

GIS 局部放电包络信号噪声抑制的小波方法

李立学¹, 黄成军¹, 曾奕¹, 钱勇¹, 李德军², 江秀臣¹

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海西门子高压开关有限公司, 上海 200245)

摘要: 基于超高频包络检波的 GIS 局部放电检测系统采样得到的超高频局部放电包络信号中含有噪声。笔者分析了检测系统测量过程中可能混入的几种噪声,通过截取没有局部放电的采样信号进行频谱计算,理论与实测分析结果均表明,包络检波后信号中的噪声主要是白噪声。基于小波变换的滤波算法对白噪声有很好的抑制效果,文中在对小波变换原理进行简要分析的基础上,提出了改进阈值的小波滤波算法,仿真及实测信号的滤波结果证实了该改进算法的有效性。

关键词: 超高频; 包络检波; 小波变换; 阈值

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0033-03

Noise Reduction Using Wavelet for Envelope Signal of Partial Discharge in GIS

LI Li-xue¹, HUANG Cheng-jun¹, ZENG Yi¹, QIAN Yong¹, LI De-jun², JIANG Xiu-chen¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Siemens High Voltage Switchgear Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: The envelope signal, detected by the GIS partial discharge detection system based on ultra-high frequency envelope detection, contains noise and interference. This paper analyzes the sources of interferences, and calculates the spectrum of a section of experimental signal. The analysis of theoretical and practical signals show that the noise in envelope signal is mainly white noise. The filtering algorithm using wavelet analysis and transform is effective for denoising the white noise. An improved threshold method of denoising with wavelet is presented based on the analysis of the principle of wavelet transform, and the denoising results of simulated and practical signals verify its effectiveness.

Key words: ultra-high frequency; envelop detection; wavelet transform; threshold

0 引言

局部放电既是 GIS 绝缘劣化的征兆和表现形式,又使绝缘进一步劣化,因此局部放电检测是目前 GIS 绝缘检测与诊断最有效的方法^[1]。超高频(UHF)检测法具有灵敏度高、可用于在线监测、适用于各种缺陷类型等优点,是目前应用最为广泛的 GIS 局部放电在线检测方法^[2]。应用超高频包络检波电路的 GIS 局部放电测量系统能够获取比峰值检波更多的局部放电信号特征,便于采用基于包络特征指纹的研究方法。

采样信号中包含有空间的背景电磁波干扰、通讯频率干扰和 UHF 传感器放大器电路产生的噪声等,采用硬件滤波器和傅里叶分析等方法只能去除窄带干扰,而对于白噪声无能为力。小波分析及其滤波算法已经成为数字信号处理领域的重要工具,其对于白噪声有很好的滤除效果^[3]。笔者采用改进阈值滤波算法对采样信号进行去噪,取得了良好的效果。

1 包络信号采样及其分析

1.1 基于包络检波方法的局部放电信号测量

基于包络检波的 GIS 局部放电检测系统由内置 UHF 传感器、UHF 放大器和 DSP 高速数据采集系统等组成,见图 1。其中内置 UHF 传感器安装在 GIS 模型的手孔上。UHF 放大器分别输出包络检波前和包络检波后信号。

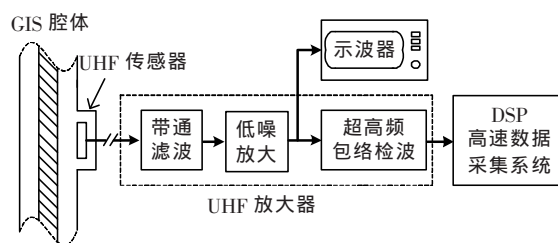


图 1 采用包络检波的 GIS 局部放电检测系统

1.2 局部放电包络信号的噪声分析

1.2.1 GIS 局部放电包络测量中的噪声分析

UHF 方法采用 UHF 传感器来接收 GIS 局部放电产生的电磁波信号,同时空间的背景电磁波干扰、

收稿日期:2008-10-10; 修回日期:2008-12-23

作者简介:李立学(1978-),男,博士研究生,主要研究方向为电力设备在线监测及故障诊断技术。

通讯频率干扰和 UHF 传感器放大器电路的噪声等都会直接影响局部放电包络信号的信噪比和真实性,甚至影响对 GIS 局部放电的诊断。主要的干扰包括^[4]: 广播和通讯系统的窄带干扰; 电力电子器件、开关等产生的重复和随机的脉冲干扰; 空间的背景电磁波信号和硬件电路的噪声等。

以上各种干扰信号中,广播和通讯系统产生的干扰为窄带干扰,其经过图 1 中的包络检波电路后将信号转换为直流信号输出,对检波后信号进行隔直滤波就可以去除此类干扰。电力电子器件、开关等产生的重复和随机的脉冲干扰主要能量集中频段都较低,UHF 方法使用的是 300 MHz 以上的信号频段,因此此类干扰经过 UHF 放大器前端的滤波器后其主要干扰成份基本被滤除。空间的背景电磁波信号表现为类似白噪声特性,其不容易被 UHF 放大器前端滤波电路和检波电路滤除,而且经过放大电路后幅值被放大。硬件电路的噪声包括:电阻的热噪声、晶体管 PN 结的散弹噪声和 $1/f$ 噪声等^[5],这些噪声同样会被放大电路放大。 $1/f$ 噪声为低频噪声,其通过包络检波电路后仍然为低频信号,也可以通过高通滤波的方法去除。因此空间的背景电磁波干扰、由电阻产生的热噪声和放大器噪声(晶体管 PN 结的散弹噪声)是测量系统主要的噪声来源,它们具有白噪声特性^[5]。

1.2.2 GIS 局部放电包络信号的噪声及其特性

图 2 为在实验室测试得到高压导体表面针尖放电模型产生的 UHF 信号和其包络检波后信号。由图可知,UHF 信号波形和包络检波后信号中都存在噪声,而且该噪声检波前后大小几乎不变。

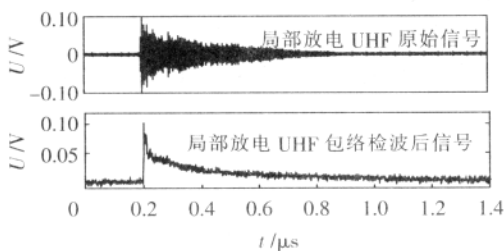


图 2 高压导体表面针尖放电 UHF 信号及其包络检波信号

截取一段没有放电信号的包络检波信号采样数据进行分析,其原始时域信号和经 FFT 计算得到的功率谱密度见图 3。包络检波后噪声的功率分布在频率轴上,表现为白噪声特性。

1.3 噪声抑制方法

傅里叶变换及其相关数字信号处理方法广泛应用于窄带信号的滤波^[6],而白噪声的频谱分布于整个带宽内,因此不能采用傅里叶频域阈值处理等方法来抑制局部放电包络信号中的噪声。局部放电包络信号属于非平稳信号,白噪声干扰属于平稳信号。因此,局部放电包络信号和白噪声在小波变换下随尺

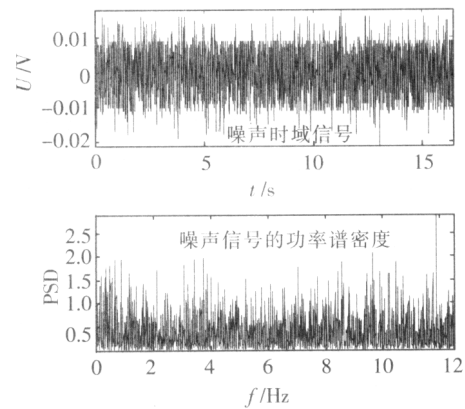


图 3 包络检波噪声信号及其功率谱密度

度变化曾现出不同的变化特征,即信号的边缘具有良好的局部特性,其变换系数出现在各个尺度上,系数的幅值几乎不变化;噪声的能量集中在小尺度上,其小波系数的幅值随着分解尺度的增加迅速衰减。可以根据这一特性采用小波变换的方法滤除局部放电包络采样信号中的白噪声^[7]。

2 小波滤波

2.1 小波滤波方法原理概述

信号和噪声在小波变换下随尺度变化曾现出不同的变化特征,具有不同的 Lipschitz 正则性。信号的 Lipschitz 指数大于零,而噪声的 Lipschitz 指数小于零,即信号的边缘具有良好的局部特性,并且出现在各个尺度上;噪声的能量集中在小尺度上,其小波系数的幅值随着分解尺度的增加迅速衰减。

根据这一原理,Mallet、Xu 和 Donoho 等人各自提出了不同的信号滤波方法,分别是模极大值重构滤波、空域相关滤波和小波域阈值滤波,其分别适用于不同的应用,表 1 对这 3 种小波滤波方法进行了简单的比较^[7]。基于计算量、对信号信噪比的要求和滤波效果的考虑,笔者采用小波域阈值滤波算法来抑制局部放电包络信号中的噪声干扰。

表 1 3 种滤波方法的比较

滤波方法	模极大值重构滤波	空域相关滤波	小波域阈值滤波
计算量	大	较大	小
稳定性	稳定	较稳定	依赖于信噪比
滤波效果	较好	好	好
适用范围	低信噪比	高信噪比	低信噪比

2.2 小波域阈值滤波

Donoho 提出了小波域阈值滤波算法,其原理是除了最粗尺度外,将各个小波变换细节系数做阈值处理。Donoho 在理论上证明并找到了最优的通用阈值

$$\lambda_i = \frac{\text{Median}(|W_{i,k}|) \sqrt{2 \ln(N_i)}}{0.6745} \quad (1)$$

式(1)中,Median(|W_{i,k}|)表示带噪信号函数 X 最小尺度上的小波系数{X,ψ_{i,m}}_{0 ≤ m < N/2} 值按顺序排列后中间位的取值。基于小波域阈值滤波的算法用

式(2)表示

$$\hat{W}_{i,k} = \begin{cases} 0 & |W_{i,k}| \leq \lambda \\ W_{i,k} & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

小波域阈值滤波实际应用中效果并不十分理想。事实上,阈值的选取与噪声的方差有关,因此需要事先估计噪声的方差才能取得较好的滤波效果^[7]。

2.3 阈值改进算法

小波分解过程中信号的边缘出现在各个尺度上,而噪声的能量主要集中在小尺度上,其小波系数的幅值随着分解尺度的增加迅速衰减。包络检波电路具有积分特性,因此包络检波得到的包络信号相对于白噪声而言是低频信号,即小波分解得到的分解系数中小尺度上基本为噪声,低频的包络信号能量保留在大尺度分解系数中。

因此文中对包络信号的小波分解系数的尺度1~3进行置零,大尺度分解系数使用硬阈值算法进行滤波。

3 仿真

采用单指数衰减、双指数衰减、单指数衰减振荡和双指数衰减振荡等4种典型的局部放电模型信号混入白噪声进行仿真,来验证小波滤波算法去噪的效果。图4分别为仿真原始信号、混入噪声后的信号、硬阈值滤波后信号和改进阈值滤波后信号波形。

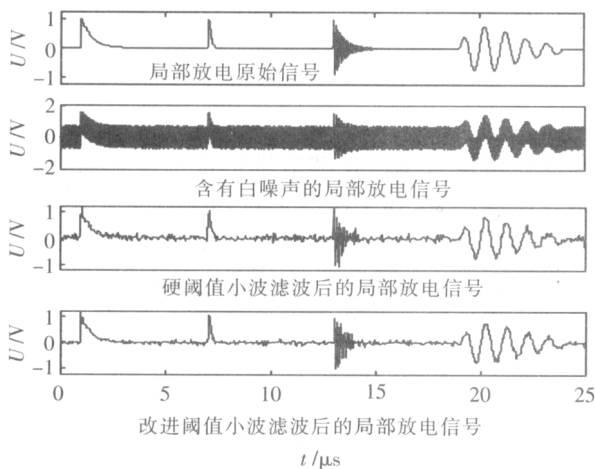


图4 硬阈值和改进阈值小波滤波算法滤波效果

可以用相关系数(ρ_{xy})和均方误差(MSE)等来评价滤波效果。相关系数表示处理后信号和原真实信号的互相关程度,均方误差(MSE)用以衡量信号处理过程中的波形失真情况。以上仿真过程两种小波滤波方法的相关系数和均方误差见表2。可以得出,针对局部放电包络信号的去噪,改进阈值滤波算法和硬阈值算法滤波效果都比较好,前者相比后者性能有所提高。

4 实际包络信号的滤波

分别选取针尖模型和浮动电极模型的局部放电

表2 改进阈值滤波算法与硬阈值滤波算法的滤波效果比较

滤波方法	改进阈值滤波	硬阈值滤波
ρ_{xy}	0.975 7	0.951 9
MSE	0.002 2	0.004 3

包络信号进行小波去噪,并采用上述改进阈值小波滤波算法。图5(a)和图5(b)分别是此两种模型局部放电包络信号滤波前后的信号波形,从波形上看,噪声得到了很好的抑制,而脉冲波形没有明显的失真。

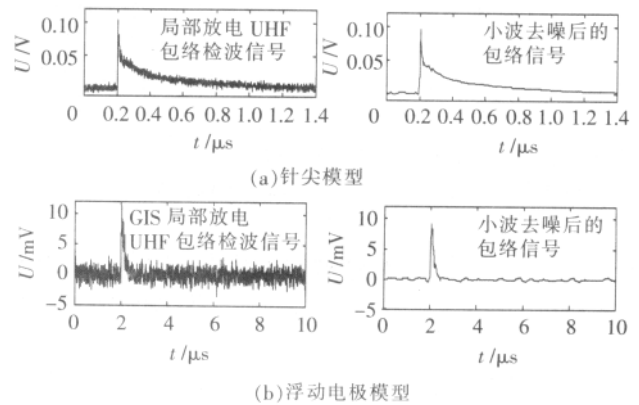


图5 针尖模型与浮动电极模型局部放电包络信号的滤波效果

5 结论

(1)GIS局部放电包络信号的噪声干扰具有白噪声特性,不适合采用硬件滤波器或FFT频域阈值方法滤波。

(2)包络信号能量集中于低频段,笔者提出的将小尺度小波分解系数置零、大尺度小波分解系数采用硬阈值滤波的改进算法对包络信号具有较好的去噪效果,仿真测试和对实际信号的滤波验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] SAKAKIBARA T, NAKAJIMA T, MARUYAMA S, et al. Development of GIS Fault Location System Using Pressure Wave Sensors [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(2): 371-377.
- [2] PEARSON J S, HAMPTON B F, SELLARS A G. A Continuous UHF Monitor for Gas-insulated Substations [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1991, 6 (3): 469-478.
- [3] 李士心, 刘鲁源. 小波域中值滤波器设计的研究 [J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(1): 18-21.
- [4] SATISH L, NAZNEEN B. Wavelet-based Denoising of Partial Discharge Signals Buried in Excessive Noise and Interference [J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2003, 10(2): 354-367.
- [5] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 谢良聘, 朱德恒. FFT 频域分析算法抑制窄带干扰的研究 [J]. 高压电技术, 2000, 26(4): 6-8.
- [7] 潘泉, 张磊. 小波滤波方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.