

DOI: 10.7667/PSPC171058

基于 S 变换暂态能量与方向的无整定配电网选线新方法

陈豪威^{1,2}, 王媛媛¹, 唐夏菲¹, 殷惠¹, 林成¹, 黄路明¹

(1. 湖南省电动交通与智能配网工程技术研究中心(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114;

2. 国网湖北省电力有限公司检修公司鄂东运维分部, 湖北 武汉 430000)

摘要: 为了提高配电网单相接地故障时选线的准确性和可靠性, 提出了一种基于 S 变换暂态能量与方向的无整定配电网选线新方法。通过 S 变换计算各条线路故障特征频率下的暂态能量参数与综合相角参数, 利用欧氏距离算法融合二维信息得到每条线路的特征距离, 比较实时特征样本的故障距离和健全距离大小实现基于无整定保护判别的配电网故障选线。仿真结果表明, 该方法受故障位置、故障合闸角、故障电阻、网络结构等因素影响较小, 且判据裕度较高。该方法相比单一判据方法更加适用于结构复杂的配电网系统, 同时不必人为规定继电器的动作特性, 即无需人为设定判别整定值, 具有很高的选线准确性和鲁棒性。

关键词: S 变换; 暂态能量参数; 综合相角参数; 特征距离; 无整定

A new fault line selection method for distribution network system based on transient energy and direction of S-transformation

CHEN Haowei^{1,2}, WANG Yuanyuan¹, TANG Xiafei¹, YIN Hui¹, LIN Cheng¹, HUANG Luming¹

(1. Hunan Provincial Engineering Research Center of Electric Transportation and Smart Distributed Network, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. The Eastern Operation and Maintenance Division, Maintenance Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and reliability of faulty line selection when single phase grounding fault occurs in distribution systems, this paper presents a new non-setting fault line selection method for distribution systems based on transient energy and direction of S transform. The transient energy parameters and the integrated phase angle parameters are calculated at a characteristic frequency of each line by S transform, the Euclidean metric algorithm is used to get the characteristic distance of each line by fusing two-dimensional information, the robust distance and the fault distance of the real-time samples are compared, thereby realizing the fault line selection based on the method of non setting protection. According to simulation result, this method is affected little by fault location, fault initial phase angle, ground resistance network structure and other factors, and the criterion margin is higher. Comparing with single criterion method, it is more suitable for complex distribution network system. At the same time, it does not need to specify the operating characteristics of relays, which means there is no need to set discriminant settings and has high accuracy and robustness in fault line selection.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777014).

Key words: S-transform; transient energy parameters; integrated phase angle parameters; characteristic distance; non setting

0 引言

我国中低压配电网系统中性点大多为小电流接地运行方式。在该运行方式下的单相接地故障占配电网总故障次数的 80%左右, 且大多数相间故障都是由单相接地故障发展而来。因此当发生单相接地

故障时, 迅速准确地选出故障线路对于防止故障进一步扩大及隔离故障、恢复供电尤为重要^[1]。

根据故障信号的来源, 现有的配电网故障选线方法主要分为注入信号法^[2]、故障信号法^[3-4]及信息融合法^[5-6]等。注入信号法在现场应用中具有较好效果, 但其信号源的设计与控制相对复杂。故障信号法包括稳态信号^[7]选线方法和暂态信号^[8-12]选线方法, 其中稳态选线方法利用的故障电流信号微弱, 易受配电网中性点接地方式和电弧不稳定性等因素

基金项目: 国家自然科学基金资助(51777014); 湖南省自然科学基金资助(2016JJ2004)

的干扰,导致检测的信号可靠性较低。暂态信号的选线方法故障特征明显且受消弧线圈影响小,若能充分利用其特点,有利于选线。现有文献利用暂态信号选线方法主要集中在高频特征的提取,多数都是从不同角度对暂态信号进行处理来确定故障线路,但是在经高阻接地及故障角较小时选线效果不佳。文献[13-14]利用S变换进行故障选线,能够有效地提取某频带的暂态信号极性或能量特性,但未考虑其他特征的影响。文献[15]利用暂态零序电流起始阶段整体变化趋势选线,但当零序电流中含有较强直流分量时由于电流互感器饱和引起波形畸变而容易带来选线失效问题。文献[16-17]利用小波分析暂态零序电流进行故障选线,具有一定的适用性,但是会受到小波基函数的选取和小波分解尺度等因素影响。文献[18]提出的基于零序电流能量选线方法适用于纯架空线路,但在架空-电缆混合线路中会出现健全电缆线路的能量比故障架空线路高而发生误判的情况。

针对以上不足,本文在对小电流接地系统发生单相接地故障时各线路零序电流分析的基础上,利用S变换得到表征各线路的时频矩阵。通过故障特征频率下故障线路暂态能量远大于健全线路和故障线路零序电流相位滞后健全线路 180° 的特点,计算各条线路故障特征频率下的暂态能量参数与综合相角参数,利用欧氏距离算法融合二维信息得到每条线路的特征距离,最后基于无整定保护判别^[19]的方法,比较实时样本的故障距离和健全距离大小实现故障选线。

1 S变换的基本理论分析

S变换是以Morlet小波为小波基的连续小波变换和加时窗短时傅里叶变换的基础上延伸而来的一种具有强大时频分析能力的方法。它不仅提取原始信号的幅值信息,而且可以提取相角信息,拥有与频率相关的分辨特征,为研究故障选线提供了有力的支持。信号 $x(t)$ 经过S变换后得到与其相关的时频矩阵,定义为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau, f)\exp(-2\pi jft)dt \quad (1)$$

$$w(\tau-t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $w(\tau-t, f)$ 为高斯窗口; τ 为高斯窗口在时间轴 t 的位置控制参数; f 为频率; j 为虚数单位。由上式可知S变换的高斯窗函数的宽度和高度因频率的不同而发生改变,高斯窗的宽度与频率成正比,高度越大,自动调节频率分辨率的能力越强。

对式(1)右边进行传统的傅里叶变换,再作傅里叶反变换,最后通过变量代换将S变换转换成信号 $x(t)$ 的傅里叶变换 $x(f)$ 的函数,即

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(v+f)\exp\left[-\frac{2\pi^2v^2}{f^2}\right]\exp(j2\pi tv)dv \quad (3)$$

式中, $f \neq 0$,对式(3)进行离散化可以得到S变换的离散形式:

$$S(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(n+k)e^{-2\pi^2k^2/n^2}e^{j2\pi kn/N} \quad n \neq 0 \quad (4)$$

$$S(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \quad n \neq 0 \quad (5)$$

其中:

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-j2\pi kn/N} \quad (6)$$

对采集后的 N 个离散信号点 $x(i)(i=1,2,\dots,N)$ 采用式(4)和式(5)进行S变换得到 $n+1$ 行 m 列的时频矩阵,记为S矩阵,其列对应采样时间点,行对应频率,第一行 $n=0$ 对应直流分量,相邻行之间的频率之差 Δf 为

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (7)$$

第 n 行对应的频率为

$$f_n = \frac{f_s}{N}n \quad (8)$$

其中: f_s 为采样频率; N 为采样点; $n=0$ 时, $f_n=0$ 。

2 选线的判据

2.1 暂态能量参数

当发生单相接地故障时,故障主导特征频率下故障线路暂态能量远大于健全线路,因此可以构成保护判据。本文在考虑每条线路零序电流故障特征频率可能不一致的基础上,选取故障后1/4周期的各故障线路零序电流短窗数据,利用S变换处理各线路的零序电流信号。比较不同频率点的暂态能量大小,根据能量最大值的原理确定故障特征频率 f_i (包含 $f_i=0$ 的直流分量),并计算每条线路的主导特征频率 f_i 下各线路的短窗能量 W_{i-t} 。其中,故障后1/4周期的暂态能量计算公式为

$$W_i\left(\frac{T}{4}\right) = \int_0^{\frac{T}{4}} u_0(\tau) i_{0i}(\tau) d\tau \quad i=1,2,\dots,6 \quad (9)$$

式中: W_i 为第 i 条线路的暂态能量; $u_0(\tau)$ 为母线零序电压; $i_{0i}(\tau)$ 为第 i 条线路的零序电流。由于每条线路的起端零序电压均为母线零序电压,在分析中略去母线零序电压,利用S变换提取各线路零序电流信号各个频率点的特征,联立式(4)、式(5)和式(9),

可定义故障主导特征频率 f_i 下各线路的短窗能量 W_{i-t} 为

$$W_{i-t} = \sum_m [S(m, k)]^2 \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (10)$$

再对各条线路 S 变换的短窗能量进行归一化处理得到暂态能量参数, 其计算公式为

$$p_i = W_{i-t} / \sum_{i=1}^m W_{i-t} \quad (11)$$

$$Q_i = \frac{p_i - \min\{p_i\}}{\max\{p_i\} - \min\{p_i\}} \quad (12)$$

式(11)中, p_i 为故障特征频率下第 i 条线路的短窗能量占线路总能量的比率, 再对 p_i 进行归一化处理得到式(12)中的暂态能量参数 Q_i 。故障线路的能量参数接近于 1, 健全线路的能量参数接近于 0, 因此可以区分故障线路和健全线路。

2.2 综合相角参数

对各条线路的零序电流信号进行分析, 易知故障线路零序电流相位滞后健全线路 180° , 通过比较每条线路的零序电流相位可以构成保护判据。本文利用 S 变换处理各线路的零序电流信号得到复时频特性矩阵, 选取故障后 1/4 周期各故障线路零序电流的短窗数据, 根据能量最大值原理确定各条线路零序电流故障特征频率 f_q (其中 $f_q \neq 0$)。对故障主导特征频率 f_q 下时频矩阵的每个元素进行相角计算, 得到各条线路的相角矩阵 φ 为

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \dots & \varphi_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_{i1} & \dots & \varphi_{ij} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, φ_{ij} 表示第 i 条线路与第 j 条线路的相角差。为了进一步刻画故障线路与健全线路的差异性, 形成更加直观简单的故障选线判据, 本文根据各条线路之间的相角差异性, 提出了表示各条线路相角关系的综合相角参数, 其计算公式为

$$\varphi_i = -\frac{1}{(m-1)\pi} \sum_{j=1, i \neq j}^m \varphi_{ij} \quad (14)$$

式中: φ_i 表示线路 i 的综合相角参数; m 表示系统的出线条数。由公式可知故障线路的综合相角参数接近于 1, 健全线路的综合相角参数接近于 $-\frac{1}{m-1}$, 因此可以利用各条线路的综合相角参数来区分故障线路和健全线路。

3 选线的算法及流程

以线路归一化后的暂态能量参数 Q_i 为横坐标,

综合相角参数 φ_i 为纵坐标, 建立二维坐标系, 其中坐标 (Q_i, φ_i) 点表示线路 i 的暂态能量参数—综合相角参数坐标点。由前文的分析可知, 故障线路距离基准点 $(1, 1)$ 的距离较小, 而健全线路距离基准点 $(0, -\frac{1}{m-1})$ 的距离较小。本文通过欧氏距离算法分别计算出第 i 线路在二维坐标系中与故障样本中心、健全样本中心的故障距离 d_{gli} 、健全距离 d_{zli} , 其表达式为

$$d_{gli} = \sqrt{(Q_i - 1)^2 + (\alpha_i - 1)^2} \quad (15)$$

$$d_{zli} = \sqrt{(Q_i)^2 + (\alpha_i + \frac{1}{m-1})^2} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可知, 当线路发生单相接地故障时, 实时样本与故障样本中心的欧式距离(故障距离)接近于 0, 与健全样本中心的欧式距离(健全距离)

接近于 $\sqrt{1 + \left(1 + \frac{1}{m-1}\right)^2}$, 而健全线路相反。因此可以

构成保护判据: 对于不含分支线路的配电网系统, 当线路 i 的故障距离小于健全距离时可判定线路 i 为故障线路, 否则为健全线路。对于含分支线路的配电网系统, 当线路 i 的故障距离小于健全距离, 且满足线路 i 的故障距离大于其他馈线, 健全距离大于其他馈线等条件时可判定为故障线路, 否则为健全线路。此过程无需整定参数, 避免了人为因素干扰。

基于上述选线原理, 当配电网发生单相接地故障时, 实现故障选线的步骤如图 1 所示。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

为了验证上述算法的正确性, 本文基于 ATP-EMTP 电磁暂态仿真软件搭建含馈线分支线路的 10 kV 配电网单相接地故障模型^[20], 分别考虑架空线路和电缆混合线路两种情况。10 kV 配电网线路参数及模型如表 1、表 2 和图 2 所示。

表 1 架空线路参数

相序	$R/(\Omega/\text{km})$	$L/(\text{mH}/\text{km})$	$C/(\mu\text{F}/\text{km})$
正序	0.17	1.21	0.012
零序	0.23	3.7	0.009

表 2 电缆线路参数

相序	$R/(\Omega/\text{km})$	$L/(\text{mH}/\text{km})$	$C/(\mu\text{F}/\text{km})$
正序	0.12	0.52	0.29
零序	0.35	1.54	0.19

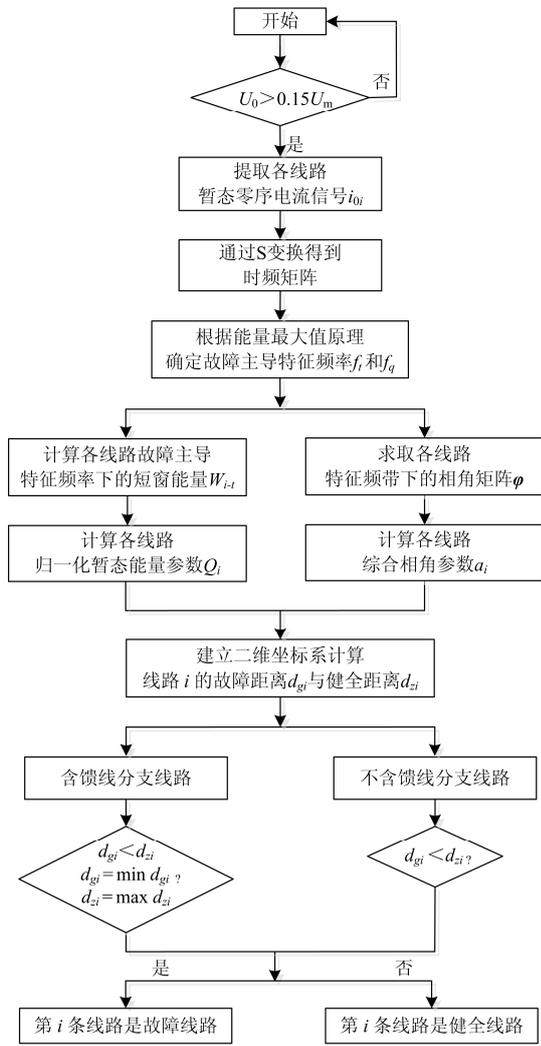


图 1 故障选线流程图

Fig. 1 Flow chart of faulty line selection

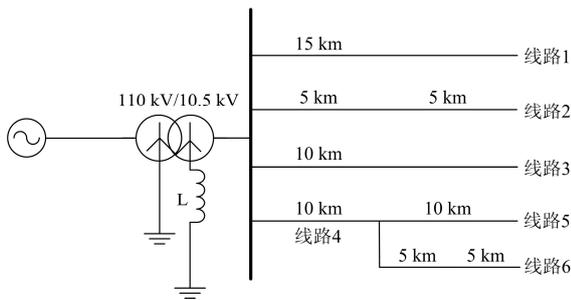


图 2 10 kV 配电网仿真模型

Fig. 2 Simulation model of 10 kV distribution system

10 kV 配电网仿真模型采用电缆线路与架空线路的混合模型，该系统有4条出线和2条分支线路，其中线路1、线路4和线路5分别为15 km、10 km和10 km的架空线路；线路2和线路6为混合线路，均

由5 km的架空线路和5 km的电缆线路组成；线路3为10 km的电缆线路。消弧线圈的补偿度 p 取8%，消弧线圈电感值取为0.773 H；各条线路的负荷都用一个 $400+j20 \Omega$ 的等效阻抗代替。

4.2 仿真分析

仿真中采样频率取10 kHz(每个周期200个采样点)，电源频率为50 Hz。单相接地故障后，第一个周期内的暂态信号最明显，选取故障后的1/4周期的信号进行处理分析。本文针对不同的故障线路、故障位置、故障电阻和故障合闸角进行了大量仿真。限于篇幅，本文给出了低阻接地故障、一般性故障、高阻接地故障等几种典型接地故障分析。

仿真的情况如下。

- 1) 故障线路 L_m ：从线路1到线路6。
- 2) 单相接地故障位置 X_f ：从线路长度的0%到100%，间隔为线路的长度的10%。
- 3) 故障电阻 R_f ：从1 Ω 至5 000 Ω 。
- 4) 故障合闸角 θ ：从 0° 至 90° 。

为了方便分析，假设线路3的50%处发生单相接地故障，利用S变换对每条线路故障后1/4周期的暂态零序电流进行分析，得到相对应的时频矩阵，再利用Matlab软件分析出故障线路与健全线路在各频带的能量分布如图3—图8所示。

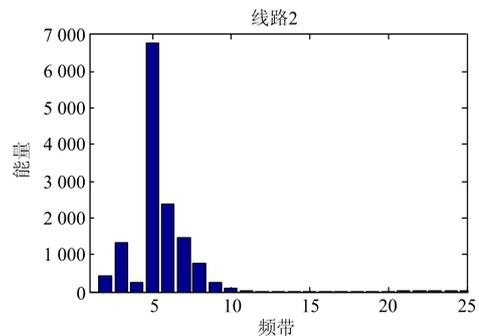


图 3 故障线路 L1

Fig. 3 Fault line L1

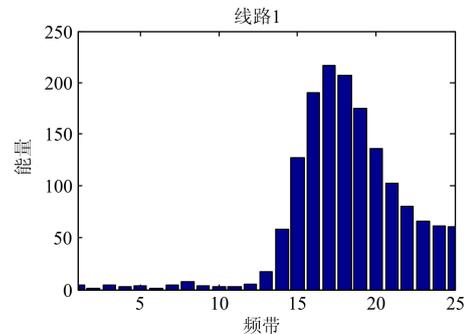


图 4 故障线路 L2

Fig. 4 Fault line L2

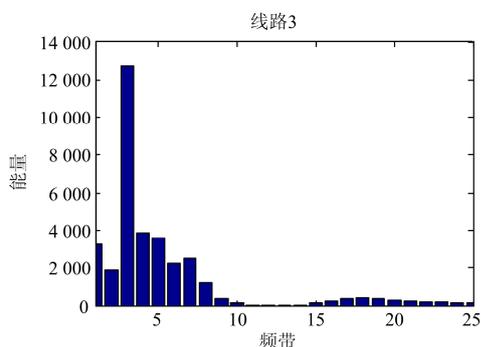


图5 故障线路L3

Fig. 5 Fault line L3

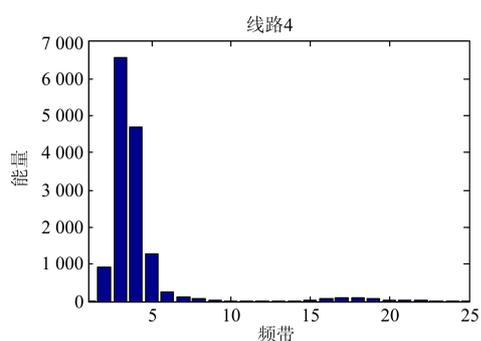


图6 故障线路L4

Fig. 6 Fault line L4

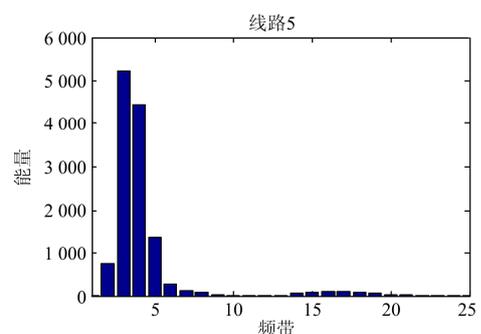


图7 故障线路L5

Fig. 7 Fault line L5

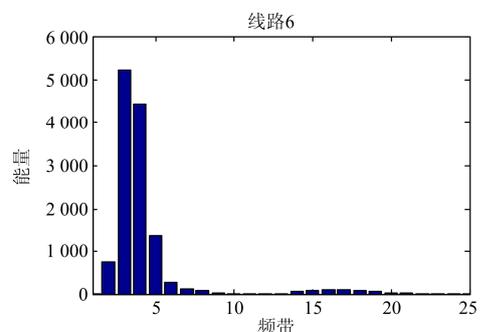


图8 故障线路L6

Fig. 8 Fault line L6

由图3—图8可知, 线路L1、L2、L3对应的故障特征频率分别为: 3 200 Hz、800 Hz、400 Hz。线路L4、L5、L6对应的故障特征频率均为400 Hz。可以分别计算出故障特征频率下各条线路所对应的暂态能量参数 Q_i 和综合相角参数 φ_i , 从而区分故障线路与健全线路。本文分别模拟10 kV配电网系统的6条线路在不同接地位置, 不同合闸角和不同故障电阻情况下发生单相接地故障。通过S变换得到表征各线路的时频矩阵, 然后计算各条线路故障特征频率下暂态能量参数 Q_i 和综合相角参数 φ_i , 得到其结果如表3和表4所示。

若以线路归一化后的暂态能量参数 Q_i 为横坐标, 线路综合相角参数 φ_i 为纵坐标, 建立二维坐标系, 计算每条线路所对应的二维坐标点 (Q_i, φ_i) , 利用欧氏距离算法分别计算出第*i*线路的故障距离 d_{gli} 和健全距离 d_{zli} 。为了方便分析, 当线路2的50%处发生了故障电阻为500 Ω 、故障合闸角为45°的单相接地故障, 其所对应的二维坐标点 $(Q_{i,i}, \varphi_i)$ 与故障样本中心和健全样本中心的特征距离可以用矩阵 D 表示:

$$D = \begin{bmatrix} 1.562 & 0.000 & 1.219 & 1.262 & 1.266 & 1.281 \\ 0.000 & 1.562 & 0.408 & 0.401 & 0.400 & 0.400 \end{bmatrix}$$

表3 基于不同故障条件下各线路暂态能量参数 Q_i
Table 3 Results of the transient energy parameter Q_i in each line based on different fault conditions

L_m	$X_f/\%$	R_f/Ω	$\theta/(^\circ)$	$Q_i [Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6]$					
1	10%	5	0	1	0.030	0.109	0.037	0.029	0
	50%	500	45	1	0.017	0.064	0.022	0.016	0
	90%	5000	90	1	0.091	0.335	0.132	0.102	0
2	10%	5	0	0.000	1	0.151	0.054	0.042	0
	50%	500	45	0.000	1	0.080	0.024	0.019	0
	90%	5000	90	0.000	1	0.015	0.001	0.002	0
3	10%	5	0	0.000	0.060	1	0.084	0.066	0
	50%	500	45	0.000	0.028	1	0.031	0.027	0
	90%	5000	90	0.000	0.006	1	0.001	0.001	0
4	10%	5	0	0.000	0.044	0.161	1	0.047	0
	50%	500	45	0.000	0.022	0.084	1	0.025	0
	90%	5000	90	0.000	0.004	0.011	1	0.006	0
5	10%	5	0	0.000	0.045	0.169	0.940	1	0
	50%	500	45	0.000	0.026	0.091	0.974	1	0
	90%	5000	90	0.000	0.191	0.366	0.871	1	0
6	10%	5	0	0.000	0.031	0.116	0.650	0.033	1
	50%	500	45	0.000	0.018	0.067	0.725	0.020	1
	90%	5000	90	0.000	0.105	0.367	0.494	0.072	1

表 4 基于不同故障条件下各线路综合相角参数 φ_i

Table 4 Results of the integrated phase angle parameter φ_i in each line based on different fault conditions

L_m	$X_f/\%$	R_f/Ω	$\theta/^\circ$	φ_i [φ_1 φ_2 φ_3 φ_4 φ_5 φ_6]					
1	10%	5	0	1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
	50%	500	45	1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
	90%	5000	90	1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
2	10%	5	0	-0.2	1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
	50%	500	45	-0.2	1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
	90%	5000	90	-0.2	1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
3	10%	5	0	-0.2	-0.2	1	-0.2	-0.2	-0.2
	50%	500	45	-0.2	-0.2	1	-0.2	-0.2	-0.2
	90%	5000	90	-0.2	-0.2	1	-0.2	-0.2	-0.2
4	10%	5	0	-0.2	-0.2	-0.2	1	-0.2	-0.2
	50%	500	45	-0.2	-0.2	-0.2	1	-0.2	-0.2
	90%	5000	90	-0.2	-0.2	-0.2	1	-0.2	-0.2
5	10%	5	0	-0.4	-0.4	-0.4	0.8	0.8	-0.4
	50%	500	45	-0.4	-0.4	-0.4	0.8	0.8	-0.4
	90%	5000	90	-0.4	-0.4	-0.4	0.8	0.8	-0.4
6	10%	5	0	-0.4	-0.4	-0.4	0.8	0.4	0.8
	50%	500	45	-0.4	-0.4	-0.4	0.8	0.4	0.8
	90%	5000	90	-0.4	-0.4	-0.4	0.8	0.4	0.8

表 5 基于不同故障条件下各线路故障距离 d_{g1} 和健全距离 d_{z1}

Table 5 Results of the fault distance d_{g1} and sound distance d_{z1} in each line based on different fault conditions

L_m	$X_f/\%$	R_f/Ω	$\theta/^\circ$	$[d_{g1}, d_{z1}]$	$[d_{g2}, d_{z2}]$	$[d_{g3}, d_{z3}]$	$[d_{g4}, d_{z4}]$	$[d_{g5}, d_{z5}]$	$[d_{g6}, d_{z6}]$	选线结果
1	10%	50	0	[0.000, 1.562]	[1.543, 0.030]	[1.495, 0.109]	[1.539, 0.029]	[1.544, 0.029]	[1.562, 0.000]	1
	50%	500	45	[0.000, 1.562]	[1.551, 0.017]	[1.522, 0.064]	[1.548, 0.022]	[1.552, 0.016]	[1.562, 0.000]	1
	90%	5000	90	[0.000, 1.562]	[1.506, 0.091]	[1.372, 0.335]	[1.481, 0.132]	[1.499, 0.102]	[1.562, 0.000]	1
2	10%	50	0	[1.562, 0.000]	[0.000, 1.562]	[1.166, 0.428]	[1.239, 0.404]	[1.248, 0.402]	[1.281, 0.400]	2
	50%	500	45	[1.562, 0.000]	[0.000, 1.562]	[1.219, 0.408]	[1.262, 0.401]	[1.266, 0.400]	[1.281, 0.400]	2
	90%	5000	90	[1.562, 0.001]	[0.000, 1.562]	[1.269, 0.400]	[1.280, 0.400]	[1.279, 0.400]	[1.281, 0.400]	2
3	10%	50	0	[1.562, 0.000]	[1.525, 0.060]	[0.000, 1.562]	[1.510, 0.084]	[1.521, 0.066]	[1.562, 0.000]	3
	50%	500	45	[1.562, 0.000]	[1.544, 0.028]	[0.000, 1.562]	[1.542, 0.031]	[1.545, 0.027]	[1.562, 0.000]	3
	90%	5000	90	[1.562, 0.000]	[1.559, 0.006]	[0.000, 1.562]	[1.561, 0.001]	[1.562, 0.001]	[1.562, 0.000]	3
4	10%	50	0	[1.562, 0.000]	[1.534, 0.044]	[1.464, 0.161]	[0.000, 1.562]	[1.532, 0.047]	[1.562, 0.000]	4
	50%	500	45	[1.562, 0.000]	[1.548, 0.022]	[1.510, 0.084]	[0.000, 1.562]	[1.546, 0.025]	[1.562, 0.000]	4
	90%	5000	90	[1.562, 0.000]	[1.560, 0.004]	[1.555, 0.011]	[0.000, 1.562]	[1.558, 0.006]	[1.562, 0.000]	4
5	10%	5	0	[1.720, 0.200]	[1.695, 0.205]	[1.628, 0.262]	[0.209, 1.373]	[0.200, 1.414]	[1.720, 0.200]	5
	50%	500	45	[1.720, 0.200]	[1.705, 0.202]	[1.699, 0.220]	[0.202, 1.396]	[0.200, 1.414]	[1.720, 0.200]	5
	90%	5000	90	[1.720, 0.200]	[1.617, 0.276]	[1.537, 0.417]	[0.238, 1.326]	[0.200, 1.414]	[1.720, 0.200]	5
6	10%	5	0	[1.720, 0.200]	[1.703, 0.202]	[1.656, 0.231]	[0.403, 1.193]	[1.138, 0.601]	[0.200, 1.414]	6
	50%	500	45	[1.720, 0.200]	[1.710, 0.201]	[1.682, 0.211]	[0.340, 1.235]	[1.149, 0.600]	[0.200, 1.414]	6
	90%	5000	90	[1.720, 0.200]	[1.662, 0.226]	[1.536, 0.418]	[0.545, 1.115]	[1.105, 0.604]	[0.200, 1.414]	6

通过矩阵 D 可知线路2的故障距离 d_{g12} 远小于健全距离 d_{z12} ，而其他线路相反，因此可以构成保护判据：对于不含分支线路的配电网系统，当线路 i 的故障距离小于健全距离时可判定线路 i 为故障线路，否则为健全线路。对于含分支线路的配电网系统，当线路 i 的故障距离小于健全距离，且满足线路 i 的故障距离大于其他馈线，健全距离大于其他馈线等条件时可判定为故障线路，否则为健全线路。此过程无需整定参数，避免了人为因素干扰。

为了进一步验证本文所提判据的适用性和优势，现模拟不同合闸角、不同故障电阻、不同故障位置下的单相接地故障情况，得到各个线路的故障距离 d_{g1} 与健全距离 d_{z1} 的结果如表5所示。

由表5可知，当故障发生在线路1至线路4时，该方法均能准确判别故障线路；当故障发生在分支线路5和分支线路6时，流经分支线路的零序电流相位与线路4相同，但分支线路暂态能量参数大于线路4暂态能量参数，根据选线判据，该方法也能准确地判别故障分支线路。相比两种单一的故障选线方法，该方法具有较高的判据裕度，受故障位置、故障合闸角、故障电阻和网络结构等因素影响较小，并且无需人为设定阈值进行故障判别，具有很高的选线准确性和可靠性。

5 结论

本文提出了一种基于 S 变换方向与能量的无整定配电网故障选线新方法。根据故障线路与健全线路零序电流相位和能量的差异性, 利用 S 变换得到表征各线路的时频特性矩阵。通过建立综合相角参数与暂态能量参数的二维坐标得到各条线路的健全距离与故障距离, 通过比较实时特征样本的故障距离和健全距离大小实现基于无整定保护判别的配电网故障选线。该方法具有如下特点:

1) 充分利用了故障发生后的暂态零序电流特征, 将两种判据有效结合, 提高了保护裕度, 且受故障位置、故障合闸角、故障电阻、网络结构等因素的影响较小。

2) 通过欧式距离计算出每条线路的健全距离和故障距离进行故障判别, 无需人为设定阈值, 提高了故障选线的可靠性。

3) 选线算法可适用于含分支线路的配电网系统, 且用 10 kHz 的采样频率记录故障数据足以实现选线, 对硬件要求较低。

参考文献

- [1] 姜博, 董新洲, 施慎行. 配电网单相接地故障选线典型方法实验研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 67-74.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Experimental study of typical methods of single phase to ground fault line selection in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 67-74.
- [2] 樊淑娴, 徐丙垠, 张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 91-95.
FAN Shuxian, XU Bingyin, ZHANG Qingzhou. A new method for fault line selection in distribution system with arc suppression coil grounding with square-wave signal injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 91-95.
- [3] 赵敏. 基于Rogowski线圈测量信号和改进Elman神经网络的矿井电网故障选线研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(9): 71-75.
ZHAO Min. Research on fault line selection of mine power grid based on Rogowski coil measurement signal and improved Elman neural network[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9): 71-75.
- [4] 宋金钊, 李永丽, 石峥, 等. 一种新的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 9-15.
SONG Jinzhao, LI Yongli, SHI Zheng, et al. A fault line selection method for resonant earthed system with high accuracy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 9-15.
- [5] 蔡颖倩, 王钢, 樊晨曦, 等. 利用故障全过程信息的消弧线圈接地系统间歇性接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 9-17.
CAI Yingqian, WANG Gang, FAN Chenxi, et al. Faulty line selection based on information in the whole process of intermittent earth fault in resonant grounding distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 9-17.
- [6] 庄伟, 牟龙华. 融合零序电流衰减直流分量的矿山电网接地选线[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1087-1095.
ZHUANG Wei, MU Longhua. Fault line election of coalmine distribution network considering decaying DC component of zero sequence current under single-phase earth fault[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1087-1095.
- [7] 梁睿, 辛健, 王崇林, 等. 应用改进型有功分量法的小电流接地选线[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 375-379.
LIANG Rui, XIN Jian, WANG Chonglin, et al. Fault line selection in small current grounding system by improved active component method[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 375-379.
- [8] 潘本仁, 宋华茂, 张秋风, 等. 小电流接地故障无功功率分析及选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 51-56.
PAN Benren, SONG Huamao, ZHANG Qiufeng, et al. Reative power analysis and novel faulty selection method in resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 51-56.
- [9] 刘谋海, 方涛, 姜运, 等. 基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 74-79.
LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, et al. A new correlation analysis approach to fault line selection based on transient main-frequency components[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 74-79.
- [10] 金涛, 褚福亮. 基于暂态非工频零序电流的含 DG 新型配电网的接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 96-105.
JIN Tao, CHU Fuliang. A fault line-selection method in new distribution network with DG based on transient non-power frequency zero sequence current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 96-105.
- [11] 闫光太, 梁甲文, 王新涛, 等. 利用暂态幅值故障测度的谐振电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015,

- 43(8): 64-68.
YAN Guangtai, LIANG Jiawen, WANG Xintao, et al. A faulty line selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 64-68.
- [12] 王晓卫, 魏向向, 高杰, 等. 基于 EEMD 与 SVM 的配电网故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 55-61.
WANG Xiaowei, WEI Xiangxiang, GAO Jie, et al. A novel fault line selection method based on EEMD-Hilbert and SVM for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(12): 55-61.
- [13] 张钧, 何正友, 贾勇. 基于 S 变换的故障选线新方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 31(10): 109-115.
ZHANG Jun, HE Zhengyou, JIA Yong. Fault line identification approach based on S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 31(10): 109-115.
- [14] 束洪春, 彭仕欣. 基于短窗数据 S 变换能量的缆-线混合配电网故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 152-159.
SHU Hongchun, PENG Shixin. A fault line detection algorithm for distribution network of overhead line and underground cable mixed lines using S-transform energy from short window data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 152-159.
- [15] 束洪春, 朱梦梦, 黄文珍, 等. 基于暂态零序电流时频特征量的配网故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 1-6.
SHU Hongchun, ZHU Mengmeng, HUANG Wenzhen, et al. Faulty line selection based on time-frequency characteristics of transient zero-sequence current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 1-6.
- [16] 张淑清, 马跃, 李盼, 等. 基于改进的广义谐波小波包分解和混沌振子的小电流接地系统故障选线[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 13-20.
ZHANG Shuqing, MA Yue, LI Pan, et al. Application of improved generalized harmonic wavelet packet decomposition and chaos oscillator to fault line detection in small current grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 13-20.
- [17] 刘渝根, 王建南, 马晋佩, 等. 结合小波包变换和5次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1519-1525.
LIU Yugen, WANG Jiannan, MA Jinpei, et al. Comprehensive fault line selection method for resonant grounded system combining wavelet packet transform with fifth harmonic method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1519-1525.
- [18] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌, 等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.
WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [19] 曾祥君, 喻锴, 王媛媛. 基于聚类分析的配电网无整定保护技术[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(1): 13-17.
ZENG Xiangjun, YU Kun, WANG Yuanyuan. Non scheduled protection technology of distribution network based on clustering analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(1): 13-17.
- [20] 严浩军, 夏巧群, 刘鹏, 等. 35 kV配电网中性点灵活接地方式的仿真研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 43-47.
YAN Haojun, XIA Qiaoqun, LIU Peng, et al. Simulation research on flexible grounding mode of neutral point in 35 kV distribution network[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 43-47.

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2017-09-22

作者简介:

陈豪威(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 445909300@qq.com

王媛媛(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 36850507@qq.com

唐夏菲(1984—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统控制。E-mail: 11875391@qq.com

(编辑 葛艳娜)