

基于电容序列近似熵的消弧线圈接地选线方法

殷家敏¹, 吉畅², 罗建², 张鹏²

(1. 重庆市电力公司长寿供电分公司, 重庆 401220; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对零序电流互感器极性不明确导致选线失败的问题, 分析了选线失败的原因, 提出一种基于对地电容近似熵的选线方法。提出利用差分方法改进矩阵束, 解决分量湮没问题, 从而准确提取复频域极点信息。分别求取每条线路对地电容序列, 由于消弧线圈补偿作用故障线路电容序列近似熵将超过阈值, 则判断该条线路为故障线路。仿真实验结果验证: 该方法摆脱了由于零序互感器极性不同而导致选线错误的限制, 且适用于两出线系统, 适应性强, 选线准确率高。

关键词: 消弧线圈接地系统; 单相接地故障; 矩阵束; 近似熵

Fault line selection approach of extinction coil based on capacitance sequence approximate entropy

YIN Jiamin¹, JI Chang², LUO Jian², ZHANG Peng²

(1. Changshou Power Supply Bureau, Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401220, China;
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Anti-polarity of zero sequence CT leads to the failure in NES fault line selection, after analyzing the reason, a new selection approach using approximate entropy of ground admittance is proposed. Difference method is used to improve matrix pencil and solve the problem of component annihilation, therefore the pole information of complex frequency domain is got accurately. Evaluating the approximate entropy of distribution capacitance of each feeder under arc suppression coil compensation effect, then it is discriminated as fault feeder when the numerical value is beyond a threshold value. The method eliminates the error due to the limitation of anti-polarity of zero sequence CT and can also be applied to system with two feeders. Experimental results show that it can increase the accuracy and dependability of fault line detection effectively.

Key words: neutral indirectly grounded system; single-line to ground fault; matrix pencil; approximate entropy

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0045-06

0 引言

国内配电网故障中约 80%为单相接地, 故障选线由于故障电流小^[1]、故障情况复杂、系统运行方式多变等原因, 一直是领域内的热点和难点^[2-5]。

在中性点经消弧线圈接地系统的单相接地故障选线方法中, 国内外学者做了大量研究, 其中故障分量分析法应用最广, 利用稳态分量选线易受到消弧线圈^[6-9]电流补偿的影响, 零序电流存在“倒相”问题^[10-11], 在过补偿条件下失效。

利用暂态分量选线方法不受消弧线圈影响, 但基于特征频段(Selected Frequency Band, SFB)或结

合现代信号处理技术^[12](相关分析、小波分析^[13]、S变换^[14]等)等依靠方向的方法对各线路CT极性要求非常严格, 工程实际应用中发生接线极性错误时常发生, 特别是在老站安装多年的CT极性已不清楚, 在无法停电校验情况下, 故障线路与非故障线路暂态信号可能由于同相(如图 1 所示)导致算法失效, 现场应用很不满意^[11-12]。

文献[14]提出利用暂态能量为特征量进行选线, 不依靠电流方向, 但在两出线或长线系统中, 故障线路与非故障线路暂态能量近似相等使得算法失效。文献[15]提出利用基频零序补偿导纳进行选线, 但需已知每条线路的零序参数精确值, 随着运

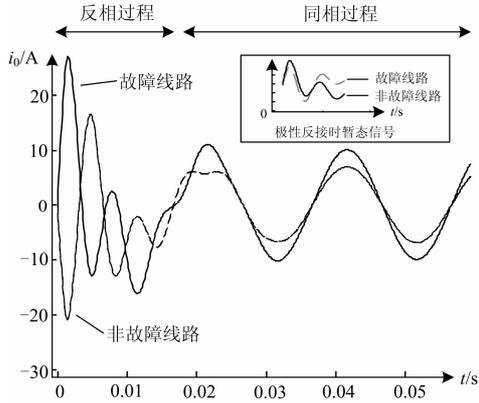


图1 零序电流波形

Fig. 1 Zero sequence current wave

行方式发生改变，线路参数也将发生变化，无法实现实际应用。文献[16]利用矩阵束计算频域参数进行故障选线，计算中忽略各分量衰减系数，零序 CT 极性不一致时无法利用参数符号实现选线。

另一方面，小波分析与 S 变换得到的是频带信息，无法得到准确的复频域极点信息^[11,17]，而基于拉氏变换的矩阵束方法虽然可以提取极点信息，但在小幅度高频极点分量分析计算时容易出现被大幅度低频分量“湮没”。

基于上述情况，本文提出一种基于零序电容近似熵的选线方法，利用差分方法改进矩阵束用于高频极点分量精确提取，求取多极点零序电容等值参数。由于消弧线圈补偿作用使得故障线路电容值近似熵骤增，则判断其为故障线路，而健全线路电容值近似熵较小。仿真实验结果验证了该方法摆脱了零序互感器极性不同导致选线错误的限制，实现了线路故障自判，适应性强、选线准确率高，同时摆脱了选线方法对零序 CT 极性的依赖。

1 单相接地故障特征分析

当谐振接地系统第 n 条出线发生单相接地时，其简化的零序网络如图 2 所示(下文提到的参数均为零序参数)。

设故障点电压表达式为 $U(t)=U_m \sin(\omega_0 t + \alpha)$ ，可得到母线处零序电压的拉普拉斯表达式为

$$U_0(s) = U_m \frac{sL(ssina + w_0.cosa)}{(s^2RLC + sL + R)(s^2 + w_0^2)} \quad (1)$$

式中： C 为系统总对地等效电容； L 为消弧线圈电感值； R 为系统等效电阻。得故障线路和健全线路零序电流的拉氏变换表达式：

$$I_f(s) = -U_m \frac{sL[s(C - C_d) + 1/sL](s \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha)}{(s^2RLC + sL + R)(s^2 + \omega_0^2)} \quad (2)$$

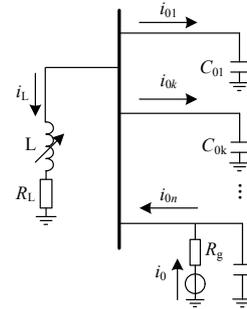


图2 消弧线圈接地系统单相接地故障零序线路等效网络图

Fig. 2 Zero sequence circuit of NES

$$I_n(s) = U_m \frac{s^2LC_n(s \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha)}{(s^2RLC + sL + R)(s^2 + \omega_0^2)} \quad (3)$$

式中： C_n 为第 n 条线路对地电容； C_d 为接地故障线路对地等效电容，由此可得故障线路等效对地电容 $C_{eq}(s) = -[s(C - C_d) + 1/sL]/s$ 。复频域极点 $s = \sigma + j\omega$ ， $\omega = 2\pi f$ ， σ 为 ω 对应的衰减系数，设补偿系数 $\lambda = 1 + 1/[s^2L(C - C_d)]$ ，可得 $C_{eq}(s) = -\lambda(C - C_d)$ 。由于高频极点频率(虚部)较高、衰减系数(实部)较大，该复频域参数 s 下消弧线圈电流分量较小 ($1/[s^2L(C - C_d)] \approx 0$)， $C_{eq}(s) \approx -(C - C_d)$ ，电流可近似等效为电路中的电容电流^[2]。

随着振荡分量衰减，基频分量电流成为主要成分，此时消弧线圈的补偿作用逐渐体现， $s_0 = j\omega_0 (\omega_0 = 100\pi)$ ， $1/[s^2L(C - C_d)]$ 分量所占比重大幅度增加，而且由于消弧线圈一般处于过补偿状态使得 $\lambda < 0$ ， $C_{eq}(s_0)$ 不仅数值改变而且符号改变。

如图 3 所示，由于消弧线圈的补偿作用使得故障线路 C_{eq} 发生明显变化，而健全线路 C_n 幅值变化不大，该特征可明显判断线路是否故障。而如何准确获得出线侧零序电压、电流信号参数和衡量电容整体指标成为提高选线成功率的关键。

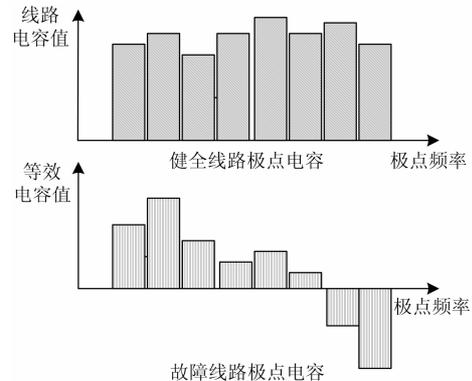


图3 线路极点电容示意图

Fig. 3 Diagram of line capacitance

2 基于对地电容近似熵的选线方法

2.1 矩阵束基本原理及差分算法

矩阵束算法^[18]将暂态信号表示为一组幅值按指数规律变化的指数线性组合, 即

$$y(kT_s) = \sum_{i=1}^M R_i e^{S_i k T_s} = \sum_{i=1}^M R_i e^{(-\sigma_i + j\omega_i) k T_s} \quad (4)$$

式中: $k=0, 1, \dots, N$, 其中 N 为最大采样点数; R_i 、 σ_i 和 ω_i 分别为第 i 个信号的复幅值、衰减系数和角频率; T_s 为采样间隔; M 为信号的阶数。构造 Hankel 矩阵:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(L) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \cdots & y(N) \end{bmatrix}_{(N-L+1) \times (L+1)} \quad (5)$$

式中, L 为束参数, 恰当的选取 L 可以有效地抑制噪声干扰, 通常取值为 $N/3$ 到 $N/2$ 之间。

由于小幅值高频信号中极易衰减高频分量的幅值较为微弱, 有时甚至被其他分量湮没, 求取幅值和初相角之前各级计算都有舍入误差积累, 从而导致计算结果失效, 文献[19]验证了利用差分算法提高高频信号提取准确度可行性。

利用差分算法去掉 \mathbf{Y} 最后一行得到 \mathbf{Y}_1 , 去掉第一行得到 \mathbf{Y}_2 , 利用 \mathbf{Y}_1 、 \mathbf{Y}_2 生成矩阵 $\mathbf{Y}_x = (\mathbf{Y}_2 - \mathbf{Y}_1)/T_s$, 当采样频率较高时, $T_s \rightarrow dt$, $\mathbf{Y}_x \rightarrow d\mathbf{Y}/dt$, 可得:

$$y_x(kT_s) = \sum_{i=1}^M (-\sigma_i + j\omega_i) \times R_i e^{(-\sigma_i + j\omega_i) k T_s} \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}_x = \begin{bmatrix} \dot{y}(0) & \dot{y}(1) & \cdots & \dot{y}(L) \\ \dot{y}(1) & \dot{y}(2) & \cdots & \dot{y}(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{y}(N-L-1) & \dot{y}(N-L) & \cdots & \dot{y}(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)} \quad (7)$$

对 \mathbf{Y}_x 进行奇异值分解得到信号阶数 M 以及极点 S_i 求取与原矩阵束方法相同, 不再赘述。信号复幅值 R_i 可以从下式按照最小二乘法求得:

$$\begin{bmatrix} y_x(0) \\ y_x(1) \\ \vdots \\ y_x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ S_1 & S_2 & \cdots & S_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_1^{N-1} & S_2^{N-1} & \cdots & S_M^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \ln S_1 \\ R_2 \ln S_2 \\ \vdots \\ R_M \ln S_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

经过差分处理后的信号由式(6)、式(8)可以得出结论: 矩阵 \mathbf{Y}_x 利用差分通过指数系数放大高频极点复幅值, 更利于提取极点分量; 特定频率信号的幅

值和相位, 解得 S_i 和 R_i 后即可通过式(9)求得 R_i 、 σ_i 、 ω_i 。

$$\begin{cases} \varphi_i = \arctan \frac{\text{Im}(R_i)}{\text{Re}(R_i)} \\ \sigma_i = \frac{-\text{Re}(\ln S_i)}{T_s} \\ \omega_i = \frac{\text{Im}(\ln S_i)}{T_s} \\ A_i = |R_i| \end{cases} \quad (9)$$

复频域下电流电压关系方程:

$$U(s) = sC \times I(s) \quad (10)$$

将 $s = \sigma + j\omega$ 代入上式通利用下式可求得各极点组成的电容序列:

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{R1} / (sI_{R1}) \\ U_{R2} / (sI_{R2}) \\ \vdots \\ U_{Rn} / (sI_{Rn}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2 对地电容近似熵

近似熵是信息论中反映信号整体特征量的一种指标, 是对信息序列复杂度大小特征的定量描述。将对极点电容序列描述时, 近似熵越大, 说明电容值变化越剧烈。利用在选线上时有以下特征:

- 1) 近似熵为非负值, 与序列本身符号无关, 当线路互感器极性不一致时, 同样能够反映故障特征。
- 2) 近似熵算法与参数序列的幅值无关, 只于复杂程度有关, 而由于线路长度不一致, 使得每条线路对地电容值不尽相同, 与幅值无关的特点非常重要。

计算步骤如下:

- 1) 将计算得到的电容序列重组得到一组 m 维新向量 $\mathbf{C}(i) = [C(i), C(i+1), \dots, C(i+m-1)]$, $i=1, 2, \dots, n+m-1$;
- 2) 对每一个 i 值计算 $\mathbf{C}(i)$ 与其他向量之间的距离

$$d(i, j) = \max_{k=0, 1, \dots, m-1} |\mathbf{C}(i+k) - \mathbf{C}(j+k)| \quad (12)$$

- 3) 按照设定的偏差值 $r(r>0)$, 计算向量之间的相似度

$$C_i^m(r) = \sum_{i \neq j} \Theta \{r - d[\mathbf{C}(i), \mathbf{C}(j)]\} / (n - m + 1) \quad (13)$$

其中

$$\Theta \{x\} = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (14)$$

- 4) 将 $C_i^m(r)$ 取对数, 然后求其对所有 i 的平均值, 记作 $\Phi^m(r)$, 得

$$\Phi^m(r) = \frac{1}{n-m+1} \sum_{i=1}^{n-m+1} \ln C_i^m(r) \quad (15)$$

5) 对 $m+1$, 重复以上过程, 得到 $\Phi^{m+1}(r)$

6) 理论上此序列的近似熵为

$$S_a(m, r) = \Phi^m(r) - \Phi^{m+1}(r) \quad (16)$$

嵌入维数 m 通常取 2, $r=(0.1\sim 0.25)\sigma$ (σ 为电容序列的标准差), 本文取 $m=2, r=0.2\sigma$ 。

由于健全线路电容序列近似熵相对较小, 可形成选线判据:

1) $S_i < S_{set}, i=1, 2, \dots, n$, 对于所有的 i 恒成立, 则判定母线故障。

2) $S_i > S_{set}, i=1, 2, \dots, n$, i 对应的馈线为故障馈线 (S_{set} 取 0.7)。

2.3 选线流程

基于上述选线原理, 消弧线圈接地系统发生单相接地故障时, 实现故障选线的步骤如图 4 所示。

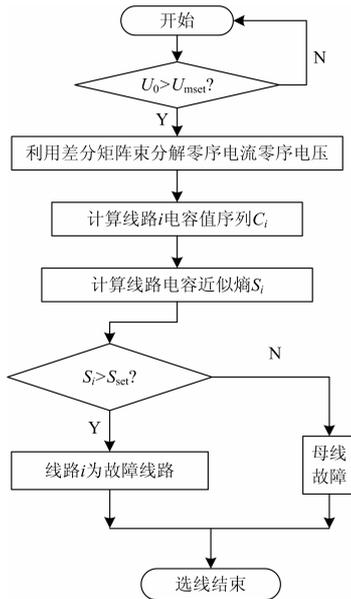


图 4 故障选线算法流程图

Fig. 4 Flowchart of fault line detection algorithm

3 仿真分析

利用 Matlab 提供的 Simulink 仿真软件搭建 10 kV 配网仿真模型, 进行单相接地故障的仿真实验, 采样频率 $f_s=10$ kHz, 数据窗为 40 ms。如图 5 所示, 变压器变比为 110/10.5 kV, 容量为 50 MVA。线路单位长度参数如表 1 所示, 线路 1 和线路 3 为架空线路, 线路 2 和线路 4 为电缆线路。

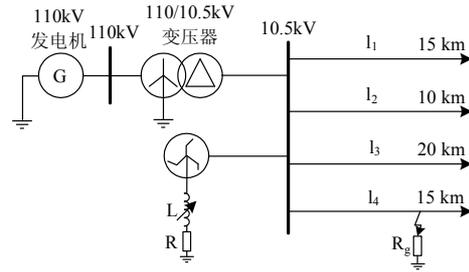


图 5 单相接地仿真电路

Fig. 5 Simulation circuit of single-phase ground fault

表 1 线路参数

Table 1 Line parameters

线路类型	正序参数			零序参数		
	R_1	L_1	C_1	R_0	L_0	C_0
架空线路	0.125	0.52	11.5	0.83	2.54	7.1
电缆线路	0.150	1.21	260	0.37	5.43	210

表中 $R_1 \setminus R_0$ 单位 Ω/km , $L_1 \setminus L_0$ 单位 mH/km , $C_1 \setminus C_0$ 单位 nF/km 。

负荷经过负荷变压器的容量设为 100 kVA, 功率因数为 0.6(滞后)。为模拟工程实际将线路 2 与线路 3 零序 CT 反接以验证算法可靠性。

由于篇幅所限, 以发生单相接地故障为例, 计算包括故障距离、故障初相角在不同情况下的选线结果。仿真证明在不同的线路、故障相角、接地电阻为故障时, 本方法选线结果正确。

表 2 不同条件下的选线结果

Table 2 Simulation results with different conditions

故障线路	故障相角/ $^\circ$	接地电阻/ Ω	故障距离/ km	对地电容近似熵				选线结果
				线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	
线路 2	0	5	5	0.1341	0.3054	1.5341	0.4297	线路 2
	30	50	10	0.1548	0.4513	1.6914	0.2716	线路 2
	90	200	15	0.4131	0.1351	1.7541	0.6410	线路 2
线路 4	0	5	5	0.2317	0.5395	1.6921	0.5642	线路 4
	30	50	10	0.3565	0.4214	1.7626	0.5241	线路 4
	90	200	15	0.1319	0.2973	2.0513	0.4261	线路 4
母线	0	5	5	0.3432	0.2791	0.3531	0.1507	母线
	30	50	10	0.2363	0.4214	0.3219	0.5241	母线
	90	200	15	0.1561	0.1985	0.0554	0.2261	母线

4 结论

本文针对消弧线圈接地系统, 利用差分矩阵束精确提取极点分量参数, 提出一种基于电容序列近似熵的选线方法, 可以得到以下结论:

(1) 该方法无需已知线路参数, 利用复频域方程组实现自适应计算, 进而表征线路补偿特征。

(2) 仿真结果表明, 近似熵值与线路电容绝对值无关, 其值反映的是电容序列的近似程度。本方法摆脱了零序 CT 极性的限制, 安装前无需极性校验, 提高选线方法的可靠性。

(3) 补偿特征无需群比, 利于线路故障“自判”, 当出现多条线路同时故障时, 也可正确判断。若利用沿线的 FTU 可实现线路区段保护, 为故障定位提供了新思路。

参考文献

- [1] 廖俊宏, 帅红, 梁伟. 小电流接地系统选线方法的灵敏度分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(6): 65-70.
LIAO Junhong, SHUAI Hong, LIANG Wei. Sensitivity analysis of fault line detection method in small current grounded system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(6): 65-70.
- [2] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] 李斌, 束洪春. 基于瞬时实功率和瞬时虚功率的谐振接地系统单相接地选线新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 184-190.
LI Bin, SHU Hongchun. A new integration method of fault line detection in resonant earthed system based on instantaneous real power and instantaneous virtual power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 184-190.
- [4] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.
JIA Qingquan, SHI Leilei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 191-197.
- [5] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.
XU Bo, ZHANG Jianwen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.
- [6] 周登登, 刘志刚, 胡非, 等. 基于小波去噪和暂态电流能量分组比较的小电流接地选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 22-28.
ZHOU Dengdeng, LIU Zhigang, HU Fei, et al. A new method for fault line selection based on wavelet de-noising and transient current energy grouping comparison in ineffective grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 22-28.
- [7] 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.
- [8] 张钧, 刘洪星, 何正友, 等. 基于瞬时能量函数的故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 1-9.
ZHANG Jun, LIU Hongxing, HE Zhengyou, et al. A novel fault line identification approach based on instantaneous energy function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 1-9.
- [9] 靳维, 张栋梁, 张洋, 等. 一种基于阻抗角差对地电容测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 121-125.
JIN Wei, ZHANG Dongliang, ZHANG Yang, et al. A method of ground capacitance measurement based on impedance angle difference[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 121-125.
- [10] 束洪春, 刘娟, 王超, 等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 72-76.
SHU Hongchun, LIU Juan, WANG Chao, et al. Adaptive method for fault circuit selection in arc suppression coils system by using transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 72-76.
- [11] 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.
- [12] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

- [13] 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, 2006, 27(6): 17-22.
BI Yanqiu, ZHAO Jianguo. Faulty feeder detection based on transient current and wavelet packet in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 27(6): 17-22.
- [14] 张钧, 何正友, 贾勇, 等. 基于 S 变换的故障选线新方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 109-115.
ZHANG Jun, HE Zhengyou, JIA Yong, et al. Fault line identification approach based on S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 109-115.
- [15] 林湘宁, 高艳, 刘沛, 等. 基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 45-49.
LIN Xiangning, GAO Yan, LIU Pei, et al. A novel method to identify the single phase-to-earth fault in the neutral un-effectual grounded system using the zero-sequence compensated admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 45-49.
- [16] 索南加乐, 李宗朋, 王莉, 等. 基于频域参数识别方法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 93-97, 125.
SUONAN Jiale, LI Zongpeng, WANG Li, et al. Fault line selection in distribution networks based on parameter identification method in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 93-97, 125.
- [17] 郭谋发, 刘世丹, 杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 183-190.
GUO Moufa, LIU Shidan, YANG Gengjie. A novel approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 183-190.
- [18] SARKAR T K, PEREIRA O. Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995, 37(1): 48-55.
- [19] 石一辉, 张承学, 易攀, 等. 差分算法在电力系统高频信号分析过程中的研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(3): 115-119, 136.
SHI Yihui, ZHANG Chengxue, YI Pan, et al. Research on analysis of high frequency signals by differential algorithm in electric power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(3): 115-119, 136.

收稿日期: 2014-10-24; 修回日期: 2015-04-28

作者简介:

殷家敏(1975-), 男, 工程硕士, 高级工程师, 从事电网调度运行;

吉畅(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 从事电力系统建模与辨识、电力系统继电保护; E-mail: 443264793@qq.com

罗建(1960-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统继电保护、电力系统建模与辨识等。

(编辑 张爱琴)