

一种配网单相接地选线的频带自适应获取方法

杨健翔¹, 常仲学², 豆敏娜², 王小波²

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 小电流接地系统单相故障选线中, 目前频带的选择方法中被广泛采用的是首容性频带方法, 但是这种方法易受配网运行方式、线路参数不精确等因素的影响。为了克服以上缺点, 提出一种基于矩阵束算法的配电网单相接地选线频带自适应获取方法。频带下限在不接地系统中为 0, 经消弧线圈接地为 150 Hz; 频带上限的确定方法为首先通过矩阵束算法提取各出线零序电流的共有频率以及对应的相位, 然后找到满足相位关系的最大频率, 此最大频率就是频带的上限。PSCAD 仿真和故障录波验证了该方法在各种故障情况下的有效性。此方法有望提高小电流接地系统单相接地故障时的选线正确率。

关键词: 配电网; 故障选线; 矩阵束算法; 频带; 自适应

A novel frequency band self-adaptive selection method of fault line selection in distribution network

YANG Jianxiang¹, CHANG Zhongxue², DOU Minna², WANG Xiaobo²

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the non-solid earthed network fault line selection, nowadays the frequency band selection method is based on special frequency band (SFB). However, this method is liable to be influenced by the distribution network operation type and line parameters. To overcome the disadvantages, a new selection method of frequency band based on matrix pencil algorithm is proposed. In ungrounded distribution network, the minimum frequency is 0 Hz, in compensated distribution network, the minimum frequency is 150 Hz. The maximum frequency of frequency band is determined by the way as follows: first the common frequencies and phases of all line transient zero sequence current are extracted by the matrix pencil method. Then the maximum frequency that meets a certain relationship is found and the maximum frequency is the maximum of the frequency band. The simulation on PSCAD and the recording data analysis verify that the method proposed is effective. The method is hopeful to improve the accuracy of the fault line selection.

Key words: distribution network; fault line selection; matrix pencil algorithm; frequency band; self-adaptive

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)15-0060-07

0 引言

小电流接地系统中单相接地故障的选线问题一直是研究的热点和难点, 目前的主流是基于暂态信息的选线方法^[1]。这些暂态方法主要分为两类: 1) 在特征频带内基于暂态零序电压和各出线零序电流之间的幅值和相位关系的选线方法^[2-10]; 2) 基于其他暂态特征的选线方法^[11-13]。文献[2-4]指出在首容性频带内故障线路的零序电流幅值最大且与其他出线零序电流相位相反; 文献[5]通过判断各出线零序电流与零序电压之间的相关性进行选线, 但实质是判别了各出线零序电流与零序电压之间的相位关

系; 文献[6]首先建立了各出线的 π 模型, 然后通过最小二乘算法求解母线侧的等效电容值实现选线, 该方法的实质还是判别各出线的零序电流与零序电压之间的幅值和相位关系; 文献[7-9]仅仅是把小波分析法引入到选线中, 其依然建立在故障线路与健全线路零序电流极性不同的基础之上。文献[10]中进行频率分解并通过各出线暂态零序电流幅值与所有出线零序电流幅值和之间的关系来确定频带上限, 选线判据还是基于各出线零序电流的幅值关系; 文献[11]中分析了故障后各出线的暂态行波特性构成选线判据, 但目前行波保护中波头的捕捉精度依然不高; 文献[12]分析了配网故障后负序电流的分

布特性进行选线但判据太过复杂; 文献[13]通过比较各出线故障相零序电流有效值与健全相零序电流有效值的比值差别进行选线但并未具体指出频带的获取方法。

通过上述分析我们可以看出在一定的频带内各出线暂态故障特征关系是明显的, 基于暂态信号的选线方法从原理上来讲能够选出故障线路, 但是根据目前现场运行经验来看装置的动作成功率依然很低。这除了变电站运行不规范、电磁干扰、装置制造工艺等的影响外^[14-15], 频带的不合理选取也是一重要因素。频带太宽会造成不符合故障特征的频点信息参加选线, 从而误选。频带太窄会造成有用信号不能被充分利用而选线失败。目前大部分选线方法中频带的选择都是依据首容性频带, 这种方法易受配网运行方式的影响, 且因线路参数不精确造成频带的选择不精确, 所以急需一种精确的频带选择方法, 且如果这种方法能够仅利用故障后的电气量进行选择而不依靠配网结构和参数决定则更好。

利用矩阵束算法能够准确提取信号频点和基本不受滤波影响的特点^[16], 借鉴文献[17]指出的小电流接地系统单相故障时各出线暂态零序电流的全响应模型, 本文提出一种配网单相接地选线的频带获取方法。该方法不受配网运行方式、线路参数不精确等因素的影响。

1 频带获取的必要性

对于一个有 n 条出线的配网, 当第 i 条出线故障时, 其 0 模网络如图 1 所示。

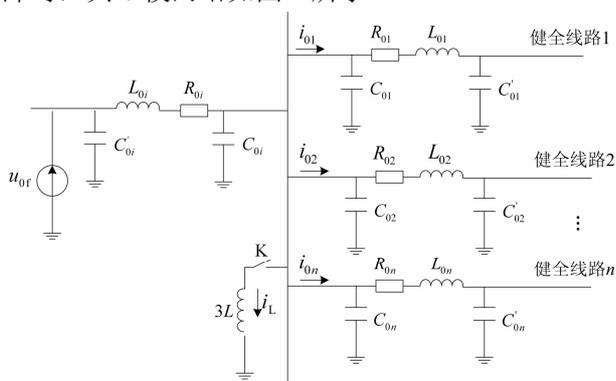


图 1 0 模网络示意图

Fig. 1 Zero-sequence network diagram

其中 R_{0k} 、 L_{0k} 、 C_{0k} 、 C'_{0k} 分别表示线路 π 模型的等效参数, $C'_{0k} \neq C_{0k}$, 表示负荷侧分支电容等的影响。 $3L$ 为消弧线圈电感, 当开关打开时系统不接地, 当开关合上时系统为经消弧线圈接地。 u_{0f} 为系统的 0 模电压, i_{0i} ($i=1, 2, \dots, n$) 表示第 i 条出线的

零序电流, 呈容性。 i_L 表示消弧线圈中的电流, 呈感性。

1.1 频带下限

对于不接地系统, $i_L = 0$, 即使在工频下其依然满足故障线零序电流与健全线零序电流反向, 可以构成选线判据。下面主要论述经消弧线圈接地时故障线路与健全线路零序电流的特征。

以母线指向线路为正方向, 对于故障线路 i , 其零序电流 $i_{0i} = -(i_L + i_{0\Sigma})$, $i_{0\Sigma}$ 表示所有健全线的零序电流之和。

由于正常运行时电路过补偿运行, 而补偿量是在工频下计算得到的, 所以实际上故障线路的零序电流 i_{0i} 呈容性, 也即其方向与健全线零序电流方向相同, 从而无法选线。向量图如图 2(a)。

实际上 i_L 、 $i_{0\Sigma}$ 是关于频率 f 的函数, 随着频率的增大, i_L 减小, $i_{0\Sigma}$ 增大, 直到某一频率 f_L 时, $i_L = i_{0\Sigma}$ 。高于 f_L 后 $i_L < i_{0\Sigma}$, 此时故障线的零序电流呈感性, 也即与健全线的零序电流反向, 向量图如图 2(b)。

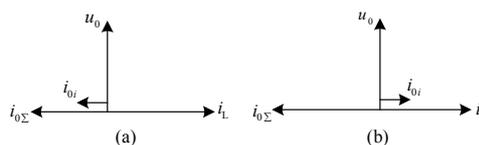


图 2 故障线路零序电流向量图

Fig. 2 Zero-sequence current vector diagram of fault line

1.2 频带上限

根据相关电路理论, 线路的输入阻抗为

$$Z = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega l_0}{j\omega c_0} \coth(l\sqrt{(r_0 + j\omega l_0)j\omega c_0})} \quad (1)$$

式中: r_0 、 l_0 、 c_0 分别是线路单位长度的零序电阻、电感和电容; l 是线路长度。

根据式(1)可以看出, 线路阻抗会交替呈现容性和感性, 其相频特性如图 3 所示。

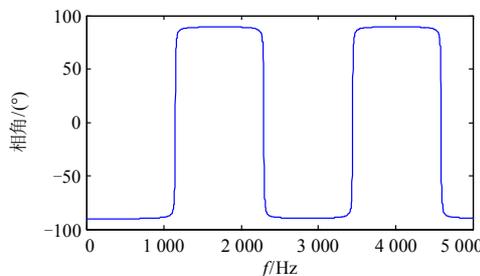


图 3 线路的相频特性

Fig. 3 Phase-frequency characteristics of line

当忽略线路电阻时, 可以得出线路的第一次串

联谐振频率 f_k 为

$$f_k = \frac{1}{4\sqrt{l_0 c_0} l} \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 线路越长, 第一次串联谐振频率 f_k 越低。当频率高于 f_k 后, 相关的故障特征将不再明显, 所以高于 f_k 的频率不能用来选线。

综上分析可以看出, 只有在一定的频带内, 故障线与健全线的零序电流差异才比较明显, 可以实现选线, 所以对于原始数据必须进行合理的滤波之后才能进行选线。

2 零序电流暂态特征分析

2.1 单相接地等值网络

根据单相接地故障的特点, 利用卡伦鲍尔相模变换建立小电流接地系统单相接地的等值网络^[18], 如图4所示。

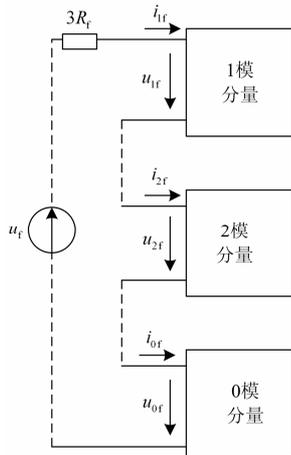


图4 小电流接地系统单相接地等值网络

Fig. 4 Equivalent network of neutral indirect ground system when single-phase fault occurs

其中 u_r 为故障点的附加电源, R_f 为过渡电阻, u_{1f} 、 u_{2f} 、 u_{0f} 为1模、2模、0模网络端口电压, i_{1f} 、 i_{2f} 、 i_{0f} 为流进1模、2模、0模网络的暂态电流。

2.2 暂态零序电流响应

对于0模端口电压 u_{0f} , 不光含有工频分量, 同时含有更高频率的分量。即 u_{0f} 满足

$$u_{0f} = U_0 \cos(314t + \theta_0) + \sum_{i=1}^M e^{-\delta_i t} U_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (3)$$

式中: $i=1,2,\dots,M$, 表示暂态信号个数; U_0 、 θ_0 表示工频分量的幅值和相位; U_i 、 θ_i 、 f_i 、 δ_i 分别表示各频率分量的幅值、相位、频率及衰减因数。

各出线零序电流的响应为 u_{0f} 的激励下的强制分量以及故障前自身储能元件充放电产生的自由分

量。各出线零序电流中的强制分量频率共有且与 u_{0f} 所含频率相同。其可以表示成

$$i_j = \sum_{k=1}^M e^{-\delta_k t} I_k \cos(2\pi f_k t + \theta_k), j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

规定电流正方向为由母线指向线路, 则有在首容性频带内各出线的零序分量频率满足故障线与健全线相位相反; 母线故障时, 各出线相位相同。超出首容性频带的频率分量则不满足该特点。

3 矩阵束算法原理

从式(4)可以看出, 各出线的零序电流由 M 个指数函数构成。离散后, 其可以表示成

$$y(kT_s) = \sum_{i=1}^M R_i z_i^k, k=0,1,\dots,N-1 \quad (5)$$

式中: $y(kT_s)$ 为第 k 个采样时刻的值; $z_i = e^{(-\alpha_i + j\omega_i)T_s}$, $i=1,2,\dots,M$; T_s 为采样周期; R_i 表示幅值; α_i 表示衰减因子; ω_i 为角频率, $\omega_i = 2\pi f_i$ 。

令

$$Y_1 = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \cdots & y(L-1) \\ y(1) & y(2) & \cdots & y(L) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \cdots & y(N-2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(L) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \cdots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: N 为最大采样点数; L 为束参数, 一般取 $N/3 \sim N/2$ 即可有效滤除噪声。

利用 Y_1 、 Y_2 构成矩阵束 $Y_2 - \lambda Y_1$, z_i 即为矩阵 $Y_2 - \lambda Y_1$ 的广义特征值。因此, 求解 z_i 问题转化成求解 $Y_2 - \lambda Y_1$ 的广义特征值问题, 也即求解 $Y_1^+ Y_2$ 的特征值。其中 Y_1^+ 为 Y_1 的伪逆矩阵。求出 $Y_1^+ Y_2$ 的特征值后就可以给出信号的特征频率, 有

$$-\alpha_i + j\omega_i = \ln z_i / T_s, i=1,2,\dots,M \quad (8)$$

得到 z_i 和 M 后就可以计算 R_i 了。

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_M \end{bmatrix} \quad (9)$$

得到 z_i 和 R_i 后即可给出幅值 A_i 、相位 θ_i 、衰减因子 α_i 和角频率 ω_i 。

$$\begin{cases} A_i = |R_i| \\ \theta_i = \arctan(\text{Im}(R_i)/\text{Re}(R_i)) \\ \alpha_i = -\text{Re}(\ln z_i)/T_s \\ \omega_i = \text{Im}(\ln z_i)/T_s \end{cases} \quad (10)$$

4 频带的获取方法

选线中的频带 $[f_{\min}, f_{\max}]$, 对于不接地系统频带下限 $f_{\min} = 0$, 对于经消弧线圈接地系统 $f_{\min} = 150 \text{ Hz}$ [19-20]。下面主要根据暂态零序电流的特点给出频带上限 f_{\max} 的自适应获取方法。该方法如下:

1) 运用矩阵束算法提取各出线零序电流的频率分量以及各频率分量的相位。

2) 提取各出线的共有频率分量 f_i , $i = 1, 2, \dots, N$, 并从小到大排序, 比较各频率分量的相位。

3) 找到频率 $f_k (1 \leq k \leq N)$ 。 f_k 满足这样的条件: 在其及以下, 某条出线的各共有频率分量的相位一直满足与其他线路的相反或者所有出线的共有频率分量一直满足同相位, 直到下一频率 f_{k+1} 时不再满足; 前一种情况实际是发生了线路故障, 后一种情况发生了母线故障, 而 f_k 和 f_{k+1} 之间的某一频率就是最长线路发生第一次串联谐振的频率。

考虑到工程实际, 给出 3) 中判断相位相同的判据

$$-90^\circ \leq \theta_i - \theta_j \leq 90^\circ \quad (11)$$

式中, θ_i 、 θ_j 是共有频率 f_i 、 f_j 对应的相角, θ_i 、 $\theta_j \in [0^\circ, 360^\circ]$ 。

式(11)对应的具体向量图如图 5 所示。以 0° 为参考轴, 当向量落入 A 区时判为同向, 当落入 B 区时判为反向。

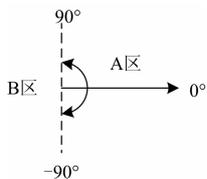


图 5 相位判别向量图

Fig. 5 Phase discrimination vector diagram

5 仿真验证

5.1 PSCAD 仿真验证

在 PSCAD 中搭建如图 6 所示的模型, 线路参数 $r_0 = 0.16 \Omega/\text{km}$, $l_0 = 3.3\text{mH}/\text{km}$, $c_0 = 0.009 \mu\text{F}/\text{km}$, $r_1 = 0.0484 \Omega/\text{km}$, $l_1 = 1.1 \text{ mH}/\text{km}$, $c_1 = 0.011 \mu\text{F}/\text{km}$

开关 K 打开为不接地系统, 合上为经消弧线圈接地。补偿度为 10%。采样频率为 10 kHz, 矩阵束算法数据窗长为 20 ms。

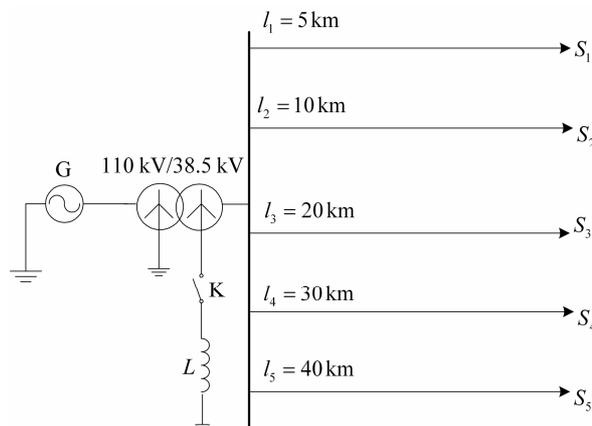


图 6 仿真模型拓扑结构

Fig. 6 Topological structure of simulation model

首先根据式(2)可以计算出各条出线发生首次串联谐振的频率, 如表 1 所示。

表 1 各出线首次谐振频率

线路	1	2	3	4	5
谐振频率/Hz	9 174	4 587	2 294	1 529	1 146

仿真考虑故障初相角、过渡电阻、故障离母线的距离等因素的影响, 具体仿真结果见表 2、表 3。

表 2 不同故障条件下的各出线频率

故障	R_f	φ	f	各出线相位/(°)				
				1	2	3	4	5
0	90	661.1	124.7	-90.4	106.9	100.8	100.6	
		1 164	114.9	-78.9	106.2	105.0	-86.5	
		1 674	107.5	-72.1	115.0	-78.6	-83.2	
50	90	660.8	121.7	-92.0	106.5	97.9	98.1	
		1 165	114.9	-78.4	106.6	104.8	-80.6	
		1 673	115.9	-68.4	113.6	-98.7	-70.8	
0	30	661.1	110.2	-101.6	93.5	82.0	83.4	
		1 164	104.0	-76.2	101.2	104.2	-90	
		1 678	100.8	-80.0	99.4	-98.6	-93.0	
50	30	658.7	105.8	-102.2	90.6	81.9	88.9	
		1 162.5	104.0	-76.2	101.2	104.2	-90.5	
		1 677	103.7	-73.6	102.6	-99.4	-80.6	

表 2 为经消弧线圈接地系统中, l_2 线路中间故障时, 过渡电阻分别为 0 和 50 Ω 和故障初相角分别为 90° 和 30° 时的各出线频率。表 3 为不接地系统中, l_4 首端、 l_5 末端以及母线发生单相故障时的各出线频率。 R_f 表示过渡电阻, φ 表示初相角。 f 表示共有频率, 单位为 Hz。

表 3 不同位置故障时的各出线频率

Table 3 Frequency of all lines when fault occurs in different positions

故障位置	f	各出线相位/ $^\circ$				
		1	2	3	4	5
l_4 首端	984	113.1	92.5	96.0	-108.9	93.2
	1275	131.0	127.7	128.1	-81.2	-107.6
l_5 首端	365.4	126.7	103.9	112.6	96.2	-88.3
	1307.5	110.4	108.2	98.7	103.6	100.8
母线	447	-5.1	-5.5	-10.2	-18.1	-15.6
	987.4	-8.2	-8.2	-13.6	-25.7	-20.1
	1428.7	-44.9	-44.1	13.1	3.0	172.1

以 $R_f = 0$ 、 $\varphi = 90^\circ$ 的故障数据为例, 给出频带的获取方法。5 条出线的共有频率分别是 661.1Hz 和 1164Hz, 其中 661.1Hz 对应的各出线中线路 2 的相位与其他线路相位相反, 1164Hz 对应的各出线中线路 5 与线路 2 的相位相同, 这是因为线路 5 在 1164Hz 时输入阻抗已经从容性变成了感性, 所以不能包含在频带内。综上频带上限可以定为 670 Hz。

综合表 1、表 2 可以看出, 随着各条出线共有频率的增大, 最长的线路总是最先发生相位翻转, 这符合前文提到的规律, 可是用来确定频带的上限。

需要指出的是如果过渡电阻太大, 各频点的这种相位关系将不再满足, 此时将无法给出频带。如果故障初相角太小, 暂态信息较少, 也会影响频带的获取。

5.2 故障录波验证

以某变电站录波数据为例进行频带获取方法的验证。该变电站共有 9 条出线, 线路 7 发生单相接地故障, 录波数据采样频率为 5 kHz。数据窗采用 20 ms, 表 4 为计算结果。

从表 4 可以看出, 当共有频率为 751.3 Hz 时, 线路 6 发生相位翻转, 当共有频率为 1250.6 Hz 时, 线路 3、5、6 都发生了相位翻转, 所以频率的上限可确定为 500 Hz。

表 4 录波数据计算结果

Table 4 Computation results of field recording data

	各出线共有频率/Hz				
	263.9	500	751.3	1250.6	
各 出 线 相 位	1	0	0	0	0
	2	0	0	50.4	0
	3	0	0	0	152.8
	4	0	0	-9.6	0
	5	0	0	0	152.3
	6	0	0	-99.2	-168.8
	7	151.8	-157.1	105.4	124.0
	8	0	0	0	0
	9	0	0	0	0

6 结论

本文通过分析小电流接地系统单相接地故障后的各出线零序电流响应特性, 得到以下结论:

1) 当配网发生单相接地故障时, 各出线的序电流响应为 0 模电压作用下的强制分量以及各自电容电感之间能量交换的自由分量, 其中强制分量为各出线共有, 自由分量为各线路独有。

2) 因为线路的阻抗交替呈现容性和感性, 参数相同的情况下, 最长各线路总是最先发生谐振, 所以总是最长线路共有频率对应的相位最先发生翻转。

3) 频带的获取方法为: 频带下限在不接地系统中为 0, 经消弧线圈接地为 150 Hz; 频带上限的确定方法为首先通过矩阵束算法提取各出线零序电流的共有频率以及对应的相位, 然后找到满足相位关系的最大频率, 此最大频率就是频带的上限。

相比于首容性频带, 该方法能够在大部分故障情况下正确地给出频带的上限, 具有不受配网运行方式、线路参数不精确等因素影响的优点, 有利于提高选线的准确率。

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] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 195-199.
XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin. Analysis of

- transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(2): 195-199.
- [3] 王伟, 焦彦军. 暂态信号特征分量在配网小电流接地选线中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 96-100.
WANG Wei, JIAO Yanjun. Application of characteristics of transient signal in grounded wire detection of ineffectively earthed distribution systems[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 96-100.
- [4] 揭林玲, 唐昆明, 张太勤, 等. 基于暂态信号相频特性的小电流接地选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 50-54.
JIE Linling, TANG Kunming, ZHANG Taiqin, et al. Research on ground fault detection based on phase-frequency characteristics of transient signals[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 50-54.
- [5] 李森, 宋国兵, 康小宁, 等. 基于时域下相关分析法的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 15-20.
LI Sen, SONG Guobing, KANG Xiaoning, et al. Time-domain fault line selection based on correlation analysis in neutral indirect ground system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 15-20.
- [6] 索南加乐, 张超, 王树刚. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 65-70.
SUONAN Jiale, ZHANG Chao, WANG Shugang. Fault line selection in the non-solid earthed network based on the model identification method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 65-70.
- [7] 张仲孝, 苗世洪, 林湘宁, 等. 基于多频带分量重构的小电流接地系统自适应选线新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 210-215.
ZHANG Zhongxiao, MIAO Shihong, LIN Xiangning, et al. A new adaptive faulty line detection approach based on reconstruction of multi-band components for small current neutral grounding system[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 210-215.
- [8] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.
DAI Jianfeng, ZHANG Yanxia. Study on adaptively choosing fault line under single-phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.
- [9] 李也白, 唐克义, 张霄霄, 等. 小波包原理小电流接地选线装置的研发与应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 159-162.
LI Yebai, TANG Keyi, ZHANG Xiaoxiao, et al. Research and application of small current grounding line selection device based on wavelet packet principle[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(2): 159-162.
- [10] 张保会, 赵慧梅, 张文豪, 等. 基于特征频带内暂态零序电流特点的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 5-10.
ZHANG Baohui, ZHAO Huimei, ZHANG Wenhao, et al. Faulty line selection by comparing the amplitudes of transient zero sequence current in the special frequency band for power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 5-10.
- [11] 董新洲, 毕见广. 配电网暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 1-6.
DONG Xinzhou, BI Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.
- [12] 林湘宁, 翁汉琨, 吴科成, 等. 小电流接地系统自适应单相接地保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 52-57.
LIN Xiangning, WENG Hanli, WU Kecheng, et al. A novel adaptive protection principle of the single-phase earth fault of the non-effectively rounded power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 52-57.
- [13] 赵慧梅, 张保会, 段建东, 等. 一种自适应捕捉特征频带的配电网单相接地故障选线新方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 41-46.
ZHAO Huimei, ZHANG Baohui, DUAN Jiandong, et al. A new scheme of faulty line selection with adaptively capturing the feature band for power distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 41-46.
- [14] 薛永端, 张秋凤, 颜廷纯, 等. 综合暂态与工频信息的谐振接地系统小电流接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 80-85.
XUE Yongduan, ZHANG Qiufeng, YAN Tingchun, et al. Faulty feeder identification based on combined transient and power-frequency components in resonant grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,

- 38(24): 80-85.
- [15] 薛永端, 徐丙垠, 杜景远. 谐振接地系统接地故障选线技术分析[J]. 电力设备, 2008, 8(11): 5-10.
XUE Yongduan, XU Bingyin, DU Jingyuan. The technology analysis of earth fault protection in resonant grounded system[J]. Electrical Equipment, 2008, 8(11): 5-10.
- [16] 康小宁, 屈亚军, 焦在滨, 等. 基于最小二乘矩阵束算法的工频分量提取方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 66-70.
KANG Xiaoning, QU Yajun, JIAO Zaibin, et al. Power-frequency phasor extraction based on least-square matrix pencil algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 66-70.
- [17] 康小宁, 刘鑫, 马超, 等. 基于矩阵束算法的经消弧线圈接地系统故障选线新方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 88-93.
KANG Xiaoning, LIU Xin, MA Chao, et al. New method for fault line selection in non-solidly grounded system based on matrix pencil method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 88-93.
- [18] 薛永端, 李娟, 徐丙垠, 等. 中性点不接地系统小电流接地故障暂态等值电路的建立[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 206-215.
XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin, et al. Analysis of transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 206-215.
- [19] 李广. 配电网单相接地故障区段定位研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.
- [20] 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.
-
- 收稿日期: 2015-01-11
- 作者简介:
- 杨健翔(1968-), 男, 本科, 讲师, 主要研究方向为电网自动化和信息化; E-mail: yangjianxiang@xust.edu.cn
- 常仲学(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: changzhx@163.com
- 豆敏娜(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 752373872@qq.com
- (编辑 张爱琴)