

基于小波包的配电网单相接地故障判别

王军芬, 康怡, 韩钧, 邱巍巍

(华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 基于故障产生的暂态零序电压电流在特定频段内分量呈容性关系,应用小波包良好的频域分频特性,以适当频率带宽对配电网发生单相接地故障后暂态电气量进行分解,得到其在不同频段下的输出。对于中性点接地方式不同的配电网,按照能量的观点,在 SFB 频段内选择不同的频带利用波形识别技术来实现故障选线。理论及大量的仿真试验表明,该方法可以准确、可靠地实现单相故障接地选线,适合于接地方式不同的电网。

关键词: 配电网; 故障选线; 小波包; 单相故障

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)24-0010-06

0 引言

我国 6 ~ 35 kV 的配电网中性点普遍采用不接地或经消弧线圈接地方式,属于中性点非有效接地电网。此种接地电网发生单相接地故障时不形成短路回路,只是经过线路对地电容形成较小的电流通路,电网电压仍然对称。规程规定,中性点非有效接地系统发生单相接地故障时由于线电压的对称性及故障电流较小,电网可以继续运行 1 ~ 2 h。但中性点非有效接地系统发生单相接地故障时,非故障相对地电压有不同程度的升高,而且间歇性弧光接地可能引起电弧接地过电压,对系统绝缘有威胁。同时随着系统线路的增多、增长,电容电流会增大,这些容易导致单相故障扩大为 2 点或多点接地故障。因此应该尽快确定故障线路,尽快排除故障。

现有的选线方法大都是基于稳态分量进行分析的。例如:注入信号法、比幅法、比相等。注入信号法需要附加高压耦合设备且也不能适应高阻和电弧不稳定故障;比幅法和比相法中 CT 不平衡电流及过渡电阻大小,均会影响选线精度。基于暂态信号的选线方法灵敏度高且不受消弧线圈影响。上世纪 50 年代提出了利用暂态电压、电流初始极性关系的首半波^[1]法,但其基于接地故障发生在相电压接近最大值瞬间这一假设,以及极性关系正确的时间非常短(远小于暂态过程),且受线路结构和参数影响。

文献[2]对故障暂态特征进行了深入的研究,发现在一定频段(SFB - selected frequency band)内暂态零序电压与电流间呈容性关系。在该选定频段

内,故障线路暂态零序电流与非故障线路相反。小波变换作为一种新的时频分析工具,通过小波函数的伸缩和平移产生可变的时频窗,对于暂态非平稳信号,标定其发生变化的时间位置和发生变化的剧烈程度。我们可对故障信号的整个暂态过程进行小波分析,使其投影到不同频带上,根据信号特征选择适当的频带进行选线。

本文利用 db6 小波包分解故障暂态信号,在 SFB 频段内,根据不同接地方式,选择能量集中的不同频带作为选线频带,利用波形识别技术,来判断故障线路。

1 小波包分解介绍^[3]

1.1 小波包提出

傅里叶变换反映的只是信号的整体特征,主要用于平稳信号的分析。小波分析可以对信号进行有效的时频分解,但在高频段其频率分辨率较差,而在低频段其时间分辨率较差。小波包分析能够为信号提供一种更加精细的分析方法,将频带进行多层次划分,因此能对多分辨分析没有细分的高频部分作进一步分解。并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时频分辨率,具有更广泛的应用价值。

1.2 小波包定义

将尺度空间 V_j 和小波子空间 W_j 用一个新的子空间 U_j^n 统一表征,定义子空间 U_j^n 是函数 $u_n(t)$ 的闭包空间,而 U_j^{2n} 是 $u_{2n}(t)$ 的闭包空间,并令 $u_n(t)$ 满足下面的双尺度方程:

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) u_n(2t-k) \\ u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) u_n(2t-k) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 $g(k)$ 为高通滤波器系数; $h(k)$ 为低通滤波器系数; $g(k) = (-1)^k h(1-k)$, 即两系数具有正交关系。由式(1)构造的序列 $\{u_n(t)\}$ (其中 $n \in \mathbf{Z}_+$) 称为由基函数 $u_0(t) = \phi(t)$ 确定的正交小波包。

1.3 小波包的分解

由式(1)可知,对任意的 $n \in \mathbf{Z}_+$ (非负整数)有

$$U_{j+1}^n = U_j^{2n} \oplus U_j^{2n+1} \quad j \in \mathbf{Z}; n \in \mathbf{Z}_+$$

这样的小波包空间的各种分解如下:

$$\begin{cases} w_j = U_{j-1}^{2j} \oplus U_{j-1}^{2j+1} \\ \dots \\ w_j = U_{j-k}^{2^k} \oplus U_{j-k}^{2^k+1} \oplus \dots \oplus U_{j-k}^{2^k+1-1} \\ \dots \\ w_j = U_0^{2^j} \oplus U_0^{2^j+1} \oplus \dots \oplus U_0^{2^j+1-1} \end{cases}$$

相应于 w_j 的第 j 频段就被分解为 2^k 个子频段,从而增强了局部化特性,克服了正交小波变换的不足。小波包分解树如图 1 所示。

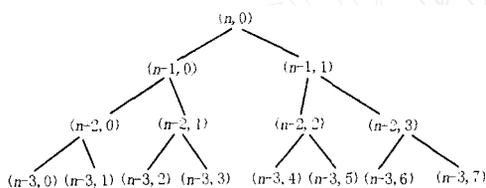


图 1 小波包二分树

Fig 1 Binary tree of wavelet packets

2 SFB 频段配电网单相接地故障特征^[1]

中性点非有效接地系统发生单相接地时,电网中将出现零序成分和负序成分。由于产生负序的原因很多,不容易识别,所以易采用零序分量作为故障特征量。

2.1 单相接地故障特征

设中性点不接地系统第 i 条出线发生单相接地故障,零序网络图如图 2 所示。

图 2 中,开关 k 为断开状态,其中, U_{i0} 为故障点虚拟电源在零序网络的压降; L_{0k} 、 R_{0k} 、 C_{0k} 分别为第 k 条出线单位长度零序电感、电阻和分布电容; D_k 为各出线检测点; L 为消弧线圈电感; l_k 为出线 k 线路长度; n 为系统出线数。

健全线路 k 输入端阻抗为:

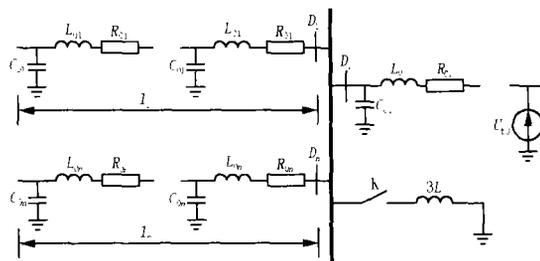


图 2 单相接地故障全频零序网络等效图

Fig 2 Equivalent circuit of the zero sequence network for earth fault in whole frequency band

$$Z_{0ck}(\omega) = \frac{\sqrt{R_{0k}^2 + j\omega L_{0k}}}{j\omega C_{0k}} \operatorname{cth} \left(l_k \sqrt{j\omega R_{0k} C_{0k} - \omega^2 L_{0k} C_{0k}} \right)$$

式中 ω 为角频率。忽略线路电阻时,健全线路 k 的首次串联谐振频率即阻抗呈容性的低频段临界频率 ω_{ks} :

$$\omega_{ks} = \frac{1}{\sqrt{2} \sqrt{L_{0k} C_{0k} l_k}} = \frac{1}{\sqrt{2} \sqrt{L_k C_k}}$$

式中 $L_k = L_{0k} l_k$ 、 $C_k = C_{0k} l_k$ 在 0 到 ω_{ks} 频段内,健全线路 k 可以等效一集中参数电容。设 ω_{ks} 为所有健全线路自身串联谐振频率的最小值,则在 0 到 ω_{ks} 频段 (SFB) 内,均可等效为一集中参数电容。

在 SFB 频段内,零序网络简化为如图 3 所示。

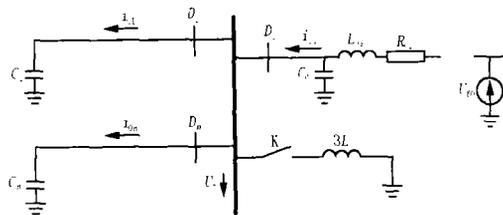


图 3 单相接地故障 SFB 频段内零序网络等效图

Fig 3 Equivalent circuit of the zero sequence network for earth fault in SFB

根据图 3,零序容性电流从故障点虚拟电源输出,经故障线路分配到各健全线路。即在 SFB 频段内,母线处检测到的暂态零序电压、电流具有如下特性:

- 1) 故障线路的容性电流幅值大于任何一条健全线路。
- 2) 故障线路中的容性电流从线路流向母线,而健全线路中的容性电流从母线流向线路。二者流向相反。
- 3) 健全线路暂态零序电压、电流 SFB 分量 $u_0(t)$ 、 $i_0(t)$ 满足

$$i_0(t) = C_k [du_0(t)]/dt$$

而故障线路暂态零序电压、电流 SFB 分量 $u_0(t)$ 、 $i_0(t)$ 满足

$$\dot{i}_0(t) = -C_{0h} [du_0(t)]/dt \quad (2)$$

式中 $C_{0h} = \sum_{k=1, k \neq i}^n C_k$ 为所有健全线路零序电容。

利用上述特性均可检测出故障线路。

对于中性点经消弧线圈接地系统中,在 SFB 频段内,消弧线圈的影响可以忽略。即上述的在 SFB 频段内故障线路与健全线路暂态零序电压、电流特性 1)~3) 仍然成立。不同点是,因为消弧线圈电感的作用,式(2)中的等效电容 C_{0h} 将减小为 C_{0hp} 。因此,可以和中性点不接地系统使用相同的保护方法。

$$C_{0hp} = C_{0h} - \frac{2}{r} C_0 / \omega^2$$

2.2 SFB 频段的确定^[4]

对中性点不接地系统, SFB 可选为 $0 \sim \omega_1$ 频段范围。对于消弧线圈接地电网, SFB 可选为 $\omega_1 \sim \omega_2$ 。设最大的健全线路零序电容为 C_{max} , 则 ω_1 为:

$$\omega_1 = \sqrt{C_0 / (C_{0h} - C_{max})}$$

在实际应用中,对于消弧线圈接地电网来说, SFB 的下限可选为 150 Hz,而对于中性点不接地电网,下限就是直流分量。本文中为了同时满足两种系统选下限为 150 Hz。

由于可证明故障暂态过程的主谐振频率包含在 SFB 内^[1],故障后可先计算零序暂态电流的主谐振频率。SFB 的上限可确定为主谐振频率基础上加一预设阈值。实际应用中也可以根据网络结构直接将其设为固定值,一般为 2~3 kHz。

3 小波包选线方法

3.1 小波函数的选取

正交小波基函数的选择需要考虑小波基的下列特性:A:支集长度特性;B:光滑性;C:对称性;D:消失矩特性。单相接地的特点表明,在经过非线性电阻接地或消弧接地时,电流信号往往包含持续时间短促的脉冲。另外,经过小波变换后,即使发生相移和频带的一些混叠,电流间的相对相位不变,选线不会发生实质性恶化。因此,要求小波基函数的时间局部性好,波动次数少,能量集中度高,而允许光滑性和消失矩较差。文献[5]论证,在已知的各种小波基函数中,db6小波的支集长度为12,能量集中度高,具有最佳的局部特性,能够在各种故障波形中较好的提取有用信号成分,因此本文选择 db6 紧支集小波作为小波基函数。

3.2 小波包选线判据

按照适当的频带宽度,采用小波包分解故障暂态信号的原始采样序列,按照公式(3)计算分解后各频带信号对应的能量。

$$E_k^{(j)} = \sum_n [w_k^{(j)}(n)]^2 \quad (3)$$

式中 $w_k^{(j)}(n)$ 为小波包分解第 (j, k) 子频段下的系数。

对于中性点不接地配电网,选择能量集中的高频频带。而对于中性点经消弧线圈接地的配电网,选择能量次最大的高频频带^[6]。这样避免了信号频带能量较小、由于测量和计算误差的存在而导致错误选线的可能,从而为可靠、准确选线提供了基础。

对从零序电流互感器或零序电流滤过器获得的故障暂态电流进行小波包分解,实质是让信号通过一组高低通组合的共扼正交滤波器组,不断地将信号划分到不同的频段上,滤波器组每作用一次,采样间隔增加一倍,数据点数则减半。

单相接地故障发生后,非故障线路上的零序电流中的 SFB 频段分量投影到小波包的某一频段上,呈现相同变化趋势的波形特征,而故障线路呈现几乎反向的变化特征。当母线发生故障时,所有线路呈现几乎相同的变化特征。在谐波干扰严重的情况下,大多数的小波分解系数的极性符合上述特征,只有少数的小波分解系数的极性由于干扰而变得没有规律,因此可采用少数服从多数的原则确定选线结果^[7],选线过程如下:

1) 以故障发生时刻对应的采样点为基准,取故障前 0.5 周期、故障后 4.5 周期的采样数据作为分析数据窗,用 db6 小波对各条线路的零序电流进行小波包分解。应先选择适当的分解层数,层数过多则频带宽度过小,频带对应的采样点数过少,使得判据灵敏度降低;层数过少则频带宽度过大,信息量增加,可能引入更多的干扰成分,降低判据的可靠性。本文每周期采样 100 点,采样周期为 5 kHz,基于对以上原因及 SFB 频带的要求,采用 4 层分解,每个频带宽度为 156.25。db6 小波包 4 层分解后除 (4, 0) 外,均属于 SFB 频带。

2) 给母线及各线路分别设置故障标志 $f(k)$, k 为线路编号 ($k=0$ 为母线),并令初值为零。

3) 设定一阈值^[8] (一般可取 $\theta = 0.01 \sim 0.02$)。对于每一条线路在这该节点上的所有小波分解细节系数满足 $|w(i)| > \theta$ 的依次进行极性比较,如果哪一条线路上的一个小波分解系数的极性与其它线路上

对应于同一时间位置的小波分解系数的极性都相反,则该线路的标志加 1;如果所有线路上的小波分解系数的极性都相同,则母线的标志加 1;不符合以上两条原则的点,则应丢弃。

4) 比较完毕后,将各个标志排序,标志最大的那条线路为故障线路。

4 MATLAB 仿真及结果分析

4.1 MATLAB 仿真图^[9]

根据电网分割理论以及等效代换理论将中性点非有效接地系统从电网中分立出来。为了突出主要因素,系统输入端简化为带内阻抗的无穷大容量的三相电压源,负荷侧以固定负荷代替,功率因数设为

0.8;由于在对电压和电流信号进行分析的时候,主要利用其暂态产生的高频谐波分量,三回路出线选用分布式参数线路。取每条线路长度各不相同,线路参数正序参数为:正序电阻 =0.45 /km,正序感抗 =0.933 7 mH/km,正序容抗 =0.070 74 μF/km;零序电阻 =0.74 /km,零序感抗 =4.126 4 mH/km,零序容抗 =0.047 8 μF/km;变压器电抗为:0.568 5 + j0.403 3 ,电压等级为 110 kV/10 kV;线路长度分别为: $L_1 = 10$ km; $L_2 = 12$ km; $L_3 = 18$ km; $L_4 = 23$ km;取过补偿为 10%,经过计算得出消弧线圈的参数为:电阻 =6 ,感抗 =0.95 H。仿真模型见图 4。

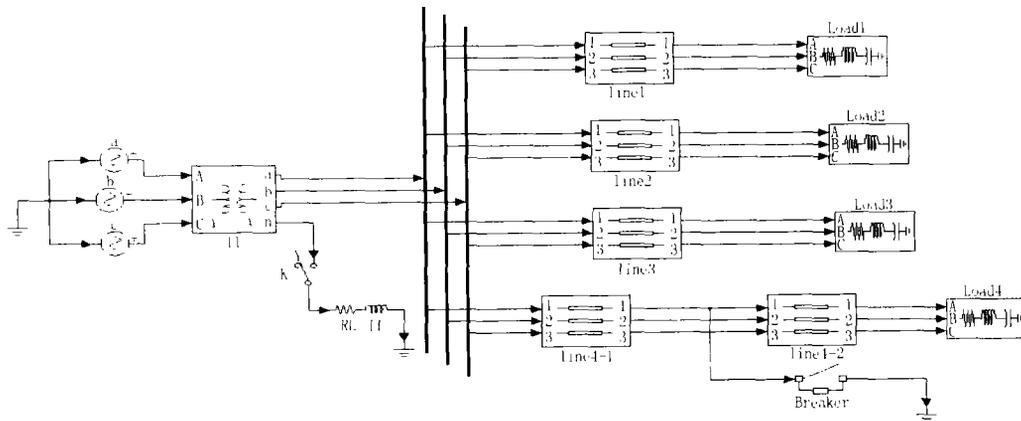


图 4 系统仿真模型

Fig 4 System simulation model

4.2 仿真分析

本文给出 3 种不同典型故障条件下的接地故障试验:母线接地故障、电压最大值时馈线发生接地故障和电压过零时线路发生接地故障。限于篇幅,下面仅给出了几种特殊故障接地条件下线路情形。

仿真 1:中性点不接地系统,线路 4 在 8 km 处相电压达最大值时发生单相接地故障,过渡电阻为 100 。由选线程序可以得:零序电压能量最大的频带为 (4, 1);各线路的故障标志为 $f(4) = 20$; $f(0) = f(1) = f(2) = f(3) = 0$; 可以准确判断为线路 4 故障。图 5 给出了线路 1~4 在 (4, 1) 上的小波细节系数。为了消除边界效应带来的影响,经理论分析和仿真试验,有用小波系数取 MATLAB 仿真系数 2~31 之间的值 (以下仿真相同),见图 5。

仿真 2:中性点经消弧线圈接地系统,过补偿为 10%,L2 线路在 6 km 处相电压达最大值时发生单

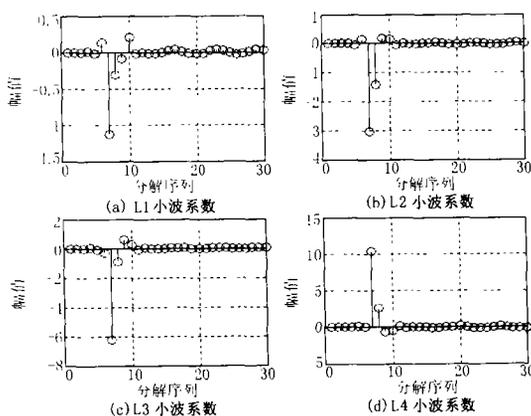


图 5 L4 故障频段 (4, 1) 下小波包分解结果

Fig 5 Result of wavelet packets decomposition in band (4, 1) with an earth fault in line L4

相接地故障,过渡电阻为 0.01 。由选线程序可以得:零序电压次能量最大的频带为 (4, 1);各线路的

故障标志为 $f(2) = 12; f(0) = 6; f(1) = f(3) = f(4) = 0$; 可以准确判断为线路 2 故障。图 6 为小波包分解结果。

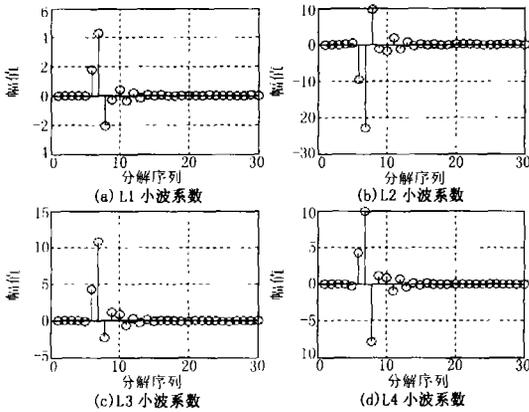


图 6 L2 故障频段 (4, 1) 下小波包分解结果

Fig 6 Result of wavelet packets decomposition in band (4, 1) with an earth fault in line L2

仿真 3: 中性点经消弧线圈接地系统, 相电压过零时母线发生单相接地故障, 接地电阻为 10。由选线程序可以得: 零序电压能量最集中的频段为 (4, 3); 各线路的故障标志为 $f(0) = 5; f(1) = f(2) =$

$f(3) = f(4) = 0$; 可以准确判断为母线故障。图 7 为小波包分解结果。

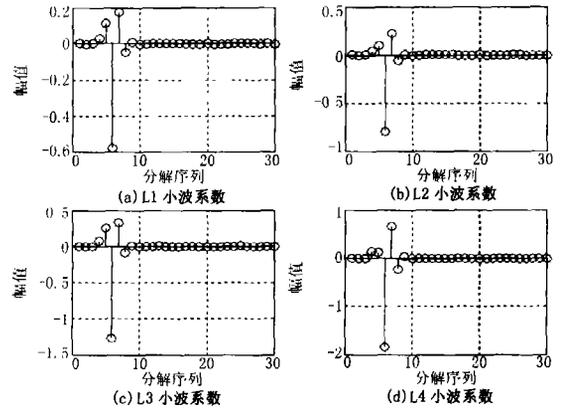


图 7 母线故障频段 (4, 3) 下小波包分解结果

Fig 7 Result of wavelet packets decomposition in band (4, 3) with an earth fault in bus bar

改变故障线路, 改变故障点位置, 接地电阻等参数, 发现本方法基本不受其影响。MATLAB 仿真结果表明, 此选线方法在各种故障条件下均能正确选线。表 1 列出了其中部分实验结果, 其中母线接地故障仿真中以中性点经消弧线圈接地系统为例。

表 1 单相接地故障选线结果

Tab 1 Results of detection at phase-to-ground fault case

| 故障线路名称 | 故障距离 /km | 过渡电阻 / | 故障初始角 / (°) | 故障标志排序 (按降序, 若相等按线路符号升序排列) | 选线结果 |
|--------|----------|--------|-------------|--------------------------------|------|
| L3 | 0.0 | 1 000 | 90 | $f(3), f(0), f(1), f(2), f(4)$ | L3 |
| L3 | 9 | 500 | 30 | $f(3), f(0), f(1), f(2), f(4)$ | L3 |
| L3 | 18 | 50 | 60 | $f(3), f(0), f(1), f(2), f(4)$ | L3 |
| L1 | 5 | 1 000 | 30 | $f(1), f(0), f(2), f(3), f(4)$ | L1 |
| L2 | 12 | 50 | 0 | $f(2), f(0), f(1), f(3), f(4)$ | L2 |
| L4 | 11.5 | 50 | 30 | $f(4), f(0), f(1), f(2), f(3)$ | L4 |
| 母线 | 0.0 | 1000 | 90 | $f(0), f(1), f(2), f(3), f(4)$ | 母线 |
| 母线 | 0.0 | 500 | 60 | $f(0), f(1), f(2), f(3), f(4)$ | 母线 |
| 母线 | 0.0 | 100 | 30 | $f(0), f(4), f(1), f(2), f(3)$ | 母线 |
| 母线 | 0.0 | 50 | 0 | $f(0), f(4), f(1), f(2), f(3)$ | 母线 |

5 结论

本文利用小波包的时频特性, 对中性点非有效接地配电网中发生单相接地故障后的暂态零序电流进行了分解, 根据故障线路和非故障线路小波细节系数极性的比较结果来确定故障线路。该方法具有如下的特点:

- 1) 在最大限度保留了暂态信号的基础上, 剔除了其中不支持选线要求的分量, 提高了暂态检测方法的可靠性。
- 2) 由于系统谐波、装置安装处电磁环境的影

响, 不是所有的小波分解系数都满足故障特征, 本方法根据少数服从多数的原则, 只需有大多数的小波分解细节系数满足条件即可, 从而可有效去除干扰成分的影响, 保证极性判定的结果。

3) 因为本方法比较的是小波分解细节系数的极性, 而与其幅值大小没有关系, 所以具有很强的抗过渡电阻的能力, 且不受故障初始角、故障点位置等因素的影响; 设置阈值一方面可减少不必要的计算量和运行时间, 另一方面可增加抗干扰能力。

4) 不受消弧线圈的影响, 可适用于中性点不接地和经消弧线圈接地系统。

参考文献:

- [1] 马珂,张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J]. 继电器, 2003, 31(5): 65-69.
MA Ke, ZHANG Bao-hui Development and Prospect of the Single-phase Grounding Fault Detection in Unearthed or Compensated Neutral Networks[J]. Relay, 2003, 31(5): 65-69.
- [2] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56
XUE Yong-duan, XU Bing-yin, FENG Zu-ren, et al The Principle of Directional Earth Fault Protection Using Zero Sequence Transients in Non-solid Earthed Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56
- [3] 胡昌华,李国华,刘涛,等. 基于 MATLAB 6 X 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.
HU Chang-hua, LI Guo-hua, LIU Tao, et al MATLAB 6 X Based System Analysis and Design——Wavelet Analysis[M]. Xi an: Xidian University Press, 2004.
- [4] 齐郑,陈 聪,杨奇逊. 基于小波变换和 LMS 自适应滤波器的单相接地选线方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 58-61.
QI Zheng, CHEN Jiong-cong, YANG Qi-xun Selection of Single-phase to Ground Fault Line Based on Wavelet Transform and LMS Adaptive Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 58-61.
- [5] 贾清泉. 提高配电网单相接地故障选线保护性能的研究(博士学位论文)[D]. 北京:华北电力大学, 2002
JIA Qing-quan Research on Improving Performance of Single Phase to Ground Fault Detection for Power Distribution Systems, Doctoral Dissertation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2002
- [6] 毛鹏,孙雅明,张兆宁,等. 小波包在配电网单相接地故障选线中的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 9-13, 17.
MAO Peng, SUN Ya-ming, ZHANG Zhao-ning, et al Wavelets Packet Based on Detection of Phase-to-ground Fault in Distribution Automation System [J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 9-13, 17.
- [7] 苏战涛,吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 30-33.
SU Zhan-tao, L ü Yan-ping A New Wavelet Packet Analysis Based Method to Detect Faulty Line for Single Phase to Ground Fault Occurred in Distribution Network with Small Current Neutral Grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 30-33.
- [8] 贾清泉,肖鹏,杨以涵,等. 小电流接地电网单相接地故障的小波选线方法[J]. 继电器, 2001, 29(3): 5-8.
JIA Qing-quan, XIAO Peng, YANG Yi-han, et al Wavelets Method to Select Single Phase Faulted Circuit for Small Current Grounding Power Systems [J]. Relay, 2001, 29(3): 5-8
- [9] 吴天明,谢小竹,彭彬. MATLAB 电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
WU Tian-ming, XIE Xiao-zhu, PENG Bin MATLAB Power System Design and Analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.

收稿日期: 2005-07-26; 修回日期: 2005-08-18

作者简介:

王军芬(1979-),女,硕士研究生,研究方向为信号处理; E-mail: hbsjzwjf@126.com

康 怡(1957-),女,副教授,硕士生导师,主要从事实时信号处理方向的研究工作。

Selection on single-phase to ground fault line based on wavelet packets

WANG Jun-fen, KANG Yi, HAN Jun, Q U Wei-wei

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: According to the capacitive relationship between transient zero sequence voltage and current components in a selected frequency band (SFB) produced by earth fault, applying the good property of frequency division of wavelet packets, transient electrical quantities, which appears in the distribution networks occurring a single phase to ground fault, are decomposed to obtain the outputs of different frequency bands. In view of energy, using waveform recognition, the different frequency band is chosen corresponding to the distribution system with the different neutral grounding mode in SFB. Theoretical analysis and simulations show that the proposed method can reliably and exactly choose the faulty line in single phase-to-ground fault and it is suitable for various distribution systems with different neutral grounding modes

Key words: distribution system; faulty line detection; wavelet packets; single-phase faults