

[变电站]

基于改进HHT算法配电网单相接地短路选线的研究

文/淮南矿业集团张集煤矿 陈孝刚

分析了中性点不接地系统发生单相接地故障的稳态和暂态特征，并归纳了其特点。

我国35 kV及以下配电网大多采用小电流接地方式，包括中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统。小电流接地系统发生单相接地故障的概率较大，达配电网故障的80%以上。为了提高供电连续性，保证电力系统安全稳定运行，快速准确地检测出故障线路，在配电网自动化研究中尤为重要。故障暂态信息是具有奇异性、非平稳的高频信号。小电流接地系统单相接地故障选线问题之所以困难，其主要原因在于故障边界太复杂、随机，难以用单一统计模型来描述。加之故障时稳态故障分量小，给信号的检测和选线判断增加了困难。尽管已有数种故障选线方法提出并且应用到现场，但由于实际使用效果不理想，许多故障依然依靠人工拉线的方法实现故障选线的。可见，小电流接地故障准确选线仍然是一个亟待解决的问题。

小电流接地故障选线尚需解决的问题：①目前，选线装置的选线方法大多都是基于故障后的稳态信号进行分析，由于受外界干扰因素的干扰致使接地时的稳态零序电流很小，使基于幅值比较的保护选线精度降低，基于相位比较的保护因“时针效应”而误选，此类选线方法对中性点的接地方式也有要求，因此，必须研究新的选线原理。②对于使用谐波分量的选线法，谐波在信号中所占比例较小，难以分离和提取，加之负荷

的谐波干扰，使基于谐波原理的装置在实际应用中出现误判。首半波选线法的前提假设是故障发生在相电压接近最大值附近，但实际运行中故障时的相电压可能出现在零值附近，这使该方法的应用受到很大限制。③小波分析具有可变的时频窗，可以很好地分析暂态信号的变化特征，但由于该方法需先设定小波基函数及分解尺度，存在一定的可变性，而且暂态过程持续时间短，信号难以捕捉和提取，在实际应用中难以实现准确选线；Prony算法通过分析高频谐波分量的幅值和相位，从而实现故障定位的方法是有效的，但此算法需设定拟合阶数且计算量较大。④由于故障接地电阻、合闸角及外界因素干扰，致使零序电流异常微弱的情况下，也能敏锐地反映零序电流信号的突变情况。⑤对于配电网运行中各状态下的故障情况还有待于做大量的专门的研究与仿真，以及动模试验和现场测试，使得选线方法可以适用各种情况。综合国内外的研究情况来看，在小电流接地系统中发生单相接地短路时的选线的正确性还是存在着很多的问题。本文从对HHT算法改进方面出发，希望能够对选线正确性起到一定的作用。新兴的希尔伯特黄变换理论由于其具有良好的时频局部化特性，在分析非线性、非平稳信号时优于传统的小波信号分析法，常用于此类信号的奇异值点检测。经验模态分解EMD是HHT

分析的核心,但原始HHT方法中的EMD在分解过程中存在端点效应,使得分解的固有模态分量IMF严重失真,极大地影响了故障选线的准确性。

本文采用基于自适应波形匹配的端点延拓法对其进行改进,可以抑制端点效应。本文应用MATLAB软件建立了小电流接地系统的仿真模型,对小电流接地系统发生单相接地故障的情况进行了仿真计算。在仿真试验中,通过改变接地点位置、合闸角、接地电阻、线路长度等参数,对基于改进HHT的故障选线效果进行仿真验证,结果表明改进的HHT可以有效地解决端点效应问题,从而提高了单相接地故障选线的准确率。

配网单相接地故障的特征分析

全文都是只分析中性点不接地系统发生金属性接地的单相接地短路这种情形,因为篇幅有限,其他的不作讨论。图1是中性点不接地系统正常运行时的简单示意图。图2为中性点不接地系统发生单相接地故障时的简单示意图。

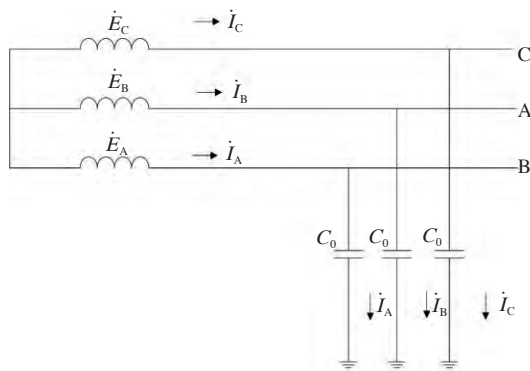


图1 中性点不接地系统正常运行时的简单示意图

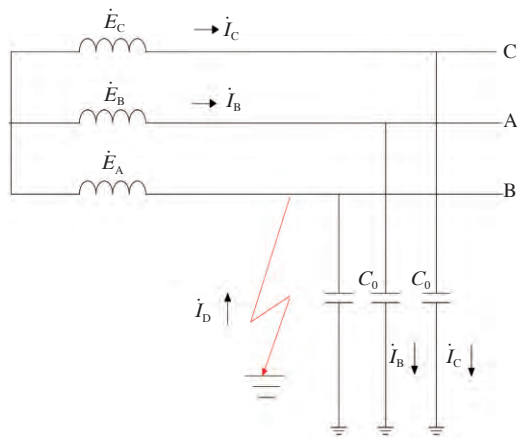


图2 中性点不接地系统发生单相接地故障时的简单示意图

根据图2所示,在正常情况下,三相电源 $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$ 是对称的,每一相对地电容 C_0 也是相等的,所以,每一相都有一个超前电压 90° 的容性电流流向大地,三相容性电流的和为零。我们假设A相发生了单相接地故障,于是得到各相的对地电压为

$$\dot{U}_{A-D}=0 \quad (1)$$

$$\dot{U}_{B-D}=\dot{E}_B-\dot{E}_A=\sqrt{3}\dot{E}_A e^{-j150^\circ} \quad (2)$$

$$\dot{U}_{C-D}=\dot{E}_C-\dot{E}_A=\sqrt{3}\dot{E}_A e^{-j150^\circ} \quad (3)$$

故障点d零序电压可以表示为

$$\dot{U}_{d0}=\frac{1}{3}(\dot{U}_{A-D}+\dot{U}_{B-D}+\dot{U}_{C-D})=-\dot{E}_A \quad (4)$$

在非故障相中流向故障点的电容电流可以表示为

$$\dot{I}_B=\dot{U}_{B-D}j\omega C_0 \quad (5)$$

$$\dot{I}_C=\dot{U}_{C-D}j\omega C_0 \quad (6)$$

其有效值为 $\dot{I}_B=\dot{I}_C=U_\phi j\omega C_0$,式中的 U_ϕ 为相电压的有效值。

此时,从接地点流回的电流 $\dot{I}_D=\dot{I}_B+\dot{I}_C$,其有效值就是 $\dot{I}_D=3U_\phi j\omega C_0$,即正常运行时,三相对地电容电流的算术和。

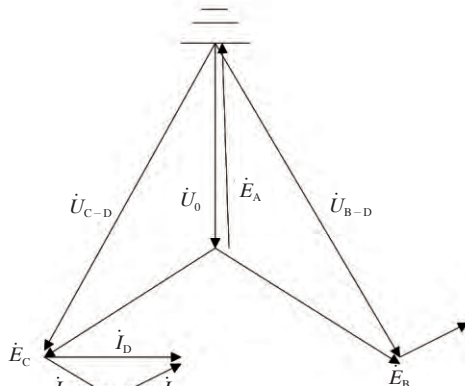


图3 小电流接地系统发生A相接地时的相量图

图3是小电流接地系统发生A相接地时的相量图。当网络中包含有发电机和多条线路时,每台发电机和每条线路对地均有电容存在,设系统有5条出线,分别以 C_{0f} 、 $C_{01}\cdots C_{05}$ 集中电容来表示,当线路5的A相发生接地故障后,若是忽略负荷和电容电流在线路的阻抗上的电压降,那么全系统A相的对地电压就是零,因而各元件A相对地的电容电流也是零,于此同时B相和C相的对地电压和电容电流都升高到原来的3倍,仍然可以用式(1)至式(6)来表示。

对于中性点不接地的电网中的发生的单相接地故障,通过上述的分析,我们可以得到下面的结论:

(1) 单相接地故障发生的时候,零序电压会

在整个系统之中出现。

(2) 零序电流会在非故障的元件中出现,其数值就是其对地的电容性电流。

(3) 非故障线路上,全系统中的非故障的元件对地的电容性电流的总和(其数值一般较大)就是零序电流。

对HHT算法的改进

EMD分解中端点效应是影响HHT方法精度的主要因素,必须对信号序列进行端点延拓,这样才能得到准确的故障信息。现有的一些端点延拓方法有:①直接将端点作为极值点进行端点延拓,即将当前待分析的数据端点作为极值点,这种方法最简单,但效果并不理想。②邓拥军提出了神经网络端点延拓法,速度比较慢,而且对于不同的信号,适合的神经网络模型也有所不同。③镜像延拓法对于短数据序列处理效果也欠佳;杨世锡曾提出了使用高次样条插值来解决HHT方

法中的端点效应问题,但该方法计算复杂度高,需要较长的计算时间,执行效率较低;本文采用由张亢等人提出的应用于EMD分解的自适应波形匹配延拓法,即从原始信号内部找出最符合信号趋势的波形对信号进行延拓,最大限度地维持信号的内部变化趋势。对于内部规律较弱,边界数据变化异常的信号可以只考虑信号边缘的极值点信息,该方法不仅能准确给出故障时的信号变换,还具有自适应性。

数据信号的延拓包括左右两个端点,下面以左端点的延拓为例来说明该方法。设原始信号为 $x(t)$, a_j, b_j , 其中, $j=1, 2, 3, \dots$ 分别为信号 $x(t)$ 的极大值和极小值,各自对应的时间为 t_{a1} 和 t_{b1} ,设 $x(t)$ 的左端点值为 $x(1)$,以 $x(1), a_1, b_1$ 三点构成一个三角形S1如图4所示,并将从时间间隔 $t_{a1}-t_{b1}$,所对的 $x(t)$ 波形称为特征波形,然后沿着信号 $x(t)$ 搜寻与特征波形最为匹配的三角波形 $x(j)-a_j-b_j$,即S2,定义为匹配波形。

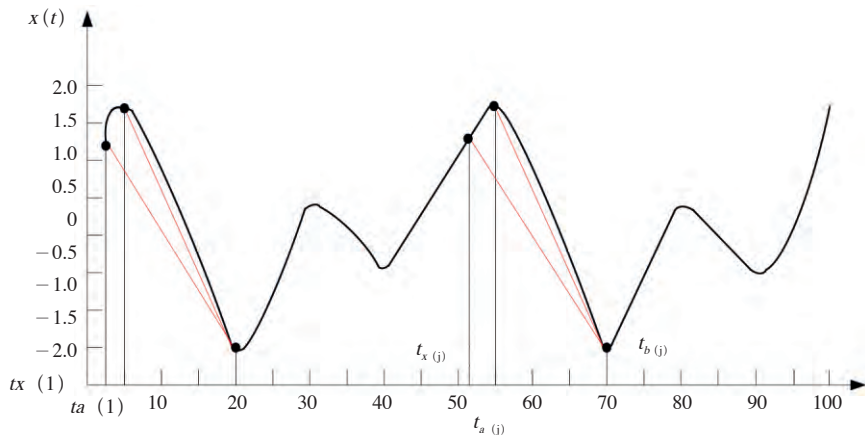


图4 特征波形图

从图4中可见,特征波形S1和匹配波形相似,将其之前的(右延拓为匹配波形后的)数据从时间间隔 t_{a1} 到 t_{b1} ,所对的 $x(t)$ 波形作为延拓波形,这样便会符合信号的自然趋势。

具体步骤如下:

(1) 找出除特征波形以外的所有三角波形起始点的值 $x(j)$,根据三角形相似原理得出其对应的时间点为

$$t_{x(j)} = \frac{(t_{a1}t_{bj} - t_{b1}t_{aj})}{(t_{a1} - t_{b1})} \quad (7)$$

(2) 计算所有三角波形与特征波形的匹配误差,误差可定义为

$$e(j) = |a_j - a_1| + |b_j - b_1| + |x(j) - x(1)| \quad (8)$$

(3) 找出最小的匹配误差值 $\text{mine}(j)$,并设定一阈值 α ,若 $\text{mine}(j) < \alpha$,则将 $\text{mine}(j)$ 对应

的三角波形作为匹配波形,将匹配波形前的数据延拓到原始信号的前面,若 $\text{mine}(j)$ 跳转至下一步。阈值的大小可以根据实际情况来调整, α 越小说明与原信号越匹配,反之说明原信号内部规律越弱,或边界数据异常。

(4) 直接设置信号端点处的极值,即分别求出最靠近信号端的相邻的M个极大值点的平均值A和N个极小值点的平均值B,将其分别作为信号 $x(t)$ 的极大值和极小值,具体A, B值的正负可根据信号在边界处的跳变情况而定。

(5) 按同样的方法延拓右端的信号,将左右两端延拓后的信号 $x'(t)$ 做EMD分解,对分解得到的IMF分量按原信号 $x(t)$ 对应的时刻进行截取,这样便能获得改善后的分解结果。

应用改进HHT对Simulink仿真及改进后计算结果

Matlab环境下的Simulink平台是对复杂的动态系统进行建模和仿真的图形化交互式平台，在

Simulink中SimpowerSystem工具箱是用微分方程刻画电力系统动态过程的电力系统仿真工具箱。中性点不接地系统发生单相金属性接地的Matlab仿真及选线结果分析。

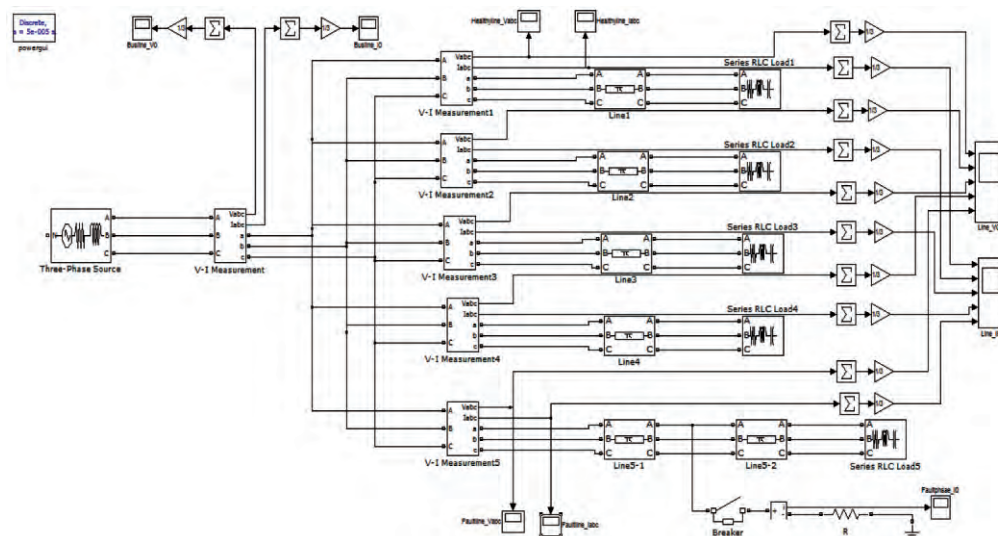


图5 中性点不接地系统发生单相金属性接地的Matlab仿真

图5模拟的是10 kV的配电网系统，其中有5条出线。系统中的仿真持续时间是0.5 s，在 $t=0.1$ s时出线5的A相断路器闭合，模拟单相接地故障。系统中的各元件的参数如下：

(1) 电源参数：线电压的有效值是10 kV，频率50 Hz，Y形接线（留出中性点不接地）。

(2) 线路参数：频率50 Hz，单位长度的正序和零序电阻值分别是0.01273 Ohms/km和0.3864 Ohms/km，单位长度的正序和零序电抗值分别是 $0.9337e-3$ H/km和 $4.1264e-3$ H/km，单位长度的正序和零序的电容值分别是 $12.74e-9$ F/km 和

$7.751e-9$ F/km。线路长度是100 km。

(3) 线路负荷的参数：线电压的有效值是10 kV，频率是50 Hz，有功功率是1000e3 W，感性无功功率是100 var，容性无功是100 var。

(4) 断路器的参数：电阻值为0.01 Ω ，初始状态是“0”。（0表示断开，1表示闭合），开关闭时间和时间为0.1 s；

(5) 故障点接地电阻参数：电阻值为1 Ω 。

通过对上述的仿真图进行仿真，可以得到5条出线上的零序电流、故障点的零序电流如图6（从上到下分别是线路1到线路5的波形）：

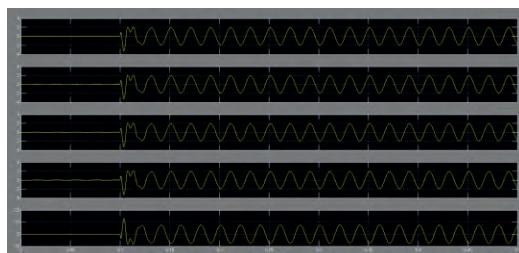


图6 5条出线上的零序电流波形

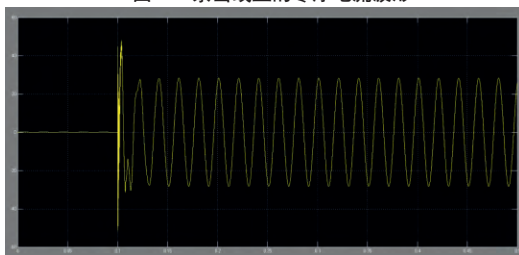


图7 故障点的零序电流

得到了每条出线上的零序电流后，对电流波形进行采样后，将数据传送到Matlab的工作窗口中，保存在相应的数组中。

截取故障发生后的一个周波，通过EMD分解程序对Line_I0中的数据进行分解，从而得到有限的IMF分量。截取的非故障线路故障后一个周波的零序电流波形如下：

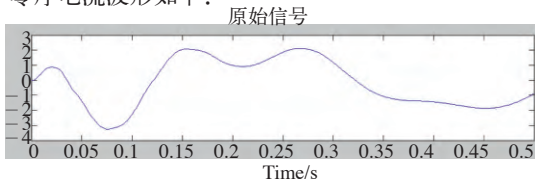


图8 非故障线路故障后一个周波的零序电流波形

对截取的波形进行EMD分解，得到3个IMF分量如图9所示。

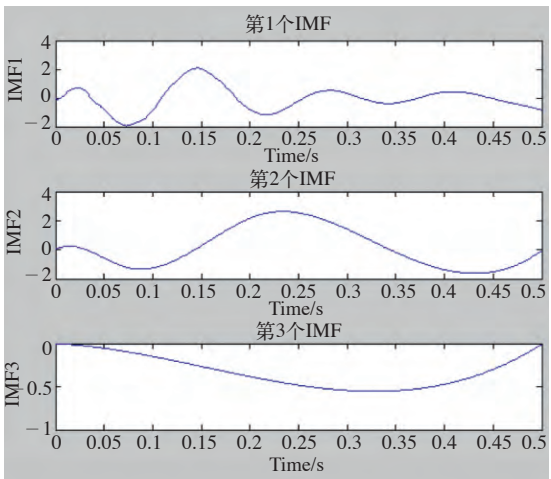


图9 IMF分量

截取的故障线路故障后一个周波的零序电流波形如图10所示。

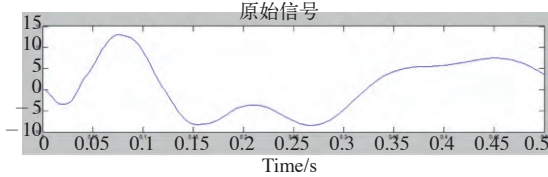


图10 故障线路故障后一个周波的零序电流波形

对截取的波形进行EMD分解，得到3个IMF分量如图11所示。

从图中我们能够清晰地看到，应用改进的HHT算法对波形进行延拓后，非故障线路和故障线路的EMD分解后的最后一个IMF分量是衰减的直流分量，并且它们的极性是相反的，通过该直流分量的每一个采样点的值进行累加，就能够得到一个可以量化的值，这个值也就能实现选出故障线路。利用Matlab软件仿真平台，还可以对小电流接地系统的单相接地故障的三种形式，即金属性单相接地、弧光单相接地和经高阻单相接地进行仿真和计算。在中性点不接地系统发生单相金属性接地时，基于本文的改进HHT原理选线原理能够准确选出故障线路。

结束语

本文针对目前我国配电网单相接地故障选线所存在的问题，对小电流接地系统单相接地故障特征中的暂态特征进行了详细的理论分析和仿真研究，在此基础上提出了采用改进HHT的小电流接地故障选线新方法。对中性点不接地系统的单相接地故障

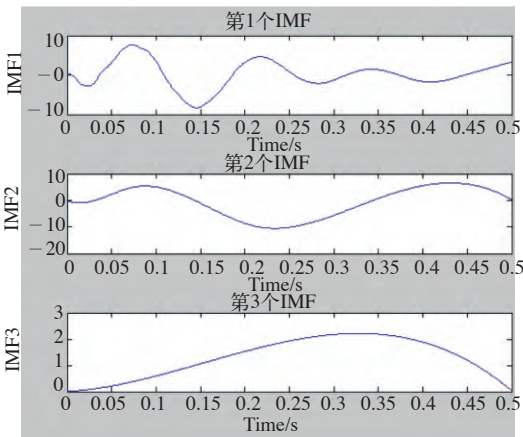


图11 IMF分量

特征进行了理论分析，着重对零序电流的暂态故障特征进行研究。介绍了HHT方法中瞬时频率的概念及其核心EMD分解的详细过程；通过仿真验证基于改进HHT故障选线方法对中性点直接接地方式仿真分析接地方式、不同接地电阻、故障位置、合闸

角、母线故障等因素对改进HHT故障选线法的影响，通过仿真波形和结果数据共同验证该方法正确选出故障线路的有效性。EA

(收稿日期：2015.06.18)

(编辑：白文亭)