



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109375041 A

(43)申请公布日 2019.02.22

(21)申请号 201811582682.6

(22)申请日 2018.12.24

(71)申请人 华北科技学院

地址 065000 河北省廊坊市三河燕郊开发区学院大街467号

(72)发明人 顾涛

(74)专利代理机构 北京东方汇众知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11296

代理人 张淑贤 王庆彬

(51) Int. Cl.

G01R 31/02(2006.01)

G01R 31/08(2006.01)

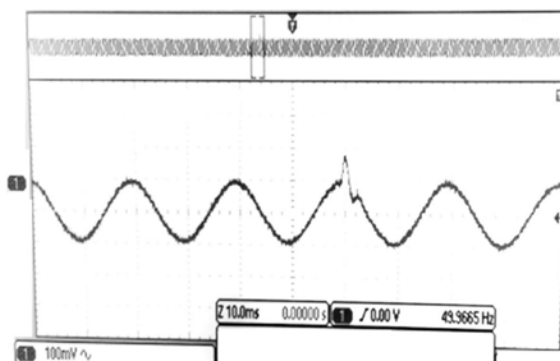
权利要求书1页 说明书7页 附图1页

## (54)发明名称

小电流接地系统单相接地故障判断方法

## (57)摘要

本发明涉及一种小电流接地系统单相接地故障判断方法以识别单相接地故障。本发明构建的单相接地故障判断Fisher分类器中,结合了暂态特征和稳态特征的接地故障特征向量信号。从状态转移角度出发研究,当小电流接地系统中线路单相接地故障发生时,线路电场和电流变化其实是一个从稳态到暂态变化再到稳态变化的过程。所以本发明更能模拟单相接地故障发生时的实际情况,使用本方法构建的Fisher分类器能快速、准确地对小电流接地系统单相接地故障进行区分判断。



1. 小电流接地系统单相接地故障判断方法,其特征在于,包括以下步骤:第一步,提取单相暂态电流特征分量 $W_{\text{value}}$ ,其中 $W_{\text{value}}$ 为线路电流db5小波变换第3层小波模系数最大值,线路电流db5小波变换第3层小波模系数 $d_j[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{j+1}[m]h_1[m-2k]$ ,式中 $c_3[k] = 2^{3/2}f$

$$[k], f(t) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_0[k]\varphi(t-k) + \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_j[k]2^{\frac{j}{2}}\Psi(2^j t - k) \quad ,$$

$c_j[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{j+1}[m]h_0[m-2k]$ ,其中 $h_0[k]$ 为小波分解滤波器,j和k分别代表尺度标号和平移标号;

第二步,建立单相接地故障判断Fisher分类器,所建立的Fisher分类器中的分类判别函数为 $y = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_px_p$ ,式中由 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 组成的矩阵 $X_i$ 为具体小电流接地系统中采集的行向量,其中由 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_p$ 组成的矩阵 $C_i$ 根据

$$L(l_1, l_2, \dots, l_p) = \frac{(\bar{y}^0 - \bar{y}^1)^2}{\sum_{i=1}^s (y_i^0 - \bar{y}^0)^2 + \sum_{i=1}^t (y_i^1 - \bar{y}^1)^2} \text{取极大值时确定};$$

第三步,构造小电流接地系统的单相统计向量 $\xi = (W_{\text{value}}, I, E)$ ,并根据构造的统计向量确定分类判别函数中由 $c_1, c_2, c_3$ 组成的矩阵 $C_i$ 的具体取值,其中 $I$ 为线路故障前和故障后电流有效值, $E$ 代表线路故障前和故障后对地电场有效值;

第四步,计算特征向量 $y$ 与临界向量 $y_0$ 并判断是否发生接地故障,其中 $y$ 根据第三步确定的分类判别函数计算得出,根据 $y_0 = \frac{s\bar{y}_A + t\bar{y}_B}{s+t}$ 确定临界值 $y_0$ ,其中 $\bar{y}_A$ 为线路故障前所有特征向量 $y$ 的平均值, $\bar{y}_B$ 为线路故障状态下所有特征向量 $y$ 的平均值, $s$ 为线路故障前统计向量 $\xi$ 行数, $t$ 为线路故障状态下统计向量 $\xi$ 行数;若 $y < y_0$ ,则发生单相接地故障;若 $y \geq y_0$ ,则新特征向量属于非接地故障情况。

2. 根据权利要求1所述的小电流接地系统单相接地故障判断方法,其特征在于:在所述第三步中构建的单相统计向量 $\xi$ 中,加入 $\xi_1 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\min}(1-n_1\%))$ 、 $\xi_2 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\min}(1-n_2\%))$ 、 $\xi_3 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\max}(1-n_1\%))$ 、 $\xi_4 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\max}(1-n_2\%))$ 共计4组预建立接地故障数据以建立所述Fisher自适应分类器,式中 $(n_1\%, n_2\%)$ 为线路电场测量值接地故障报警跌落范围。

## 小电流接地系统单相接地故障判断方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种小电流接地系统单相接地故障判断方法。

### 背景技术

[0002] 10KV架空线路单相接地故障判断一直是配电网行业内的难题之一。近年来大量绝缘导线在架空线路中投入使用,进一步加大了断线单相接地故障的识别难度。尽管目前已提出注入信号法、暂态录波分析法、首半波法、群体比幅比相法、零序功率法等方法去解决单相接地故障选线和定位问题。但由于配电网结构比较复杂、中性点接地方式不同、单相接地过渡电阻阻值不定,以及接地点离变电所出口处远近不同等因素导致接地信号特征在某些情况下不够显著,难以有效提取出来。现场实践表明已有方法还需进一步提高报警准确率。

[0003] 事实上,在目前国家电网推广使用的基于故障指示器的中压配电网故障定位系统中,可以将单相接地故障解决方案大概分为外施信号法和非外施信号法两类。前者报警准确性与注入信号频率有很大关系,使用上受限于外施信号能否形成信号回路以及检测设备能否正确检测到外施信号特征。非外施信号法具有很大安装灵活性,可以很容易构成配电网参数分布式监控系统。这种方法又可以细化分为暂态特征法和稳态特征法两类。进一步研究非外施信号法中的各种方法,发现现有方法往往只强调电路参数的暂态特征或稳态特征单个方面的接地特征信号提取,缺少在一种方法里构建结合了暂态特征和稳态特征的接地故障特征向量信号。因而只用暂态法或稳态法并不能很好解决单相接地故障识别问题。故需要建立一个结合暂态和稳态信号特征的统一理论模型,以更好地识别单相接地故障。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于建立一种结合暂态信号特征和稳态信号特征的小电流接地系统单相接地故障判断方法以识别单相接地故障。

[0005] 为实现上述目的,本发明的小电流接地系统单相接地故障判断方法采用以下技术方案:

[0006] 小电流接地系统单相接地故障判断方法,包括以下步骤:第一步,提取单相暂态电流特征分量 $W_{\text{value}}$ ,其中 $W_{\text{value}}$ 为线路电流db5小波变换第3层小波模系数最大值,线路电流db5小波变换第3层小波模系数 $d_j[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{j+1}[m]h_1[m-2k]$ ,式中 $c_3[k] = 2^{-3/2}f[k]$ ,

$$f(t) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_0[k]\varphi(t-k) + \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_j[k]2^{\frac{j}{2}}\Psi(2^j t - k), \quad c_j[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{j+1}[m]h_0[m-2k],$$

[0007] 其中 $h_0[k]$ 为小波分解滤波器,j和k分别代表尺度标号和平移标号;

[0008] 第二步,建立单相接地故障判断Fisher分类器,所建立的Fisher分类器中的分类判别函数为 $y = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_px_p$ ,式中由 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 组成的矩阵 $X_i$ 为具体小电流接地系统中采集的行向量,其中由 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_p$ 组成的矩阵 $C_i$ 根据

$$L(l_1, l_2, \dots, l_p) = \frac{(\bar{y}^0 - \bar{y}^1)^2}{\sum_{i=1}^s (y_i^0 - \bar{y}^0)^2 + \sum_{i=1}^t (y_i^1 - \bar{y}^1)^2} \text{取极大值时确定};$$

[0009] 第三步,构造小电流接地系统的单相统计向量 $\xi = (W_{\text{value}}, I, E)$ ,并根据构造的统计向量确定分类判别函数中由 $c_1, c_2, c_3$ 组成的矩阵 $C_i$ 的具体取值,其中 $I$ 为线路故障前和故障后电流有效值, $E$ 代表线路故障前和故障后对地电场有效值;

[0010] 第四步,计算特征向量 $y$ 与临界向量 $y_0$ 并判断是否发生接地故障,其中 $y$ 根据第三步确定的分类判别函数计算得出,根据 $y_0 = \frac{s\bar{y}_A + t\bar{y}_B}{s+t}$ 确定临界值 $y_0$ ,其中 $\bar{y}_A$ 为线路故障前

所有特征向量 $y$ 的平均值, $\bar{y}_B$ 为线路故障状态下所有特征向量 $y$ 的平均值;若 $y < y_0$ ,则发生单相接地故障;若 $y \geq y_0$ ,则新特征向量属于非接地故障情况。

[0011] 在所述第三步中构建的单相统计向量 $\xi$ 中,加入 $\xi_1 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\min}(1-n_1\%))$ 、 $\xi_2 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\min}(1-n_2\%))$ 、 $\xi_3 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\max}(1-n_1\%))$ 、

$\xi_4 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\max}(1-n_2\%))$ 共计4组预建立接地故障数据以建立所述Fisher自适应分类器,式中 $(n_1\%, n_2\%)$ 为线路电场测量值接地故障报警跌落范围。

[0012] 本发明的有益效果如下:本发明构建的单相接地故障判断Fisher分类器中,结合了暂态特征和稳态特征的接地故障特征向量信号。从状态转移角度出发研究,当小电流接地系统中线路单相接地故障发生时,线路电场和电流变化其实是一个从稳态到暂态变化再到稳态变化的过程。所以本发明更能模拟单相接地故障发生时的实际情况,使用本方法构建的Fisher分类器能快捷、准确地对小电流接地系统单相接地故障进行区分判断。

[0013] 进一步地,通过引入4组预建立接地故障数据,使得本发明所建立的Fisher分类器具有自适应学习能力。

## 附图说明

[0014] 图1为使用本发明的小电流接地系统单相接地故障判断方法的实施例一所判断的线路电场曲线图。

## 具体实施方式

[0015] 小电流接地系统单相接地故障判断方法的实施例一:

[0016] 本发明的小电流接地系统单相接地故障判断方法包括以下步骤:

[0017] 第一步,提取暂态电流特征分量 $W_{\text{value}}$ 。

[0018] 将小电流接地系统正常工作时电流小波分析模系数最大值和接地故障发生时电流小波分析模系数最大值作为暂态电流特征分量 $W_{\text{value}}$ ,本实施例中以10KV架空线路的小电流接地系统为例进行。

[0019] 设小波函数 $\Psi(t)$ 是紧支集的,在 $L_2(R)$ 空间上对于平移为 $\tau$ 、尺度为 $s$ 的小波变换可以定义为

$$[0020] \quad Wf(\tau, S) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{S}} \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{S}\right) dt \quad (1)$$

[0021] 为了计算方便,需要将尺度和平移离散化。设尺度 $S=2^{-j}$ ,平移 $\tau=ks=2^{-j}$ ,通过这样取值可以保证计算机计算的高效性,其中 $j$ 和 $k$ 分别代表尺度标号和平移标号。公式(1)就可以转化为离散二进制小波变换。在实际变换时,尺度都是有限的,则离散二进制小波变换对任意信号 $f(t)$ 的逼近就可以用公式(2)来描述:

$$[0022] \quad f(t) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_0[k] \varphi(t-k) + \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_j[k] 2^{\frac{j}{2}} \Psi(2^j t - k) \quad (2)$$

[0023] 公式(2)表明,均任意信号 $f(t)$ 均可以近似分解为 $S_0$ 空间基尺度函数和 $W_0 \sim W_{M-1}$ 空间小波函数之线性组合。

[0024] 用于公式(2)分解的每层系数之间由公式(3)和公式(4)所表述的DWT分析关系确定如下:

$$[0025] \quad c_j[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{j+1}[m] h_0[m-2k] \quad (3)$$

$$[0026] \quad d_j[k] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_{j+1}[m] h_1[m-2k] \quad (4)$$

[0027] 综合考虑dbN系列小波波形和变化率特点与电流突变波形之间频率关系,以及dbN分解滤波器的长度对计算的影响,针对单相接地时电流波形变化特征,采用db5小波对电流数据进行3层变换,并求取第3层最大小波模系数值作为混合特征向量的暂态电流特征分量。

[0028] 公式(3)和公式(4)中 $h_0[k]$ 和 $h_1[k]$ 之间关系为:

$$[0029] \quad h_1[k] = (-1)^k h_0[N-1-k] \quad (5)$$

[0030] 其中 $N$ 是Daubechies小波的阶数。对于db5小波,其小波分解滤波器为:

$$[0031] \quad h_0[k] = \{.0033357, .012581, -.0062415, -.077571, -.032245, .24229, .13843, -.72431, .60383, -.1601\}.$$

[0032] 根据公式(5)就可以求出 $h_1[k]$ 。利用采集到的电流数据点作为分解系数的起始点,由 $c_3[k] = 2^{-3/2} f[k]$ ,就可以逐一计算出 $c_2[k]$ 、 $c_1[k]$ 、 $c_0[k]$ 以及 $d_3[k]$ 、 $d_2[k]$ 、 $d_1[k]$ 、 $d_0[k]$ 。其第三层小波模系数最大值就可以从 $d_3[k] \sim d_0[k]$ 中求出。

[0033] 第二步,建立单相接地故障判断Fisher分类器。

[0034] 针对小电流接地系统,对于10KV架空线路状态可以划分为正常运行态、单相接地故障态、短路故障态和停电态。短路故障可以很容易识别并被报告出来,停电状态也可以通过传感器很容易的识别出来。通过程序条件设置,这两类状态可以被直接判断出。剩下就可以将线路运行状态划分为正常运行状态和单相接地故障状态两类。这样,就可以利用Fisher分类理论对线路正常运行态和单相接地故障态进行分类。

[0035] 建立的Fisher分类器中的分类判别函数为 $y = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_p x_p$ 。式中由 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $\dots$ 、 $x_p$ 组成的矩阵 $X_i$ 为具体小电流接地系统中采集的向量。Fisher两类分类器目标就是在公式(6)取极大值条件下,确定分类判别函数 $y = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_p x_p$ 中由 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 、 $\dots$ 、 $c_p$ 组成的矩阵 $C_i$ 的系数,并求出临界值 $y_0$ 。

$$[0036] \quad L(l_1, l_2, \dots, l_p) = \frac{(\bar{y}^0 - \bar{y}^1)^2}{\sum_{i=1}^s (y_i^0 - \bar{y}^0)^2 + \sum_{i=1}^r (y_i^1 - \bar{y}^1)^2} \quad (6)$$

[0037] 第三步,构造小电流接地系统的统计向量 $\xi = (W_{\text{value}}, I, E)$ ,并根据构造的统计向量确定分类判别函数中与 $W_{\text{value}}$ 、 $I$ 、 $E$ 一一对应的、由 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 组成的矩阵 $C_i$ 的具体取值。其中

$W_{\text{value}}$ 代表线路电流db5小波变换第3层小波系数模最大值,表征线路暂态特征量。 $I$ 代表线路故障前和故障后电流有效值, $E$ 代表线路故障前和故障后对地电场有效值。 $I$ 和 $E$ 表征线路单相接地故障发生前与发生后稳态特征值。

[0038] 第四步,计算特征向量 $y$ 与临界向量 $y_0$ 并判断是否发生接地故障,其中 $y$ 根据第三步确定的分类判别函数计算得出,根据 $y_0 = \frac{s\bar{y}_A + t\bar{y}_B}{s+t}$ 确定临界值 $y_0$ ,其中 $\bar{y}_A$ 为线路故障前

所有特征向量 $y$ 的平均值, $\bar{y}_B$ 为线路故障状态下所有特征向量 $y$ 的平均值, $s$ 为线路故障前统计向量 $\xi$ 行数(与证明例中矩阵A行数对应), $t$ 为线路故障状态下统计向量 $\xi$ 行数(与证明例中矩阵B行数对应);若 $y < y_0$ ,则发生单相接地故障;若 $y \geq y_0$ ,则新特征向量属于非接地故障情况。

[0039] 为了进一步清楚地对本发明的方法进行介绍,以下举例说明使用本方法对图1中接地故障发生时电流暂态变化波形进行判断的过程及结果。使用第一步的计算方法计算图1中正常工作时电流小波分析模系数最大值 $W_{\text{value}}$ ,同时记录接地故障发生前线路电流有效值 $I$ 和有效电场值 $E$ ,得到如表1所示的单相正常运行数据,并以矩阵A记录表1数据。

[0040] 表1

[0041]

正常电流波形 DB5 变换, 第 3 层小波模系数低频最大值	接地前电流值 (A)	接地前对地电场值
231.1	10.1	579
231.2	11	605
231.3	11	605
235.3	11.7	585
231.3	11.7	585
231.3	11.7	585
237.7	12.1	624
231.3	12.1	624
241.3	14.4	624
231.3	14.4	624
243.6	15.3	611
245.3	13.9	630
231.3	13.9	630
231.3	13.9	630
231.3	14.4	640
231.3	14.4	640
231.3	13	586

[0042]

231.3	13	586
231.3	13	586
232.5	13.9	645
231.3	13.9	645
235.1	14.4	583
234.2	14.4	583
234.2	14.4	583

[0043] 同理,使用第一步的计算方法计算图1中接地故障发生时电流小波分析模系数最大值 $W_{value}$ ,同时记录接地故障发生后线路电流有效值 $I$ 和有效电场值 $E$ ,得到如表2所示的单相正常运行数据,并以矩阵B记录表2数据。

[0044] 表2

[0045]

接地暂态过程, 电流波形 DB5 小波分析, 第 3 层小波模系数最大值	接地后电流值 (A)	接地后对地电场值 (V)	接地电阻值 ( $\Omega$ )
1171.2	18.9	86	10
311.3	17.8	122	200
270.9	15.3	287	400
250.9	16.4	350	800
251.5	17.4	414	1000

[0046] 针对矩阵A和矩阵B, 可以求出分类判别函数为:

[0047] 
$$y = 0.0014x_1 - 0.1005x_2 + 0.0059x_3 \quad (7)$$

[0048] 结合  $y_0 = \frac{sy_A + ty_B}{s+t}$  可进一步可以计算出临界值  $y_0 = 2.22103$ 。[0049] 针对矩阵A非接地情况, 根据公式 (7), 可以求得  $\bar{y}_A = 2.6037$ 。针对矩阵B接地情况, 可以求得  $\bar{y}_B = 0.3842$ 。式中  $\bar{y}_A$  为线路故障前所有特征向量  $y$  的平均值,  $\bar{y}_B$  为线路故障状态下所有特征向量  $y$  的平均值。

[0050] 可以根据第四步对单相接地故障判断规则如下:

[0051]  $\bar{y}_A > y_0$ , 若计算得的新特征向量  $y > y_0$ , 则新特征向量属于非接地故障情况; 若计算得的新特征向量  $y < y_0$ , 则发生单相接地故障。[0052] 为判断例中建立的Fisher分类器建立是否有效, 需要讨论相应的F分布统计量, 也即进行判别函数置信讨论。若  $F \geq F_\alpha$ , 则建立的判别函数有效, 若  $F < F_\alpha$ , 则判别函数无效。

[0053] 本例中统计量  $F = \left[ \frac{st}{s+t} \frac{s+t-p-1}{p} \right] \left| \bar{y}_A - \bar{y}_B \right| = 76.53423$

[0054] 在  $\alpha = 0.005$  时,  $F_\alpha(p, s+t-p-1) = F_\alpha(3, 25) = 5.46$ 。[0055] 因而,  $F > F_\alpha$ , 故Fisher分类器建立是有效的。[0056] 同理, 若图1中B相或C相接地故障发生, 其暂态过程会影响A相的电流小波分析值和A相电场值变化, 依据B或C接地电阻大小, 其对A相影响大小不同。申请人仿真了B相200欧姆接地时, A相所获得的一组向量为 (300.01, 14, 550), 将其带入公式 (7), 计算可得  $y = 2.258014 > y_0$ , 由判别法则可以判别A相没有接地故障发生, 没有产生误报。当A相测得向量为 (251, 15, 22) 时,  $y = 1.3337 < y_0$ , 这时判A相接地发生, 与高阻接地实验情况一致。

[0057] 以上判别例证明了本发明小电流接地系统单相接地故障判断方法在接地故障判断方面的成功性。

[0058] 小电流接地系统单相接地故障判断方法的实施例二:

[0059] 实施例二与实施例一的区别仅在于第三步中构造的小电流接地系统的单相统计向量  $\xi$  不同, 这是因为在实际中, 每条线路电流和电场所测量的数据差异都比较大, 电流的瞬态变化也比较大, 小波分析模系数最大值也不相同。因此, 很难建立一个参数固定的单相接地故障Fisher分类模型适合所有线路分支。为了解决这个问题, 必须泛化分类器建立, 使



分类器具有自适应自学习能力。分类器参数自适应建立具体包括以下步骤。

[0060] 步骤1:根据单相接地发生时电场跌落统计规律,设置线路电场测量值接地故障报警跌落范围在( $n_1\%$ ,  $n_2\%$ )区间,则混合特征向量最后一项值可以构建为 $E_{\min}(1-n_1\%)$ 、 $E_{\min}(1-n_2\%)$ 、 $E_{\max}(1-n_1\%)$ 、 $E_{\max}(1-n_2\%)$ 。其中电场跌落百分比是指前一个电场测量有效值减去当前电场值除以前一个电场值。

[0061] 步骤2:构建四个接地故障特征向量  $\xi_1 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\min}(1-n_1\%))$ 、 $\xi_2 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\min}(1-n_2\%))$ 、 $\xi_3 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\max}(1-n_1\%))$ 、 $\xi_4 = (\bar{W}(1+5\%), \bar{I}+2, E_{\max}(1-n_2\%))$ 。 $\bar{W}$ 和 $\bar{I}$ 分别为线路正常工作时采样24组的电流小波变换3层最大系数值均值和线路电流均值。依据统计结果,分别对小波系数和电流值做了具有接地趋势特征的最小限度调整。这样,就可以用24组采样数据和4组预建立接地故障特征数据建立Fisher自适应分类器。

[0062] 步骤3:更新分类器指标。建立采样向量保存表格,记录采样时标。对正常线路采样数据做分类,一般分类器不报警。当没有接地故障发生时,分类器如果将向量误报为接地,这时需要将新的向量更新到24组中,重新计算分类器参数。如果发生了接地,但没有报出来。则需要将向量加入到接地故障特征向量中,重新计算分类器参数。每次接地故障报警时,均记录报警向量和时标,后台进行现场认证后,发出更新分类器指标命令,完成Fisher分类参数更新。

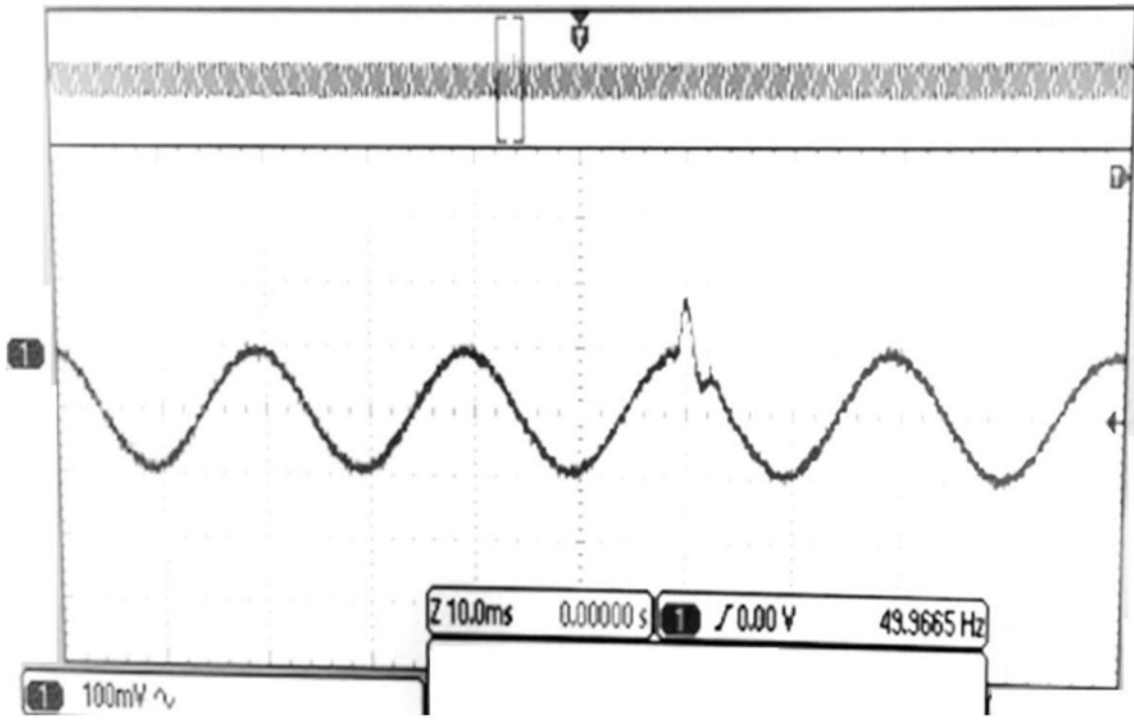


图1