# 基于小波能量矩的高阻接地故障检测方法

朱晓娟,林 圣,张 姝,何正友 (西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:中性点不接地中压配电网时常发生高阻接地故障,普通的零序电流保护难以对其检测。通过对仿 真和实验得到的高阻接地故障电流信号进行频谱分析,发现其高频分量分布显著区别于系统其他扰动暂态信 号。由此,引入小波能量矩算法,通过对高频段能量矩进行归一化、求和及取对数处理,提出了一种高阻接地故 障的检测方法,该方法只需要利用故障后第1个工频周期内的电流信号,通过小波能量矩分析得到诊断判据, 即可实现高阻接地故障的有效识别。大量的仿真和实测数据表明,该方法适应性强,且不受线路非高阻接 地故障暂态信号的影响。

# 0 引言

配电网中性点不接地方式因结构简单、建造成本低,在我国 35 kV 及以下电压等级的配电系统中广 泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而,配电系统受距离地面较近、馈入 居民区等实际因素的影响,运行时容易接触周围的 树枝、建筑物等,从而发生高阻接地故障 HIGF(High-Impedance Grounding Fault);同时恶劣的自然因素(如 大风、雷击等)也会造成架空线高阻接地故障的发生。 高阻接地故障发生时,由于过渡电阻很大,引起的电 压、电流突变量并不明显,所以常规保护不能可靠发 出动作或报警信号。但高阻接地故障若长期存在, 不仅系统会因故障产生的过电压而出现新的接地 点,导致事故进一步扩大,甚至还会因故障发生时伴 有的电弧引起火灾,威胁人身、财产安全<sup>[3]</sup>。因此, 快速准确地检测出高阻接地故障具有重要意义。

目前已有大量研究关注高阻接地故障检测问题,其检测方法主要分为时域法<sup>[4-5]</sup>和频域法<sup>[6-7]</sup>。 时域法虽然可以直观地反映高阻接地故障信号的 时域电气特性,但其对高阻模型的精度要求高,且建 模过程繁琐,因而在实际应用中其可靠性得不到保 障。相比而言,频域法通过在频域上有效提取故障 电流的非线性畸变特征来判别高阻接地故障,分析 过程及判别结果可靠。因而近年来对高阻接地故障 检测算法的研究主要集中在频域法。

根据利用故障信号频段范围的不同,频域法又 可分为低频分量检测算法<sup>[8-9]</sup>和高频分量检测算 法[10-12]。国外较早利用低频分量检测算法分析了配 电系统的高阻接地故障问题,如 Texas A&M University运用模式识别及人工智能算法、微机保护装置分 析故障电流 20~800 Hz 的谐波和非谐波成分,得到 8 种诊断高阻接地故障的算法,但目前微机保护对高 阻接地故障的反应能力仍然不足[13]。诺顿科技高阻 接地故障识别系统基于故障电流的3次谐波分量和 故障相电压具有同相位的原理判别故障,文献[14] 在此方法的基础上做了改进,利用3次谐波电流的 幅值和相位关系实现高阻接地故障检测,但在低信 噪比时仍易受噪声干扰。而高频分量检测算法可以 利用小波变换后高频段的细节信号作标准差取自然 对数的绝对值,得到检测高阻接地故障的良好指标, 但该方法没有充分考虑信号的时域特征[15]。除此以 外, Sonja Ebron 和纽约州立电气公司也尝试将神经 网络用于高阻接地故障检测,但未正式投入商用[16]。 总体而言,目前尚无较好的技术措施能够可靠地检 测出高阻接地故障。

本文对高阻接地故障电流信号进行频谱分析, 发现其高频含量分布明显区别于其他扰动暂态电流 信号,可考虑利用高频分量来检测高阻接地故障。 基于此,本文借鉴文献[17]提出的小波能量矩算法, 给出一种基于高频分量小波能量矩的高阻接地故障 检测方法。大量仿真和实验数据验证了所提算法的 可靠性。

## 1 小电流接地系统暂态电流频谱分析

## 1.1 高阻接地故障的暂态分析

当中性点不接地系统发生单相接地故障后,暂 态电流的幅值和频率均由暂态电容电流决定。图 1 为高阻接地故障暂态电流等值电路,其中C 为配电网

收稿日期:2016-01-11;修回日期:2016-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307145);四川省应用基 础计划项目(2014JY0177)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51307145) and the Application Basic Research Project of Sichuan Province (2014JY0177)

三相对地电容,L<sub>0</sub>为三相 线路和电源变压器的等 效零序电感,R<sub>0</sub>为故障 线路的零序电阻,u<sub>0</sub>为零 序电压。

暂态电容电流 ic 主



图 1 HIGF 暂态电流等值电路 Fig.1 Equivalent circuit of HIGF transient current

要由暂态自由振荡分量 *i*<sub>Cos</sub> 和稳态工频分量 *i*<sub>Ca</sub> 两部 分组成,经过拉氏变换等分析运算可得<sup>[18]</sup>:

$$i_{C} = i_{Cos} + i_{Cst} = I_{Cm} \left[ \frac{\omega_{f}}{\omega} \sin\varphi \sin(\omega_{f}t) - \cos\varphi \cos(\omega_{f}t) \right] e^{-\delta t} + I_{Cm} \cos(\omega_{f}t) e^{-\delta t}$$
(1)

其中, $I_{Cm}$ 为电容电流稳态幅值; $\omega_f = 1/\sqrt{L_0C} = 2\pi/T_f$ 为暂态自由振荡分量的角频率, $T_f$ 为暂态自由振荡 分量的周期; $\omega$ 为工频角频率; $\varphi$ 为故障时相电压的 相角; $\delta = 1/\tau_c = R_0/(2L_0)$ 为自由振荡分量的衰减系 数, $\tau_c$ 为回路的时间常数。当 $\varphi = 0^\circ$ 时, $i_{Cos}$ 最小;当  $\varphi = \pi/2$ 时, $i_{Cos}$ 最大,并且会在 $t = T_f/4$ 时出现该自由 振荡电流分量的最大值 $i_{Cosmax}$ ,如式(2)所示。

$$i_{Cos\,\max} = I_{Cm} \frac{\omega_{\rm f}}{\omega} {\rm e}^{-T_{\rm f}/(4\tau_{\rm c})}$$
(2)

由式(2)可知,暂态自由振荡电流分量的最大值 *i<sub>Cos max</sub>* 和稳态电流幅值 *I<sub>Cm</sub>*之比,近似等于自由振荡 角频率 ω<sub>f</sub>与工频角频率 ω之比,因此暂态电流值可 能较稳态电流值大几倍到几十倍。

高阻接地故障的暂态过程会产生多个不同频率 的高频分量,这些高频分量实质上是由于分布电容 中存储的能量在短路后经线路和系统阻抗与电容构 成的 RLC 串联电路中发生振荡形成<sup>100</sup>。另外由于 电流回路接触不可靠,发生高阻接地故障时经常伴 有的电弧也会产生同样明显的高频分量,因此,可 考虑利用这些丰富的高频暂态信号来检测高阻接 地故障。

## 1.2 暂态信号的频谱分析

如图 2 所示,在 10 kV 的 IEEE 34 节点配电网 模型中对高阻接地故障和常见扰动暂态信号(如电 容投切、负荷投切、简谐荷载)以及金属性接地故障 进行仿真,获取不同的暂态信号。图 2 中 H<sub>x</sub>、C<sub>x</sub>、L<sub>x</sub>、



图 2 IEEE 34 节点配电网模型 Fig.2 IEEE 34-bus distribution network

 $B_x 和 S_x 分别表示相应节点 X 处$ 发生高阻接地故障、电容投切、负荷投切、金属性接地故障和投入简谐荷载,其中高阻接地故障的模型如图 3 所示<sup>[19]</sup>。

该模型由 2 个直流源 U<sub>p</sub>、U<sub>n</sub> 和相应二极管 D<sub>p</sub>、D<sub>n</sub> 组成正负 半周电流的通路。2 个直流源  $D_p$  工  $D_n$  $U_p$   $U_p$   $U_n$ =图 3 HIGF 模型

<sup>ま じ</sup><sub>p</sub>、じ<sub>n</sub> 成正负 图 3 HIGF 模型 Fig.3 HIGF model

U<sub>p</sub>、U<sub>n</sub>模拟来自电弧的电压,其值取决于系统的电压 等级和不对称建模,且每隔 0.1 ms 会随机独立变化。 改变 U<sub>p</sub>、U<sub>n</sub>的大小会增加不对称故障的随机性和消 弧时间。为了模拟引起不对称电流的电弧电阻,R<sub>p</sub>、 R<sub>n</sub>取不同的值且每隔 0.1 ms 随机独立变化,可以通过调 节 R<sub>p</sub>、R<sub>n</sub>来控制高阻接地故障电流的大小和相位。

本文中高阻接地故障模型的各参数选取如下:  $U_p=3.0 \text{ kV}$ ,且随机变化 ±10%; $U_n=2.0 \text{ kV}$ ,且随机变化 ±10%; $R_n$  在[700,750] Ω之间随机变化; $R_p$  在[700,750] Ω之间随机变化。

取系统稳定运行后分别发生 H<sub>850</sub>、C<sub>800</sub>、L<sub>806</sub>、B<sub>850</sub>、 S<sub>812</sub> 故障或扰动的电流信号作为分析对象,对其进行 频谱分析,发现高阻接地故障信号和其他暂态信号 在 0.5 kHz 以下较难区分。为得到更明显的高阻接 地故障特征,对上述分析信号取一个工频周期,对 0.5 kHz 以上的频率段进行分析。图 4 为暂态信号 归一化后的功率谱对比图(仅给出了频率在 0.5 kHz 以上的分布)。



图 4 暂态信号归一化的功率谱

Fig.4 Power spectrum of normalized transient signals

从图 4 的功率谱可看出,在 0.5~10 kHz 的频段 内高阻接地故障电流信号的高频分量相对丰富,而 其他暂态信号仅在 0.5~1.5 kHz 频段拥有少许信号 分量。另一方面,常见暂态信号的高频分量主要持 续在暂态发生的前半个工频周期内,而高阻接地故 障暂态信号的高频分量持续分布于整个故障时间。 基于此,可根据暂态信号的持续时间与频率分布特 性,联合时域和频域 2 个维度,判断高阻接地故障发 生与否。

同时,为了更为准确地刻画高阻接地故障电流 信号的特征,使其区别于其他暂态信号,考虑利用基 于多分辨率分析的小波变换对暂态信号的高频部分



进一步细化,并采取分频段求和的方式检测高阻接 地故障。

## 2 基于小波能量矩的高阻接地故障检测方法

### 2.1 小波能量矩的定义

多分辨率小波变换是研究电力系统暂态现象的 重要工具之一,它能通过伸缩平移运算对具有突变 性质的非平稳信号逐步多尺度细化,使本不明显的 信号频率特征在多层分解后的不同子空间中以显著 的能量变化形式表现出来,从而提取暂态电流信号 的特征信息。

采用正交小波变换,暂态电流信号 *i*(*t*)可用多 分辨率分解公式表示为<sup>[20]</sup>.

$$i(t) = \sum_{n=1}^{N} c_J(n) \varphi_{J,n}(t) + \sum_{j=1}^{J} \sum_{n=1}^{N} d_j(n) \psi_{j,n}(t)$$
(3)

其中, $\varphi_{J,n}(t)$ 为尺度函数; $\psi_{j,n}(t)$ 为小波函数;J为信 号最大小波分解层数;N为总的采样点数;分解系数  $c_J(n)$ 和 $d_j(n)$ 分别为第J个分解尺度下的离散平滑 逼近和第j个分解尺度下的离散细节信号,递推式 可分别表示为式(4)和式(5)。

$$c_{j+1}(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m-2n)c_j(m)$$
(4)

$$d_{j+1}(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(m-2n)c_j(m)$$
 (5)

其中,h(n)和g(n)分别为低通数字滤波器和高通数 字滤波器。滤波器组的最初输入 $c_0(n)$ 采用i(t)的原始采样序列i(n)。设采样频率为 $f_s$ ,则i(t)占据的频带为 $0 \sim f_s$ ,经过一级分解(j=1),得到 $c_1(n)$ 和 $d_1(n)$ ,它们占据的频带分别为 $0 \sim f_s/4$ 和 $f_s/4 \sim f_s/2$ ;依此类推,经过J级分解,可得到信号i(t)的 J+1个信号序列 $d_1(n)$ 、 $d_2(n)$ 、…、 $d_1(n)$ 、 $c_1(n)$ 。

由于多分辨率小波分析不能全面反映暂态信号 特征,故文献[17]提出了小波能量矩的概念,它在传 统小波分析的基础上考虑了各个频段上能量沿时间 轴的分布特点,是一种时频特征参数,能有效弥补传 统小波分析的不足。因此,本文利用小波能量矩来 表征暂态电流信号的特征,从而构造高阻接地故障 检测判据,其中小波能量矩定义如下。

对暂态电流信号i(t)进行小波变换后所得到的 J+1个信号序列 $(d_1(n) - d_j(n), c_j(n))$ 进行单支重 构,得到第j个频带内信号 $S_{j,n}$ 的能量矩:

$$M_j = \sum_{n=1}^{N} n\Delta t \left| S_{j,n}(n\Delta t) \right|^2$$
(6)

其中,Δt 为采样时间间隔。由式(6)可知,小波能量 矩不仅体现了各频段能量的大小,也体现了能量随 时间的分布情况,能更加全面地反映故障信号的时 频特征。

# 2.2 故障判据和检测算法流程

信号 i(t)的小波能量矩特征提取步骤如下。

(1)对暂态电流信号 *i*(*t*)进行小波分解,根据高 阻接地故障电流的特征选择 db4 小波作为母小 波<sup>[15]</sup>。本文实验和仿真的采样频率均为 20 kHz,为 使基频 50 Hz 位于最低子频带的中心,对故障或扰 动发生后第 1 个工频周期信号(400 个采样点)进行 7 层分解,得到离散细节信号 *d*<sub>1</sub>(*n*) — *d*<sub>7</sub>(*n*)和离散 平滑逼近信号 *c*<sub>7</sub>(*n*)对应的频带范围如图 5 所示,图 中数据单位为 Hz。

#### 图 5 各级离散信号的频带范围

Fig.5 Frequency bands of different discrete signal levels

(2)通过单支重构提取各级频带范围内的信号 S<sub>i</sub>,n,计算各级小波能量矩 M<sub>i</sub>。

(3)对小波能量矩  $M_1 - M_7$  进行归一化处理。由于基频存在于各暂态信号之中,对诊断高阻接地故障帮助不大,因此除去逼近信号  $c_7(n)$ 的小波能量矩  $M_{8,1}$ 归一化的公式如式(7)所示。

$$T_{j} = M_{j} / \left(\sum_{j=1}^{7} M_{j}^{2}\right)^{1/2}$$
(7)

根据上述步骤,对图 4 中 5 种暂态信号的相电 流进行分析,提取各暂态信号频带 1— 5 的小波能 量矩,统计结果如图 6 所示。



图 6 5 种暂态信号的小波能量矩统计图 Fig.6 Statistics of wavelet energy moment for five kinds of transient signal

从图 6 可以看出:高阻接地故障电流在频带 1—5(321.5 Hz~10 kHz)的小波能量矩大小明显区 别于其他暂态信号,但是目前尚未有文献给出一个 明确的阈值以区分高阻接地故障信号和其他暂态信 号。为了放大小波能量矩之间的差异性,考虑将 321.5 Hz~10 kHz 频段范围内的小波能量矩  $T_1$ — $T_5$ 求和,并取对数,用δ表示,数学表达式如式(8)所 示,其中补偿值5 使得δ的临界值为0。

$$\delta = \ln \left( T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \right) + 5 \tag{8}$$

本文以上述定义的特征值 $\delta$ 作为高阻接地故障 的判断标准,当判断特征值 $\delta > 0$ 时为高阻接地故障, $\delta \leq 0$ 时为其他暂态扰动。综上所述,基于小波 能量矩的高阻接地故障诊断流程如图 7 所示。



图 7 HIGF 诊断方法流程图 Fig.7 Flowchart of HIGF detection

# 3 高阻接地故障检测方法验证

#### 3.1 仿真验证

在 PSCAD 中建立如图 2 所示的配电网仿真模型,并对不同位置、不同时刻的不同暂态信号进行仿真,图 2 中仅列举了几处具有代表性的仿真位置。

当发生 H<sub>812</sub> 高阻接地故障时,得到如图 8 所示的故障电流波形。



#### 图 8 节点 812 处发生高阻接地故障时的故障电流波形 Fig.8 Fault current when HIGF occurs at Node 812

图 8 中故障电流具有随机性、非线性,且其正负 不对称的峰值为 7.8 A 和 - 6.0 A,同时,过零点的中 断表征了短暂的灭弧,仿真结果表明所提模型可以 反映高阻接地故障电流的所有特征,可用来验证检 测算法的可靠性。

图 9 为节点 800 处投入 1 µF 接地电容组后的



图 9 4 种暂态信号下的电流

Fig.9 Four kinds of transient signal current

电流 *I<sub>c</sub>*、节点 806 处投入 15 kW 负荷后的电流 *I<sub>L</sub>*、 节点 850 处发生金属性接地故障时的电流 *I<sub>B</sub>*、节点 812 处投入 1 A 简谐荷载后的电流 *I<sub>s</sub>*的波形图。

图 10 中给出了上述高阻接地故障和图 9 中 4 组 不同暂态扰动在频带 1—5 的小波能量矩大小。



图 10 5 组暂态信号的频段小波能量矩统计图 Fig.10 Statistics of wavelet energy moment for five kinds of transient signal

从图 10 可看出,各暂态信号的小波能量矩特征 虽有不同,但仅通过各层小波能量矩的大小很难给 出一个明确的阈值以区分高阻接地故障,因此需进 一步计算判断特征值δ。表1给出了5组暂态信号 的小波能量矩及其特征值。

表 1 5 组暂态信号下的小波能量矩及其特征值大小 Table 1 Wavelet energy moments and eigenvalue for

five	kinds	of	transient	signal	
------	-------	----	-----------	--------	--

能量	暂态电流信号类型						
矩和	高阻	电容	负荷	金属性	简谐荷载		
特征值	接地故障	投入	投入	接地故障	投入		
$T_7$	0.9959	0.9993	0.999	0.9999	0.9998		
$T_6$	0.0708	0.0379	0.0452	0.0102	0.0178		
$T_5$	0.0143	0.0022	0.003	$1.52 \times 10^{-4}$	$2.47 \times 10^{-4}$		
$T_4$	0.0076	$4.59 \times 10^{-4}$	$3.33 \times 10^{-4}$	$2.31 \times 10^{-6}$	$3.68 \times 10^{-5}$		
$T_3$	0.0093	$8.35 \times 10^{-5}$	$2.30 \times 10^{-5}$	$7.59 \times 10^{-7}$	$6.20 \times 10^{-7}$		
$T_2$	0.0259	$1.18 \times 10^{-5}$	$1.86 \times 10^{-5}$	$4.40 \times 10^{-7}$	$3.29 \times 10^{-7}$		
$T_1$	0.0469	$6.47 \times 10^{-6}$	$5.78 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^{-5}$	$3.65 \times 10^{-10}$		
δ	2.737	-0.892	-0.690	-3.678	-3.165		
判定	$\delta > 0$	$\delta < 0$	$\delta < 0$	$\delta < 0$	$\delta < 0$		

从表 1 中的判断特征值可看出,对高频段小波 能量矩  $T_1 - T_5$ 之和取自然对数可放大细微的差异, 通过判断高阻接地故障时的 $\delta > 0$ ,而其他暂态信号 的 $\delta$ 均小于 0,可以准确地判别出高阻接地故障。 为验证算法的适应性,对不同位置、不同时刻的 不同暂态信号进行了仿真分析,部分判断特征值δ 的统计情况如图 11 所示。





大量的仿真结果证明,所有高阻接地故障的判 断特征值δ均大于0,即说明在系统发生高阻接地 故障时,检测算法不会拒动,而其他扰动暂态信号也 能通过计算判断特征值δ区别于高阻接地故障, 但δ的大小将受故障位置、变压器数量的影响。当 配电网模型中节点834附近发生电容投入或金属性 接地故障时,出现了图11中扰动暂态信号的特征值 大于0的误判,有待进一步研究。

#### 3.2 实验验证

本文在西南交通大学-施耐德电气联合实验室 的配电网模拟实验系统上利用潮湿草地、钢筋混凝 土等多种不同高阻介质进行实验验证。该配电网模 拟实验系统采用交流 380 V 三相电路模拟 10 kV 中 压配电网,如图 12 所示为高阻接地故障实验箱接入 模拟实验系统的接线示意图,380 V 模拟配电网的 10 km、15 km 架空线末端分别接入一个单相负载箱 (500 W)和 2 个三相负载箱(2 kW),高阻接地故障 发生在 10 km 架空线的末端,其相应的三相输电线 路综合模拟图如图 13 所示。





Fig.12 Wiring diagram of HIGF experiment





图 13 所示为一种利用相似原理提出的线路模 型<sup>[21]</sup>,即用一个π链代表一定长度的一段线路,所有 的 π 链串联起来构成模型线路,其中  $R_1, L_1, C_1$  分别 为模型线路每 km 的正序电阻、正序电感、正序电 容,R<sub>m</sub>,L<sub>m</sub>,C<sub>m</sub>为用于保证网络的零序特征不变的中 线参数。10 km 架空线路的具体参数为:相线电感 L1为2mH,额定电流为30A;地线电感Lon为1.5mH, 额定电流为 50 A;相线电阻  $R_1$  为 0.25  $\Omega$ ,额定电流 为 30 A; 地线电阻 R<sub>on</sub> 为 0.05 Ω, 额定电流为 50 A; 电容 C<sub>1</sub>为 0.3 µF, 耐压 400 V; 电容 C<sub>m</sub>为 1.5 µF, 耐压 400 V。15 km 架空线路的具体参数为:相线电 感 L<sub>1</sub> 为 3 mH, 额定电流为 30 A; 地线电感 L<sub>on</sub> 为 2 mH, 额定电流为 50 A; 相线电阻  $R_1$  为 0.4  $\Omega$ , 额 定电流为 30 A; 地线电阻  $R_{\rm en}$  为 0.08  $\Omega$ , 额定电流 为 50 A;电容 C<sub>1</sub> 为 0.5 μF,耐压 400 V;电容 C<sub>m</sub> 为 2 µF, 耐压 400 V。

表 2 给出了 6 组不同高阻介质进行接地实验的 对比情况,其故障电流有效值均很小。

表 2 不同高阻介质实验对比情况 Table 2 Comparison of experimental results

among different high-resistance mediums

实验	는 미	故障电流 I <sub>f</sub>		
序号	样品	状态	体积/cm³	有效值/A
1	草地	潮湿	450	3.800
2	沙	潮湿	1 200	0.778
3	砖	潮湿	600	0.354
4	钢筋混凝土	干燥	96000	2.850
5	石头	潮湿	100	0.776
6	新鲜树枝	潮湿	255	2.151

实验所得的部分高阻介质接地故障电流 *I*<sub>f</sub> 的波形如图 14 所示。

上述实验结果与文献[22-23]在实际配电网馈 线上的实验结果波形具有共同的高阻接地故障电流 特征,即高阻接地故障电流的非线性、随机性、不对 称性以及中间电弧熄灭。证明在 380 V 模拟配电网 实验柜上测量即可满足高阻接地故障现场实验的测 试要求,避免了现场测试产生巨大损耗和断电实验 影响用户正常用电的问题。

表 3 中列举了对应图 14 中 6 组不同高阻介质 故障电流信号经过检测算法运算后得到的小波能量 矩大小和判断特征值δ。

从表 3 可看出,不同介质的高阻接地故障发生时,其特征值δ都大于0,说明所提算法对实际情况 下不同介质的高阻接地故障均适用,可作为高阻接 地故障检测判据。

#### 3.3 算法对比

上述仿真和实验分析验证了本文高阻接地故障 检测算法的可靠性,但目前检测算法较多,主要以基





于故障电流的非线性畸变特征的谐波方法为主,为 验证所提算法的优劣,选取最早被采用并实现商业 化的3次谐波电流算法<sup>[14]</sup>进行对比分析。

依据 3 次谐波电流的高阻接地故障检测算法需要计算故障电流的基波幅值 *I*<sub>1</sub>、3 次谐波幅值 *I*<sub>3</sub>、基 波电压相位 *φ*<sub>U1</sub> 以及 3 次电流相位 *φ*<sub>I5</sub>,认为基波与 3 次谐波的幅值比与相位差满足式(9)所示的阈值关

表 3	6 组高阻接地胡	女障信号	下的小	波能量夠	詎及其
	\$	<b>寺征值大</b>	小		

Table 3 Wavelet energy moments and eigenvalue for six kinds of HIGF signal

能量矩和	不同介质的高阻接地故障实验序号					
特征值	1	2	3	4	5	6
$T_7$	0.9668	0.9999	0.9699	0.9997	0.9427	0.9637
$T_6$	0.2552	0.0103	0.2412	0.0238	0.3332	0.2667
$T_5$	0.0153	0.0088	0.0091	0.0100	0.0137	0.0106
$T_4$	0.0050	0.0034	0.0041	0.0021	0.0024	0.0032
$T_3$	0.0019	0.0019	0.0102	$6.13 \times 10^{-4}$	0.0022	0.0014
$T_2$	0.0020	0.0027	0.0129	$6.06 \times 10^{-4}$	0.0028	$7.74 \times 10^{-4}$
$T_1$	0.0035	0.0057	0.0274	0.0012	0.0069	0.0016
δ	1.414	1.206	2.246	0.768	1.424	0.959
判定	$\delta > 0$	$\delta > 0$	$\delta > 0$	$\delta > 0$	$\delta > 0$	$\delta > 0$

系时,就判断为发生了高阻接地故障。

$$\left|\frac{I_3}{I_1} > \lambda_1\right| \tag{9}$$

$$\varphi_{\text{set2}} > \varphi_{U_1} - \varphi_{I_3} > \varphi_{\text{set1}}$$

基于此,利用 3.2 节的实验数据,对高阻接地故 障进行 3 次谐波电流分析,得到如表 4 所示的结果。 从表 4 可以看出,不同介质接地时,3 次谐波电流与 基波电流的幅值比  $I_3/I_1$ 、基波电压与 3 次谐波电流 的相位差  $\varphi_{U_1}-\varphi_{I_3}$ 均有较大的差异性。但对于潮湿 的沙和潮湿的树枝等介质而言,其 3 次谐波电流与基 波电流的幅值比  $I_3/I_1$ 与电容投入的比值非常接近, 阈值  $\lambda_1$ 选取困难,因此不能有效判别高阻接地故障。

表 4 实测数据的谐波分析结果 Table 4 Harmonic analysis results of measured data

组别	基波 电流 幅值 <i>I</i> 1/A	3次谐波 电流 幅值 I <sub>3</sub> /A	<i>I</i> <sub>3</sub> / <i>I</i> 1 比值	基波电压 相位 <i>φ<sub>U1</sub>/</i> (°)	3 次谐波 电流相位 <i>φI₃</i> /(°)	<i>φ<sub>Ui</sub> 与 φ<sub>I3</sub></i> 相位 差/(°)
潮湿草	0.455	0.475	1.044	-150	-160	10
潮湿沙	19.4	9.44	0.489	-263	-78	-185
潮湿砖	0.205	0.332	1.620	247	-335	582
干燥钢筋 混凝土	0.546	0.453	0.830	355	55	300
潮湿石头	9.05	7.35	0.812	272	86	186
潮湿树枝	0.305	0.213	0.698	83	-152	235
电容投入	1.972	1.097	0.556	-36	236	-272
谐波荷载 投入	1.344	3.932	2.928	-36	236	-272

而利用小波能量矩的方法,对于以上所有情况 都能给出灵敏可靠的结果,几乎不受固有谐波的影 响,而且能够准确区分高阻接地故障和其他扰动暂 态信号。

# 4 结论

本文针对高阻接地故障问题,提出一种基于小 波能量矩的检测算法,利用仿真与实验进行了验证, 得到如下结论。

166

(1)通过小波能量矩提取了故障及扰动发生后 第1个工频周期内信号的高频分量,以特征值δ从 时频域中区分高阻接地故障和其他扰动暂态信 号,避免了在单一时间或频率维度故障检测不准确 的问题。

(2)大量的仿真和实验结果表明,本文所提基于 小波能量矩的高阻接地故障检测方法不受故障位 置、故障时刻等工况及高阻介质的影响,具有较强的 适应性与工程应用价值。

#### 参考文献:

[1] 刘鹏辉,黄纯. 基于动态时间弯曲距离的小电流接地故障区段定位方法[J]. 电网技术,2016,40(3):952-957.

LIU Penghui, HUANG Chun. A fault section location method for small-current grounding fault in distribution network based on dynamic time warping distance [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 952-957.

 [2] 徐玉琴,聂暘,高原,等. 10 kV 线路保护测控装置的同期合闸功 能实现[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):96-101.
 XU Yuqin,NIE Yang,GAO Yuan,et al. Implementation of

synchronous closing for protection, measuring & control device of  $10 \ kV$  line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36 (5):96-101.

- [3] YUN-SEOK K. A self-isolation method for the HIF zone under the network-based distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2):884-891.
- [4] 王宾,耿建昭,董新洲. 配网高阻接地故障伏安特性分析及检测
  [J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3815-3823.
  WANG Bin,GENG Jianshao,DONG Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics for high impedance faults in distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34 (22):3815-3823.
- [5] 李欣唐,员志皓,孟昭勇.一种适于高阻接地短路的故障测距新 算法[J]. 电力自动化设备,2000,20(4):15-18.
  LI Xintang,YUN Zhihao,MENG Shaoyong. New algorithm of fault allocation for high impedance grounding[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(4):15-18.
- [6] ETEMADI A H, SANAYE P M. High impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(1):110-118.
- [7] WU H W,PHUNG B T,ZHANG D M, et al. Modeling and detection of high impedance faults [C] // IEEE Conference Publications:Smart Green Technology in Electrical and Information Systems. Perth,Australia:IEEE,2014:88-93.
- [8] CARPENTER M, HOAD R F, BRUTON T D, et al. Staged-fault testing for high impedance fault data collection [J]. Protective Relay Engineers, 2005, 4(5):9-17.
- [9] SHENG Y, ROVNYAK S M. Decision tree-based methodology for high impedance fault detection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2):533-539.
- [10] 陈佳佳, 邰能灵, 林韩, 等.利用单端暂态量检测单相高阻接地 故障的新方法[J].电力系统自动化, 2007, 31(9):56-60.

CHEN Jiajia, TAI Nengling, LIN Han, et al. Nov el non-unit

transient-based protection of single phase high-impedance fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9):56-60.

[11] 陈博博,屈卫锋,杨宏宇,等.小电流接地系统单相接地综合电 弧模型与选线方法的研究[J].电力系统保护与控制,2016,44 (16):1-7.

CHEN Bobo,QU Weifeng,YANG Hongyu,et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffectively grounding system[J]. Power System Protection and Control,2016,44(16):1-7.

- [12] MICHALIK M, REBIZANT W, LUKOWICZ M, et al. Highimpedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4):1793-1801.
- [13] 葛乃成,刘艳敏,倪腊琴. 电力系统高阻接地故障保护综述[J].
   华东电力,2011,39(5):753-756.
   GE Naicheng,LIU Yanmin,NI Laqin. High impedance groun-

ding fault protection in power system[J]. East China Electric Power,2011,39(5):753-756.

- [14] 贺家李,李永丽,董新洲,等. 电力系统继电保护原理[M]. 北 京:中国电力出版社,2010:80-81.
- [15] CHEN J C,PHUNG B T,ZHANG D,et al. Arcing current features extraction using wavelet transform [C] // Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM). Niigata, Japan: The Institute of Electrical Engineers, 2014:221-224.
- [16] EBRON S,LUBKENMAN D L,WHITE M. A neural network approach to the detection of incipient faults on power distribution feeders [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990,5(2):905-914.
- [17] 林圣,何正友,罗国敏. 基于小波能量矩的输电线路暂态信号分类识别方法[J].电网技术,2008,32(20):30-34.
  LIN Sheng,HE Zhengyou,LUO Guomin. A wavelet energy moment based classification and recognition method of transient signals in power transmission lines[J]. Power System Technology, 2008,32(20):30-34.
- [18] 束洪春. 配电网络故障选线[M]. 北京:机械工业出版社,2008: 19-24.
- [19] GAUTAM S,BRAHMA S M. Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (2):1226-1234.
- [20] 姚海燕,张静,留毅,等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(9):115-123.
  YAO Haiyan,ZHANG Jing,LIU Yi,et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multiscale wavelet criterions and time-frequency feature association [J]. Power System Protection and Control,2015,43(9):115-123.
- [21] 李欣然,于永源. 超高压输电线路模拟的研究[J]. 长沙水电师 院学报,1992,7(2):215-220.
   LI Xinran,YU Yongyuan. Study on the simulation of the ultrahigh voltage line[J]. Journal of Changsha Normal University of

Water Resources and Electric Power, 1992, 7(2):215-220.
[22] SARLAK M, SHAHRTASH S M. High-impedance faulted branch identification using magnetic-field signature analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(28):67-74.

[23] MICHALIK M,LUKOWICZ M,REBIZANT W, et al. Verification of the wavelet-based HIF detecting algorithm performance in solidly grounded MV networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(4):2057-2064.

#### 作者简介:

朱晓娟(1992—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研 究方向为配电网故障诊断(E-mail:zhuxjswjtu@163.com); 林 圣(1983—),男,湖南宁乡人,副教授,博士,通信作



者,研究方向为电力系统故障诊断、故障测距 与继电保护(E-mail:slin@home.swjtu.edu.cn); 张 妹(1988—),女,四川自贡人,博士研 究生,研究方向为配电网保护与定位(E-mail: ZS20061621@163.com);

何正友(1970—),男,四川自贡人,教授,博士研究生导师,研究方向为信号处理和信息理论在电力系统故障分析中的应用、

新型继电保护原理、配网综合自动化等(E-mail:hezy@swjtu.edu.cn)。

## High-impedance grounding fault detection based on wavelet energy moment

ZHU Xiaojuan, LIN Sheng, ZHANG Shu, HE Zhengyou

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract**: HIGF(High-Impedance Grounding Fault) often occurs in the mid-voltage distribution network with ungrounded neutral point, which is hardly detected by normal zero-sequence current protection. The frequency spectrum of HIGF current obtained by simulation or experiment is analyzed, which shows that the distribution of its high-frequency components is obviously different from that of other disturbed transient signals. The wavelet energy moment algorithm is introduced, the energy moments of high-frequency components are normalized, summed and processed in logarithm, and a method for detecting HIGF is then proposed, which only carries out the wavelet energy moment analysis for the current signals of the first postfault fundamental frequency cycle to get the detection criterion. Massive simulative and measured data show that, the proposed method has strong adaptability and is not affected by the non-HIGF transient signals of lines.

**Key words**: distribution network; high-impedance grounding fault; high-frequency component; wavelet energy moment; medium; fault detection

(上接第 160 页 continued from page 160)

# Strategy and implementation of soft-clamp misoperation prevention for smart substation protections

BU Qiangsheng<sup>1</sup>, GAO Lei<sup>1</sup>, YAN Zhiwei<sup>2</sup>, YUAN Yubo<sup>1</sup>, SONG Liangliang<sup>1</sup>, SONG Shuang<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211113, China;

2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract**: The influence of soft-clamp misoperation on the relay protections is analyzed according to its actual application situations in smart substations, the fundamental principle and specific strategy against the soft-clamp misoperation are proposed, the implementation of soft-clamp misoperation prevention on the background supervisory control platform is introduced based on an actual smart substation project, and the expression and auto-generation of anti-misoperation logic for soft clamps are discussed.

Key words: smart substation; relay protection; soft clamp; anti-misoperation; logic strategy; virtual signal

168