

基于 FFT 和 ITD 的绝缘子泄漏电流去噪

黄建才, 朱永利

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 采用快速傅里叶变换(FFT)实现泄漏电流中周期分量和非周期分量的分离,给出了分离 2 种分量时的阈值。采用改进的固有时间尺度分解(ITD)方法实现非周期分量的去噪,给出了采用 ITD 去噪时的阈值。引入两端延拓解决了 ITD 的端点效应问题,提高了采用 ITD 分析的准确性。以高压试验中采集到的绝缘子泄漏电流为处理对象,采用所提方法对其进行了去噪。结果表明:所提的方法既能平滑信号,又能有效保留特征数据。

关键词: 绝缘子; 泄漏电流; 傅里叶变换; 固有时间尺度分解; 噪声

中图分类号: TM 835.4

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.018

0 引言

绝缘子泄漏电流含有丰富的特征信息,通过分析泄漏电流能够获得绝缘子的状态数据。然而,受电磁场和采集设备的影响,泄漏电流中极易混入噪声^[1-2]。文献[3]报道了希腊学者对变电站绝缘子进行长期现场监测所取得的波形数据,通过列举白噪声、冲击噪声和单点噪声说明了噪声对泄漏电流影响较大;文献[4-11]也报道了泄漏电流中存在大量白噪声的事实。

当前公开发表的关于绝缘子泄漏电流去噪的文献存在一定的缺陷。文献[3]给出了冲击噪声和单点噪声的去噪方法,但并没有讨论去除其他噪声的问题。文献[4-7]虽然提出采用小波变换去除泄漏电流中的噪声,但小波去噪需要根据实际信号选择最优小波基,不具备自适应性,且可能会消除幅值较小的周期分量。文献[8]采用自适应对消的方法消除泄漏电流中的噪声,其原理是:用 2 个传感器分别采集噪声信号和含噪声的泄漏电流信号,通过自适应算法实现去噪。但输电线路绝缘子数量很大,该方法增加了经济成本,安装也不方便。文献[9]采用经验模式分解对泄漏电流进行去噪,但该方法的计算量很大,严重束缚了应用的广泛性,且可能会去除部分周期分量。

绝缘子泄漏电流包含可作为特征的周期分量^[12-16]和非周期分量^[17-19],去噪时应予以保留。快速傅里叶变换(FFT)能够提取泄漏电流的周期分量,进而实现周期分量和非周期分量的分离。固有时间尺度分解(ITD)^[20]可以自适应地将任意复杂信号分解为若干具有实际物理意义的固有旋转分量 PRC (Proper Rotation Component) 和一个单调趋势项(余量)。与

小波变换相比,ITD 方法具有自适应性,避免了选择小波基的困扰;与 EMD 方法^[21]和 EEMD 方法^[22]相比,ITD 方法的计算速度大幅提高,为分析信号提供了一种新的途径^[23-24]。为了去噪的同时有效保留泄漏电流特征数据,研究 FFT 和 ITD 相结合的去噪方法具有现实意义。

本文采用 FFT 方法分离周期分量和非周期分量,给出分离这些分量时的阈值。采用改进 ITD 对非周期分量进行去噪,引入两端延拓解决了 ITD 存在的端点效应;给出了采用 ITD 去噪时的阈值。

1 泄漏电流分析

1.1 试验设置

为了研究泄漏电流中的噪声,在高压试验室中进行绝缘子泄漏电流采集试验,接线原理如图 1 所示。图中,泄漏电流传感器采用电磁式电流互感器,分为 4 个档位,在软件端根据档位信息将采集到的数据转换成实际值;采用 FXBW₄-110/100/型大小伞复合绝缘子和 YDJY-900/150 型试验变压器。为了测量相对湿度,项目组开发了电容性湿度传感器,其湿度测量范围为 0~100%RH (RH 为相对湿度);温度测量范围为 -40~+100℃;湿度测量精度为 ±3.0%RH;温度测量精度为 ±0.4℃。为了控制试验中的相对湿度,设置了抽湿装置。

污秽模拟过程中,可溶性物质用 NaCl 模拟,不

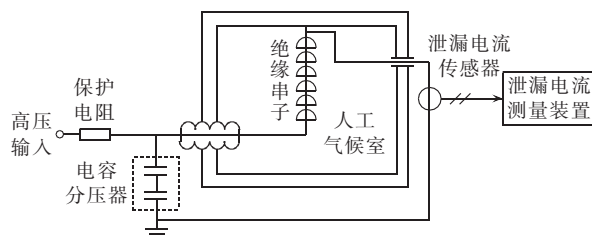


图 1 试验原理

Fig.1 Principle of test

收稿日期:2012-04-17;修回日期:2013-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60974125)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(60974125)

溶性物质用硅藻土模拟,污秽度为:

$$\rho_{\text{ESDD}} = 0.4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$\rho_{\text{NSDD}} = 0.2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$$

其中, ρ_{ESDD} 为等值附盐密度, ρ_{NSDD} 为灰密度。

将污秽均匀涂刷到清洁干净的绝缘子表面,放至干燥通风的地方约 24 h 后待用。

为了使污层能够充分受潮,并防止污层过饱和而导致污秽流失,试验中采取的措施有:在 20~25 °C 范围内控制人工气候室内相对湿度为 85%~90%;将绝缘子放入人工气候室,经过长时间迁移,并连续起雾 6 h 后,以 1 kV/s 的速率加压。

当绝缘子施加电压时,外观上观察不到放电现象。随着电压的升高,泄漏电流增大,高压端绝缘子出现蓝紫色局部电晕放电;继续发展,紫色的火花放电变成粉红色电弧放电,随后变成间歇性白弧;进入临闪阶段,白弧迅速连通,白弧与接地端的小弧连通完成全面闪络。

1.2 试验数据

绝缘子泄漏电流的噪声主要集中于安全区 ($<50 \text{ mA}$)^[7]。因此,采集试验中安全区泄漏电流进行噪声分析,采样率 $f_s = 10 \text{ kHz}$ 。图 2 是一段典型的安全区泄漏电流信号。由图 2 可以看出:泄漏电流呈现周期性的变化规律;泄漏电流信号并不平滑,存在一定量的噪声;存在突变值,比如 300 ms 和 350 ms 之间(具体位置为 333 ms 处)存在突变值。

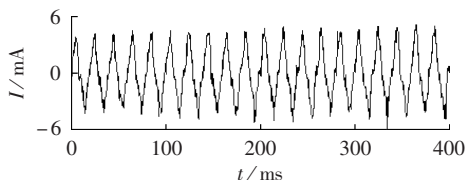


图 2 原始绝缘子泄漏电流

Fig.2 Original insulator leakage current

2 去噪方法

2.1 去噪步骤

为了去除绝缘子泄漏电流中噪声,同时有效保留周期分量和非周期分量特征,采用 FFT 和 ITD 相结合的去噪方法。具体步骤如下:

a. 采用 FFT 分离周期分量和非周期分量,并去除周期分量中的固有频率干扰(详见 2.2 节);

b. 采用改进的 ITD 方法去除非周期分量的噪声(详见 3.3 节);

c. 由 **a** 中的周期分量和 **b** 中的去噪结果重构得到最终的波形。

2.2 分离周期分量和非周期分量

2.2.1 阈值的设置

绝缘子泄漏电流周期分量对于分析泄漏电流具

有重要作用,但其分布较为广泛,且各周期成分随着泄漏电流的发展而发生变化^[12-16]。因此,此处采用阈值的方法选择周期分量,即预先设置阈值,泄漏电流经傅里叶变换之后,将幅度大于该阈值的傅里叶系数分离出来,剩下的即为非周期成分。

阈值的设置需要判断原始泄漏电流经傅里叶变换后发生了怎样的变化。因此,将绝缘子泄漏电流的组成用式(1)表示如下:

$$x(n) = s(n) + e(n) + g(n) + h(n) \quad (1)$$

其中, $n = 1, 2, \dots, N$; N 为离散信号的长度; s 为泄漏电流中的离散周期分量; e 为固有周期频率噪声; g 为离散白噪声; h 为放电引起的局部突变值。

式(1)中的 $g(n)$ 可以用离散高斯白噪声近似。由离散高斯白噪声和离散傅里叶变换的性质可知,离散高斯白噪声序列由离散傅里叶变换到频域后,幅度谱仍为离散高斯白噪声序列。

式(1)中 $h(n)$ 在波形上可表现为 2 种情况:

a. 窗口内某点处幅值的绝对值远高于其他点处的绝对值;

b. 窗口内有限点处幅值的绝对值远高于其他点处的绝对值。

当为情况 **a** 时,为不失一般性,记 n_i 处的绝对值远高于其他点处的绝对值,为了简化处理,可令 n_i 之外的点处的幅值为 0。根据傅里叶变换的过程可知:

$$H(k) = \sum_{n=1}^N h(n) e^{-j2\pi kn/N} = h(n_i) e^{j2\pi kn_i/N} \quad (2)$$

因此, $|H(k)| = |h(n_i)|$, 即 $h(n)$ 经傅里叶变换之后的幅度为一常数。

当为情况 **b** 时,可令有限点处幅值的绝对值远大于其他点处幅值的绝对值,这些点的分布不呈现周期性且数量有限。为了简化处理过程,令其他点处的幅值为 0。根据傅里叶变换的过程可知,此时, $|H(k)|$ 的取值根据有限点处的取值在一定范围内波动。

由上分析可知,式(1)中的 $g(n)$ 和 $h(n)$ 经傅里叶变换之后,幅度均分布在一定范围内,可通过合适的阈值将其分离出来。

从幅度谱中分离非周期分量 $g(n)$ 和 $h(n)$ 的阈值可借鉴小波阈值进行设置。具体原因如下。

a. $g(n)$ 变换到幅度谱后仍遵循白噪声性质,这与小波去噪中设置阈值时具有相似的背景。按照小波去噪的原理,白噪声变换到小波系数上的成分仍然具有白噪声的性质。据此,去除各系数中白噪声的固定阈值函数为 $\text{thr} = \sqrt{2 \ln K}$, K 是信号长度。小波去噪过程中,往往需要估计白噪声的方差,其计算方法为:

$$\sigma = \text{median} |d_j| / 0.6745$$

其中, d_j 是第 j 个尺度的细节, median 表示取中值。即采用固定阈值去除小波系数中的白噪声时,常通过阈值 $T = \text{thr} \times \sigma$ 对各细节进行量化。正是由于上述原因,可以借鉴小波阈值设置分离 $g(n)$ 时的阈值。

b. 由于式(1)中的非周期分量除了 $g(n)$ 还有 $h(n)$, 所以,不能照搬小波阈值来分离二者。

为了分离 $g(n)$ 和 $h(n)$, 本文在小波阈值的基础上引入了调节因子 c , 具体计算过程见式(3):

$$\begin{aligned} T'_c &= c \times \text{thr} \times \sigma' \\ \sigma' &= \text{median} |X(n)| / 0.6745 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, 调节因子 c 可控制周期分量的个数; $X(n)$ 为泄漏电流 $x(n)$ 的傅里叶系数。

记 $\text{NUM}(T'_c)$ 为取阈值 T'_c 时从幅度谱中分离出的周期分量中不为 0 的幅值的个数。经过大量试验发现, 当满足式(4)时分离效果最好。

$$\text{NUM}(T'_c) \approx 100 \quad (4)$$

此时, 既可有效分离非周期成分, 又可有效保留周期分量。

2.2.2 消除固有频率噪声

在干燥情况下采集的绝缘子泄漏电流主要含有基波分量, 在潮湿环境下污秽绝缘子会出现谐波分量。因此, 可取干燥情况下的绝缘子泄漏电流中明显的非基波分量作为固有频率干扰, 并依此对潮湿环境下采集泄漏电流做截断处理, 以消除干扰。

2.2.3 分离周期分量和非周期分量的步骤

综合 2.2.1 节和 2.2.2 节, 采用 FFT 分离绝缘子泄漏电流中周期分量和非周期分量的步骤如下。

a. 采用 FFT 将绝缘子泄漏电流变换到频域, 得到傅里叶系数, 进而计算出幅度谱。

b. 按照 2.2.1 节所述设置阈值, 筛选傅里叶系数, 即幅度大于预设阈值的傅里叶系数为周期分量, 反之, 为非周期分量。

c. 对于提取的周期分量, 判断基波周期是否和电压周期一致; 若偏离较大, 则认为是故障噪声, 丢弃该信号; 若一致, 则按照 2.2.2 节所述方法去除周期分量中的固有频率噪声, 剩下的成分为有用的周期成分, 并将其变换到时域, 得到有用的周期分量的时域表示。

d. 将步骤 **b** 提取的非周期成分通过逆傅里叶变换, 得到非周期成分的时域表示。

2.3 非周期分量的去噪

2.3.1 ITD 端点效应的解决

虽然与小波变换相比, ITD 方法不必选择母小波; 与 EMD 方法和 EEMD 方法相比, ITD 方法计算速度大为提高, 但是, ITD 方法还存在端点效应。图 2 的绝缘子泄漏电流经一次 ITD 的结果如图 3 所示。图 3 中的 PRC_1 最右端有清晰的突变值, 但图 2

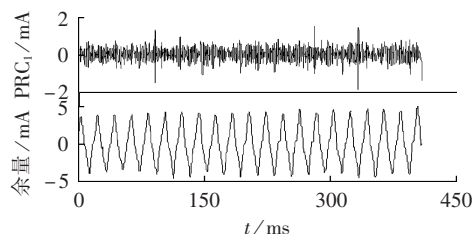


图 3 泄漏电流经 ITD 方法分解后的结果

Fig.3 Result of leakage current decomposition by ITD

中原始信号的右端处并没有明显的突变。可见, PRC_1 的端点处反映的突变结果与原始信号并不一致, 产生的突变值是虚假信号, 即采用 ITD 对泄漏电流进行分解时, 得到的 PRC 和余量可能在端点处存在较大误差。为了便于讨论, 记这种现象为端点效应。

ITD 方法存在端点效应的原因是: 该方法在采用基线提取算子计算过程中(详见文献[20]), 根据相邻的 3 个极值点估算其中第 2 个极值点处的趋势值, 从而造成原始信号的 2 个端点处的值无法估算。解决 ITD 的端点效应的有效方法之一是对信号进行延拓, 扩展两端的数据点数。

绝缘子从受潮到发生闪络要经历一定的过程, 且泄漏电流在波形上表现为阶段性^[1,13], 因此, 可以认为泄漏电流在局部波形上具有相似性。本文采用信号中已有的相似数据段对信号两端进行延拓。

在延拓过程中, 采用欧氏距离表征数据段的相似程度。以左延拓为例, 具体如式(5)所示:

$$dt = \sum_{m=1}^{\text{length}(l)} [i(m) - l(m)]^2 \quad (5)$$

其中, i 和 l 为等长的不同数据段, l 为信号最左端一段数据, i 为信号中的一段数据; $\text{length}(l)$ 表示数组 l 的长度。选择所有 dt 中的最小值对应的 i , 并记其为 l 的最相似数据段。取该 i 左侧的 $\text{length}(i)$ 长的数据段对原始信号的左端进行延拓。由于 ITD 根据极值进行分解, 且泄漏电流至少包含基波信号, 为了保证延拓出来的数据至少包含一个极值点, 延拓时取 $\text{length}(i) = \text{length}(l) = \text{基波周期长度} / 2$ 。

右延拓与左延拓类似, 这里不再讨论。

按照上述方法对图 2 的波形进行两端延拓, 延拓结果见图 4。图 4 中 2 条虚线之间的部分是没有延拓时的波形(即为图 2 的波形)。由图 4 可以看出, 延拓出来的部分比较连续, 没有发生畸变, 说明

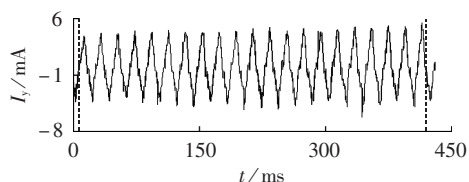


图 4 延拓后的泄漏电流

Fig.4 Leakage current extended at both ends

本文给出的延拓方法是有效的。

对图 4 的波形进行一次 ITD, 并去除延拓部分后的结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, PRC_i 的两端没有明显突出成分, 避免了图 3 中右端点处的虚假突变值。这说明, 所给出的方法极大改善了 ITD 存在的端点效应。

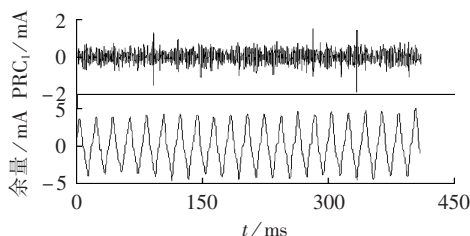


图 5 泄漏电流经改进 ITD 方法分解后的结果
Fig.5 Result of leakage current decomposition by improved ITD

2.3.2 ITD 去噪时的阈值

借鉴小波阈值的原理, 含噪声 PRC_i 的去噪阈值 T_i 的如式(6)所示:

$$T_i = \text{thr}_i \times \sigma_i \quad (6)$$

其中, 固定阈值函数 $\text{thr}_i = \sqrt{2 \ln N_i}$, N_i 为 PRC_i 的长度; $\sigma_i = \text{median} |\text{PRC}_i| / 0.6745$, 它表示 PRC_i 噪声方差的估计值。

为含噪声的 PRC_i 设置好阈值后, 需要对其进行量化以去除噪声。处理的方法主要有软阈值和硬阈值 2 种, 分别如式(7)、(8)所示:

$$\overline{\text{PRC}}_{i,j} = \begin{cases} 0 & |\text{PRC}_{i,j}| \leq T_i \\ \text{PRC}_{i,j} - T_i & |\text{PRC}_{i,j}| > T_i \end{cases} \quad (7)$$

$$\overline{\text{PRC}}_{i,j} = \begin{cases} 0 & |\text{PRC}_{i,j}| \leq T_i \\ \text{PRC}_{i,j} & |\text{PRC}_{i,j}| > T_i \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\text{PRC}_{i,j}$ 表示 PRC_i 中的第 j 个值。

2.3.3 去噪过程

根据 2.3.1 节和 2.3.2 节所述, 采用 ITD 方法对 2.2 节中得到的非周期分量进行去噪的过程如下:

- a. 按照 2.3.1 节所述对非周期分量进行延拓;
- b. 对延拓后信号进行 ITD, 得到若干 PRC 和 1 个余量;
- c. 去除各个 PRC 和余量中的延拓部分, 得到真实的 PRC 和余量;
- d. 按照 2.3.2 节所述对含噪声的 PRC 设置阈值, 并对各个 PRC 选择软阈值或者硬阈值进行量化;
- e. 对量化后的各个 PRC 和余量进行重构, 得到去噪后的结果。

3 去噪效果验证

为了验证所提去噪方法的有效性, 按照第 2 节所给的方法对图 2 的泄漏电流去噪。

首先, 采用 FFT 将图 2 的泄漏电流变换到频域,

其幅度谱如图 6 所示。

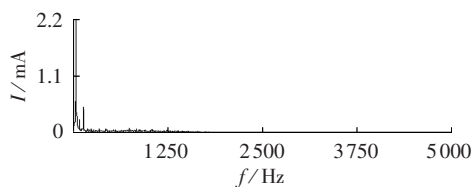


图 6 泄漏电流的幅频特性
Fig.6 Amplitude-frequency characteristic of leakage current

其次, 根据式(3)设置阈值提取周期分量。此处为了计算简单, 按照式(4)条件计算调节因子 c 时, 限定 c 取整数。当 $c=17$ 时, $\text{NUM}(T'_c)=108$; 当 $c=18$ 时, $\text{NUM}(T'_c)=98$ 。因此, 取 $c=18$ 。按照式(3)提取的周期分量的幅度谱如图 7 所示。图 6 中的固有频率噪声较弱, 在提取周期分量过程中被分离到了非周期分量中。

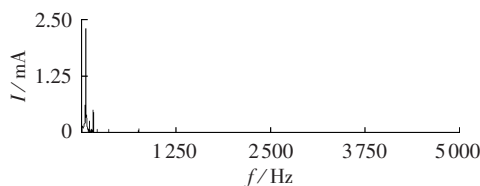


图 7 周期分量的幅频特性
Fig.7 Amplitude-frequency characteristic of periodic component

图 7 的时域波形如图 8 所示, 提取周期分量之后剩下的非周期分量如图 9 所示, 其包含了明显的突变值。

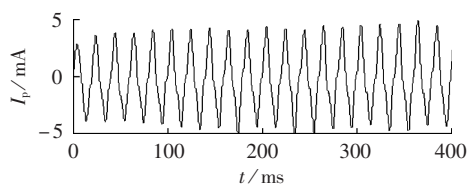


图 8 周期分量的时域波形
Fig.8 Time-domain waveform of periodic component

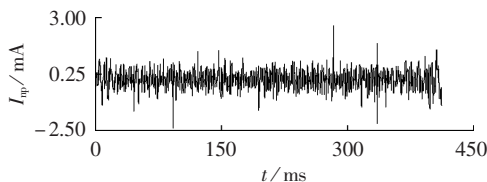


图 9 非周期分量的时域波形
Fig.9 Time-domain waveform of non-periodic component

对图 9 中的信号进行两端延拓, 并采用改进 ITD 方法分解 4 次, 结果如图 10 所示。

图 10 中的各个 PRC 均以噪声为主, 因此, 对其进行阈值量化处理。将量化后的 PRC 和余量重构, 结果如图 11 所示。

由图 8 和图 11 的信号重构得到最后的泄漏电流去噪结果, 如图 12 所示。

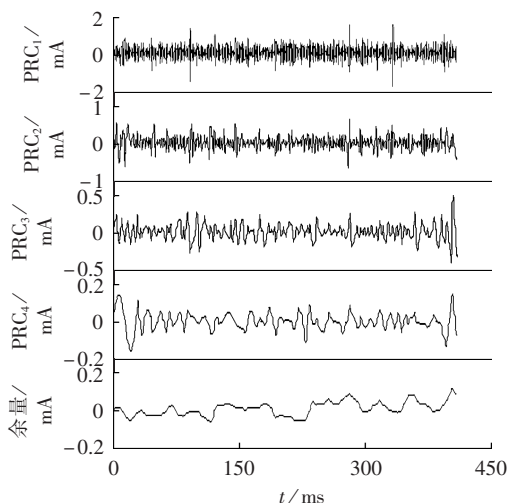


图 10 非周期分量经改进 ITD 方法分解的结果

Fig.10 Result of non-periodic component decomposition by improved ITD

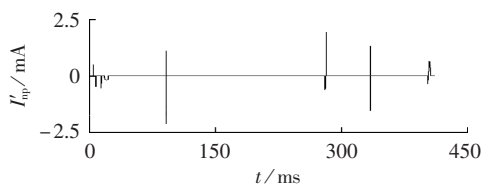


图 11 非周期分量经改进 ITD 去噪的结果

Fig.11 Result of non-periodic component denoising by improved ITD

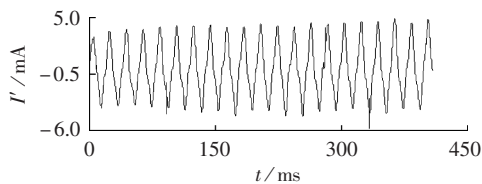


图 12 原始泄漏电流去噪结果

Fig.12 Denoising result of original leakage current

由图 12 可以看出,图 2 的泄漏电流经去噪后得到了极大的平滑。此外,去噪结果含有周期分量,反映了基波和谐波的分布;同时,还含有明显的突变值,反映了绝缘子放电的冲击结果。可见,文中所提的方法在平滑信号的同时,还能有效保留特征数据,其有效性得到了验证。

4 结论

a. 采用 FFT 分离绝缘子泄漏电流中周期分量和非周期分量,给出了分离时的阈值,该阈值能有效分离 2 种分量。

b. 通过两端延拓,解决了 ITD 存在的端点效应,提高了采用 ITD 分解时的准确性。

c. 给出了采用 ITD 去噪时的阈值,实现了泄漏电流中非周期分量的有效去噪。

d. 对高压试验中采集到泄漏电流的去噪结果表明,FFT 和 ITD 相结合的去噪方法既能平滑信号,又

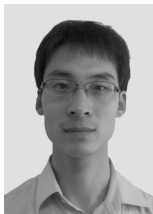
能有效保留特征数据。

参考文献:

- [1] 李璟延,姚陈果,胡建林,等. 染污绝缘子放电发展区段与污闪预警的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(13):8-14.
LI Jingyan,YAO Chenguo,HU Jianlin,et al. Experimental research on discharge development zones of contamination insulators and contamination flashover prewarning[J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(13):8-14.
- [2] 陈攀,孙才新,米彦,等. 一种用于绝缘子泄漏电流在线监测的宽带微电流传感器的特性研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):144-148.
CHEN Pan,SUN Caixin,MI Yan,et al. Research of broad bandwidth micro-current sensor character for insulator leakage current monitoring system[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(24):144-148.
- [3] PYLARINOS D,SIDERAKIS K,PYRGIOITI E,et al. Impact of noise related waveforms on long term field leakage current measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(1):122-129.
- [4] 赵汉表,林辉,廖胜蓝,等. 小波变换在绝缘子泄漏电流检测中的应用[J]. 高电压技术,2005,31(4):34-36.
ZHAO Hanbiao,LIN Hui,LIAO Shenglan,et al. New method for leakage current detection of insulators based on wavelet transform[J]. High Voltage Engineering,2005,31(4):34-36.
- [5] 贺博,林辉. 基于泄漏电流的污秽绝缘子闪络风险预测[J]. 高电压技术,2006,32(11):22-25.
HE Bo,LIN Hui. Method of flashover risk prediction for contaminated insulator based on leakage current[J]. High Voltage Engineering,2006,32(11):22-25.
- [6] 赵汉表,林辉,廖胜蓝,等. 基于高压侧测量的输电线路绝缘子泄漏电流在线监测系统[J]. 电力系统自动化,2004,28(22):78-82.
ZHAO Hanbiao,LIN Hui,LIAO Shenglan,et al. On-line monitoring system on measuring leakage current near HV side for electrical transmission line insulators[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(22):78-82.
- [7] 李璟延,司马文霞,姚陈果,等. 染污绝缘子安全区泄漏电流检测中去除信号干扰方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(5):85-89.
LI Jingyan,SIMA Wenxia,YAO Chenguo,et al. Application of de-noise methods used in monitoring leakage current in safety stage of contamination insulators[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(5):85-89.
- [8] 刘涤尘,夏利民,商志会. 自适应噪声对消应用于高压绝缘子泄漏电流检测的研究[J]. 武汉大学学报:工学版,2001,34(4):96-99.
LIU Dichen,XIA Limin,SHANG Zhihui. Study of adaptive noise cancellation used in measuring HV insulator's leakage current [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2001,34(4):96-99.
- [9] 孙金宝,朱永利,刘丽轻,等. 基于 EMD 的绝缘子泄漏电流去除噪声研究[J]. 华北电力大学学报,2010,37(6):1-5,22.
SUN Jinbao,ZHU Yongli,LIU Liqing,et al. Study on de-noising method based on EMD used in insulator leakage current [J]. Journal of North China Electric Power University,2010,37(6):1-5,22.
- [10] 杨建明. 污秽绝缘子泄漏电流监测系统的设计[D]. 北京:北京交通大学,2008.
YANG Jianming. Design of monitoring system for leakage current of polluted insulator[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2008.

- sity, 2008.
- [11] 姚陈果,毛峰,匡红刚,等. 输电线路绝缘子泄漏电流的句法模式识别[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1487-1493.
YAO Chenguo, MAO Feng, KUANG Honggang, et al. Syntactical pattern recognition for leakage current of transmission line insulators[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1487-1493.
- [12] KORDKHEILI H H, ABRAMESH H, TABASI M, et al. Determining the probability of flashover occurrence in composite insulators by using leakage current harmonic components[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(2): 502-512.
- [13] SUDA T. Frequency characteristics of leakage current waveforms of a string of suspension insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 481-487.
- [14] 司马文霞,李璟延,孙才新. 染污绝缘子污闪全过程泄漏电流波形及谐波特性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1101-1106.
SIMA Wenxia, LI Jingyan, SUN Caixin. Development on the frequency domain of leakage currents during discharge detection for contamination insulators[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1101-1106.
- [15] SONG Y C, CHOI D H. High-frequency components of leakage current as diagnostic tool to study aging of polymer insulators under salt fog[J]. Electronics Letters, 2005, 12(41): 684-685.
- [16] 乐波,王黎明,毛颖科. 污秽绝缘子高频泄漏电流特征的研究[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 401-404, 407.
YUE Bo, WANG Liming, MAO Yingke. Study on the characteristics of high frequency leakage current of contaminated insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(6): 401-404, 407.
- [17] 蔡炜,余涛,刘云鹏,等. 500 kV 线路长串绝缘子的冰闪泄漏电流[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2535-2539.
CAI Wei, YU Tao, LIU Yunpeng, et al. Icing flashover leakage current of long insulator strings in 500 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2535-2539.
- [18] 贺博,林辉. 基于泄漏电流的污秽绝缘子闪络风险预测[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 22-25.
HE Bo, LIN Hui. Method of flashover risk prediction for contaminated insulator based on leakage current[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 22-25.
- [19] DU B X, LIU Yong, LIU H J. Recurrent plot analysis of leakage current for monitoring outdoor insulator performance[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 139-146.
- [20] FREI M G, OSORIO I. Intrinsic time-scale decomposition: time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2007, 463(2078): 321-342.
- [21] HUANG N E, ZHANG Shen, LONG S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454(1971): 903-995.
- [22] WU Z, HUNAG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [23] 顾小昕. 基于固有时间尺度分解的信号分析与干扰抑制技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
GU Xiaoxin. Research on signal analysis and interference mitigation techniques based on intrinsic time-scale decomposition [D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [24] 李雪. 基于固有时间尺度分解的数字调制识别[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
LI Xue. Digital modulated signal recognition based on intrinsic time-scale decomposition[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

作者简介:



黄建才

黄建才(1977-),男,河北满城人,博士研究生,主要从事电力系统自动化和网络技术方面的研究工作(E-mail: fdohjc@hotmail.com);

朱永利(1963-),男,河北冀州人,教授,博士研究生导师,从事网络化监控和智能信息处理的研究工作。

Insulator leakage current denoising based on FFT and ITD

HUANG Jiancai, ZHU Yongli

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The FFT(Fast Fourier Transform) is applied to separate the periodic and non-periodic components of leakage current and the corresponding threshold is given. The improved ITD(Intrinsic Time-scale Decomposition) is applied to denoise the non-periodic components and the corresponding threshold is given. The extension is introduced to both ends of ITD to avoid the end effect, which improves its decomposition accuracy. The proposed method is applied to the insulator leakage current measured in high-voltage experiment and the denoising result show that, the proposed method smoothes the leakage current while keeps the feature data effectively.

Key words: electric insulators; leakage current; Fourier transforms; intrinsic time-scale decomposition; noise