

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102103183 A

(43) 申请公布日 2011.06.22

(21) 申请号 201010568526.1

(22) 申请日 2010.12.01

(71) 申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号

申请人 西北电网有限公司

(72) 发明人 董明 李彦明 赵学风 任明

孙强 王守国

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

代理人 汪人和

(51) Int. Cl.

G01R 31/12(2006.01)

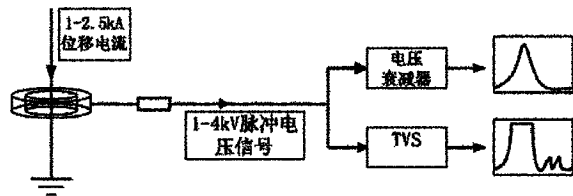
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 2 页

(54) 发明名称

用于现场冲击电压下局部放电测量装置及其信号处理方法

(57) 摘要

本发明公开了一种用于现场冲击电压下的局部放电测量装置及其信号处理方法,该装置包括电流传感器、分接头,电压衰减器,电压瞬态抑制器以及后端处理及显示系统,所述电流传感器的输出端通过积分电阻和同轴电缆连接至分接头的输入端,所述分接头的输出端一路连接至电压衰减器的输入端,另一路连接至电压瞬态抑制器的输入端;所述电压衰减器和电压瞬态抑制器的输出端分别连接至后端处理及显示系统上。本发明用于现场冲击电压下的局部放电测量装置是通过罗氏线圈检测 GIS 接地线上的位移电流信号,现场测量回路搭建简单,该种测量方式不仅操作容易,而且保障了人员及设备的安全。



1. 一种用于现场冲击电压下的局部放电测量装置,其特征在于:包括电流传感器、分接头,电压衰减器,电压瞬态抑制器(TVS)以及后端处理及显示系统,所述电流传感器的输出端通过积分电阻和同轴电缆连接至分接头的输入端,所述分接头的输出端一路连接至电压衰减器的输入端,另一路连接至电压瞬态抑制器(TVS)的输入端;所述电压衰减器和电压瞬态抑制器(TVS)的输出端分别连接至后端处理及显示系统上。

2. 根据权利要求1所述的局部放电测量装置,其特征在于:所述后端处理及显示系统为工控机。

3. 根据权利要求1所述的局部放电测量装置,其特征在于:所述电流传感器采用罗氏线圈电流传感器,所述罗氏线圈电流传感器穿套在冲击电压耐压试验回路的待测GIS设备接地线上,将接地电流信号转化为电压信号,并使用同轴电缆将电压信号传输至后级的信号处理系统。

4. 根据权利要求3所述的局部放电测量装置,其特征在于:所述罗氏线圈电流传感器采用百兆级工作频率及高初始磁导率的Ni-Zn磁芯。

5. 一种基于权利要求1所述的用于现场冲击电压下的局部放电测量装置的信号处理方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 后端处理及显示系统通过数据采集卡分别采集电压衰减器和电压瞬态抑制器(TVS)输出的电压信号,并对两路电压信号分别进行离散小波变换,使用变比例萎缩去噪方法对离散小波进行处理,得到去噪后的局部放电脉冲信号;

2) 对步骤1)得到的局部放电脉冲信号进行处理,提取其基于小波变换的特征信息,结合统计信息进行数据库的建立以及放电脉冲类型识别:

首先对去噪后的局部放电脉冲信号进行三层小波包分解,分别提取第三层从低频到高频多个频率成份的信号特征,得到小波包分解系数 X_{3i} ,对小波包分解系数 X_{3i} 重构,以 S_{3i} 表示 X_{3i} 的重构信号, i 取值为 $0 \sim 7$,由于信号频带较宽,仅对第三层进行分析,总信号 S 可以表示为:

$$S = \sum_{i=0}^7 S_{3i},$$

然后对去噪后的局部放电脉冲信号进行快速傅里叶变换,得到局部放电信号的频谱特征参数;

最后以 S_{3i} 对局部放电信号的频谱特征进行分类,构造特征向量,确定正常与局放故障状态下,特征向量的特征值及容差范围,设向量的元素 E_{3i}/E 的特征值为 C_j ,容差范围是 ΔC_j :

$$C_j = \frac{\sum_{k=1}^n x_{jk}}{n},$$

n 为试验次数; x_{jk} 为小波分解系数 X_{3i} 中的元素,然后依照下式对 C_j 进行归一化处理,得到归一化矩阵 T' :

$$T' = [C_0/C, C_1/C, C_2/C, C_3/C, C_4/C, C_5/C, C_6/C, C_7/C];$$

$$C_j \text{ 的容差范围 } \Delta C_j = K \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{jk} - C_j)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ 其中 } K = 3, 4, 5$$

同样,也对容差 ΔC_j 进行归一化处理,得到归一化矩阵 $\Delta C'$:

$$\Delta C' = [\Delta C_0/C, \Delta C_1/C, \Delta C_2/C, \Delta C_3/C, \Delta C_4/C, \Delta C_5/C, \Delta C_6/C, \Delta C_7/C]$$

3) 将步骤 1) 和 2) 中得到的特征参数统计到数据库中,得到冲击电压下局部放电次数、脉冲幅值、放电脉冲时间序列参数、缺陷局部放电频率特征以及不同电压等级下的放电概率信息。

6. 根据权利要求 5 所述的信号处理方法,其特征在于,步骤 1) 中,所述的使用变比例萎缩去噪方法对离散小波进行处理的方法为:

(1) 首先在信号小波系数高斯分布的前提下,基于最小均方差 MSE 得到原始小波系数 X 的估计为 Y 的函数,记为: $X = h(Y)$, 其均方误差表示为: $MSE = E(X-h(Y))^2$;

(2) 使用线性回归的方法推导出原始小波系数 X 的比例估计:

设 X、Y 的数学期望分别是 μ_x, μ_y , 标准差分别是 σ_x, σ_y , X 与 Y 的相关系数是 r, X 与 Y 的线性关系为: $\tilde{X} = h(Y) = a + bY$, 则最小均方差 $MSE = \min \{E(X-(a+bY))^2\}$; 由最佳线性预测得到: $h(Y) = \mu_x + r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (Y - \mu_y)$, 其最小均方误差 $MMSE = \sigma_x^2 (1-r^2)$; 式中 r 是 X 与 Y 的

相关系数, $r = \frac{\sigma_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_n^2}}$, 因此 $MMSE = \frac{\sigma_x^2 \sigma_n^2}{\sigma_x^2 + \sigma_n^2}$;

噪声方差估计 σ_n 采用小波去噪中值估计法得到:

$$\sigma_n = M(|Y(i, j)|) / 0.6745, Y(i, j) \in HH_1$$

σ_x 的值根据局部噪声尺度变化而设定,采用基于局部自适应一维窗口的极大似然法和最大后验概率估计法计算 σ_x 。

7. 根据权利要求 6 所述的信号处理方法,其特征在于,所述 σ_x 根据下式计算:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2(i) &= \underset{\sigma^2 \geq 0}{\operatorname{argmax}} \prod_{(n) \in N(i)} p(Y(n) \sigma^2) \\ &= \max(0, \frac{1}{M_{(n)}} \sum_{(n) \in N(i)} Y^2(n) - \sigma_n^2) \end{aligned}$$

式中 $p(Y(n) \sigma^2)$ 为服从零均值。

8. 根据权利要求 5 所述的信号处理方法,其特征在于,步骤 2) 中所述频谱特征参数包括主频范围,中心频率和相角特征。

用于现场冲击电压下局部放电测量装置及其信号处理方法

技术领域

[0001] 本发明属于 GIS 设备绝缘状况检测技术领域,特别是涉及一种用于现场冲击电压下局部放电测量装置及其信号处理方法,适用于超高压 (750kV)GIS 设备在现场进行的冲击电压下局部放电信号处理。

背景技术

[0002] 气体绝缘全封闭式组合电器设备 (Gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS) 在制造、运输、储存和安装中可能发生的问题有零部件松动、脱落,电极表面刮伤或安装错位引起的电极表面缺陷,导电微粒进入或工具遗忘在装置内等。上述意外因素均会导致绝缘故障,相关统计数据表明,GIS 的绝缘事故中约有 2/3 发生在未进行过现场耐压试验的设备上。现场耐压试验的目的是检查总体装配的绝缘性能是否完好,因此 GIS 在现场组装后必须进行现场耐压试验。

[0003] 近年来,局部放电测量已成为 GIS 绝缘监测的重要手段。GIS 在作现场交流耐压试验的同时测量局部放电,对发现现场安装完成后设备的绝缘缺陷发挥了重要作用,国家标准 (GB) 和电力行业标准 (IEC) 均对 GIS 的现场试验及局部放电检测方法给出了具体的规定,可以说对 GIS 进行工频耐压及局部放电测量的方法和技术已达到比较成熟的阶段。

[0004] 然而,随着设备电压等级的不断提高,对于高电压等级设备的工频耐压试验与冲击耐压试验的等效性已不能满足要求。研究发现, SF₆ 气体中的隐患对于不同的电压波形其灵敏度不同。工频耐压试验对检查介质污染、SF₆ 气体受潮等引起的绝缘击穿相当灵敏,但对于金属表面有划痕,导体表面状态不良等灵敏度不高,隐患不易发现。而在冲击耐压试验下,由于极不均匀电场击穿时电晕稳定化作用差,因此,冲击试验对检查固定金属微粒、零件遗留在 GIS 设备内部、屏蔽罩安装不当等情况非常有效。因此 GIS 设备虽然做过交流耐压试验还不足以发现所有隐患。此外,对于某些缺陷,工频电压虽然可以激发、暴露缺陷但由于其持续性的特点也同时会使缺陷进一步扩大,从而给设备造成更大的损伤。冲击电压由于其一过性的特点,在激发、暴露缺陷的同时,并不会扩大缺陷。因此根据相关规程规定,针对 GIS 设备现场交接试验进行冲击电压特别是操作冲击电压试验并在本项目研究的基础上同时进行冲击电压下局部放电的检测以便更有效地发现缺陷就是一个迫切需要解决的问题。本方法的提出的另一个有利条件是 IEC60060-3 对电力设备做现场冲击耐压试验所使用的雷电冲击、操作冲击波形做了明确规定,推荐的波形具有产生效率高因而适合现场使用又具有和实验室相应波形的一致性因而便于对结果进行比较的优点,这也是本方法的提出与以后实施的重要标准基础。基于以上,在进行 GIS 现场冲击电压试验的同时进行局部放电测量对于及时发现内部隐患,确保设备安全运行具有重要的实际意义。因此,冲击电压下局部放电测量技术具有重要的工程应用价值。

[0005] 目前对现场进行冲击电压下局部放电检测没有成熟的方法,也缺乏相关试验标准,基于此本方法提出在标准的冲击耐压试验的同时进行局部放电检测,使用罗格夫斯基线圈的方式从 GIS 试品的接地线上取得位移电流信号,并通过一些信号处理技术提取局部

放电信号。

[0006] 本技术的提出对于电力设备的绝缘安全和系统的稳定运行都有重大意义。

发明内容

[0007] 本发明的目的在于克服上述现有技术的缺点,提供一种用于现场冲击电压下局部放电测量装置及其信号处理方法,该装置通过罗氏线圈检测 GIS 接地线上的位移电流信号,不仅现场测量回路搭建简单,而且配合信号处理方法的测量方式,使操作更容易,而且能够保障人员及设备的安全。

[0008] 本发明的目的是通过以下技术方案来解决的:

[0009] 这种用于现场冲击电压下的局部放电测量装置,包括电流传感器、分接头,电压衰减器,电压瞬态抑制器以及后端处理及显示系统,所述电流传感器的输出端通过积分电阻和同轴电缆连接至分接头的输入端,所述分接头的输出端一路连接至电压衰减器的输入端,另一路连接至电压瞬态抑制器的输入端;所述电压衰减器和电压瞬态抑制器的输出端分别连接至后端处理及显示系统上。

[0010] 上述后端处理及显示系统为工控机。

[0011] 上述电流传感器采用罗氏线圈电流传感器,所述罗氏线圈电流传感器穿套在冲击电压耐压试验回路的待测 GIS 设备接地线上,将接地电流信号转化为电压信号,并使用同轴电缆将电压信号传输至后级的信号处理系统。

[0012] 上述罗氏线圈电流传感器采用百兆级工作频率及高初始磁导率的 Ni-Zn 磁芯。

[0013] 基于上述用于现场冲击电压下的局部放电测量装置,本发明提供一种信号处理方法,包括以下步骤:

[0014] 1) 后端处理及显示系统通过数据采集卡分别采集电压衰减器和电压瞬态抑制器(TVS)输出的电压信号,并对两路电压信号分别进行离散小波变换,使用变比例萎缩去噪方法对离散小波进行处理,得到去噪后的局部放电脉冲信号;

[0015] 2) 对步骤 1) 得到的局部放电脉冲信号进行处理,提取其基于小波变换的特征信息,结合统计信息进行数据库的建立以及放电脉冲类型识别:

[0016] 首先对去噪后的局部放电脉冲信号进行三层小波包分解,分别提取第三层从低频到高频多个频率成份的信号特征,得到小波包分解系数 X_{3i} ,对小波包分解系数 X_{3i} 重构,以 S_{3i} 表示 X_{3i} 的重构信号, i 取值为 $0 \sim 7$,由于信号频带较宽,仅对第三层进行分析,总信号 S 可以表示为:

$$[0017] \quad S = \sum_{i=0}^7 S_{3i},$$

[0018] 然后对去噪后的局部放电脉冲信号进行快速傅里叶变换,得到局部放电信号的频谱特征参数;

[0019] 最后以 S_{3i} 对局部放电信号的频谱特征进行分类,构造特征向量,确定正常与局放故障状态下,特征向量的特征值及容差范围,设向量的元素 E_{3i}/E 的特征值为 C_j ,容差范围是 ΔC_j :

$$[0020] \quad C_j = \frac{\sum_{k=1}^n x_{jk}}{n},$$

[0021] n 为试验次数; x_{jk} 为小波分解系数 X_{3i} 中的元素, 然后依照下式对 C_j 进行归一化处理, 得到归一化矩阵 T' :

[0022] $T' = [C_0/C, C_1/C, C_2/C, C_3/C, C_4/C, C_5/C, C_6/C, C_7/C]$;

[0023] C_j 的容差范围 $\Delta C_j = K \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{jk} - C_j)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$, 其中 $K = 3, 4, 5$

[0024] 同样, 也对容差 ΔC_j 进行归一化处理, 得到归一化矩阵 $\Delta C'$:

[0025] $\Delta C' = [\Delta C_0/C, \Delta C_1/C, \Delta C_2/C, \Delta C_3/C, \Delta C_4/C, \Delta C_5/C, \Delta C_6/C, \Delta C_7/C]$

[0026] 3) 将步骤 1) 和 2) 中得到的特征参数统计到数据库中, 得到冲击电压下局部放电次数、脉冲幅值、放电脉冲时间序列参数、缺陷局部放电频率特征以及不同电压等级下的放电概率信息。

[0027] 以上步骤 1) 中, 所述的使用变比例萎缩去噪方法对离散小波进行处理的方法为:

[0028] (1) 首先在信号小波系数高斯分布的前提下, 基于最小均方差 MSE 得到原始小波系数 X 的估计为 Y 的函数, 记为: $X = h(Y)$, 其均方误差表示为: $MSE = E(X - h(Y))^2$;

[0029] (2) 使用线性回归的方法推导出原始小波系数 X 的比例估计:

[0030] 设 X, Y 的数学期望分别是 μ_X, μ_Y , 标准差分别是 σ_X, σ_Y , X 与 Y 的相关系数是 r , X 与 Y 的线性关系为: $\tilde{X} = h(Y) = a + bY$, 则最小均方差 $MSE = \min \{E(X - (a + bY))^2\}$; 由最佳

线性预测得到: $h(Y) = \mu_X + r \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} (Y - \mu_Y)$,

[0031] 其最小均方误差 $MMSE = \sigma_X^2 (1 - r^2)$; 式中 r 是 X 与 Y 的相关系数,

$r = \frac{\sigma_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_n^2}}$, 因此 $MMSE = \frac{\sigma_x^2 \sigma_n^2}{\sigma_x^2 + \sigma_n^2}$;

[0032] 噪声方差估计 σ_n 采用小波去噪中值估计法得到:

[0033] $\sigma_n = M(|Y(i, j)|) / 0.6745, Y(i, j) \in HH_1$

[0034] σ_x 的值根据局部噪声尺度变化而设定, 采用基于局部自适应一维窗口的极大似然法和最大后验概率估计法计算 σ_x 。所述 σ_x 根据下式计算:

[0035]

$$\sigma_x^2(i) = \underset{\sigma^2 \geq 0}{\operatorname{argmax}} \prod_{(n) \in N(i)} p(Y(n) | \sigma^2)$$

[0036] $= \max(0, \frac{1}{M_{(n)}} \sum_{(n) \in N(i)} Y^2(n) - \sigma_n^2)$

[0037] 式中 $p(Y(n) | \sigma^2)$ 为服从零均值。

[0038] 以上步骤 2) 中所述频谱特征参数包括主频范围, 中心频率和相角特征。

[0039] 本发明具有以下有益效果:

[0040] (1) 本发明用于现场冲击电压下的局部放电测量装置是通过罗氏线圈检测 GIS 接地线上的位移电流信号, 现场测量回路搭建简单, 该种测量方式不仅操作容易, 而且保障了人员及设备的安全。

[0041] (2) 本发明在对罗氏线圈输出的较大幅值的电压信号进行前期硬件处理时, 采用衰减器和电压瞬态抑制器同时处理的方式, 不但能够将高幅值的电压信号处理至后续信号处理装置所允许的范围内, 而且能够有效获取接地电流信号的波形, 有效凸显接地电流信

号上叠加的局部放电脉冲信号。

[0042] (3) 本发明提供的后级信号处理方法能够有效的去除现场环境下的背景噪声, 滤除位移电流信号, 提取局部放电脉冲信号, 并能够分析局部放电脉冲信号的特征参数及统计信息, 建立冲击电压下局部放电数据库。

[0043] 综上所述, 本发明能够有效提高对 GIS 设备的绝缘状态评估及判断的效果, 对超高压等级的电力系统安全运行有极其重大的意义。

附图说明

[0044] 图 1 为本发明的设计原理图;

[0045] 图 2 为位移电流信号与局部放电信号叠加仿真结果;

[0046] 图 3 为本发明在一台 800kV GIS 上的接线示意图;

[0047] 图 4 为使用本方法对冲击电压下局部放电测量的结果示例;

[0048] 图 5 为冲击电压下局部放电次数、脉冲幅值、放电脉冲时间序列参数、缺陷局部放电频率特征以及不同电压等级下的放电概率信息, 其中 (a) 表示的是待提取局部放电脉冲的放电次数、脉冲幅值及时间序列参数示例; (b) 表示的是通过多次试验得到的放电概率随施加电压变化的统计信息示例。

具体实施方式

[0049] 下面结合附图对本发明做进一步详细描述:

[0050] 参见图 1, 这种用于现场冲击电压下的局部放电测量装置, 包括电流传感器、分接头, 电压衰减器, 电压瞬态抑制器 TVS 以及后端处理及显示系统。在本发明中, 尽量选择测量频带较宽, 测量电流较大的电流传感器, 这样才能够将高频的局部放电信号从 μs 级的位移电流中提取出来, 并尽量保证电流传感器的灵敏度满足测量要求。本发明的较佳实施例中, 电流传感器选用罗氏线圈电流传感器, 此传感器采用百兆级工作频率及高初始磁导率的 Ni-Zn 磁芯。将罗氏线圈电流传感器穿套在冲击电压耐压试验回路的待测 GIS 设备接地线上, 将接地电流信号转化为电压信号, 并使用同轴电缆将电压信号传输至后级的信号处理系统。具体连接关系为: 电流传感器的输出端通过积分电阻和同轴电缆连接至分接头的输入端, 分接头的输出端一路连接至电压衰减器的输入端, 另一路连接至电压瞬态抑制器 TVS 的输入端。电压衰减器和电压瞬态抑制器 TVS 的输出端分别连接至后端处理及显示系统上。图 3 所示的是以现场一台 800kV GIS 为例, 冲击电压下局部放电测量的安装示意图, 将高频电流传感器穿套在 GIS 的接地线上, 并用匹配 50Ω 电缆将信号传入以上所述的由电压传感器和 TVS 组成的信号处理系统。

[0051] 上述的电压衰减器和电压瞬态抑制器的选择采用仿真计算的方法得到:

[0052] (1) 输出电压为单位值时试品电容 $C = 1nF$ 上产生的位移电流根据位移电流计算公式 (1), 得标准雷电波在试品电容 $C = 1nF$ 上产生的位移电流数学表达式如式 (2) 所示:

$$[0053] \quad i = C \frac{du}{dt} \quad (1)$$

$$[0054] \quad I = C \times 1.03725 \times (2468900 \times \exp(-2468900t) - 14659 \times \exp(-14659 \times t)) \quad (2)$$

[0055] 仿真求得输出电压 U 为单位值时在试品电容 C 上产生的位移电流 I

[0056] 的最大幅值为 2.5kA 左右,其频率分布主要为 0 ~ 10MHz。

[0057] (2) 典型局放脉冲仿真

[0058] 局放脉冲通常采用以下四种函数进行仿真：

[0059] 单指数衰减形式：

$$[0060] \quad y_1(t) = Ae^{-t/\tau} \quad (3)$$

[0061] 双指数衰减形式：

$$[0062] \quad y_2(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \quad (4)$$

[0063] 单指数衰减振荡形式：

$$[0064] \quad y_1(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(2\pi f_c t) \quad (5)$$

[0065] 双指数衰减振荡形式：

$$[0066] \quad y_2(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(2\pi f_c t) \quad (6)$$

[0067] 式中： τ 为衰减系数， f_c 为振荡频率， A 为脉冲幅值。

[0068] (3) 位移电流叠加局放脉冲

[0069] 将输出电压 U 设为 1kV 时再进行位移电流与脉冲信号的叠加（假设四种局放脉冲分别发生对应于位移电流的位置为 $1\mu s$ 、 $2\mu s$ 、 $3\mu s$ 和 $4\mu s$ 处），结果如图 4 所示。

[0070] 实际 GIS 试品做耐压试验时，试品上所加电压远远大于 1kV，这里假设试品上电压为 1000kV，而局放脉冲幅值 A 仍然采用单位值 1V，则在此电压下位移电流叠加局放脉冲，局部放电信号也同时衰减 1000 倍。这样，局部放电信号将湮没在现场的背景噪声中。

[0071] (4) 电压瞬态抑制器 TVS 的选择

[0072] 局部放电信号相对位移电流信号较小，选择通流较大，钳制电压 较低的 TVS 即可满足需要，在以上条件下选择型号为 1.5KE6.8CA 的 TVS，其钳位电压为 10.5V，最大通流为 150A。

[0073] 图 4 所示的是以现场一台 800kV GIS 为例，使用本方法测得的局部放电测量结果，图中黄色线表示通过衰减器后的信号，蓝色线表示通过 TVS 后的信号。

[0074] 在本发明的较佳实施例中，后端处理及显示系统采用工控机实现。

[0075] 本发明还提出的用于现场冲击电压下的局部放电测量装置的后端信号处理方法，包括以下步骤：

[0076] 1) 后端处理及显示系统通过数据采集卡分别采集电压衰减器和电压瞬态抑制器 TVS 输出的电压信号，并对两路电压信号分别进行离散小波变换，使用变比例萎缩去噪方法对离散小波进行处理，得到去噪后的局部放电脉冲信号；所述的使用变比例萎缩去噪方法对离散小波进行处理的方法为：

[0077] (1) 首先在信号小波系数高斯分布的前提下，基于最小均方差 MSE 得到原始小波系数 X 的估计为 Y 的函数，记为： $X = h(Y)$ ，其均方误差表示为： $MSE = E(X-h(Y))^2$ ；

[0078] (2) 使用线性回归的方法推导出原始小波系数 X 的比例估计：

[0079] 设 X 、 Y 的数学期望分别是 μ_X 、 μ_Y ，标准差分别是 σ_X 、 σ_Y ， X 与 Y 的相关系数是 r ， X 与 Y 的线性关系为： $\tilde{X} = h(Y) = a + bY$ ，则最小均方差 $MSE = \min \{E(X-(a+bY))^2\}$ ；由最佳线性预测得到： $h(Y) = \mu_X + r \frac{\sigma_X}{\sigma_Y}(Y - \mu_Y)$ ，

[0080] 其最小均方误差 $MMSE = \sigma_X^2(1-r^2)$ ；式中 r 是 X 与 Y 的相关系数，

$$r = \frac{\sigma_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_n^2}}, \text{ 因此 } MMSE = \frac{\sigma_x^2 \sigma_n^2}{\sigma_x^2 + \sigma_n^2};$$

[0081] 噪声方差估计 σ_n 采用小波去噪中值估计法得到：

$$[0082] \quad \sigma_n = M(|Y(i, j)|) / 0.6745, Y(i, j) \in HH_1$$

[0083] σ_x 的值根据局部噪声尺度变化而设定, 采用基于局部自适应一维窗口的极大似然法和最大后验概率估计法计算 σ_x 。

[0084] 所述 σ_x 根据下式计算：

[0085]

$$\sigma_x^2(i) = \underset{\sigma^2 \geq 0}{\operatorname{argmax}} \prod_{(n) \in N(i)} p(Y(n) \sigma^2)$$

$$[0086] \quad = \max(0, \frac{1}{M_{(n)}(n) \in N(i)} \sum Y^2(n) - \sigma_n^2)$$

[0087] 式中 $p(Y(n) \sigma^2)$ 为服从零均值。

[0088] 2) 对步骤 1) 得到的局部放电脉冲信号进行处理, 提取其基于小波变换的特征信息, 结合统计信息进行数据库的建立以及放电脉冲类型识别：

[0089] 首先对去噪后的局部放电脉冲信号进行三层小波包分解, 分别提取第三层从低频到高频多个频率成份的信号特征, 得到小波包分解系数 X_{3i} , 对小波包分解系数 X_{3i} 重构, 以 S_{3i} 表示 X_{3i} 的重构信号, i 取值为 $0 \sim 7$, 由于信号频带较宽, 仅对第三层进行分析, 总信号 S 可以表示为：

$$[0090] \quad S = \sum_{i=0}^7 S_{3i},$$

[0091] 然后对去噪后的局部放电脉冲信号进行快速傅里叶变换, 得到局部放电信号的频谱特征参数, 该频谱特征参数包括主频范围, 中心频率和相角特征。

[0092] 最后以 S_{3i} 对局部放电信号的频谱特征进行分类, 构造特征向量, 确定正常与局放故障状态下, 特征向量的特征值及容差范围, 设向量的元素 E_{3i}/E 的特征值为 C_j , 容差范围是 ΔC_j ：

$$[0093] \quad C_j = \frac{\sum_{k=1}^n x_{jk}}{n},$$

[0094] n 为试验次数; x_{jk} 为小波分解系数 X_{3i} 中的元素, 然后依照下式对 C_j 进行归一化处理, 得到归一化矩阵 T' ：

$$[0095] \quad T' = [C_0/C, C_1/C, C_2/C, C_3/C, C_4/C, C_5/C, C_6/C, C_7/C];$$

$$[0096] \quad C_j \text{ 的容差范围 } \Delta C_j = K \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{jk} - C_j)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ 其中 } K = 3, 4, 5$$

[0097] 同样, 也对容差 ΔC_j 进行归一化处理, 得到归一化矩阵 $\Delta C'$ ：

$$[0098] \quad \Delta C' = [\Delta C_0/C, \Delta C_1/C, \Delta C_2/C, \Delta C_3/C, \Delta C_4/C, \Delta C_5/C, \Delta C_6/C, \Delta C_7/C]$$

[0099] 3) 将步骤 1) 和 2) 中得到的特征参数统计到数据库中, 得到冲击电压下局部放电次数、脉冲幅值、放电脉冲时间序列参数、缺陷局部放电频率特征以及不同电压等级下的放电概率信息, 如图 5 所示, 其中图 5(a) 表示的是待提取局部放电脉冲的放电次数、脉冲幅值及时间序列参数示例, 图 5(b) 表示的是通过多次试验得到的放电概率随施加电压变化的

统计信息示例。

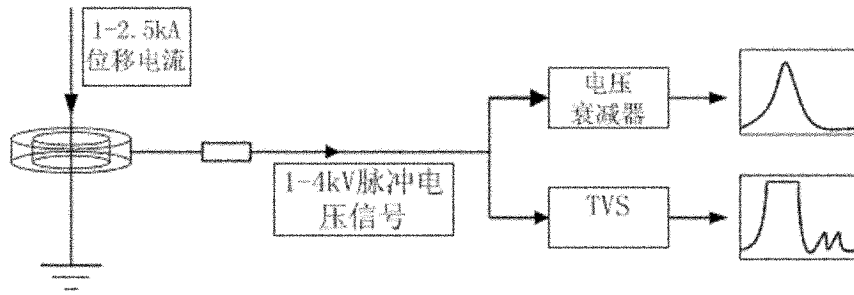


图 1

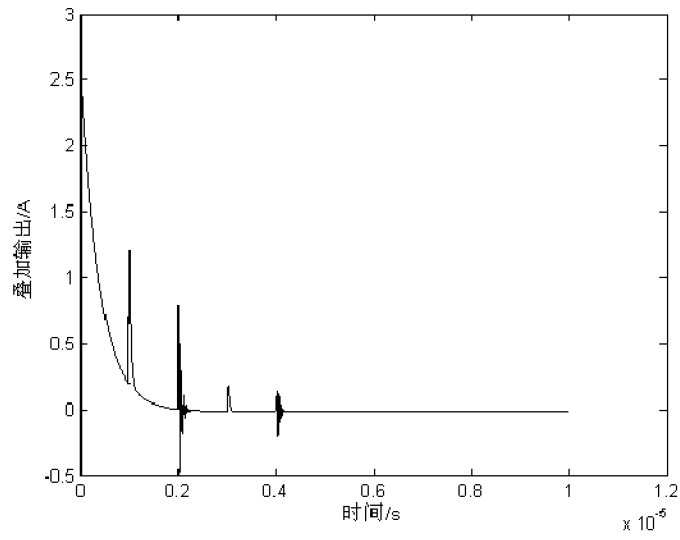


图 2

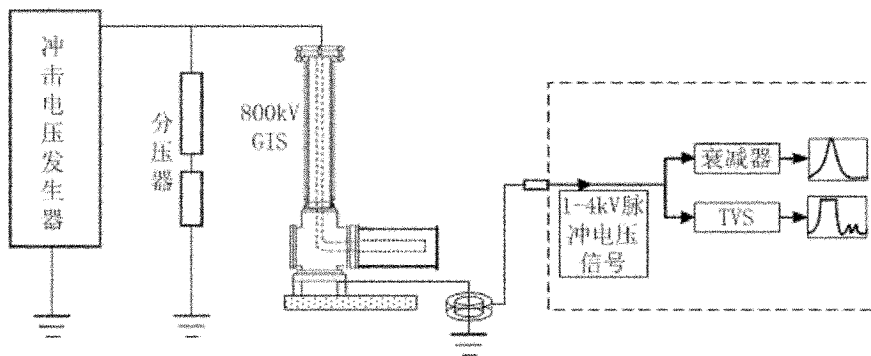


图 3

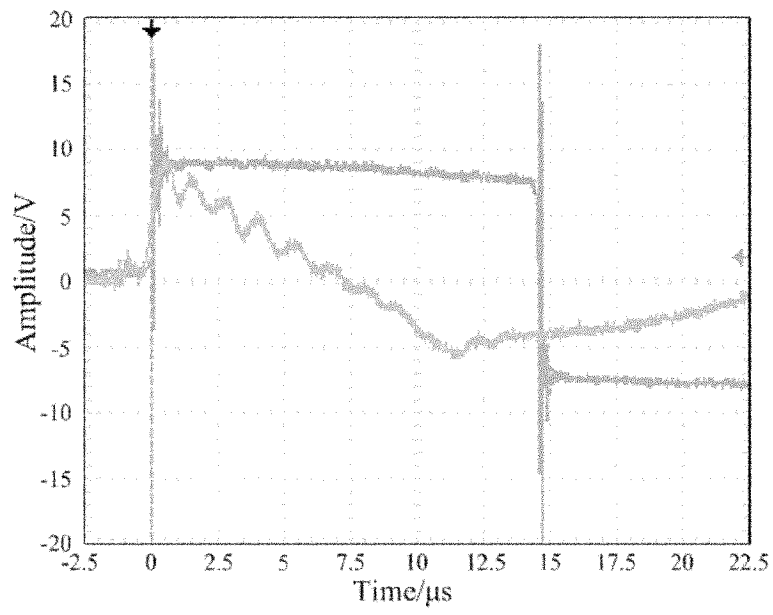


图 4

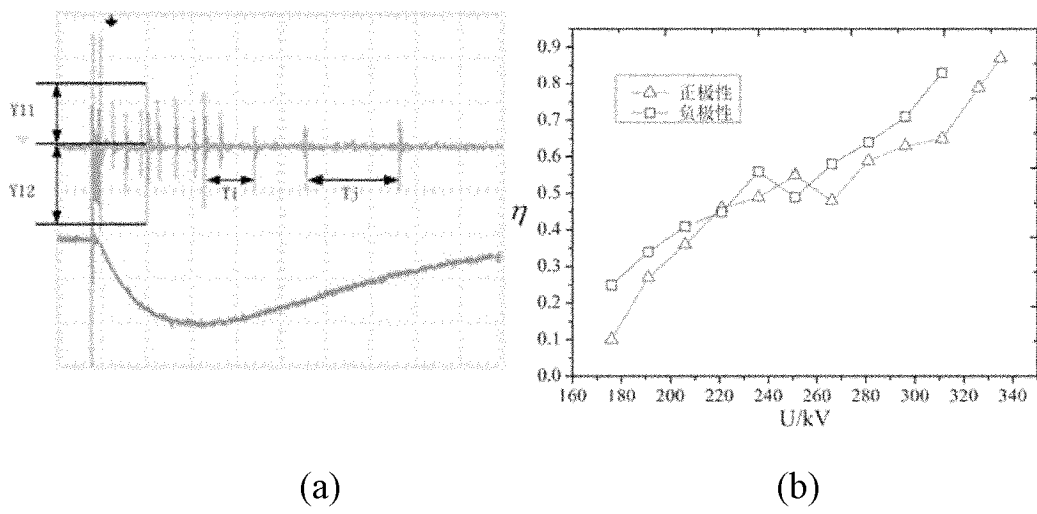


图 5