

基于小波包分析的 10kV 电网接地故障选线的研究

田小东

(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061)

摘 要: 针对小电流接地系统中的故障选线问题, 本文对该系统发生单相接地故障后所出现的稳态和暂态特征进行深入研究, 从而为研究故障选线的新算法奠定了理论基础, 并指出了利用暂态信息进行接地故障选线的研究方法。本文利用小波包的良好频率分频特性, 以适当频率带宽对配电网发生单相接地故障后各条线路的暂态零序电流进行分解, 提出了一种基于波形识别的判别依据, 并应用 Matlab 仿真软件建立了仿真分析, 结果表明, 该方法准确、可靠。

关键词: 小电流接地系统; 故障选线; 电力系统; 小波包分析; Matlab 仿真

0 引言

当小电流接地系统发生单相接地故障时, 流过故障点的电流仅为线路对地电容电流, 且电网的三相线电压仍保持对称关系, 不影响负荷供电, 所以电力系统规程规定可以继续运行 1-2h。但故障会引起非故障相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍, 长时间运行易使故障扩大成两点或多点接地短路, 破坏系统安全运行。

科研人员通过大量研究, 基于不同原理提出多种解决方法。但这些方法的选线效果并不理想, 误选、漏选率较高。所以, 对小电流接地系统单相接地故障选线的问题还有必要进一步研究。

本文应用 Matlab 仿真软件建立了仿真模型, 依据小波包理论, 以 10kV 电网为例, 分解故障暂态信号, 根据故障线路和非故障线路电流在高频段的不同表现, 研究了一种新的小电流接地系统故障选线方法。

1 小电流接地系统单相接地过渡过程的特点

当发生单相接地故障是, 接地电容电流的暂态分量可能比其稳态值大很多, 在一般情况下, 由于电网中绝缘被击穿而引起的接地故障, 经常发生在相电压接近于最大值的瞬间, 因此, 可以将暂态电容电流看成是如下两个电流之和。

(1) 由于故障相电压突然降低而引起的放电电容电流, 它通过母线而流向故障点, 放电电流衰减很快, 其振荡频率高达数千赫兹, 振荡频率

主要决定于电网中线路的参数、故障点的位置以及过渡电阻的数值。

(2) 对非故障相的电压突变升高而引起的充电电容电流, 它要通过电源而成回路。由于整个流通回路的电感较大, 因此, 充电电流衰减较慢, 振荡频率也较低, 仅为数百赫兹。

在故障线路中, 零序暂态电流的高频分量包含了其它所有非故障线路零序暂态电流的高频分量之和, 方向与其它线路相反, 即当故障线路暂态电流瞬时值为正时, 健全线路暂态电流瞬时值为负; 当母线故障时, 所有线路的零序暂态电流高频分量方向相同, 与母线中零序暂态电流方向相反。本文基于此特征进行了选线, 该方法将有更强的适应性, 更能满足实际应用的要求。^[1]

2 二进小波包分解

2.1 小波包的提出

由于傅立叶变换有一个严重的不足, 那就是在做变换时丢掉了时间信息, 无法根据傅立叶变换的结果判断一个特定的信号是在什么时候发生的。也就是说, 傅立叶变换只是一种纯频域的分析方法, 它在频域里的定位是完全准确的即频域分辨率最高, 而在时域上没有分辨能力。傅立叶变换所反映的是整个信号全部时间下的整体频域特征, 而不提供任何局部时间段上的频率信息。对于平稳变化的信号, 这一点也许不是很重要, 但是对于突变的、非平稳变化的信号, 通常需要提取某一时间段或瞬间的频域信息或某一频段所对应的时间信息。因此, 需要寻求一种具有一定

时间和频率分辨率的基函数来分析时变信号。多分辨率分析可以对信号进行有效的时频分解,但由于其尺度是按二进制变化的,所以在高频段其频率分辨率较差。小波包分析能够为信号提供一种更精细的方法,从而提高了时频分辨率而且小波包能够根据被分解信号的特征,自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,以实现信号最简洁最有效的表示。因此小波包比小波具有更广泛的应用价值。

2.2 小波包的定义

小波包分析是小波理论的发展,能够对高频的小波空间进一步分解,从而将高频信号中的各种频率分量进一步细分到各个频带上。

将正交小波尺度函数 $\phi(t)$ 改记为 $U_0(t)$, 小波函数 $\psi(t)$ 改记为 $U_1(t)$, 于是正交小波的二尺度方程变为

$$u_0(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \phi(2t - k)$$

$$u_1(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \phi(2t - k)$$

类似地, 改记 $U_j^0 = V_j, U_j^1 = W_j$ 则

$$U_{j-1}^0 = U_j^0 \oplus U_j^1$$

最后, 将以上公式推广到小波包, 定义小波包, 称由公式

$$U_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k U_n(2t - k)$$

$$U_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k U_n(2t - k)$$

定义的函数集合 $\{U_n(t)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 为由 $U_0 = \phi$ 必

所确定的小波包。其中 h_n 为低通滤波器系数, g_n

为高通滤波器系数。

2.3 小波包的分解

类似小波理论, 记

$$U_j^n = \text{clos}_{L^2(\mathbb{R})} \left\{ 2^{-\frac{j}{2}} U_n(2^{-j}t - k), k \in \mathbb{Z} \right\}, n=0,1,2,\dots,j,k \in \mathbb{Z}$$

这是函数 $U_n(t)$ 在尺度下的整数平移系列的

线性组合所生成的子空间在 $L^2(\mathbb{R})$ 中的闭包, 函

数族 $\left\{ 2^{-\frac{j}{2}} U_n(2^{-j}t - k), k \in \mathbb{Z} \right\}$ 构成了空间 U_j^n

的一组标准正交基。与原来小波理论中的尺度空间和尺度空间对应, 有

$$U_j^0 = V_j, U_j^1 = W_j$$

令 n 是任意非负整数, 那么空间 U_j^n 具有如下关系:

$$U_{j-1}^n = U_j^{2n} \oplus U_j^{2n+1}$$

根据以上公式, 可以得到小波包分析中的空间划分如表 1 所示。

表 1 小波包的空间划分

$U_0^0(V_0)$							
$U_1^0(V_1)$				$U_1^1(V_1)$			
$U_2^0(V_2)$		$U_2^1(V_2)$		$U_2^2(V_2)$		$U_2^3(V_2)$	
$U_3^0(V_3)$	$U_3^1(V_3)$	$U_3^2(V_3)$	$U_3^3(V_3)$	$U_3^4(V_3)$	$U_3^5(V_3)$	$U_3^6(V_3)$	$U_3^7(V_3)$

由表 1 可见, 原来的正交小波空间 W_j 可分

解为:

$$W_j = U_j^1 = U_{j-p}^{2^p} \oplus U_{j-p}^{2^p+1} \oplus \dots \oplus U_{j-p}^{2^{p+1}-1}$$

$$\text{即 } W_j = \sum_{q=0}^{2^p-1} U_{j-p}^{2^p+q} \quad \text{其中 } j=1,2,\dots;p=1,2,\dots,j$$

这样, 原来的小波空间 W_j , 在小波包分析

下被进一步细分为多个子空间, 从而提高了高频信号的频域分辨率。^[2]

3 基于小波包分析的选线方法

3.1 小波包选线判据

单相接地故障发生后, 非故障线路上的零序电流中的暂态高频分量投影到小波包的某一频段上, 呈现相同的变化趋势的波形特征, 而故障线路呈现几乎相反的变化趋势。当母线发生变化时, 所有线路呈现几乎相同的变化趋势。在谐波干扰严重的情况下, 大多数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。

3.2 小波函数的选取

与标准傅立叶变换相比,小波分析中所用到的小波函数不具有唯一性,即小波函数的选择具有多样性。用不同的小波基分析同一问题会产生不同的效果,所以目前并没有一个公用的原则来选择小波函数,实际中选用定型分析结合实验的方法。DbN小波系是工程上应用较多的小波函数,这一小波系的特点是随着序号N的增加,时域支撑长度变长,时间局部性变差;滤波器长度变长,频域局部性变好。本文的应用对时间局部性要求不是很严格,而对频域局部性要求则较高,以防止频域混叠。并且本文提出的选线方法,要求滤波器的长度不能太短,否则灵敏度不高,甚至误判。另外,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,其实质是让信号通过一组高低通组合的共轭正交滤波器组,不断地降信号划分到不同的频段上,滤波器组每做一次,采样间隔增加一倍,数据点数则减半。对于相同频段,小波分解系数的多少与所用小波的滤波器的长度有关,滤波器长度越长,则个数越多,选线判据的灵敏度相应越高。不过也不能一味追求滤波器的长度,因为对于谐波干扰越来越严重的配电系统,小波分解系数的个数的增加也可能引入更多的干扰因素,降低判据的可靠性。综合以上各种因素,并通过采用多种小波进行仿真实验比较,决定选用db15小波。^[3]

4 仿真及结果分析

本文通过 Matlab 对 10kV 小电流接地系统单相接地故障情况进行了仿真分析及验证。

所用的仿真模型为 5 条出线的 10kV 网络,线路参数为:线路长度 $l_1=25\text{km}$, $l_2=15\text{km}$, $l_3=10\text{km}$, $l_4=12\text{km}$, $l_5=25\text{km}$ 。正序阻抗 $Z_1=(0.17+j0.38)\Omega/\text{km}$, 零序阻抗为 $Z_0=(0.23+j1.72)\Omega/\text{km}$, 零序容纳为 $b_0=1.884\mu\text{s}/\text{km}$; 补偿方式为过补偿。

算例 1: 中性点不接地系统,线路 1 在 20km 处, $t=0.025\text{s}$ 时刻 A 相发生接地故障处串接 100Ω 电阻故障,故障初始角为 0° , 利用 Matlab 中 Simulink 搭建的仿真模型如图 1 所示。

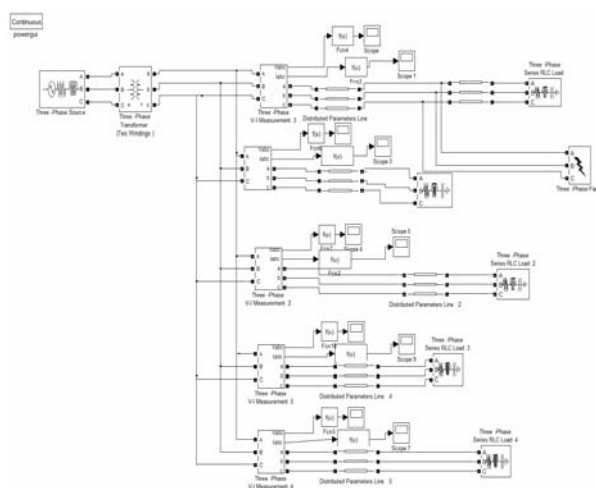


图 1 小电流接地系统算例 1 的 Matlab 仿真模型

接下来再对各线路的零序电流进行小波包变换,利用 Matlab 中小波工具箱的命令编程,得到小波包树图 2,并得到各线路在节点 (3, 2) 的小波包分解系数,如图 3 所示。

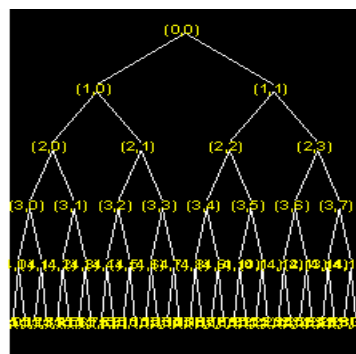
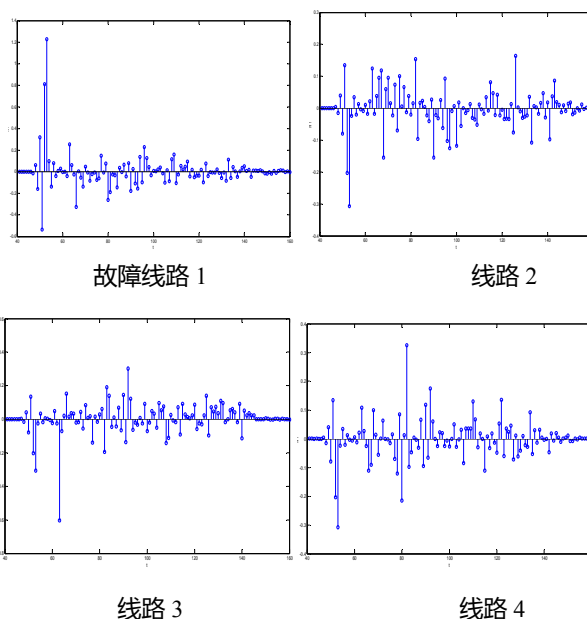
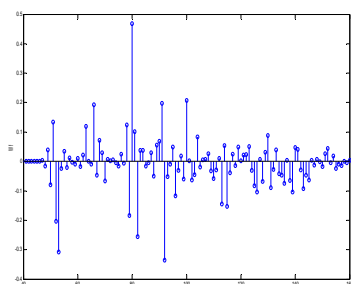


图 2 小波包分解树





线路 5

图 3 各线路在节点 (3, 2) 的小波包分解系数

从上述图中可以看出线路 1 的小波包分解系数的极性与各其他线路的正好相反, 而且幅值也比其他线路的大许多。综合分析, 这时可以确定线路 1 就是故障线路。

算例 2: 中性点不接地系统, 母线在 $t=0.025s$ 时刻 B 相发生接地故障处串接 500Ω 电阻故障, 故障初始角为 30° 。

仿真结果表明, 在中性点不接地系统中, 仍能明显看出母线的小波包分解系数的极性与各线路的正好相反, 而且幅值也比其他线路的大许多。综合分析结果, 这时可以确定母线就是故障线路。

算例 3: 中性点经消弧线圈接地系统, 线路 1 在 15km 处, $t=0.025s$ 时刻 A 相发生接地故障处串接 5000Ω 电阻故障, 故障初始角为 70° 。

仿真结果表明, 线路 1 的小波包分解系数的极性与各其他线路的正好相反, 而且幅值也比其他线路的大许多。综合分析结果, 可以确定线路 1 就是故障线路。

本文应用本文提出的小波包选线方法进行小电流接地系统的故障选线, 该方法用小波包对个各线路零序电流进行变换, 得到各线路在节点(3, 2)的小波包分解系数, 根据各高频分量的幅值和极性进行故障选线, 大量仿真结果表明该方法不受消弧线圈, 故障初始角, 线路长度, 故障相别的影响, 具有较高的接地电阻耐受能力, 分析结果可靠性较高。

5 结论

本文利用小波包的时频特性, 对 10kV 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(母线)和非故障线路小波细节系数极性和幅值的比较结果来确定故障线路, 进行了大量仿真, 得出如下结论:

(1)适用于中性点不接地系统和经消弧线圈

接地系统。

(2)有很强的抗过渡电阻的能力。本文判据依据是故障瞬间的突变量, 即使接地电阻减弱了信号, 选线方案仍然具有很高的灵敏度。

(3)不受故障初始角, 故障点位置, 故障相别等因素影响, 克服了传统方法中存在动作死区等缺点。

(4)由于系统谐波、装置安装处电磁环境的影响, 不是所有的小波包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包分解系数满足条件即可, 从而可有效去除干扰成分的影响, 保证极性判定的结果。

(5)能够检测瞬间故障。实际运行中关心的主要是持久故障, 但是如果对频繁发生瞬时故障的线路也有清楚的了解, 更便于运行人员掌握系统故障隐患, 及时采取适当的措施防患于未然。

(6)在现场无需进行定值整定, 对于配电网结构的变化具有很强的适应性, 解决了传统故障选线装置整定难的问题。

参考文献:

- [1] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护[M].北京:中国电力出版社,1994.
- [2] 杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:科学出版社,1999.
- [3] 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.
- [4] 王忠礼,段慧达,高玉峰. MATLAB 应用技术—在电气工程与自动化专业中的应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

作者简介:

田小东 (1986—), 女, 吉林人, 助理工程师, 主要从事配电自动化及农电自动化相关技术研究, E-mail: tianxiaodong@sgepri.sgcc.com.cn。