

(19)中华人民共和国国家知识产权局



(12)发明专利申请



(10)申请公布号 CN 108896870 A

(43)申请公布日 2018.11.27

(21)申请号 201810691360.9

(22)申请日 2018.06.28

(71)申请人 四川大学

地址 610065 四川省成都市武侯区一环路
南一段24号

(72)发明人 龚薇 曾琴 周凯

(74)专利代理机构 成都科海专利事务有限责任
公司 51202

代理人 吕建平

(51)Int. Cl.

G01R 31/08(2006.01)

G01R 31/12(2006.01)

权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法

(57)摘要

本发明公开了一种工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,通过对故障暂态电缆进行小波分析,得到不同频带下的小波能量,并依据不同频带下的小波能量计算用于判断植被闪络与污秽/覆冰闪络的识别特征量以及用于判断污秽闪络与覆冰闪络的识别特征量,通过定量分析,实现对工频和冲击联合作用(例如遭受雷击)下的植被闪络、污秽闪络及覆冰闪络故障类型的可靠识别。本发明可用于实际线路遭受雷击等冲击下的植被闪络、污秽闪络及覆冰闪络故障类型识别研究,从而对保证电力系统安全稳定运行具有更加重要的实际指导意义。

CN 108896870 A

- 1.一种工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,其特征在于包括以下步骤:
- (1)利用安装在输电线路上的数据采集器采集闪络电流信号 $f(t)$;
 - (2)利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行 j 层小波分解,得到从0到高频共 $j+1$ 个频带下的重构信号的小波系数 $S_i(n)$ ($i=0,1,\dots,j$), n 代表第 n 个闪络电流信号采样点;
 - (3)依据不同频带下重构信号的小波系数 $S_i(n)$,计算得到闪络电流信号在相应频带下的小波能量 e_i :

$$e_i = \sum_{n=1}^N |S_i(n)|^2 \quad (1);$$

式中, N 为总的采样点数;

- (4)根据小波能量计算闪络电流信号特征值 α ,并根据 α 判断闪络产生的类型:

$$\alpha = \frac{e_0}{\max_{i=1,2,\dots,j} e_i} \quad (2);$$

当 $\alpha < a$ 时,输电线路故障为植被闪络,否则输电线路故障为污秽或覆冰闪络; a 为植被闪络情况下的闪络电流信号最大特征值;

或者

将不同频带下的小波能量进行归一化处理,得到不同频带下的归一化能量 T_i ,并由 T_i 组成闪络电流信号的小波能量谱特征向量 T :

$$T_i = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^j e_i} \quad (3);$$

$$T = [T_1, \dots, T_i, \dots, T_j] \quad (4);$$

根据小波能量谱特征向量 T 计算高频段下不同频带小波能量分布的偏度系数 β ,并根据 β 判断闪络产生的类型:

$$\beta = \frac{j}{(j-1)(j-2)} \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (5);$$

$$\text{式中, } m_3 \text{ 为三阶中心矩, } \sigma \text{ 为标准差; } m_3 = \sum_{i=1}^j (i - \sum_{i=1}^j i \cdot T_i)^3 \cdot T_i, \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^j (i - \sum_{i=1}^j i \cdot T_i) \cdot T_i};$$

当 $\beta < 1$ 时,输电线路故障为植被闪络,否则输电线路故障为污秽或覆冰闪络; 1 为植被闪络情况下的小波能量分布偏度系数最大值。

- 2.根据权利要求1所述工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,其特征在于根据小波能量计算输电线路闪络信号能量位置的能量重心 k ,并根据 k 判断闪络产生的类型:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^j e_i i}{\sum_{i=1}^j e_i} \quad (6);$$

当能量重心 $k \in (b, c)$ 时,输电线路故障为污秽闪络故障;当能量重心 $k \in (c, d)$ 时,输电线路故障为覆冰闪络; b 为污秽闪络情况下闪络信号能量位置的能量重心最小值, c 为污秽

闪络情况下闪络信号能量位置的能量重心最大值或覆冰闪络情况下闪络信号能量位置的
能量重心最小值, d 为覆冰闪络情况下闪络信号能量位置的能量重心最大值。

3. 根据权利要求1或2所述工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法, 其特征在
于步骤(2)利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行 $j=5$ 或6层小波分解。

4. 根据权利要求3所述工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法, 其特征在
于当利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行 $j=5$ 层小波分解时, $a=1, l=0, b=2, c=2.6, d=$
 4 。

5. 根据权利要求3所述工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法, 其特征在
于当利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行 $j=6$ 层小波分解时, $a=1, l=0, b=2, c=3, d=4$ 。

工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力工程中的故障识别技术领域,涉及输电线路故障识别技术,具体涉及一种工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法。

背景技术

[0002] 架空输电线路是电网建设的基础,输电线路故障原因的准确、快速辨识能为电力系统安全稳定运行提供科学有效地决策支持。现有的输电线路故障辨识大多采用人工智能算法,通过故障分量、S变换、小波变换等方法提取特征量,再由BP(Back propagation)神经网络、模糊识别等方法进行分类识别。但以上方法均属于黑箱操作,具体冲击波参数或故障条件对暂态能量影响较大。

[0003] 实际电力运行中,当绝缘子处于严重覆冰或积污状态时,其工频电压虽会明显降低,但绝缘子不会立即闪络,而雷电或操作冲击等这类短时过电压的出现将会引发绝缘子闪络。可见,植被、污秽或覆冰闪络等典型故障在雷击或操作冲击下极易形成击穿通道,并在工频电压下形成续弧进而发生闪络,且这三类故障不易再重合闸成功,严重情况下回诱发大面积停电。而目前研究多集中于工频电压击穿导致的植被、污秽及覆冰闪络故障识别,冲击引起的植被、污秽及覆冰闪络等故障仍缺少有效的故障识别方法。

[0004] 综上所述,由于冲击引起的植被、污秽或覆冰闪络等故障比运行工况下的同类故障更易发生,研究输电线路于工频和冲击联合作用下的植被、污秽及覆冰闪络故障识别,对于保证电力系统安全稳定运行具有更加重要的实际指导意义。

发明内容

[0005] 对于目前输电线路在冲击作用下的故障类型,缺少有效识别方法的技术现状,本发明旨在提供一种工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,实现对冲击作用下输电线路植被、污秽及覆冰闪络故障类型的准确辨识。

[0006] 本发明的基本发明思想为:采集输电线路上的闪络故障电流信号,然后对该故障闪络故障电流信号进行小波分析,得到从0到高频各频带重构信号,再计算各频带下的能量,去除频带0对应的能量;依据不同频带能量计算作为植被闪络与污秽/覆冰闪络的识别特征量——闪络电流信号特征值 α ,或者对高频带能量进行归一化处理得到特征向量,再依据得到的特征向量计算作为植被闪络与污秽/覆冰闪络的识别特征量——高频段下不同频带小波能量分布的偏度系数 β ;最后依据高频带能量进一步计算输电线路闪络信号能量位置的能量重心 k ,作为污秽闪络与覆冰闪络的识别特征量,从而实现对工频和冲击联合作用下植被闪络、污秽闪络即覆冰闪络三类故障的准确识别。

[0007] 基于上述发明思想,本发明提供的第一种工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,包括以下步骤:

[0008] (1) 利用安装在输电线路上的数据采集器采集闪络电流信号 $f(t)$;

[0009] (2) 利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行j层小波分解,得到从0到高频共j+1个

频带下的重构信号的小波系数 $S_i(n)$ ($i=0,1,\dots,j$), n 代表第 n 个闪络电流信号采样点;

[0010] (3) 依据不同频带下重构信号的小波系数 $S_i(n)$, 计算得到闪络电流信号在相应频带下的小波能量 e_i :

$$[0011] \quad e_i = \sum_{n=1}^N |S_i(n)|^2 \quad (1);$$

[0012] 式中, N 为总的采样点数;

[0013] (4) 根据小波能量计算闪络电流信号特征值 α , 并根据 α 判断闪络产生的类型:

$$[0014] \quad \alpha = \frac{e_0}{\max_{i=1,2,\dots,j} e_i} \quad (2);$$

[0015] 当 $\alpha < a$ 时, 输电线路故障为植被闪络, 否则输电线路故障为污秽或覆冰闪络; a 为植被闪络情况下的闪络电流信号最大特征值;

[0016] 或者

[0017] 将不同频带下的小波能量进行归一化处理, 得到不同频带下的归一化能量 T_i , 并由 T_i 组成闪络电流信号的小波能量谱特征向量 T :

$$[0018] \quad T_i = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^j e_i} \quad (3);$$

[0019] $T = [T_1, \dots, T_i, \dots, T_j]$ (4);

[0020] 根据小波能量谱特征向量 T 计算高频段下不同频带小波能量分布的偏度系数 β , 并根据 β 判断闪络产生的类型:

$$[0021] \quad \beta = \frac{j}{(j-1)(j-2)} \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (5);$$

[0022] 式中, m_3 为三阶中心矩, σ 为标准差; $m_3 = \sum_{i=1}^j (i - \sum_{i=1}^j i \cdot T_i)^3 \cdot T_i$, $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^j (i - \sum_{i=1}^j i \cdot T_i)^2 \cdot T_i}$;

[0023] 当 $\beta < 1$ 时, 输电线路故障为植被闪络, 否则输电线路故障为污秽或覆冰闪络; 1 为植被闪络情况下的小波能量分布偏度系数最大值。

[0024] 上述工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法, 根据小波能量计算输电线路闪络信号能量位置的能量重心 k , 并根据 k 判断闪络产生的类型:

$$[0025] \quad k = \frac{\sum_{i=1}^j e_i i}{\sum_{i=1}^j e_i} \quad (6);$$

[0026] 当能量重心 $k \in (b, c)$ 时, 输电线路故障为污秽闪络故障; 当能量重心 $k \in (c, d)$ 时, 输电线路故障为覆冰闪络; b 为污秽闪络情况下闪络信号能量位置的能量重心最小值, c 为污秽闪络情况下闪络信号能量位置的能量重心最大值或覆冰闪络情况下闪络信号能量位置的能量重心最小值, d 为覆冰闪络情况下闪络信号能量位置的能量重心最大值。

[0027] 上述工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法, 所述闪络电流信号 $f(t)$ 为输电线路故障闪络瞬间采集到的振荡衰减信号。

[0028] 上述工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,当利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行不同层小波分解时,所述植被闪络情况下的闪络电流信号最大特征值 a 、为植被闪络情况下的小波能量分布偏度系数最大值 l 、污秽闪络情况下闪络信号能量位置的的能量重心最小值 b 、污秽闪络情况下闪络信号能量位置的的能量重心最大值或覆冰闪络情况下闪络信号能量位置的的能量重心最小值 c 、覆冰闪络情况下闪络信号能量位置的的能量重心最大值 d 有所不同,这些值可以结合本发明提供的公式(2)、(5)、(6),对多次故障模拟试验结果统计分析得到。当利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行 $j=5$ 层小波分解时, $a=1, l=0, b=2, c=2.6, d=4$ 。当利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行 $j=6$ 层小波分解时, $a=1, l=0, b=2, c=3, d=4$ 。

[0029] 上述工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,db4小波, Daubechies函数是由世界著名的小波分析学者Inrid Daubechies构造的小波函数,db4对应的是小波的分解阶数, Daubechies小波函数具体计算过程可见参考文献“子波分析与子波变换[M]. 赵松年,熊小芸.北京:电子工业出版社,1998”。利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行 j 层小波分解,得到从0到高频 j 频带下的重构信号的小波系数 $S_i(n)$ ($i=0, 1, \dots, j$)。再依据不同频带下重构信号的小波系数 $S_i(n)$,计算得到闪络电流信号在相应频带下的小波能量 e_i 。进一步将不同频带下的小波能量进行归一化处理,得到不同频带下的归一化能量 T_i ,并由 T_i 组成闪络电流信号的小波能量谱谱特征向量 T 。该小波能量谱反映了故障信号从0到高频的能量分布。

[0030] 与现有技术相比,本发明提供的工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,具有如下十分突出的优点和有益技术效果:

[0031] 1、本发明工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,通过对故障暂态电流进行小波分析,得到不同频带下的小波能量,并依据不同频带下的小波能量计算用于判断植被闪络与污秽/覆冰闪络的识别特征量以及用于判断污秽闪络与覆冰闪络的识别特征量,通过定量分析,可实现对工频和冲击联合作用(例如遭受雷击)下的植被闪络、污秽闪络及覆冰闪络故障类型的可靠识别;

[0032] 2、本发明工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,依据不同频带下的小波能量计算得到的高频带能量偏度作为判断植被闪络与污秽/覆冰闪络的识别特征量,依据不同频带下的小波能量计算得到的能量重心作为判断污秽闪络与覆冰闪络的识别特征量,特征量清晰直观,可明显对工频和冲击联合作用(例如遭受雷击)下的植被闪络、污秽闪络及覆冰闪络故障类型进行区分识别;

[0033] 3、本发明工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,可用于实际线路遭受雷击等冲击下的植被闪络、污秽闪络及覆冰闪络故障类型识别研究,从而对保证电力系统安全稳定运行具有更加重要的实际指导意义。

附图说明

[0034] 图1为本发明工频和冲击联合作用下的闪络故障模拟装置原理图。

[0035] 图2为对三类故障类型的闪络电流利用db4小波经6层小波变换后的0与高频重构信号;其中(a)对应植被闪络,(b)对应污秽闪络,(c)对应覆冰闪络。

[0036] 图3为三类故障闪络电流进行小波分析得到的高频带能量分布情况;其中(a)对应

植被闪络, (b) 对应污秽闪络, (c) 对应覆冰闪络。

[0037] 其中, 1-工频电压产生器, 2-保护电阻, 3-电容分压器, 4-输电线路, 5-绝缘子, 6-耦合电容, 7-冲击电压发生器, 8数据采集器。

具体实施方式

[0038] 以下将结合附图给出本发明实施例, 并通过实施例对本发明的技术方案进行进一步的清楚、完整说明。显然, 所述实施例仅仅是本发明的一部分实施例, 而不是全部的实施例。基于本发明内容, 本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所得到的所有其它实施例, 都属于本发明所保护的范围。

[0039] 以下实施例1-2首先利用工频和冲击联合作用下的闪络故障模拟装置对输电线路遭受雷击发生植被闪络、污秽闪络和覆冰闪络进行模拟, 然后利用采集的三类故障模拟情况下的闪络电流进行数据分析, 从而对本发明提供的工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法进行详细说明。

[0040] 以下实施例1-2采用的工频和冲击联合作用下的闪络故障模拟装置, 如图1所示, 包括工频电压产生单元、冲击电压产生单元、故障模拟单元5和数据采集器8; 工频电压产生单元与冲击电压产生单元用于向输电线路施加工频电压和冲击电压, 工频电压产生单元与冲击电压产生单元的高压端分别与输电线路4的两端连接, 工频电压产生单元与冲击电压产生单元的低压端接地, 绝缘子5高压端接入输电线路, 低压端与电流传感器串联后接地。

[0041] 如图1所示, 工频电压产生单元包括工频电压产生器1、保护电阻2和电容分压器3, 工频电压产生器1一端串联保护电阻2后作为工频电压产生单元的高压端与输电线路4一端连接, 工频电压产生器1另一端作为工频电压产生单元的低压端接地, 电容分压器3两端分别并联于工频电压产生器1与保护电阻2的串联支路上。工频电压产生器1用于产生输电线路正常运行所需的工频电压, 以模拟输电线路正常运行情况, 本实施例采用的是本申请人于2014年申请的申请号为CN201410550645.2的申请文件中公开的工频电压产生装置作为工频电压产生器, 本实施例中将保护电阻单独出来。保护电阻2用于保护工频电压产生器遭受短路冲击。电容分压器3为本领域的常规设备, 图1中虚框中给出的框图为电容分压器的等效示意图, 其中两个电容分别为高压臂上的等效电容和低压臂上的等效电容, 电容分压器靠近高压臂的一端与工频电压产生单元的高压端连接, 靠近低压臂的一端与工频电压产生单元的低压端连接。

[0042] 如图1所示, 冲击电压产生单元包括耦合电容6和冲击电压发生器7, 冲击电压发生器7, 一端经耦合电容6作为冲击电压产生单元的高压端与输电线路另一端连接, 冲击电压发生器7另一端作为冲击电压产生单元的低压端接地。耦合电容6用于保证冲击电压能够无畸变的输送到输电线路。冲击电压发生器7用于产生1.2/50 μ s的冲击波, 施加于输电线路4上, 以模拟雷击、操作等过电压情况, 本实施例采用的是本申请人于2014年申请的申请号为CN201410550645.2的申请文件中公开的冲击电压发生器。

[0043] 数据采集器8为示波器, 其信号输入端与串联在绝缘子低压端上的电流传感器连接。

[0044] 改变绝缘子表面污秽状态或选取树枝作为试品实现对实际输电线路故障类型的模拟, 三种故障类型具体模拟试验方案如下:

[0045] (1) 污秽闪络故障模拟试验中,采用喷污法对清洁绝缘子进行湿润,将配置好的污秽溶液(盐密 $\rho_{\text{SDD}}=0.1\text{mg}/\text{cm}^2$,灰密 $\rho_{\text{NSDD}}=0.5\text{mg}/\text{cm}^2$)置于加湿器中,正对清洁绝缘子表面均匀喷雾,使其均匀地覆盖一层污秽物,当其表面出现水膜,边缘将要滴水时,开始试验;试验前期预加工频电压 1.5kV 左右,维持约 2min 后,叠加 $1.2/50\mu\text{s}$ 、幅值 8kV 左右冲击电压至闪络,利用数据采集器8接收电流传感器采集流经绝缘子低压端的闪络电流信号 $f(t)$ 。

[0046] (2) 覆冰闪络故障模拟试验中,用喷壶将电导率为 $100\mu\text{S}/\text{cm}$ 的冷却水均匀喷洒在清洁绝缘子表面,置于冰箱冷却结冰,重复上述操作直至绝缘子表面形成一层 $1\sim 2\text{mm}$ 厚的冰,然后将覆冰绝缘子作为绝缘子5置于试验平台中,在绝缘子表面冰层未融化之前进行试验;试验前期预加工频电压 1.5kV 左右,维持约 2min 后,叠加 $1.2/50\mu\text{s}$ 、幅值 8kV 左右冲击电压至闪络,利用数据采集器8接收电流传感器采集流经绝缘子低压端的闪络电流信号 $f(t)$ 。

[0047] (3) 植被闪络故障模拟试验中,选用高 4cm 、直径为 1.5cm 的松树细枝作为试品。试验中将树枝置于输电线路下方,树梢与导线垂直距离设为 1mm ,水平距离为 2mm ,试验前期预加工频电压 1.5kV 左右,维持约 2min 后,叠加 $1.2/50\mu\text{s}$ 、幅值 8kV 左右冲击电压至闪络,利用数据采集器8接收电流传感器采集流经绝缘子低压端的闪络电流信号 $f(t)$ 。

[0048] 实施例1

[0049] 每种类型闪络故障模拟试验重复两次,然后采用本实施例提供的工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法对上述三类故障模拟试验中采集的闪络电流信号 $f(t)$ 进行处理的过程包括以下步骤:

[0050] (1) 在matlab中利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行6层小波分解,得到从0到高频6频带下的重构信号的小波系数 $S_i(n)$ ($i=0,1,\dots,6$), n 代表第 n 个闪络电流信号采样点,得到的重构信号如图2所示;

[0051] (2) 依据不同频带下重构信号的小波系数 $S_i(n)$,计算得到闪络电流信号在相应频带下的小波能量 e_i :

$$[0052] \quad e_i = \sum_{n=1}^N |S_i(n)|^2 \quad (1);$$

[0053] 式中, N 为总的采样点数;

[0054] (3) 为了突出闪络电流在0与高频带的差异,提高识别可靠性,根据小波能量计算闪络电流信号特征值 α ,并根据 α 判断闪络产生的类型:

$$[0055] \quad \alpha = \frac{e_0}{\max_{i=1,2,\dots,f} e_i} \quad (2);$$

[0056] 当 $\alpha < 1$ 时,输电线路故障为植被闪络,否则输电线路故障为污秽或覆冰闪络,进入步骤(4);

[0057] 分析得到的数据如表1所示;

[0058] (4) 在识别出植被闪络故障基础上,根据小波能量计算输电线路闪络信号能量位置的能量重心 k ,以反映污秽闪络与覆冰闪络的能量集中位置,从而实现对两种闪络类型的判断:

$$[0059] \quad k = \frac{\sum_{i=1}^j e_i i}{\sum_{i=1}^j e_i} \quad (6);$$

[0060] 当能量重心 $k \in (2,3)$ 时,输电线路故障为污秽闪络故障;当能量重心 $k \in (3,4)$ 时,输电线路故障为覆冰闪络;

[0061] 分析得到的数据如表1所示。

[0062] 表1输电线路故障识别结果

[0063]

故障类型	e_0	α	k	识别结果
植被闪络	8.1985	0.2559	3.8723	植被闪络
植被闪络	7.4372	0.2053	3.8041	植被闪络
污秽闪络	139.9117	4.3968	2.9326	污秽闪络
污秽闪络	294.5479	8.5640	2.8838	污秽闪络
覆冰闪络	179.6071	6.3139	3.1994	覆冰闪络
覆冰闪络	191.481	6.8778	3.1680	覆冰闪络

[0064] 进一步对27个植被闪络样本、9个污秽闪络样本和12个覆冰闪络样品采用上述闪络故障模拟装置进行闪络故障模拟试验,并采用上述步骤(1)-(4)对采集的闪络电流信号 $f(t)$ 进行数据处理,完成对三类故障类型的判定,识别准确率如表2所示。

[0065] 表2输电线路故障识别准确率

[0066]

故障类型	样本数	识别正确数	识别准确率%
植被闪络	27	27	100
污秽闪络	9	7	77.8
覆冰闪络	12	10	83.3

[0067] 从表1和表2可以看出,通过本实施例提供的工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法,可以实现对植被闪络、污秽闪络和覆冰闪络故障进行可靠识别。

[0068] 实施例2

[0069] 每种类型闪络故障模拟试验重复两次,然后采用本实施例提供的工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法对上述三类故障模拟试验中采集的闪络电流信号 $f(t)$ 进行处理的过程包括以下步骤:

[0070] (1)在matlab中利用db4小波对闪络电流信号 $f(t)$ 进行6层小波分解,得到从0到高频6频带下的重构信号的小波系数 $S_i(n)$ ($i=0,1,\dots,6$), n 代表第 n 个闪络电流信号采样点,得到的重构信号如图2所示;

[0071] (2)依据不同频带下重构信号的小波系数 $S_i(n)$,计算得到闪络电流信号在相应频带下的小波能量 e_i :

$$[0072] \quad e_i = \sum_{n=1}^N |S_i(n)|^2 \quad (1);$$

[0073] 式中, N 为总的采样点数;

[0074] (3) 为了方便对高频带能量数据的分析比对, 去除步骤 (2) 中求出的能量 e_0 , 对剩余高频带能量进行归一化处理得到不同频带下的归一化能量 T_i , 并由 T_i 组成网络电流信号的小波能量谱特征向量 T :

$$[0075] \quad T_i = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^j e_i} \quad (3);$$

$$[0076] \quad T = [T_1, \dots, T_i, \dots, T_j] \quad (4);$$

[0077] 归一化得到的三类故障模型的能量谱如图3所示;

[0078] (4) 为了进一步描述不同故障的高频带能量分布相对于标准正态分布的偏斜程度, 根据小波能量谱特征向量 T 计算高频段下不同频带小波能量分布的偏度系数 β , 并根据 β 判断闪络产生的类型:

$$[0079] \quad \beta = \frac{j}{(j-1)(j-2)} \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (5);$$

$$[0080] \quad \text{式中, } m_3 \text{ 为三阶中心矩, } \sigma \text{ 为标准差; } m_3 = \sum_{i=1}^j (i - \sum_{i=1}^j i \cdot T_i)^3 \cdot T_i, \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^j (i - \sum_{i=1}^j i \cdot T_i) \cdot T_i};$$

[0081] 当 $\beta < 0$ 时, 输电线路故障为植被闪络, 否则输电线路故障为污秽或覆冰闪络, 进入步骤 (5);

[0082] 分析得到的数据如表3所示;

[0083] (5) 在识别出植被闪络故障基础上, 根据小波能量计算输电线路闪络信号能量位置的能量重心 k , 以反映污秽闪络与覆冰闪络的能量集中位置, 从而实现两种闪络类型的判断:

$$[0084] \quad k = \frac{\sum_{i=1}^j e_i i}{\sum_{i=1}^j e_i} \quad (6);$$

[0085] 当能量重心 $k \in (2, 3)$ 时, 输电线路故障为污秽闪络故障; 当能量重心 $k \in (3, 4)$ 时, 输电线路故障为覆冰闪络;

[0086] 分析得到的数据如表3所示。

[0087] 表3输电线路故障识别结果

[0088]

故障类型	e_0	β	k	识别结果
植被闪络	8.1985	-0.1084	3.8723	植被闪络
植被闪络	7.4372	-0.1461	3.8041	植被闪络
污秽闪络	139.9117	0.0753	2.9326	污秽闪络
污秽闪络	294.5479	0.0911	2.8838	污秽闪络
覆冰闪络	179.6071	0.1290	3.1994	覆冰闪络
覆冰闪络	191.481	0.1019	3.1680	覆冰闪络

[0089] 从表3可以看出, 通过本实施例提供的工频和冲击联合作用下的输电线路故障识别方法, 可以实现对植被闪络、污秽闪络和覆冰闪络故障进行可靠识别。

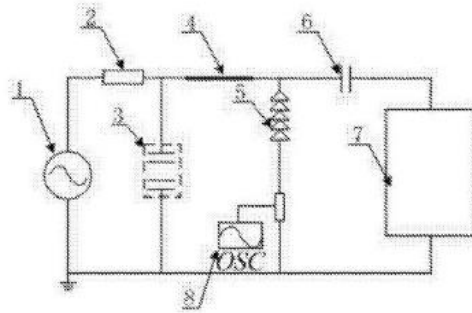


图1

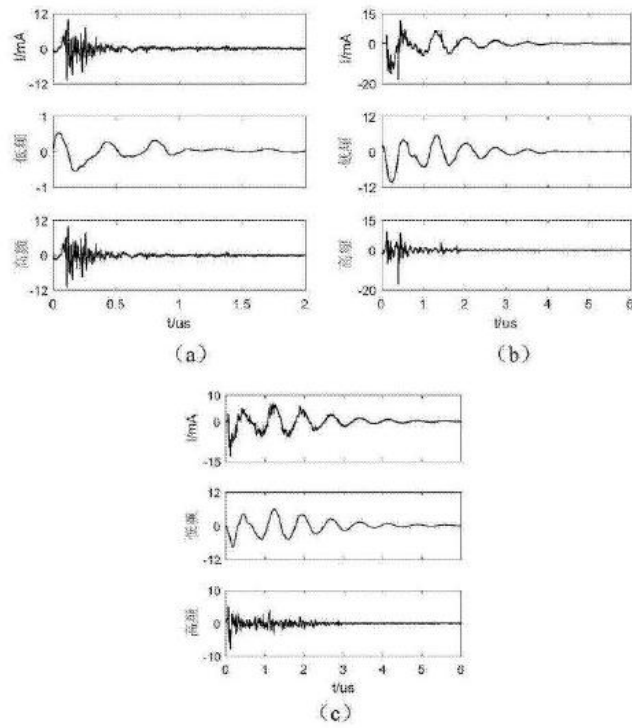


图2

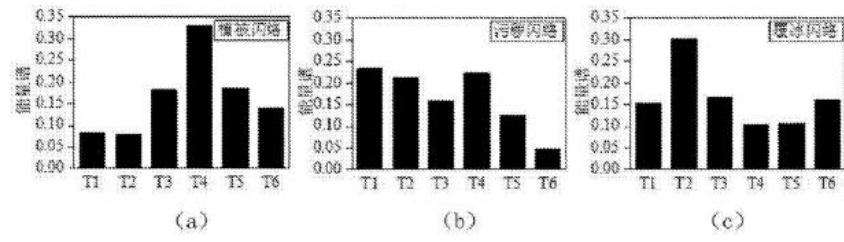


图3