

DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2018.03.003

基于归一化自相关函数与类小波软阈值法的 GIS局放信号降噪方法研究

张艺还¹, 王旭红¹, 郭良², 张绍海¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要: 针对目前利用特高频方法检测GIS典型缺陷时,存在白噪声干扰滤除效率低以及原始信号波形畸变率高等问题,构建了GIS特高频局部放电检测试验模型,经人工处理获得4种典型局部放电UHF信号,提出采用EMD分解将4种典型缺陷的特高频信号分解为有限个 IMF 分量,利用归一化自相关函数找到 IMF 分量中局部放电信号与白噪声的分界点,对含白噪声的 IMF 分量使用类小波软阈值进行滤波,随后重构所有 IMF 分量,得到各缺陷局部放电特高频信号。将文中方法所得信号与小波去噪信号进行信噪比以及波形畸变率对比,结果表明文中所用方法具有更为良好的去噪效果,可用于GIS局部放电监测。

关键词: 局部放电; EMD分解; 归一化自相关函数; 类小波软阈值; 特高频信号

Partial Discharge Detection for GIS Based on Normalized Autocorrelation Function and Similar Wavelet Soft Threshold

ZHANG Yihuan¹, WANG Xuhong¹, GUO Liang², ZHANG Shaohai¹

(1. Changsha University of Science and Technology, College of Electrical and Information Engineering, Changsha 410114, China; 2. Hunan University, College of Electrical and Information Engineering, Changsha 410082, China)

Abstract: Four typical defects are made in GIS, the UHF partial discharge signals of these defects are acquired, and a denoising method for these UHF PD signals is proposed. The empirical mode decomposition (EMD) is used to decompose the UHF PD signals of the four defects into a finite number of the intrinsic mode function (IMF) components, the cut-off point between the PD signal and the white noise in the IMF component is determined by using the normalized autocorrelation function, and the IMF component with white noise is filtered by using the wavelet soft threshold. Then, all the IMF components are reconstructed to obtain the partial discharge signals. Compared with the wavelet denoising method, the proposed method obtains the UHF PD signals with higher signal-to-noise ratio and slighter waveform distortion.

Key words: partial discharge; empirical mode decomposition; normalized autocorrelation function; similar wavelet soft threshold; ultra-high frequency signal

0 引言

在生产装配过程中,气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)有多类缺陷产生。其中主要影响GIS绝缘性质性能的缺陷有:自由微粒、绝缘

表面脏污、导体之间接触不良、绝缘子缺陷、金属毛刺或尖端等几类,这些缺陷都可能不同程度地引起GIS内部电场发生畸变,使得局部电场集中产生局部放电(partial discharge, PD),对GIS的正常运行有很大的危害。特高频(UHF)检测法作为GIS局部放电检测中较有效的方法之一^[1-2],能够及时发现GIS

收稿日期:2017-09-11; 修回日期:2017-11-25

基金项目:湖南省科技计划项目(2015GK3018);湖南省高校创新平台开放基金项目(14K001)。

Project Supported by Scientific and Technological Projects in Hunan Province(2015GK3018), the Open Fund Project of the Innovation Platform of Hunan Province's Colleges and Universities(14K001).

内部的局部放电以及一些潜在性缺陷,但此检测方法的信号常受到噪声干扰。因此,针对性地解决特高频局部放电信号中的噪声干扰问题,对提高GIS局部放电特高频检测的灵敏度具有重要意义。

运用EMD去噪已为国内外广大学者研究的热点,并被证明了是一种极其有效的去除信号中白噪声的方法。EMD分解适用于非线性非平稳信号的去噪,运用EMD方法,把局部放电特高频中复杂的信号分解成有限的本征模态函数(IMF)之和,在非平稳放电信号平稳化后,利用归一化自相关系数找到特高频局放信号主导模态和噪声主导模态的分界点,再对以噪声为主导模态的IMF采用类似于小波软阈值方法滤波,最后进行信号重构,实现高频信号的去噪。该方法可有效去除特高频信号中的白噪声,并使得去噪信号具有较小的复制误差和畸变,大大提高GIS故障诊断准确可靠水平,降低了检测的去噪耗时。

1 GIS局部放电缺陷模型与试验

1.1 GIS局部放电模型

在特高频检测法中,被检测量为缺陷激发的电磁信号,其幅值与放电脉冲的陡度和放电类型有关^[3-4]。根据GIS设备绝缘缺陷的放电形式和特点^[5-6],在实验室设置了气隙、自由金属微粒、金属突出物、悬浮电位这4类典型的缺陷。在充以0.5 MPa SF₆气体的GIS模拟装置中分别置入上述4种物理缺陷模型,并通过特高频传感器(频带为300~2 000 MHz,驻波比为3)和高速数字采集系统(模拟宽带1 GHz、采样率为10 GS/s)获取PD特高频信号的数据和波形。

GIS内缺陷模型的PD特高频测量系统见图1。实验过程中,当较低试验电压时,使用特高频传感器测量记录并储存下没有产生PD信号的现场背景噪声信号,然后逐步升高电压,直到产生明显的PD信号。待PD信号稳定,存储染有噪声信号的PD特高频信号。

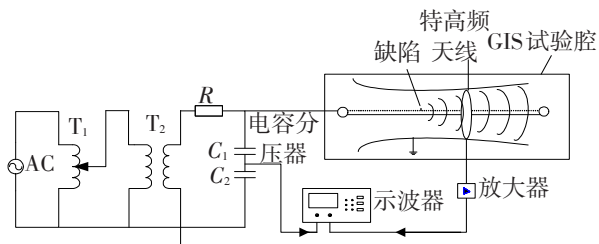


图1 GIS内部缺陷模型的PD特高频测量系统图

Fig. 1 PD ultra high frequency measurement system diagram of GIS internal defect model

图1中:AC为交流电源;T₁为单相调压器(额定容量为5 kVA);T₂为无晕工频高压试验变压器(额定容量为1 kVA);R为保护电阻(阻值约几十kΩ);C₁为分压器高压臂电容;C₂为分压器低压臂电容。

1.2 GIS局部放电UHF检测

通常情况下,在实验室环境采集的局部放电信号其信噪比较高,然而在实际的GIS现场具有很强的干扰源^[7-9],所以为使研究更具有普遍意义,将前面采集到的背景噪声峰值放大后与实际测得的局部放电的UHF信号进行叠加,凸显去噪效果的好坏。4种背景噪声放大后的特高频PD波形见图2。

从图2中可以看出,PD的特高频信号波形比较复杂,不同的放电类型的波形差异较大,且都具有较强的振荡性。

2 基于自相关函数和类小波软阈值的EMD去噪方法

2.1 EMD的自适应分解

设被噪声污染的UHF信号 $y(t)$ 表示为

$$y(t)=x(t)+n(t) \quad (1)$$

式(1)中: $x(t)$ 为原UHF信号; $n(t)$ 为白噪声。为了去除噪声,需找到原UHF信号 $x(t)$ 的一个最佳估计值 $x'(t)$,并使得 $x(t)$ 与 $x'(t)$ 之间的误差值最小。

EMD分解作为一种数据驱动的新型方法,它能自适应地将频率随时间变化的信号分解为在时间 t 内只有一个频率的信号量,即IMF,表现出其分析非平稳信号的独特优势^[10-12]。实际工程上,利用EMD去噪,文[13]经过大量的对染噪信号进行EMD分解研究发现:经过EMD分解得到的各个IMF分量都应满足:任意时刻点的信号上下包络线的平均值必须为零;IMF的能量密度与其对应的平均周期的乘积为一个常量,且相邻的两个IMF的平均周期近似呈两倍关系^[14-15]。

基于此理论,分别将各PD的UHF信号进行EMD分解,由于UHF信号是复杂信号,当EMD分解 $x(t)$ 时,极值点的分布不均匀将导致3次样条函数无法完整地包络 $x(t)$,即出现包络的欠冲或过冲问题。针对此问题,使用B样条函数组成样条空间基,通过其对极值序列进行精确逼近特征多边形的值,直接求出 $x(t)$ 的均值曲线,其方程式为

$$m(t)=\sum_{j \in Z} \frac{1}{2^{k-2}} \left[\sum_{i=1}^{k-1} \binom{k-2}{i-1} x(\tau_{j+i}) \right] B_{j,k}(t) \quad (2)$$

式(2)中: $(\tau_j; j \in Z)$ 是原信号 $x(t)$ 的全部极值点; $B_{j,k}(t)$ 是第 j 个 k 阶B样条基函数,其节点为 $(\tau_j; j \in Z)$,

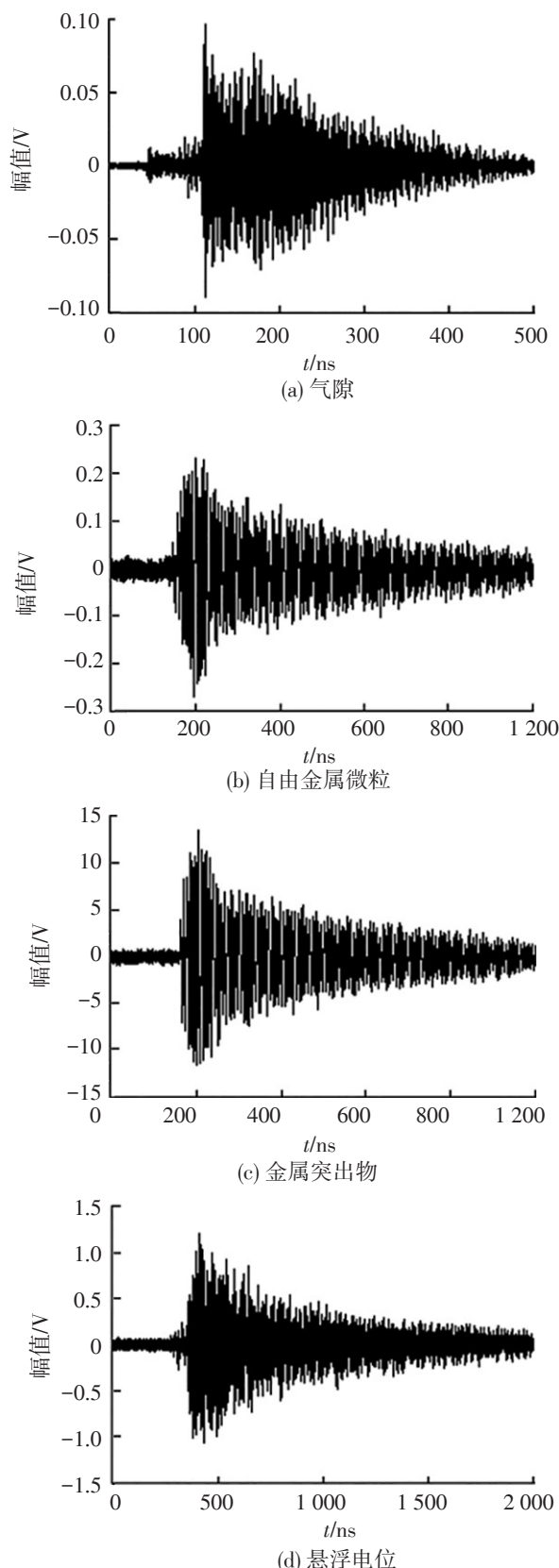


图2 染有噪声的GIS典型PD的特高频信号波形

Fig. 2 GIS typical PD ultra high frequency signal waveform stained by noise

由式(2)计算得出

$$B_{j,k}(t) = \frac{1}{k!} \sum_{i=0}^{k-j} (-1)^i C_{k+1}^i (t+k-j-i) \quad (3)$$

$$\text{式(3)中, } C_{k+1}^i = \frac{(k+1)!}{i!(k+1-i)!}$$

在EMD分解出的 IMF 分量中,含有高频成份的 IMF 分量(其中主要包含的是信号尖锐部分和白噪声)总是最先被分解出来;而其他阶数大且只含低频成分的 IMF 分量中噪声含量较少。被分解后PD信号的能量分布也产生了变化,即被噪声污染的GIS特高频信号的多数且主要的能量集中在低频段,少数且次要的能量分布在高频段。根据上述特征,得出一定存在某个 IMF_k 分量,使得对于 IMF_k 分量之后的全部 IMF 中,特高频PD信号为主导模式; IMF_k 之前的 k 个 IMF 分量中,白噪声为主导模式。因此,找到这个 IMF_k 至关重要。

2.2 基于归一化自相关函数的 IMF 筛选

一般寻找 IMF_k 的方法是基于连续均方误差准则^[16]找到噪声能量分布突变的第 k 个 IMF 分量,但当信号中包含较多尖锐信号,即有局部放电时,该方法性能在这种情况下存在着不稳定性,且容易在某些PD特高频信号的能量低于白噪声信号的能量时,前者成为全局极小值,从而不能正确的找到第 k 个分量。

由文[17-18]可知,理想高斯白噪声的归一化自相关函数(normalized autocorrelation function, NAF)值在零点处为1,在非零点处为0;而PD信号 $x(t)$ 在零点处的自相关函数取得最大值,而其它点的自相关函数并没有迅速衰减到很小的值,整体呈现随着时间差的变化而变化的趋势。在GIS的高频信号中的噪声虽然不是真正意义上的白噪声分量,但是它作为白噪声的这种统计特性依然存在^[19]。因此,根据PD信号与白噪声在自相关函数下的不同特点,找出4种缺陷的PD信号 IMF_k 的分界点 k 。

$x(t)$ 为PD信号或白噪声,则其自相关函数为

$$R_x(t_1, t_2) = E[x(t_1)x(t_2)] \quad (4)$$

按式(4)分别计算白噪声 $n(t)$ 和各典型缺陷PD信号 $x(t)$ 的自相关函数。

自相关系数反映的是EMD分解后的PD信号与滞后其一定时间度量的PD信号的相似性,考虑到实际PD特高频信号的采样点数为有限个数,这里选择通过式(3)来估计PD特高频信号的自相关函数

$$R_x(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|\tau|} x(n)x(n+\tau) \quad (5)$$

式(5)中: N 为PD信号 $x(n)$ 的采样点个数; τ 为时间差。

为了更加准确表现PD特高频信号在不同时刻的各 IMF 分量的相关程度,这里引入归一化自相关函数,其表达式为

$$\rho_x(\tau) = \frac{R_x(\tau)}{R_x(0)} \quad (6)$$

由此,利用白噪声与PD特高频信号在归一化自相关函数 $\rho_x(\tau)$ 下的不同特性,得到 k 的取值,即找到 IMF 分量中的 IMF_k 。

2.3 基于小波软阈值的去噪

一般的去噪方法是滤去 IMF_k 之前的所有 IMF 分量,重建 IMF_k 之后的所有 IMF 分量,但此方法在PD的UHF信号去噪中不可用。因为实际EMD分解得到的中间阶数的 IMF_k 有PD信号和噪声信号的混叠,即在 IMF_k 之前的所有 IMF 分量中既含有GIS的高频PD信号又含有噪声,这样直接抛弃 IMF_k 之前的所有 IMF 分量,则在滤去目标白噪声的同时,也会丢失部分各类缺陷的PD信号以及部分有用的能量。因此,应当选取一最佳阈值,用来对 IMF_k 之前的所有 IMF 分量进行滤波,从而得到 IMF_k 之前的所有 IMF 分量中的PD的特征信号,以最大可能地保留信号的完整。

为有效且不失真地去除 IMF_k 之前的所有 IMF 分量中的噪声信号,选择类似于小波全局阈值去噪

的方法进行滤波。软阈值比硬阈值好^[20-22]。硬阈值滤波时,绝对值小于阈值的 IMF 分量被置零,在 $\pm Th$ 处会产生不连续的情况;而软阈值滤波时,在 $\pm Th$ 处是可连续的且能将大于阈值的 IMF 分量变为该分量与阈值的差值,从而能更好地得到所需的 IMF 分量^[23]。因此将小波软阈值去噪函数稍加修改,应用在 IMF 去噪上,得公式为

$$imf_j' = \begin{cases} \text{sign}[imf_j(i)] [imf_j(i) - t_j] & imf_j(i) > t_j \\ 0 & imf_j(i) \leq t_j \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, t_j 为第 j 个分量 imf_j 的阈值,由式(8)得出

$$t_j = \delta_j \sqrt{2 \ln N} = \frac{\text{media}[\text{abs}(imf_j)]}{0.6745 \times \sqrt{2 \ln N}} \quad (8)$$

式(8)中, media 为第 j 个分量 imf_j 分量上的绝对值。

待滤波处理完,将所有经过和未经过阈值去噪处理的 IMF 分量进行重构,从而得到去噪后的PD特高频信号。

综合以上内容,将基于自相关函数与小波软阈值的EMD去噪过程综合,得图3。

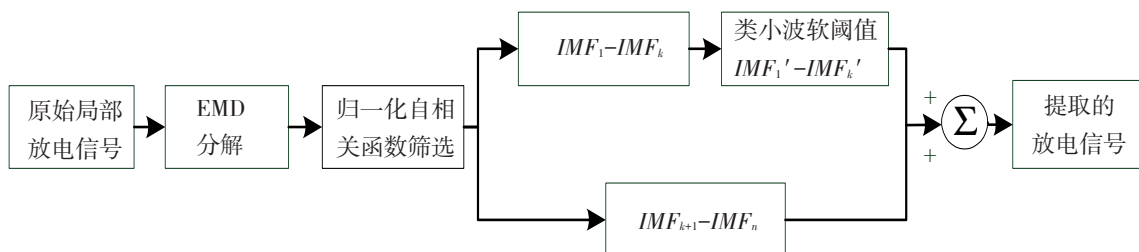


图3 基于归一化自相关函数与类小波软阈值的EMD去噪方法

Fig. 3 The EMD denoising method based on normalized autocorrelation function and similar wavelet soft threshold

整体过程是将PD特高频信号进行了EMD分解,分解后使用 IMF 的自相关系数特性找到PD信号与噪声的分界点 k ,然后对 IMF_1-IMF_k 使用类小波软阈值进行滤波,最后重组信号。此方法思路清晰且结构简单,大大节省了去噪所需的时间。

为验证以上方法的效果,将上述方法去噪后的UHF信号与小波去噪^[19]后的UHF信号进行对比,采用信噪比和波形畸变率两个常用指标进行考核。

信噪比(SNR(单位dB))表达式为

$$SNR = 10 \lg \frac{s_1}{s_2} \quad (9)$$

式(9)中: s_1 为各缺陷的PD高频信号的平均功率; s_2 为噪声信号的平均功率。

波形畸变率表达式为

$$\sigma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^h [x(i) - \bar{x}] [y(i) - \bar{y}]}{h \sigma_x \sigma_y} \quad (10)$$

式(10)中: $x(i)$ 和 $y(i)$ 分别为个缺陷的PD高频信号和去噪后信号; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 $x(i)$ 和 $y(i)$ 的平均值; h 为信号长度, σ_x 和 σ_y 分别为 $x(i)$ 和 $y(i)$ 的标准差。

3 试验结果与分析

图2中4种典型缺陷局部放电特高频原始信号波形与白噪声信号等叠加(信噪比为1)后,采用文中基于归一化自相关函数的EMD分解方法,得到的4种缺陷的6个归一化自相关系数筛选过后的 IMF 分量图形分别见图4。从图4中可以明显看出,气隙的各 IMF 由归一化自相关函数筛选后, $xcorr_1 \sim xcorr_4$ 有明显的信号混叠现象, $xcorr_5 \sim xcorr_6$ 为以PD特高频信号占主导的 IMF 分量。同理,在自由金属微粒和金属突出物的各 IMF 由归一化自相关函数筛选后,都在 $xcorr_1 \sim xcorr_5$ 有明显的信号混叠现象, $xcorr_6$ 为以PD特高频信号

占主导的IMF分量。而在悬浮电位的各IMF由归一化自相关函数筛选后, $xcorr_1 \sim xcorr_3$ 有明显的

信号混叠现象, $xcorr_4 \sim xcorr_6$ 为以PD特高频信号占主导的IMF分量。

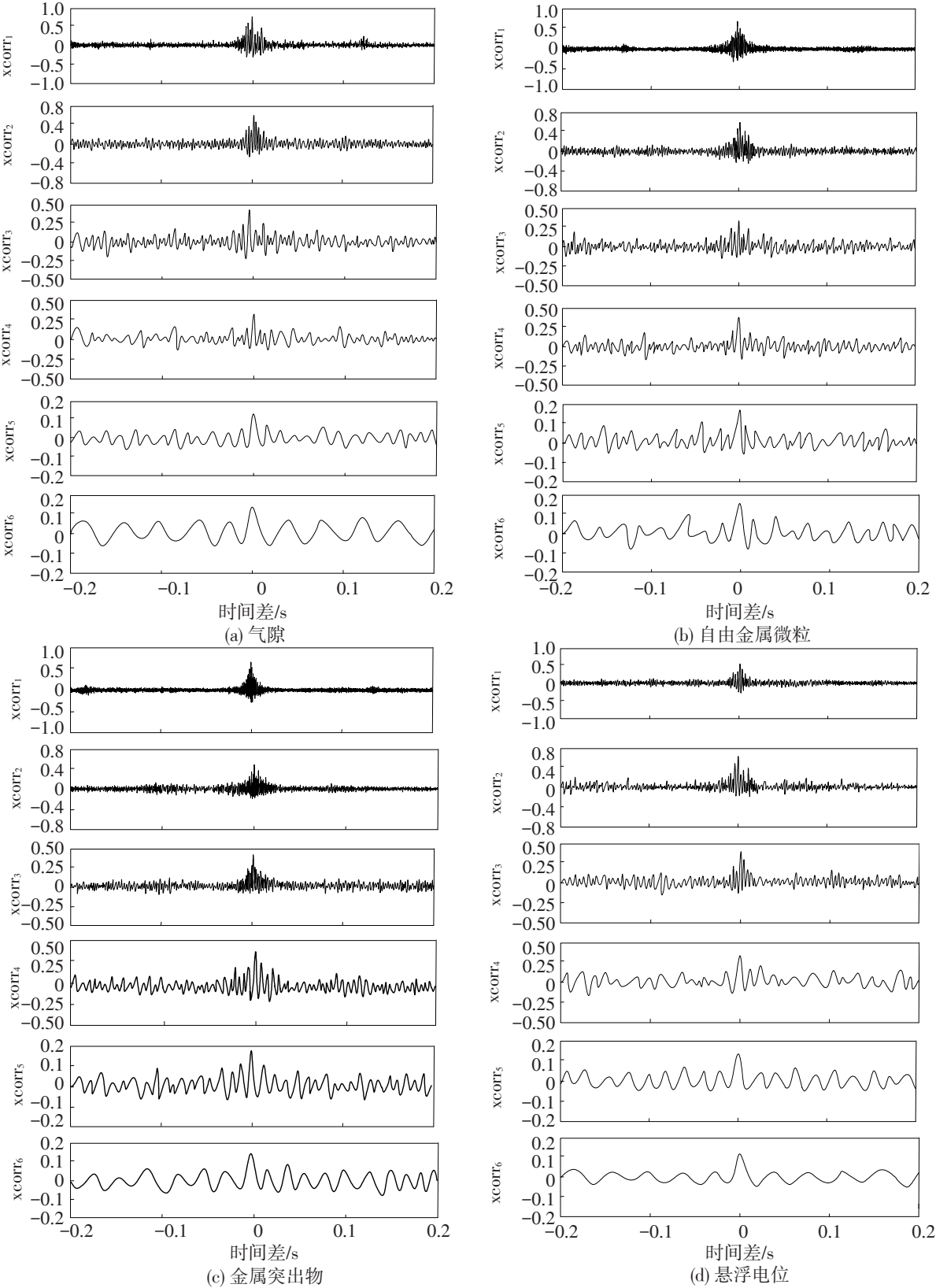


图4 典型缺陷的PD的IMF的归一化自相关系数筛选图

Fig. 4 The typical PD defects of the normalized autocorrelation function of the IMF's screening

用归一化自相关系数筛选出4种典型缺陷的局部放电的IMF分量的 k 值分别依次为4、5、5、3。

根据类小波软阈值对原本需要去除的IMF分量进行滤波,将滤波后的IMF分量跟信号为主导模态

的IMF分量进行重构,最终获得去噪后的各缺陷特

高频信号,见图5。

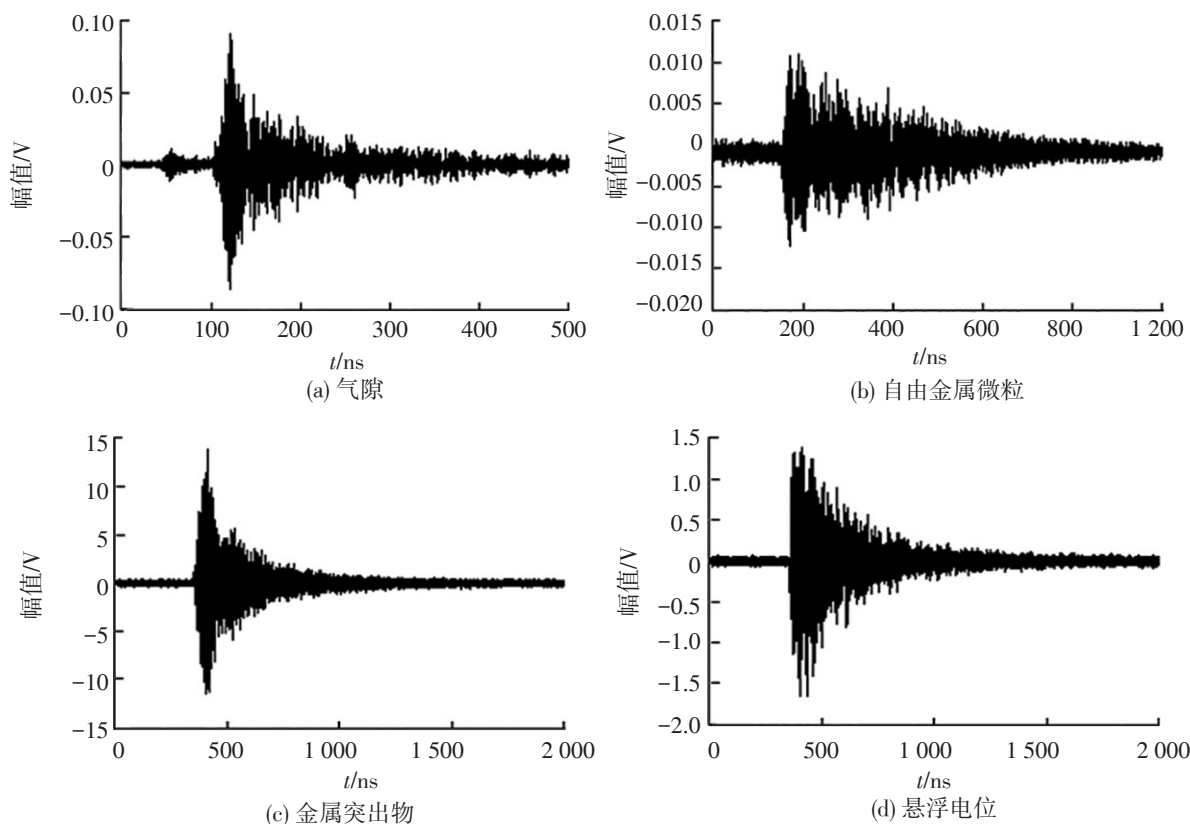


图5 4种缺陷的PD信号去噪后波形图

Fig. 5 The PD signal denoising waveform for the 4 kinds of defects

将文中方法与文[24]中采用小波变换法去噪后的特高频信号进行信噪比对比,其结果见表1。由表1可看出来,文中方法去噪后的各缺陷PD特高频信号的信噪比都要高于小波法去噪。

表1 2种方法的去噪后信噪比

Table 1 The signal-to-noise ratio of the 2 methods dB				
方法	气隙	自由金属微粒	金属突出物	悬浮电位
基于小波去噪	3.756 8	3.524 3	3.752 1	3.687 3
基于文中去噪	4.296 1	4.012 7	3.985 9	4.138 6

采用文中方法与文[25]中小波变换方法去噪后高频信号的波形畸变率比较见图6。从图6可以看出来,文中方法去噪后的各缺陷PD特高频信号的波形畸变率都要低于小波法去噪。

4 结论

研究了基于归一化自相关函数与类小波软阈值的GIS局放特高频信号去噪方法,通过分析和试验比较得到以下结论:

1)将GIS内不同缺陷的局部放电特高频信号进行EMD分解成IMF分量,使用归一化自行关函数找到噪声的IMF主导模态,不同缺陷的PD信号经归一

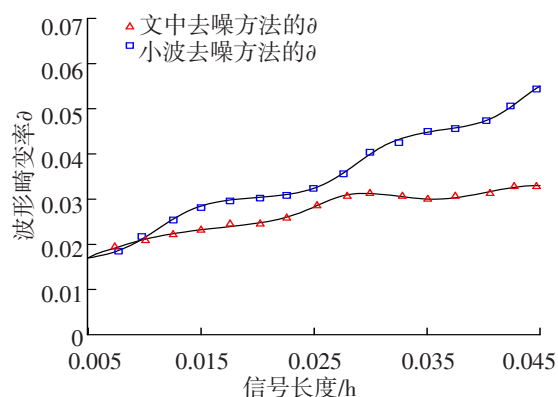


图6 2种去噪方法的波形畸变率对比图

Fig. 6 Two denoising methods of waveform distortion rate comparison chart

化自相关函数找到的噪声主导模态不一样,存在混叠差异性,由此可以判断出局部放电缺陷的类型;

2)类小波软阈值方法对噪声主导的模态去噪效果较好,去噪时间相对较短,经优化可用于GIS局部放电的实时监测系统;

3)与小波去噪信号对比,文中方法去噪后各信号的信噪比都高于小波去噪,且波形畸变率都要低于小波法去噪。

总之,文中方法可有效去除特高频信号中的白

噪声,使得去噪信号具有较小的复制误差和畸变,对抑制GIS局部放电特高频信号噪声具有较好的效果,为进一步研究将EMD分解应用于GIS局部放电实时监测系统提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 孙曙光,陆俭国,余慧中,等. 基于特高频法的典型GIS局部放电检测[J]. 高压电器,2012,48(4):7-12.
SUN Shuguang, LU Jianguo, YU Huizhong, et al. Detection of typical GIS partial discharge based on UHF method[J]. High Voltage Engineering, 2012, 48(4): 7-12
- [2] GAO Wensheng, ZHAO Dongbo, DING Dengwei, et al. Investigation of frequency characteristics of typical PD and the propagation properties in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1654-1662 .
- [3] KURRER R, FESER K. The application of ultra-high-frequency partial discharge measurements to GIS-insulated substations[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2000, 13(3): 777-782.
- [4] 李化,程昌奎,陈娇,等. 基于EMD的GIS典型局部放电特高频信号的分形特征提取方法[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 104-110.
LI Hua, CHENG Changkui, CHEN Jiao, et al. Fractal dimension research of the partial discharge UHF signal in GIS based on EMD[J]. High Voltage Engineering, 2014, 50(6): 104-110.
- [5] 段大鹏,齐伟强,刘弘景,等. GIS状态监测实验平台建设及状态检测技术研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 100-104.
DUAN Dapeng, QIN Weiqiang, LIU Hongjing, et al. Implementation of GIS condition monitoring experiment system and study of condition monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 100-104.
- [6] 李娟,李明,金子惠. GIS设备局部放电缺陷诊断分析[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 85-90.
LI Juan, LI Ming, JIN Zihui. Some method for diagnosis of GIS partial discharge defects[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 85-90.
- [7] 王科. GIS中局部放电绝缘缺陷综合检测诊断技术分析及应用[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 55-62.
WANG Ke. Analysis and on-site application of comprehensive detection and diagnosis technology for partial discharge insulation defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 55-62 .
- [8] 邵先军,何文林,石华军,等. UHF传感器GIS局部放电检测特性的实验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 46-55 .
- SHAO Xianjun, HE Wenlin, SHI Huajun, et al. Experimental and simulation research on GIS partial discharge detection characteristics of UHF sensors[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 46-55 .
- [9] 杨志特,范立新,杨成顺,等. 形态学滤波与自适应噪声抵消在GIS局部放电特高频信号去噪中的应用[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 41-46 .
YANG Zhihao, FAN Lixin, YANG Chengshu, et al. Noise removal of partial discharge UHF pulse in GIS with morphological filter and adaptive noise canceller [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 41-46.
- [10] 张旻,程家兴. 基于EMD和小波去噪处理的信号瞬时参数提取[J]. 信号处理, 2004, 20(5): 512-516.
ZHANG Min, CHENG Jiaxing. Instantaneous parameters extraction based on the empirical mode decomposition and wavelet de-noise technique[J]. Signal Processing, 2004, 20(5): 512-516.
- [11] 徐晓刚,徐冠雷,王孝通,等. 经验模式分解(EMD)及其应用[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 581-585.
XU Xiaogang, XU Guanlei, WANG Xiaotong, et al. Empirical mode decomposition and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 581-585.
- [12] 姚海妮,王珍,邱立鹏,等. 基于经验模态分析的故障诊断方法及应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(12): 3980-3986.
YAO Haini, WANG Zhen, QIU Lipeng, et al. Fault diagnosis method and application research based on empirical mode decomposition[J]. Computer Measurement and Control, 2015, 23(12): 3980-3986.
- [13] HUANG N E, ZHENG S, STEVEN R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear non-stationary time series analysis[C]//Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. London: The Royal Society Press, 1971(454), 1998: 903-995.
- [14] 魏兰英. Hilbert-Huang变换和仿真系统设计[D]. 上海: 华东师范大学, 2007: 19-21.
WEI Lanying. Hilbert-Huang transform and simulation system design[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007: 19-21.
- [15] 杜修力,何立志,侯伟. 基于经验模态分解的(EMD)小波闭值除噪方法[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(3): 265-272.
DU Xiuli, HE Lizhi, HOU Wei. A study of wavelet threshold denoising based on empirical mode decomposition(EMD) [J]. Beijing University of Technology, 2007, 33(3): 265-272.
- [16] 谢东. 较低信噪比下信号去噪方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 13-15.
XIE Dong. Research on the signal denoising under

- lower signal to noise ratio[D]. Chengdu: University of Science and Technology of China, 2015:13-15.
- [17] 陈仁祥, 汤宝平, 吕中亮. 基于相关系数的EEMD转子振动信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 542-546.
- CHEN Renxiang, TANG Baoping, LYU Zhongliang. Ensemble empirical mode decomposition de-noising method based on correlation coefficients for vibration signal of rotor system[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2012, 32(4): 542-546.
- [18] 孙博, 张健文, 潘磊落. 基于EMD的局部放电去噪方法的研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 89-93.
- SUN Bo, ZHANG Jianwen, PAN Leiluo. Study on de-noising method of partial discharge based EMD[J]. Insulated Material, 2014, 47(3): 89-93.
- [19] 彭伟文, 田慕琴, 宋建成, 等. 一种基于EEMD和高阶统计量的局部放电白噪声抑制方法[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 64-64.
- PENG Weiwen, TIAN Muqin, SONG Jiancheng, et al. Method of suppressing white-noise interference in pd signal based on EEMD and higher order statistics[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 64-64.
- [20] 陈迅, 秦海亭, 刘利, 等. GIS局部放电小波阈值去噪算法的改进[J]. 电子设计工程, 2015, 23(16): 171-174.
- CHEN Xun, QIN Haiting, LIU Li, et al. The improvement of wavelet threshold denoising algorithm of partial discharge for GIS[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(16): 171-174.
- [21] 刘卫东, 刘尚合, 胡小峰, 等. 小波阈值去噪函数的改进方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 59-63.
- LIU Weidong, LIU Shanghe, HU Xiaofeng, et al. Analysis of modified method of wavelet threshold denoising function[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 59-63.
- [22] 王彪, 李建文, 王钟斐. 基于小波分析的新阈值去噪方法[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(3): 1099-1102.
- WANG Biao, LI Jianwen, WANG Zhongfei. Threshold denoising method based on wavelet analysis[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(3): 1099-1102.
- [23] 王新楼. 小波去噪分析与MATLAB仿真[J]. 工业控制计算机, 2008, 21(6): 43-56.
- WANG Xinlou. Wavelet denoising analysis and MATLAB simulation[J]. Industrial Control Computer, 2008, 21(6): 43-56.
- [24] 许高峰, 孙才新, 唐炬, 等. 基于小波变换抑制GIS局部放电监测中白噪声干扰的新方法研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 87-90.
- XU Gaofeng, SUN Caixin, TANG Ju, et al. A New method for suppressing white noise in GIS PD monitoring by wavelet analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(2): 87-90.
- [25] 李化, 杨新春, 李剑, 等. 基于小波分解尺度系数能量最大原则的GIS局部放电超高频信号自适应小波去噪[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 84-91.
- LI Hua, YANG Xinchun, LI Jian, et al. The maximum energy of wavelet decomposition approximation-related adaptive wavelet de-noising for partial discharge UHF pulse in GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 84-91.
- 张艺还(1993—), 女, 硕士研究生, 从事电气高压设备故障诊断方面的研究工作。

《高压电器》2018年第3期广告单位

彩色广告

封一: 西安高压电器研究院有限责任公司(认证中心)

封二: 珠海思创电气有限公司

封三: 上海科石科技发展有限公司

封四: 上海乐研电气有限公司

前插1: 北京京东方真空电器有限责任公司

前插2: 北京优尼莘辉科技有限公司

前插3: 成都凯赛尔电子有限公司

前插4: 陕西龙翔电器有限公司

前插5: 浙江雅博自动化设备有限公司

前插6: 陕西斯瑞新材料股份有限公司

前插7: 攀时(上海)高性能材料有限公司

前插8: 西安高压电器研究院有限责任公司(业务)