

基于暂态量和小波包的 配电网故障选线方法

毕研秋, 赵建国

(山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 分析了配电网单相接地时的故障特征, 对现有基于稳态量与暂态量的故障选线方法进行分析比较, 指出故障暂态电流幅值比稳态对地电容电流大得多, 而且几乎不受消弧线圈影响, 因此, 利用暂态电流进行选线可以克服稳态选线方法灵敏度低、易受消弧线圈影响的缺点。为了精确提取故障时的暂态信号用于选线, 发挥小波包能进行时频联合分析的优势, 对发生接地故障时各线路的暂态零序电流进行小波包分解, 提取出各频带信号分量的小波包系数。其中, 电流采样值直接用于形成故障选线的第 1 判据, 多个高频分量的小波包系数则形成综合判据以提高选线准确性。该方法能适应小电流接地系统中的不同故障模式, 选线准确性高。仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 小电流接地; 故障选线; 暂态量; 小波理论; 小波包

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)06-0017-05

0 引言

配电网中发生单相接地故障的概率较高, 因此在小电流接地系统中及时准确地选出故障线路, 对提高系统运行安全、经济和可靠性都具有重要意义。目前的故障选线方法主要依靠故障后的稳态零序电压和零序电流, 例如比幅比相法和 5 次谐波法等^[1-4]。这些方法受系统运行方式和故障状况等因素影响较大, 在实际应用中要实现准确的选线存在许多困难。虽然也有几种利用暂态信号的方法, 如首半波原理和暂态电流选线方法, 但这些方法需要依据电压峰值时接地的假设, 使其应用受到很大限制^[5-6]。因此, 为了在小电流接地系统的各种故障模式下都能够准确可靠地实现选线, 探讨新的检测原理和算法很有必要^[7-9]。

文章在分析小电流接地系统接地故障特征的基础上, 充分利用故障后的暂态零序电流, 并引入小波包分析提取出基波和高频分量用于故障选线, 以提高故障选线的准确度。

1 利用故障后稳态量或暂态量进行故障选线的比较

小电流接地系统包括中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点经高阻接地等几种方式, 其中前 2 种方式更为常见。通过分析各种方式的小电流接地系统在发生单相接地故障后出现的暂态和稳态特征, 以及现有故障选线方法及装置的优缺点, 笔者认为目前依据故障后稳态零序电压和电流的选线

方法存在一些不足。

虽然在理论上, 中性点不接地系统发生单相接地故障时, 故障线路和非故障线路的零序电流方向不同, 且故障线路比其他任一条非故障线路的零序电流都要大, 因此可以较可靠地实现接地故障选线。但由于小电流接地系统单相接地故障时产生的稳态故障电流很小, 有时可能接近于零序电流互感器容许下限值, 因此测量误差较大; 另一方面, 由于三相不对称而产生的不平衡电流在量值上可能与故障零序电流相当, 难以彻底清除。因此, 即使对于中性点不接地系统也难以在实际现场中实现准确选线。对于中性点经消弧线圈接地系统, 采用过补偿方式后在理论上就不可能用稳态的基波分量进行选线, 因此造成选线困难。目前, 较好的方法是采用 5 次谐波, 然而现场中 5 次谐波量值更小而且不确定。这些原因导致现有选线装置选线正确率很低, 难以满足现场需要。

考虑到小电流接地系统在发生接地故障时, 主要发生变化的是电容电流和消弧线圈的电感电流, 而且暂态分量通常要比稳态分量大得多, 暂态电流信号能够更充分地显示和刻画故障特征, 因此, 如何用暂态信号实现故障选线是一个重要的研究方向。目前, 随着计算机技术的发展和广泛应用, 利用高采样率的交流采样技术获得电网故障时的暂态信号已经容易实现。在暂态分析的基础上借助先进的数学工具将是今后研究的重点。小波理论克服了传统 Fourier 分析方法的不足, 能够提取出信号在各个时频区域的特征, 从而为小电流接地系统故障时的暂态信号处理提供了理论指导和算法支持^[10-12]。因此, 将小电流接地系统故障选线的研究重点由稳态

分析转向暂态分析,研究基于小波理论的故障选线方法具有重要的理论和实际意义。

目前,已经出现了几种利用小波理论进行接地故障选线的方法,下面进行简要评述。文献[13]提出的小波选线原理是基于对故障暂态信号中 5 次谐波的小波变换系数的比较。该方法利用小波的局部化性质提取暂态信息,相对于使用稳态信号的直接比幅比相选线效果有所改善。文献[14]首先对各条线路零序电流进行多尺度小波分解,然后从最大尺度开始对各条线路的小波变换系数(要求绝对值大于某一设定的阈值)进行逐点比较,同时进行了幅值和相位判断。文献[15]采用小波包方法将各线路的暂态零序电流进行 4 层小波包分解,计算分解后各频带信号分量对应的能量。对中性点不接地配电网选择能量最大的高频频带,对经消弧线圈接地的配电网选择能量次大的高频频带,提出了以波形识别作为主判据、模极大值作为副判据的综合判据,能够较准确地实现故障选线。

就目前提出的小波选线方法看,选线保护在性能上确有不同程度的提高,但是仍存在不足,如在实际现场中某些变电站的 5 次谐波分量很小而难以提取;仅仅依靠各尺度上的少数小波变换模极大值进行判断,或只利用尺度上的“一个”小波变换模极大值,抗干扰能力较差;以及每次选线都要计算频带能量选择合适的频带,计算量较大。因此,要充分发挥小波理论的优势,满足实际现场的故障选线的需要,仍需进行深入分析和研究。

2 基于暂态量和小波包分析的故障选线方法

由于中性点经消弧线圈接地系统的故障选线比较困难,故对此进行了重点研究。在中性点经消弧线圈接地系统中,由于电感电流不能突变,因此在故障后的极短时间内可以忽略消弧线圈的影响,近似作为中性点不接地系统来处理,这样故障线路和非故障线路的零序电流方向不同,而且故障线路比其他任一条非故障线路的零序电流大。暂态信号的相位和幅值都可作为故障选线的依据。

在中性点经消弧线圈接地系统中,现有的故障选线方法主要依靠 5 次谐波,理论依据是消弧线圈是针对基波设计的,而对高次谐波有较强的阻抗;同时线路上的对地电容则不会阻碍高次谐波的流通。因此对于高次谐波,即使在稳态时也可以近似作为中性点不接地系统来分析。但是,由于现场故障情况的复杂性,5 次谐波可能量值很小或不确定,因此不一定是最佳选择,有必要根据实际情况选择其他的高次谐波。

小波变换是 20 世纪 90 年代兴起的一门新的理论,它克服了工程界一直应用的傅里叶变换不能在时频域同时具有局部化性能的缺点,通过小波基的伸缩和平移,可根据信号的变化自适应地调整分析窗的宽窄,这种方法特别适合用来分析暂态突变信

号或微弱变化的信号。电力系统故障暂态信号具有持续时间短、所占频带宽等特点,使得传统的傅里叶变换和加窗傅里叶变换难以对其进行有效的分析,而小波变换由于具有时频局部化的性质和时空域的平移不变性,得到了人们的重视和研究,并被逐步应用于电力系统故障分析和检测中。小波理论非常适合分析暂态非平稳信号,而其中的小波包分析是小波分析的扩展,它能够将被小波分解的高频空间进一步细分,从而提取出更精确的高频分量^[16-18]。通常记原始信号 $f(t)$ 的小波空间 V_0 对应小波包中的 U_0^0 ,则三尺度小波包分解如图 1 所示。

$U_0^0(V_0)$							
$U_1^0(V_1)$				$U_1^1(W_1)$			
$U_2^0(V_2)$		$U_2^1(W_2)$		U_2^2		U_2^3	
$U_3^0(V_3)$	$U_3^1(W_3)$	U_3^2	U_3^3	U_3^4	U_3^5	U_3^6	U_3^7

图 1 U_0^0 空间的小波包划分示意图

Fig.1 Wavelet packet decomposition of space U_0^0

从图 1 可以看出,小波空间能被分解为几个小波包空间:

$$W_j = U_j^1 = U_{j+p}^{2^p} \oplus U_{j+p}^{2^{p+1}} \oplus \cdots \oplus U_{j+p}^{2^{p+1}-1} \quad (1)$$

$$W_j = \sum_{q=0}^{2^p-1} U_{j+p}^{2^p+q} \quad (2)$$

$$j=1,2,\dots; p=1,2,\dots,j$$

记 $n=2^p+q$,参照正交小波公式,有小波包函数:

$$\psi_{j,k,n}(t) = 2^{-j/2} \psi_n(2^{-j}t - k) \quad (3)$$

其中, $j \in \mathbb{Z}, k \in \mathbb{Z}, n=0,1,\dots$ 。

$$\psi_n(t) = 2^{p/2} u_n(2^p t) \quad (4)$$

特别地, $u_0(t) = \phi(t)$ 是尺度函数, $u_1(t) = \psi(t)$ 是小波函数。

小波包函数和小波函数都有尺度参数 j 和平移参数 k ,而且小波包函数还多了一个频率参数 n 。因此,小波包比小波具有更好的频率处理能力,更加灵活有效。

按照小波包分解算法可将小波包空间进一步细分,得到各空间上的小波包系数:

$$d_l^{j,2n} = \sum_k h_{k-2l} d_k^{j-1,n} \quad (5)$$

$$d_l^{j,2n+1} = \sum_k g_{k-2l} d_k^{j-1,n} \quad (6)$$

其中, h_{k-2l} 为低通分解滤波器系数, g_{k-2l} 为高通分解滤波器系数。

理论上各小波包系数代表了各小波包空间内信号分量的特征,小波包分析能被用来将故障分析中的暂态电流分解成不同频率的分量,包括高频分量。现采用小波包分析对故障后的暂态信号进行变换,寻找合适的高频分量进行故障选线。

通过对小电流接地系统故障特征和现有故障选线方法的分析,提出了基于暂态量和小波包分析的故障选线方法。

该算法的基本思想是采集故障后短时间内的各

条线路零序电流,理论上故障线路的零序电流大于其他任一条非故障线路的零序电流,这可作为第1判据。考虑到现场故障情况的复杂性,例如某些长距离非故障线路的零序电流可能与故障线路的零序电流大小非常接近,为避免误判可以进一步对各线路零序电流进行小波包分解,然后从中选取对应故障线路的信号分量为最大的2个小波包空间。一般,符合条件的这2个小波包空间中应包含有幅值很大的基波和高次谐波,这样才能避免干扰的影响而数值比较稳定,从而成为识别故障线路和非故障线路的依据。由于各小波包空间的小波包系数可以完全表征该空间的信号分量,因此只需对各线路对应的小波包系数进行比较,对应最大的小波包系数的线路可以判定为故障线路。

记系统中有 M 条出线,并连续以高采样速率对各条线路的零序电流 I_0 进行采样。当线路发生单相接地故障后,将故障前后短时间内的数据记录下来供故障选线计算用。对于不同的具体系统,可以通过分析和实验选定合适的小波包空间来识别故障和非故障线路,可记选取的2个小波包空间分别是 W_{p1} 和 W_{p2} 。

所用方法的计算步骤见图2。

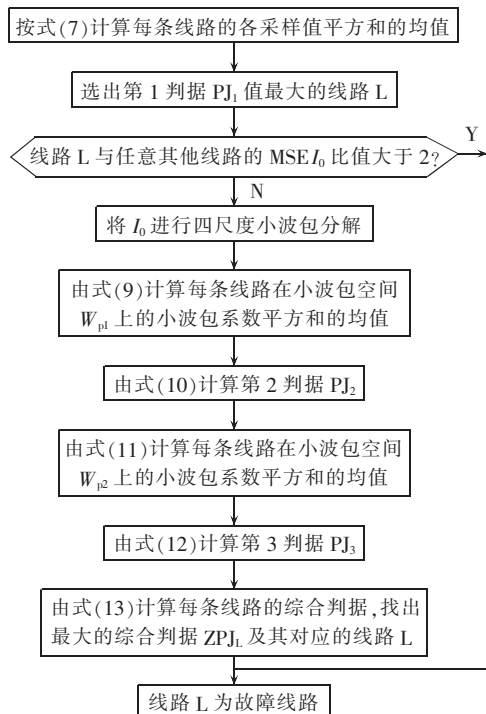


图2 计算框图

Fig.2 Flowchart of calculation

下面进行具体表述。

a. 记线路 i 的零序电流采样值序列为 $I_{0i} = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,N})$ 。通常记 I_{0i} 所在空间为 U_0^0 空间。计算线路 i 的 I_{0i} 中各采样值平方和的均值,记为

$$MSE I_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{i,n}^2 \quad i=1,2,\dots,M \quad (7)$$

定义线路 i 的第1判据:

$$PJ_{1i} = \sum_{k=1}^M \text{sign}(MSE I_{0i} - MSE I_{0k}) \quad (8)$$

$$k=1,2,\dots,M \text{ 但 } k \neq i$$

现将各条线路的第1判据从大到小排列组成选线序列。若某条线路 L 的 PJ_{1L} 最大(即 $PJ_{1L} = M-1$), 而且 $MSE I_{0L}$ 与其他任意 $MSE I_{0i}$ (这里 i 不为线路 L) 的比值大于2,则可以判断线路 L 为故障线路;否则还需要继续进行以下计算和判断。

b. 将各条线路的零序电流 I_0 进行四尺度的小波包分解,得到各小波包空间上的小波包系数。

c. 计算每条线路 i 在小波包空间 W_{p1} 上的小波包系数平方和的均值,记为

$$MSE I_{0i}(W_{p1,i}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_{i,1,n}^2 \quad i=1,2,\dots,M \quad (9)$$

$d_{i,1,n}$ 为零序电流 I_{0i} 在小波包空间 W_{p1} 上分解后得到的小波包系数。

定义每条线路 i 的第2判据:

$$PJ_{2i} = \sum_{k=1}^M \text{sign}[MSE I_{0i}(W_{p1,i}) - MSE I_{0i}(W_{p1,k})] \quad (10)$$

$$k=1,2,\dots,M \text{ 但 } k \neq i$$

d. 计算每条线路 i 在小波包空间 W_{p2} 上的小波包系数平方和的均值,记为

$$MSE I_{0i}(W_{p2,i}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_{i,2,n}^2 \quad i=1,2,\dots,M \quad (11)$$

$d_{i,2,n}$ 为零序电流 I_{0i} 在小波包空间 W_{p2} 上分解后得到的小波包系数。

定义每条线路 i 的第3判据:

$$PJ_{3i} = \sum_{k=1}^M \text{sign}[MSE I_{0i}(W_{p2,i}) - MSE I_{0i}(W_{p2,k})] \quad (12)$$

$$k=1,2,\dots,M \text{ 但 } k \neq i$$

e. 定义每条线路 i 的综合判据:

$$ZPJ_i = PJ_{1i} + PJ_{2i} + PJ_{3i} \quad i=1,2,\dots,M \quad (13)$$

将各条线路的综合判据从大到小排序作为选线序列。如果某条线路 L 的 ZPJ_L 最大,则判断线路 L 为故障线路。

3 仿真分析与结果

为了检验新方法的性能,利用 Matlab 软件中的电力系统工具箱(PSS)建模,同时考虑到多种故障模式,包括运行方式、故障地点、故障合闸角(以 A 相为基准)、接地电阻等的不同,进行了仿真试验。

在计算中选择的采样频率为 4 000 Hz,小波函数用 Bior 5.5 小波,数据窗取 1 个周期(包括故障前 0.25 个周期和故障后 0.75 个周期)以避免采样到稳态数据。计算结果表明所提出的新算法可以在各种故障模式下实现可靠的选线,而且在绝大多数情况下仅利用第1判据就可以得到正确的选线结果,计算量较小。从试验结果看,仅在中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统中,当线路接近母线处发生短路时才需要使用综合判据,如表1所示,其中标“x”的部分表示该项计算可省略。其他试验结果限于篇幅此处略。

表 1 中性点经消弧线圈接地系统——始端(2 km)接地故障选线结果

Tab.1 Faulty feeder detection results in Petersen-coil-grounding system,grounding point is 2 km away from bus

$\delta/(^{\circ})$	R/Ω	线路	各空间小波包系数平方和的均值			判据				选线结果
			$MSEI_0$	$MSEI_0(W_{p1})$	$MSEI_0(W_{p2})$	PJ_1	PJ_2	PJ_3	ZPJ	
0	0	1	8.862 1	x	x	2	x	x	x	线路 1
		2	0.272 8	x	x	-2	x	x	x	
		3	0.970 4	x	x	0	x	x	x	
	15	1	8.016 9	x	x	2	x	x	x	线路 1
		2	0.221 4	x	x	-2	x	x	x	
		3	0.558 9	x	x	0	x	x	x	
	150	1	6.394 1	x	x	2	x	x	x	线路 1
		2	0.187 2	x	x	-2	x	x	x	
		3	0.479 0	x	x	0	x	x	x	
90	0	1	532.160 0	5.125 8	41.767 0	2	0	2	4	线路 1
		2	61.395 0	2.300 8	8.291 1	-2	-2	-2	-6	
		3	373.780 0	51.906 0	40.095 0	0	2	0	2	
	15	1	53.438 0	7.326 3	1.168 7	2	2	0	4	线路 1
		2	14.792 0	4.900 7	2.626 7	-2	-2	2	-2	
		3	48.300 0	5.541 3	0.948 8	0	0	-2	-2	
	150	1	5.699 3	9.944 5	1.107 9	0	2	2	4	线路 1
		2	1.154 5	2.333 6	0.200 5	-2	-2	-2	-6	
		3	6.415 6	8.334 1	0.848 3	2	0	0	2	

注: δ 为合闸角; R 为接地电阻。

4 结语

探讨了在小电流接地系统中利用接地故障后出现的暂态信号进行故障选线的方法,并且用小波包理论对暂态信号进行了分析,提出了基于暂态量和小波包分析的故障选线方法。
该方法充分利用接地故障后各线路的暂态零序电流,以及小波包分析后得到的基波和低频分量实现故障选线,而且不必依赖电压峰值接地的假设,具有较好的理论依据和较强的适应性。Matlab 仿真表明了该算法的选线准确度高,适应性好。

参考文献:

[1] CHAARI O,BASTARD P,MEUNIER M. Prony's method:an effect tool for the analysis of earth fault currents in Petersen-coil-protected networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995,10(3):1234-1241.

[2] LIANG Jun,YUN Zhi-hao,LIU Fei-fan,et al. A method of fault line detection in distribution systems based on wavelets[C]//2002 International Conference on Power System Technology. Kunming,China:[s.n.],2002:2635-2639.

[3] JIA Qing-quan,YANG Qi-xun,YANG Wei,et al. Multi-criteria relaying strategy for single phase to ground fault in MV power systems[C]//2002 International Conference on Power System Technology. Kunming,China:[s.n.],2002:683-687.

[4] 吴清,许云峰. 小电流接地选线装置的现场接地选线试验[J]. 电力系统自动化,2006,30(17):105-107.

WU Qing,XU Yun-feng. Test of line selection equipment in non-effectively grounding system[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(17):105-107.

[5] 徐丙垠,薛永端,李天友,等. 小电流接地故障选线技术综述[J]. 电力设备,2005,6(4):1-7.

XU Bing-yin,XUE Yong-duan,LI Tian-you,et al. Review of line selection of grounding fault in non-effectively grounding network techniques[J]. Electrical Equipment,2005,6(4):1-7.

[6] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

[7] 王娜,周有庆,龚静. 小波变换在配电网单相接地故障选线中的应用[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):27-30.

WANG Na,ZHOU You-qing,GONG Jing. Application of wavelet transform to phase-to-ground fault detection system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(10):27-30.

[8] 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,LÜ 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.

[9] 孔瑞忠,董新洲,毕见广. 基于电流行波的小电流接地选线装置的试验[J]. 电力系统自动化,2006,30(5):63-67.

KONG Rui-zhong,DONG Xin-zhou,BI Jian-guang. Test of fault line selector based on current traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(5):63-67.

[10] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1995.

[11] 彭玉华. 小波变换及其工程应用[M]. 北京:科学出版社,1999.

[12] CHAARI O,MEUNIER M. Wavelets;a new tool for the resonant grounded power distribution system relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1996,11(3):1301-1308.

[13] 操丰梅,苏沛浦. 小波变换在配电自动化接地故障检测中的应用研究[J]. 电力系统自动化,1999,23(13):33-36.

CAO Feng-mei,SU Pei-pu. Study on the application of wavelet transform to detect earth-fault in distribution automation system[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(13):33-36.

[14] 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.

[15] 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.

MAO Peng,SUN Ya-ming,ZHANG Zhao-ning,et al. Wavelets packet based detection of phase-to-ground fault in distribution automation system[J]. Power System Technology,2000,24(6):9-13.

[16] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):78-82.

JIA Qing-guan,LIU Lian-guang,YANG Yi-han,et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying [J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(10):78-82.

[17] 赵新红,袁洪,车伟. 小波变换在小电流接地电弧故障选线中的应用[J]. 高电压技术,2005,31(10):18-20.

ZHAO Xin-hong,YUAN Hong,CHE Wei. Study of arc-grounding fault selection based on wavelet analysis for the small current neutral grounding system[J]. High Voltage Engineering,2005,31(10):18-20.

[18] 赵青春,刘沛,林湘宁,等. 基于综合判据的小电流接地选线装置研制[J]. 电力自动化设备,2006,26(5):84-87.

ZHAO Qing-chun,LIU Pei,LIN Xiang-ning,et al. Development

of fault line selection device based on integrated criterion for indirectly grounding power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(5):84-87.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

毕研秋(1972-),女,山东济南人,博士研究生,主要研究方向为配电网自动化和广域保护(E-mail:yqbi@sdu.edu.cn);

赵建国(1955-),男,山东乳山人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为调度自动化和配电网自动化等。

Faulty feeder detection based on transient current and wavelet packet in distribution system

BI Yan-qiu,ZHAO Jian-guo

(College of Electrical Engineering,Shandong University, Ji'nan 250061,China)

Abstract: Characteristics of single-phase-to-ground fault in distribution system are analyzed, and the faulty feeder detection methods based on steady and transient component are compared. Since the amplitude of transient current is much larger than that of steady-state line-to-ground capacitive current and not influenced by the Petersen-coil, using transient current to select faulty feeder may improve selection sensitivity and reduce vulnerability to Petersen-coil. As wavelet packet can carry out time-frequency combined analysis, the transient zero-sequence current of each feeder are decomposed with wavelet packet to extract the wavelet packet coefficients of different frequency components. The sampled current is directly used as the first criterion and the wavelet packet coefficients of multiple high-frequency components are used as the synthesized criterion to improve the accuracy of faulty feeder detection, which is more accurate and adaptive for various fault modes in small current grounding system. The simulation validates its effectiveness.

Key words: small current grounding; faulty feeder detection; transient component; wavelet theory; wavelet packet