基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法

刘谋海，方 涛，姜 运，周 丰，韦 根，黄 龙

（长沙理工大学电气工程学院，湖南 长沙 410000）

摘要：提出了一种利用零序电流暂态主频分量相关性来进行小电流接地系统故障选线的新方法，以解决单纯利用零序电流选线效果不佳的问题。通过对故障零序电流特征的分析，提出了采用 Prony 算法来提取各线路暂态主频分量。利用故障后非故障线路暂态主频分量波形相似，而故障线路与非故障线路之间有着明显区别的特点，对其进行相关性分析，得出综合相关系数，实现正确选线。理论计算及仿真结果表明，该方法准确可靠，抗干扰能力强，无须整定，不受故障初相角、接地电阻、故障距离及接地方式的影响，进一步提高了保护的裕度。

关键词：暂态主频分量；Prony 算法；小电流接地系统；相关性分析；故障选线

A new correlation analysis approach to fault line selection based on transient main-frequency components

LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, ZHOU Feng, WEI Gen, HUANG Long

(College of Electrical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: In order to solve the problem of the poor effect using simply zero-sequence current to select fault line, the paper introduces a new method to select fault line for neutral indirect grounding system by transient main frequency components of zero-sequence current. Based on the feature analysis of zero-sequence current, the paper utilizes Prony algorithm to extract the main frequency components of transient information of each line. Because its transient main frequency waveforms are similar between the non-fault lines when the fault occurred in system, and there is a clear distinction between the fault line and non-fault line, so the integrated correlation coefficients are obtained to achieve the fault line selection correctly by correlation analysis. Theoretical analysis and simulation results show the new method has validity, strong anti-interference, and without setting. It can select fault line successfully with different conditions, including different transition resistance, different initial fault angel, different fault position and grounding modes, and further improve the protection margin.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61233008 and No. 51207013).

Key words: transient main-frequency components; Prony algorithm; neutral indirect ground system; correlation analysis; fault line selection

中图分类号： TM77 文章编号： 1674-3415(2016)02-0074-06

0 引言

我国配电网广泛采用小电流接地系统，这种运行方式可有效提高配电网的可靠性，但其发生单相接地故障时，故障电流特征微弱，选线问题一直是困扰电力工作者的难题。目前，故障选线研究已经取得一些成果，但仍然存在一些困难和限制[1]。

现有选线方法主要有稳态信息法[2-3]、人工注入法[4-5]和暂态信息法[6-7]三种。总的来说，稳态信息法主要困难是故障电流微弱，电弧不稳定，因此测得的信号可靠性不高，容易产生误判。人工注入法在现场应用中有一定的效果，但不能检测瞬时性和间歇性故障，且需要增加信号注入设备，投资大。暂态信息法由于故障特征明显，且不受消弧线圈及电弧不稳定的影响，具有检测灵敏度高的优点，因而成为研究的热点。现有文献对故障的暂态特性分析还不够深入，多数仅从不同角度对暂态特性做了笼统的分析，缺乏综合分析。传统上采用傅里叶算法提取暂态信号，该算法建立在采样信号为周期性的基础上，和实际的故障暂态信号的非周期性特征不符，容易产生较大的误差，难以反映真实信号的组成。文献[8]提出了暂态零序电流选线法，但该电

基金项目：国家自然科学基金项目(61233008，51207013)

流信号包含工频分量、衰减的直流分量、噪声等成分，如果不加以处理，会降低选线的准确性，甚至误判。文献[9]利用小波包的良好的分频特性，先选择暂态零序电流的特征频段，通过比较它们的极性和幅值来实现故障选线。但由于暂态量频率成分受网络参数、故障时刻等多种因素的影响，不同线路暂态量的频率分布也不总是完全一致。

针对以上选线方法的不足，本文在对小电流接地故障暂态信号特征分析的基础上，利用 Prony 算法提取出各线路零序电流的暂态主频成分，得到波形相应的相位和幅值，在一定的数据窗下进行相关性分析，求得各线路的综合相关系数，选出故障线路。经理论计算及仿真表明，该方法具有适应能力强、计算量小、无须整定和选线可靠性高的优点。

1　小电流接地系统单相接地故障暂态分析

暂态分析等效电路如图 1 所示，其中 u_0 为零序电压源，R_d、L_0 分别为零序回路等值接地电阻和电感，C 为系统对地电容总和。由文献[10-11]可知，经消弧线圈接地系统流过故障线路的暂态零序电流 i_f 由暂态电容电流 i_c (包括工频分量和高频分量)和暂态电感电流 i_L (包括工频分量和衰减的直流分量)两部分组成。对于中性点不接地系统，只有暂态电容电流 i_c，但其暂态过程是近似相同的。

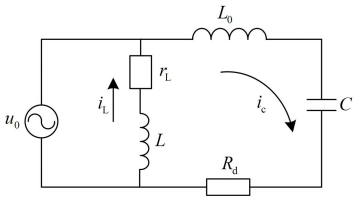


图 1 经消弧线圈接地系统暂态分析等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of transient analysis with arc suppression coil grounding

$$i_c = I_{cm}[\frac{\omega_f}{\omega}\sin\phi\sin\omega t - \cos\phi\cos\omega t + \cos(\omega t+\phi)] \quad (1)$$

$$i_L = I_{Lm}[\cos\phi e^{-t/\tau_L} - \cos(\omega t+\phi)] \quad (2)$$

$$i_f = (I_{cm}-I_{Lm})\cos(\omega t+\phi) + I_{Lm}\cos\phi e^{-t/\tau_L} + I_{cm}(\frac{\omega_f}{\omega}\sin\phi\sin\omega t - \cos\phi\cos\omega_f t)e^{-t/\tau_L} \quad (3)$$

定义表达式(3)中高频分量为暂态主频零序电流，由式可知，暂态接地电流主要由工频分量、衰减的直流分量以及按指数衰减的暂态高频分量组成，由于经消弧线圈接地时，稳态工频分量不满足故障选线的要求，因此不考虑稳态 50 Hz 频率分量，衰减的直流分量只存在于谐振接地系统，不存在于中性点不接地系统，而且单相接地故障角通常发生在90° 衰减直流分量幅值较小的情况下；而对于暂态电容电流 i_c 而言，暂态主频分量在总能量中占主导地位，包含大部分的暂态信号能量，当小电流接地系统单相接地故障时，由于受同一零序电压的作用，非故障线路主频成分的幅值主要由对地等效电容所决定，而配电网普遍出线较短，对地电容相差不大，方向由线路流向母线，极性相同；故障线路暂态主频零序分量等于所有非故障线路主频成分之和，方向由母线流向线路，幅值远大于非故障线路，极性相反。

由上述分析可知，在暂态过程初始阶段，无论是中性点不接地系统还是谐振接地系统，暂态电容电流主要由主频分量所决定，并且所有健全线路暂态主频分量波形都是相近的，而故障线路与健全线路波形差别很大，不具备相似性。利用数学方法对各线路的主频分量波形进行相关性分析，若与其他线路有明显差别，即为故障线路，若各线路主频分量波形无明显差别，即为母线故障。

2　Prony 信号分析法简介

1795 年，法国数学家 Prony[12-13]提出了利用指数函数的一个线性组合来描述等间距采样数据的数学模型，后来经过适当扩充，形成了能够直接估算给定型号的频率、衰减因子、幅值以及相位等特征量的算法。Prony算法在某种程度上可以说是一种超越快速傅立叶分析(FFT)的一种分析方法，实质上它就是一种借助 AR 自回归和 ARMA 去均值自回归的最小方差线性预测方法。

Prony算法的数学模型为：当测量端输入信号为 $y(0), y(1), y(2), \cdots, y(N-1)$ 时，Prony 算法首先假定模型是由一系列的具有任意幅值、相位、频率和衰减因子的指数函数线性组合而成。

$$y(k\Delta t) = \sum_{i=1}^{p} b_i z_i^k + \eta(k\Delta t) \quad (4)$$

$$\hat{y}(k\Delta t) = \sum_{i=1}^{p} b_i z_i^k \quad (5)$$

$$b_i = A_i \exp(j\theta_i) \quad (6)$$

$$z_i = \exp[(-\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t] \quad (7)$$

式中：k=(1, 2,⋯, N−1)为采样点数；$y(k\Delta t)$ 表示真实测量信号；$\eta(k\Delta t)$ 为系统噪音；$\hat{y}(k\Delta t)$ 为拟合信号，为其近似值；A_i 为振幅(i=1,2,⋯,p)；θ_i 为相位；α_i 是衰减因子；Δt 代表采样间隔；f_i 表示频率；p 为模型阶数。先由离散的采样数据构造线性差分方程，得出差分方程的系数 α_i。

$$\begin{bmatrix} y(p) \\ y(p-1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(p-1) & y(p-2) & \cdots & y(0) \\ y(p) & y(p-1) & \cdots & y(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-2) & y(N-3) & \cdots & y(N-P-1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_p \end{bmatrix} \tag{8}$$

然后通过求解特征多项式(9)的根，求出相应的 Z_i。

$$1+\alpha_1 z^{-1}+\cdots+\alpha_p z^{-p}=0 \tag{9}$$

b_i 可以通过式(10)得到。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}(1) \\ \hat{y}(2) \\ \vdots \\ \hat{y}(N-1) \end{bmatrix} \tag{10}$$

根据求得的 Z_i、b_i，从而计算出幅值、相位、频率等特征量。

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \text{Arctan}\dfrac{\text{Im}(b_i)}{\text{Re}(b_i)} \\ f_i = \dfrac{2\pi\Delta t}{\text{Im}(\ln z_i)} \\ \alpha_i = \dfrac{-\text{Re}(\ln z_i)}{\Delta t} \end{cases} \tag{11}$$

Prony 相对于传统的信号分析法优点在于：可以直接在时域求得信号的幅值、相位等特征量，而无须从频域中来求，计算量大大减少；采用最小二乘法意义上的拟合，有利于消除噪音、不对称分量的影响，具有很高的精度；对实时信号和图像的处理速度快，延时小，与传统提取信号算法相比，能够更加有效准确地揭示波形的主要特征。

3 相关性分析及选线流程

3.1 相关性分析

两个波形的相似性可以通过相关系数来描述[14]。因此，可以利用求取采样点之间各线路暂态主频零序电流的相关系数来判断两个波形是否相似。各线路之间相关系数 ρ 的计算公式如式(12)。

$$\rho = \frac{\sum_{n=1}^{N} x(n)y(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N} x^2(n) \sum_{n=1}^{N} y^2(n)}} \tag{12}$$

式中：$x(n)$、$y(n)$分别为两条线路的暂态主频零序电流采样信号；n 为采样序列，采样起始点 n=1 为故障发生时刻；N 为主频信号的数据长度。

1) 在同一数据窗下，对故障后的各线路的主频分量的采样数据做两两相关性分析，求得相关系数矩阵为

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1k} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{k1} & \rho_{k2} & \cdots & \rho_{kk} \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中，ρ_{ij} 表示在给定数据窗下各线路之间暂态主频零序电流之间的相关系数。显然，此矩阵为对角线均为 1 的对角矩阵。

2) 根据相关系数矩阵求取每条线路相对于其他线路的综合相关系数。

$$\rho_i = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \rho_{ij} \tag{14}$$

3) 根据各线路的综合相关系数，得出发生接地故障最大可能性的选线序列。

4) 当选线序列中最大与最小相关系数之差大于设定值 ρ_{set} (通常取 0.3)时，综合相关系数最小的线路即为故障线路，否则判定为母线故障。

3.2 选线流程

1) 在线监测配电网的三相电压和三相电流，进行离散 A/D 采样；连续计算零序电压有效值，当大于电压整定值时，判断系统发生接地故障，启动选线和保护判断。

2) 提取各线路的零序电流进行Prony算法分析，得出各线路零序电流在同一频率下的正弦函数，从而得到主频率正弦函数的幅值和相位。

3) 然后进行相关性分析求出综合相关系数，判定出故障线路。

由式(3)可知，当故障初相角接近 0°时，零序电流主频分量较小，暂态过程不明显，而衰减的直流分量幅值最大，只流经故障线路，非故障线路几乎为零，因此可以作为谐振接地系统主频分量不足时的辅助选线方法。

选线的流程如图 2 所示。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

基于 ATP 软件对 10.5 kV 系统单相接地故障进行仿真分析，用 Matlab 进行数据处理，仿真采用电缆线路与架空线路的混合模型。如图 3 所示，出线共 4 条线路，其中 L_1、L_3 分别为 25 km 和 20 km 的架空线路；L_2 是混合线路，由 5 km 的架空线路和 5 km 的电缆线路组成；L_4 为 10 km 的电缆线路。

电缆线路零序参数：R_0 =0.35 Ω/km，L_0=1.48 mH/km，C_0=0.25 μF/km，正序参数：R_1= 0.11 Ω/km，L_1=0.45 mH/km，C_1=0.33 μF/km；架空线路零序参

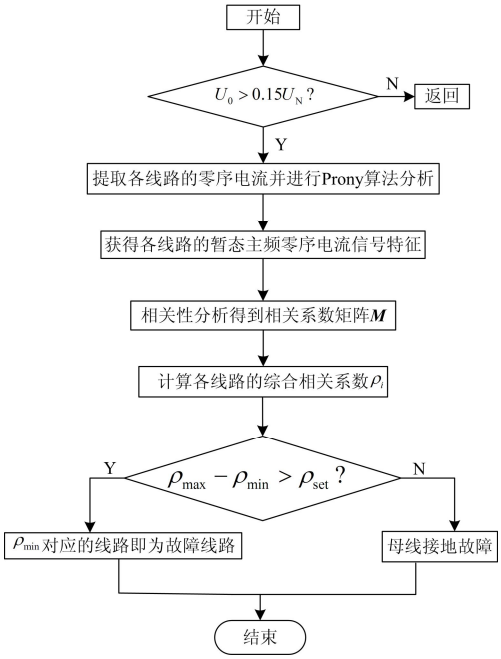


图 2 故障选线流程图

Fig. 2 Flow chart of fault line selection

数：R_0=0.24 Ω/km，L_0=3.68 mH/km，C_0=0.008 μF/km，正序参数：R_1= 0.098 Ω/km，L_1= 1.23 mH/km，C_1=0.012 μF/km。主变参数：额定电压为 110 kV/10.5 kV，额定容量为 50 MVA；空载电流为 1%，空载损耗为 35 kW；短路损耗为 205 kW，短路电压比为 10%。负荷参数：实际的系统负荷千差万别，同一条线路的各相间负荷也不尽相同，准确的模拟较为困难，本文在仿真中用等效阻抗 400+20j 替代。运行方式采用过补偿，过补偿度取 7.5%。仿真中采样频率为 10 kHz，数据窗长为 20 ms，借助 Prony 算法提取故障后的暂态主谐振频率，计算出相应的拟合数据及波形，然后对其进行相关性分析，得到选线结果。

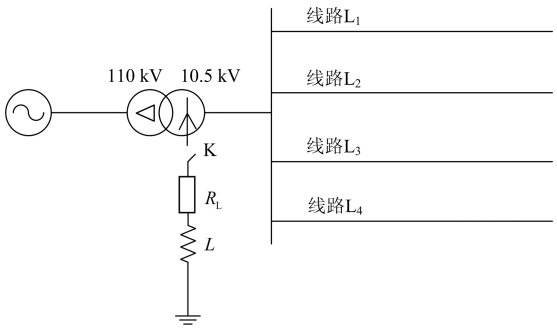


图 3 小电流接地系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of neutral indirect ground system

4.2 仿真分析

图 4、图 5 分别表示在线路 L_1 的 8 km 处发生单相接地故障时，初相角较小及高阻接地时各线路在故障发生后第一个周期内的暂态零序电流波形。由图可知，虽然故障线路与健全线路零序电流幅值和相位有着明显的差别，但是由于工频分量、噪音、系统不对称分量的存在，仍然存在一些特征不明显的区段，在极端故障条件下，容易造成选线的误判。

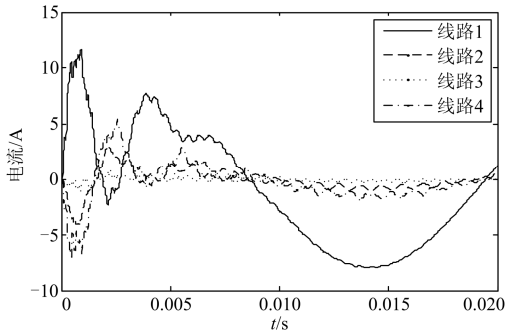


图 4 0°时各线路的暂态零序电流

Fig. 4 Transient zero-sequence current of each line when fault initial angel is 0°

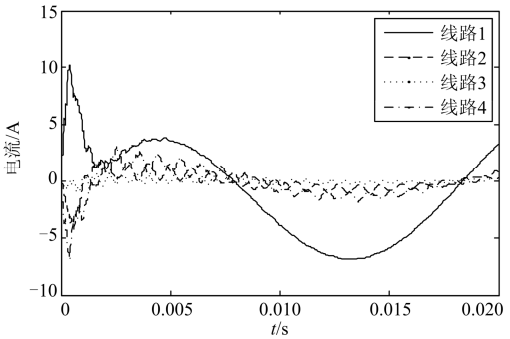


图 5 高阻接地时各线路的暂态零序电流

Fig. 5 Transient zero-sequence current of each line with high-resistance earthed

下面分别对不同的故障初相角、接地电阻、故障位置及故障线路进行了详细的仿真并提取出相应的暂态主频特征信息，为了便于分析，取线路 L_1 的相位作为参考相位，记为 0°。限于篇幅，表 1 中只给出了几种典型情况下的仿真结果。从表中的仿真结果不难看出，当发生单相接地故障时，故障线路的暂态主频分量的幅值远远大于非故障线路，其大小等于所有非故障线路的主频成分之和，相位与非故障线路相差约为 180°。母线发生故障时，各线路相位近似相同，暂态主频明显升高，其中含有电缆线路主频分量幅值较大。对于中性点不接地系统，其自由振荡的主频分量具有同样的特点。

表 2 给出了部分故障条件下相关性分析的选线结果。当线路 L_1 发生单相接地故障时，无论在何种情况下，故障线路的综合相关系数均小于 0，与其

他线路有明显的区别，因此可知 L_1 为故障线路。母线故障时，各线路综合相关系数相差不大，其最大值和最小值之差为 0.022，小于设定值 0.3，因此，可判定为母线故障。对选线结果分析可见，该选线方法无论在何种接地情况下，均能准确地选线；而且滤除了工频分量、不对称分量及系统的噪音影响，得到能量最大暂态主频分量，进一步拉大了故障线路与健全线路判断量之间的差距，提高了保护的裕度。

表 1 不同故障条件下各线路的暂态主频分量

Table 1 Transient main frequency components of zero sequence current in different fault conditions

故障线路	故障距离	接地电阻	故障初相角	幅值/A				相位/(°)				暂态主频/Hz
				L_1	L_2	L_3	L_4	L_1	L_2	L_3	L_4	
L_1	8	10	0	64.6	22.6	2.8	40.5	89.7	−89.0	−89.8	−91.7	402
L_1	8	10	45	108.0	37.8	4.7	67.1	90.4	−88.9	−89.5	−89.90	402
L_1	8	10	90	126.2	44.1	5.5	78.4	90.5	−88.9	−89.3	−89.6	402
L_1	5	5	0	80.3	27.8	3.4	49.1	90.7	−91.6	−92.6	−88.1	491
L_1	5	100	60	145.9	52.0	6.1	89.2	90.5	−89.4	−89.4	−89.7	491
L_1	5	500	90	156.1	55.4	6.6	95.3	90.5	−89.3	−89.4	−89.8	491
L_1	2	0	90	164.3	64.1	6.1	95.0	96.1	−83.7	−84.2	−84.3	698
L_1	10	0	90	119.5	41.2	5.3	75.2	83.2	−96.4	−96.6	−97.2	364
L_1	15	0	90	84.0	29.0	3.8	53.8	90.0	−89.6	−90.0	−90.5	303
母线	-	20	0	1.2	127.9	0.8	18.8	−106.7	−90.4	−109.8	−107.5	1 076
母线	-	20	45	1.0	109.6	0.7	15.8	−106.5	−90.6	−109.8	−107.5	1 076
母线	-	20	90	1.2	127.9	0.8	18.8	−106.7	−90.4	−109.8	−107.5	1 076

表 2 相关分析及选线结果

Table 2 Correlation analysis and line selection results

故障线路	故障距离	接地电阻	故障角	综合相关系数 ρ	选线结果
				L_1 L_2 L_3 L_4	
L_1	8	10	0	[−0.500 0.500 0.500 0.500]	L_1
L_1	8	10	45	[−0.500 0.500 0.500 0.500]	L_1
L_1	8	50	90	[−0.500 0.500 0.500 0.500]	L_1
L_1	8	500	90	[0.081 0.234 0.345 0.396]	L_1
L_1	2	0	90	[−0.500 0.500 0.500 0.500]	L_1
L_1	13	0	90	[−0.500 0.500 0.500 0.500]	L_1
母线	–	0	45	[0.722 0.893 0.900 0.902]	母线
母线	–	0	90	[0.722 0.893 0.900 0.902]	母线

5 结论

小电流接地系统发生单相接地故障时，故障线路暂态主频零序电流与非故障线路有明显的区别。本文利用 Prony 算法拟合信号精度高的优点，提取出各线路暂态主频分量的幅值和相位特征，并通过波形的相关性分析计算出相应的综合相关系数，通过比较选出故障线路。该方法具有以下特点：

1) 适用于谐振接地系统和中性点不接地系统。

2) 通过 Prony 算法拟合出各线路在同一频率下特征最为明显的暂态主频率分量波形的相似性进行选线，综合利用了其幅值与相位的关系，无须整定，具有较强的抗干扰及抗过渡电阻能力。

3) 利用能量最大的暂态主频分量进行选线，特征量明显，不易受非确定性扰动的影响，适应性强。

4) 本方法可以准确地区分线路故障和母线故障。

参考文献

[1] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.
GUO Qingtao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.

[2] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 6-10.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 6-10.

[3] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 61-62.
MU Longhua. Principle of selective grounding fault protection based on active component direction of zero-sequence current[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 61-62.

[4] 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.

[5] 高志鹏, 张慧芬, 孙旭娜. 注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 139-145.
GAO Zhipeng, ZHANG Huifen, SUN Xuna. A method of fault line selection and fault point location with half-wave DC injection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 139-145.

[6] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 48-53.
XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin, et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.

[7] 王铭, 王宏伟, 赵义明. 模极大值均方根比在配网暂态接地故障选线中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 50-54.
WANG Ming, WANG Hongwei, ZHAO Yiming. Application research for the root mean square ratio of modulus maxima in the distribution network transient fault line selection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 50-54.

[8] 司瑞琦, 黄翰, 罗建, 等. 基于消弧线圈补偿特征的故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 16-22.
SI Ruiqi, HUANG Han, LUO Jian, et al. Fault line selection approach based on compensation characteristics of extinction coil[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 16-22.

[9] 毕研秋, 赵建国. 基于暂态量和小波包的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(6): 17-21.
BI Yanqiu, ZHAO Jianguo. Faulty feeder detection based on transient current and wavelet packet in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(6): 17-21.

[10] 赖平, 周想凌, 邱丹. 小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 51-57.
LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method in indirectly grounding power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.

[11] 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.

[12] 邵明, 黄彦全, 韩花荣, 等. 基于 Prony 算法的小电流接地系统单相接地故障选线研究[J]. 继电器, 2005, 33(24): 6-9.
SHAO Ming, HUANG Yanquan, HAN Huarong, et al. Fault line detection for single-phase-to-earth faults in the neutral in directly grounded system based on Prony method[J]. Relay, 2005, 33(24): 6-9.

[13] 李安娜, 吴熙, 蒋平, 等. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-142.
LI Anna, WU Xi, JIANG Ping, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 137-142.

[14] 陈妮亚, 钱政, 孟晓风, 等. 基于空间相关法的风电场风速多步预测模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 15-21.
CHEN Niya, QIAN Zheng, MENG Xiaofeng, et al. Multi-step ahead wind speed forecasting model based on spatial correlation and support vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 15-21.

收稿日期：2015-04-07；　修回日期：2015-09-08

作者简介：

刘谋海(1991-)，男，硕士研究生，研究方向为配电网故障选线与定位；E-mail: 279556759@qq.com

方　涛(1993-)，男，硕士研究生，研究方向为配电网故障选线与定位。E-mail: 1294276023@qq.com

(编辑　魏小丽)