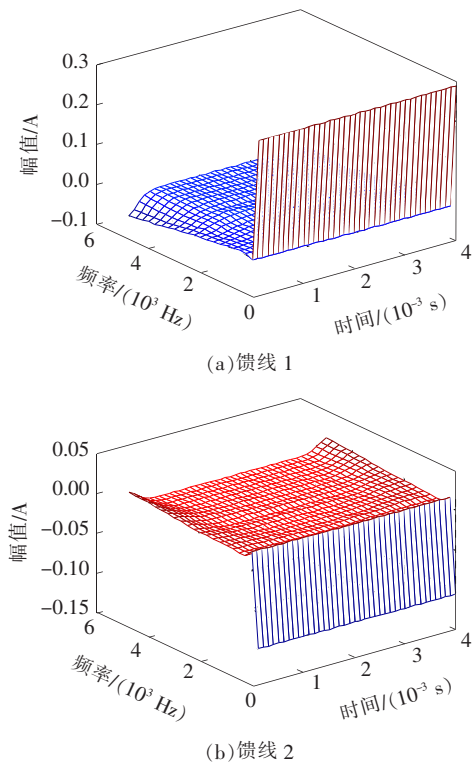


图 3 零序电流幅值时频特性

Figure 3 The time frequency characteristic diagram of zero sequence current

2) 馈线 1 的幅值时频特性与馈线 2 的时频分布特性完全不一致, 尤其在 2 kHz 以内所对应的时频区段内前者分布特征与后者完全相反, 可通过各馈线之间的相关系数进行故障选线。为了突出显示各馈线的时频局部特性, 将每频率下的信号等分成 4 个

时段, 即以每 10 个采样点为一时段, 且仅考虑前 4 个频率, 即 0~750 Hz, 每条线路将会得到一个 4×4 的矩阵。

2.2 时频矩阵相似度计算

借助图像处理中相似度原理来刻画 2 个矩阵间的相似性, 定义馈线 a 、 b 幅值时频矩阵的相似度为

$$D_{ab} = \sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M [E_a(i, j) - E_b(i, j)]^2 \quad (6)$$

式中 $E_a(i, j)$ 、 $E_b(i, j)$ 分别为线路 a 、 b 幅值矩阵第 i 个频率所对应的第 j 个时段元素, 代表线路 a 、 b 幅值矩阵之间的相似程度。

式(6)展开之后可表示为

$$D_{ab} = \sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M E_a(i, j) E_a(i, j) - 2 \sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M E_a(i, j) E_b(i, j) + \sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M E_b(i, j) E_b(i, j) \quad (7)$$

为方便阈值设定, 需对式(7)进行归一化处理, 最终得到处理后的相关系数表达式为

$$\rho_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M E_a(i, j) E_b(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M E_a^2(i, j) \sum_{i=1}^{N/2+1} \sum_{j=1}^M E_b^2(i, j)}} \quad (8)$$

式中 ρ_{ab} 为线路 a 、 b 的幅值矩阵相关系数, 取值范围为 $[-1, +1]$ 。若 $\rho_{ab} = 1$, 表明线路 a 、 b 的暂态零序电流波形完全一致; 若 $\rho_{ab} = 0$, 表明线路 a 、 b 的暂态零序电流波形差异大, 完全不相关; 若 $\rho_{ab} = -1$, 表明线路 a 、 b 的暂态零序电流波形相同, 方向相反。

由上述分析可知, 故障线路与健全线路幅值矩阵的相关系数接近于 -1 , 而健全线路幅值矩阵之间的相关系数接近于 1。若有 l 条线路, 则会得到一个 $l \times l$ 的矩阵, 即

$$\boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1j} & \cdots & \rho_{1l} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2j} & \cdots & \rho_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{i1} & \rho_{i2} & \cdots & \rho_{ij} & \cdots & \rho_{il} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{l1} & \rho_{l2} & \cdots & \rho_{lj} & \cdots & \rho_{ll} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由相关性原理可以看出, 此相似矩阵是一个对称矩阵, 对角元素全为 1, 可以在时频域内全面反映各暂态零序电流信号在每一频率点、每一时间段的

幅值及相位关系,刻画出故障馈线与健全馈线之间的相似程度。

2.3 故障选线判据及算法流程图

为进一步刻画故障馈线与健全馈线两者之间的差异,提高故障边界,形成更加简单直观的故障选线判据,借鉴综合相关系数理论,由相似矩阵求取每条馈线与其他馈线之间综合相关系数,即

$$\rho_i = \frac{1}{l-1} \left(\sum_{j=1}^l \rho_{ij} - 1 \right) \quad (10)$$

式中 $\sum_{j=1}^l \rho_{ij}$ 为馈线和系统所有馈线的相似度之和; i 为配电系统的馈线条数。

由式(10)可知,当谐振系统发生单相接地故障后,由于故障馈线所求得的综合相关系数接近于-1,而其他健全馈线所求得的综合相关系数接近于 $1 - 2/(l - 1)$ 。因此,可设定一阈值 ρ_{set} ,通过比较综合相关系数 ρ_i 与阈值 ρ_{set} 的大小来进行故障选线。若所有馈线的综合相关系数均大于 ρ_{set} ,判定母线故障;若有馈线的综合相关系数小于 ρ_{set} ,则说明该线路为故障线路。判别流程如图 4 所示。

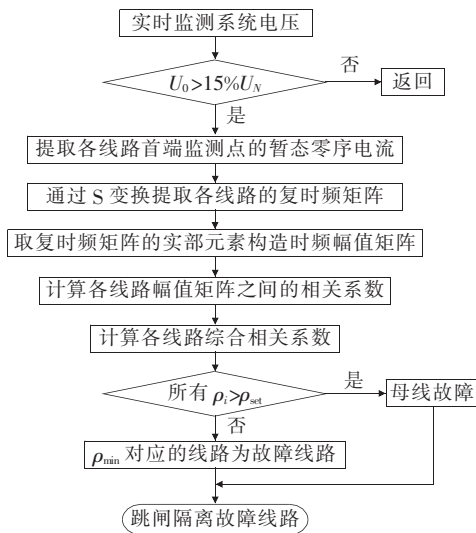


图 4 故障选线判别流程

Figure 4 Discriminant flow chart of fault line selection

3 仿真实验

本文基于 ATP 仿真软件搭建 10 kV 配电网谐振接地系统仿真模型如图 5 所示,其中架空—电缆线路参数按照参考文献[6]进行设置,具体线路参数如表 1 所示。该仿真系统中建有 5 条出线,其中线路 1、5 均为 20 km 的纯架空线路,线路 2、4 分别为 10、8 km 的纯电缆线路,而线路 3 为 10 km 的架空—电缆混合线路,其中架空线路与电缆线路均为 5 km,消弧线圈补偿度为 108%,电感值设为 468 mH,每线路负荷均由 $400 + j637 \Omega$ 的阻抗表示;采样频率为 10 kHz。

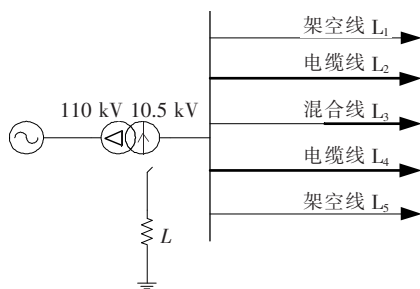


图 5 谐振接地系统仿真模型

Figure 5 Simulation model of a resonant grounding system

谐振接地系统单相接地故障的暂态过程较短,针对架空线路 1、电缆线路 2、混合线路 3,分别模拟不同故障线路、故障点位置、合闸初相角及故障电阻的单相接地故障,选线结果如表 2 所示。

相同条件下,利用小波包分解计算不同线路暂态零序电流信号综合相似系数的故障选线方法与该方法相比,采用小波包分解故障选线方法的故障边界没有本方法明显,且在距馈线 2 首端 5 km 发生故障初相角为 60° 高阻接地故障时,极易发生误判,造成选线错误,其中小波包选线结果如表 3 所示。

表 1 110 kV 配电网仿真模型线路参数

Table 1 110 kV distribution network simulation model line parameters

线路	零序参数			正序参数		
	$R_0 /$ (Ω/km)	$L_0 /$ (mH/km)	$C_0 /$ ($\mu\text{F}/\text{km}$)	$R_1 /$ (Ω/km)	$L_1 /$ (mH/km)	$C_1 /$ ($\mu\text{F}/\text{km}$)
架空线	0.275 0	4.600 0	0.005 4	0.125 0	1.300 0	0.009 6
电缆线	2.700 0	1.019 0	0.280 0	0.270 0	0.255 0	0.339 0

表 2 不同故障条件下谐振接地系统单相接地故障选线结果

Table 2 Results of single phase to ground fault line selection in resonant grounded system under different fault conditions

故障位置	$\theta/(^\circ)$	R_f/Ω	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	选线结果
距馈线 1 首端 2 km	30	5	-0.97	0.49	0.47	0.49	0.48	正确
		500	-1.00	0.50	0.50	0.50	0.49	正确
距馈线 2 首端 9 km	90	50	-0.95	0.50	0.50	0.50	0.50	正确
		5000	-0.99	0.49	0.49	0.49	0.48	正确
距馈线 3 首端 9 km	0	5	0.50	-0.99	0.50	0.50	0.50	正确
		500	0.50	-1.00	0.50	0.50	0.50	正确
距馈线 3 首端 9 km	90	50	0.50	-0.95	0.49	0.50	0.50	正确
		5000	0.50	-1.00	0.50	0.50	0.50	正确
母线故障	0	5	0.50	0.50	-1.00	0.50	0.50	正确
		500	0.50	0.50	-1.00	0.50	0.50	正确
母线故障	60	5000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	正确
		5	0.97	0.93	0.94	0.96	0.97	正确
		500	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	正确

表 3 不同故障条件下单相接地故障小波包选线结果

Table 3 Results of single phase to wavelet packet for ground fault line selection under different fault conditions

故障位置	$\theta/(^\circ)$	R_f/Ω	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	选线结果
距馈线 1 首端 2 km	30	5	-0.99	0.49	0.48	0.49	0.49	正确
		500	-0.71	0.56	0.54	0.56	0.58	正确
距馈线 2 首端 9 km	90	50	-0.99	0.50	0.50	0.50	0.50	正确
		5000	-0.70	0.24	0.18	0.24	-0.06	正确
距馈线 2 首端 9 km	0	5	0.50	-1.00	0.50	0.50	0.50	正确
		500	0.50	-0.98	0.50	0.50	0.50	正确
距馈线 2 首端 9 km	90	50	0.05	-0.56	0.04	-0.44	0.05	误判
		5000	-0.38	-0.18	0.00	-0.05	-0.38	误判

的仿真分析。

4.1 叠加噪声

当系统在噪声干扰的情况下发生单相接地故障时,该方法能正确选线。假设配电网在信噪比为 5、20、30、40 dB 的高斯白噪声干扰下,距线路 1 首端和末端 2 km 处分别发生单相接地故障时,其选线结果如表 4 所示。

表 4 叠加噪声下的故障选线结果

Table 4 Results of fault line detection with noise

故障位置	信噪比/dB	$\theta/(^\circ)$	R_f/Ω	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	选线结果
距馈线 1 首端 2 km	5	30	5	-0.96	0.49	0.47	0.48	0.49	正确
	20	30	500	-0.98	0.48	0.48	0.48	0.46	正确
距馈线 1 末端 2 km	30	0	500	-1.00	0.50	0.50	0.50	0.49	正确
	40	0	5000	-0.94	0.45	0.45	0.45	0.41	正确

4 选线方式的适用性

考虑该选线方法在工程实际应用中的适用性,针对线路噪声干扰、末端高阻接地故障、电弧故障、两点接地故障以及不同补偿度下的故障情况进行大量

4.2 线路末端高阻接地故障分析

小电流接地方式的配电网系统电压等级低、阻抗大导致单相接地故障电流非常微弱给故障检测带来了很大的难度,尤其是当系统发生线路末端高阻接地故障时,故障电流更小,故障相电压变化也不大,导致线路末端高阻接地故障的检测难度大。现针对线路 2 末端发生高阻接地故障,故障初相角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° ,接地电阻为 $5\text{ k}\Omega$,进行仿真分析,仿真结果表明该方法对于线路末端高阻接地故障仍适用,其线路 2 末端经高阻接地的故障选线结果如表 5 所示。

表 5 高阻接地的故障选线结果

Table 5 Result of fault line selection with large earthed resistance

$\theta/(\circ)$	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	选线
0	0.50	-1.00	0.50	0.50	0.50	正确
30	0.50	-0.99	0.50	0.50	0.50	正确
60	0.50	-0.99	0.50	0.50	0.50	正确
90	0.50	-1.00	0.50	0.50	0.49	正确

4.3 电弧故障分析

当配电网发生高阻接地故障后,经常伴随着间歇性电弧的产生,引起配电网的电弧故障。在电弧的熄灭与重燃的过程中电弧电阻会发生很大的变化,容易导致保护装置的频繁动作,引起误动作,造成更大的故障停电范围以及触电事故的发生。本文通过 ATP 仿真软件搭建电弧故障模型来模拟电弧故障,共模拟 4 次燃弧与 3 次熄弧过程。在距母线 5 km 处的混合线路 3 中发生电弧故障,故障初相角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° ,仿真结果表明该方法对电弧接地故障选线正确,其混合线路 3 距母线 5 km 处发生电弧接地选线结果如表 6 所示。

表 6 混合线路 3 距母线 5 km 处发生电弧接地故障选线结果

Table 6 Selection of arc faults at a distance of 5 km from the bus line at the hybrid line 3

$\theta/(\circ)$	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	选线
0	0.50	0.51	-0.97	0.51	0.50	正确
30	0.51	0.52	-0.93	0.52	0.51	正确
60	0.51	0.52	-0.92	0.52	0.51	正确
90	0.51	0.50	-0.89	0.51	0.51	正确

4.4 两点接地故障分析

当系统中不同线路在同一时刻与不同时刻发生单相接地故障时,该方法仍能正确选线。假设配电

网在架空线路 1 距母线 10 km 处与混合线路 3 距母线 5 km 处同时发生过渡电阻为 $50\ \Omega$ 的单相接地故障时,其故障选线结果如表 7 所示。

当配电网在架空线路 1 距母线 2 km 处与电缆线路 2 距母线 5 km 处,分别在不同时刻发生过渡电阻为 $5\text{ k}\Omega$ 的单相接地故障时,其中两点不同时刻产生接地故障的选线结果如表 8 所示。

表 7 2 点同一时间点的接地选线结果

Table 7 Results of fault line selection with two earthed fault occurring at the same time

$\theta/(\circ)$	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	选线
0	-0.498	0.003	-0.494	0.003	0.003	正确
30	-0.495	0.005	-0.500	0.004	0.002	正确
60	-0.458	0.022	-0.497	0.019	0.014	正确
90	-0.369	0.064	-0.444	0.0615	0.065	正确

表 8 2 点不同时刻的接地选线结果

Table 8 Results of fault line selection with two earthed fault occurring at different times

线路	$\theta/(\circ)$	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	选线
1	0	-0.537	-0.431	0.032	0.037	0.036	正确
2	30	-0.537	-0.431	0.032	0.037	0.036	正确
1	90	-0.630	-0.281	0.098	0.118	0.118	正确
2	60	-0.630	-0.281	0.098	0.118	0.118	正确

4.5 不同补偿度下的故障分析

由于消弧线圈的补偿作用会使故障点零序电流减小,消弧线圈的补偿度不同,单相接地故障的零序电流也不同,本文对不同补偿度下在架空—电缆混合线路 3 末端发生接地故障进行仿真分析,故障合闸角为 0° ,接地电阻为 $5\text{ k}\Omega$,仿真结果表明该方法对不同补偿度下的接地故障仍适用,其故障选线结果如表 9 所示。

表 9 不同补偿度下的接地选线结果

Table 9 Results of fault line selection with different compensation degrees

$\rho/\%$	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	选线
5	0.48	0.50	-1.00	0.49	0.50	正确
8	0.50	0.49	-1.00	0.50	0.49	正确
10	0.50	0.50	-0.99	0.50	0.50	正确

5 结语

本文在基于暂态零序电流时频特征、综合考虑多个频率信息的基础上,提出了一种基于 S 变换时

频特性的故障选线方法。通过分析各馈线的暂态零序电流,利用S变换构造幅值时频矩阵,计算各馈线幅值时频矩阵之间的综合相关系数来对故障线路进行判别。

1) 该方法综合考虑了多个信号较强的频率信息,突显时频局部特征,弥补了传统选线方法基于单一特征频带涵盖信息不足、各线路特征频带不一致以及特征频带内存在各频率信号混叠的缺陷。

2) 对于谐振接地系统,该方法能够有效地克服高阻接地故障中接地电阻大、故障初始角小导致故障暂态零序电流微弱的影响,实现正确选线,故障边界明显。

3) 该方法中的S变换本身的线性性质具有抑制高频干扰信号的作用,能有效地克服电弧接地故障带来的干扰因素进行正确选线。

4) 对不同补偿情况下,该方法都能实现正确选线,且对于同时或不同时接地的两点故障也能可靠选线。

参考文献:

[1] 黄宇浩,陈豪威,周佳铭,等.基于暂态零序电流频谱灰关联分析的谐振接地系统故障选线方法[J].电力科学与技术学报,2017,32(3):69-74.

HUANG Yuhao, CHEN Haowei, ZHOU Jiaming, et al. Faulty feeder detection using grey relation analysis of transient zero-sequence current spectrum in resonant grounding system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 69-74.

[2] 姜博,董新洲,施慎行,等.自适应时频窗行波选线方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(24):6387-6397.

JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. A method of adaptive time frequency window traveling wave based fault feeder selection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6387-6397.

[3] 张健,王奕,曾祥君,等.基于多端行波到达时差的配电网故障选线方法[J].电力科学与技术学报,2016,31(4):51-57.

ZHANG Jian, WANG Yi, ZENG Xiangjun, et al. A novel fault line detection method with the time difference of multi-terminal detected traveling waves for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 51-57.

[4] 吴建辉,刘伟,康国庆,等.基于波形相似度的配网小电

流接地故障选线技术研究[J].电网与清洁能源,2020,36(8):38-42+49.

WU Jianhui, LIU Wei, KANG Guoqing, et al. Research on line selection technology of distribution network with small current and ground fault based on waveform similarity[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 38-42+49.

[5] 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 Tiyan, 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.

[6] 张国军,张文周,葛群,等.基于补偿参数的多零序电流互感器的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):1-9.

ZHANG Guojun, ZHANG Wenzhou, GE Qun, et al. Single-phase ground fault line selection method of small current grounding system of multiple zero-sequence current transformer based on compensation parameters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 1-9.

[7] 朱占春,闻生学,唐金锐,等.计及配电网参数影响的有源消弧算法分析与改进[J].中国电力,2021,54(3):149-158.

ZHU Zhanchun, WEN Shengxue, TANG Jinrui, et al. Analysis and improvement of active arc suppression algorithm considering effect of distribution line parameters[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 149-158.

[8] GONG J, LUAN R. A new wavelet packet method of single-phase earth fault line selection in distribution network based on the maximum difference comparison [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems, Tokyo, Japan: ICEMS, 2009: 1-5.

[9] 郝越峰.主动干预式消弧装置故障选线方法[J].高压电器,2021,57(2):184-188.

HAO Yuefeng. Fault line selection method of active interference arc suppression device[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 184-188.

[10] 侯思祖,郭威.基于自适应陷波滤波器和混沌振子的配电网故障选线[J].电测与仪表,2020,57(6):61-66.

HOU Sizu, GUO Wei. Fault line selection in distribution network based on adaptive notch filter and chaos oscillator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(6): 61-66.