

文章编号:1000-582X(2006)09-0048-04

电缆局部放电检测中周期性窄带干扰的抑制

廖瑞金, 吕江, 杜言, 陆云才

(重庆大学电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要:局部放电检测系统由于覆盖了比较宽的频带,采集到的信号中会不可避免地包括背景噪声或干扰信号,针对局部放电检测中比较严重的周期性窄带干扰信号,介绍了现有的抑制此类干扰的方法,研究了基于db4小波基的软阈值小波包变换去除周期性窄带干扰的方法,在实验室环境下,对交联聚乙烯(XLPE)电缆的局部放电进行检测,用小波包变换去除所采集波形的周期性窄带干扰,由试验结果可以得出小波包变换抑制周期性窄带干扰效果良好。

关键词:局部放电;周期性窄带干扰;小波包变换;XLPE 电缆

中图分类号:TM835

文献标识码:A

局部放电是在局部高电场的作用下,发生在高压电气设备某些绝缘薄弱环节处的一种放电现象。中国电气设备电压等级的不断提高和各种有机绝缘材料的广泛应用,使得电气设备的局部放电问题显得越来越重要,因此对电气设备局部放电进行有效的检测对电力系统的安全稳定运行具有十分重要的意义。目前普遍采用的局部放电检测装置是通过脉冲电流法来提取局放信号,但由于检测现场干扰众多,很难获取真正的局放信号。因此,如何最大限度地抑制干扰,提取可靠的局放信号,一直以来都是局部放电检测中的重要研究课题^[1]。

1 干扰的分类和周期性窄带干扰的组成

局部放电检测中的干扰信号是多种多样的,按频带可分为窄带干扰和宽带干扰,按时域波形特征可分为连续的周期性干扰、脉冲型干扰和白噪声干扰3类^[2],连续的周期性干扰包括系统高次谐波、载波通讯及无线电通讯等。

不同类型的干扰所表现出来的特性也不同,因此针对不同类型的干扰采取不同的抗干扰措施才能取得理想的去噪效果。下面介绍专门针对周期性窄带干扰所采取的抑制措施。

2 周期性窄带干扰的抑制措施

2.1 传统的模拟滤波法

传统的模拟滤波器是局部放电检测中抑制电磁干

扰的重要手段,此法对于消除工频及其谐波、载波通讯、无线电广播等窄带干扰比较有效,但是其带宽和中心频率的选择依识别干扰的信号而定,窄带滤波抗干扰性强,能抑制通带以外的干扰,但易造成信号某些频率成分的丧失,宽带滤波可测得信号的频率成分比较丰富,但不利于抑制干扰。因此带宽的选择非常重要,由于此方法的通带频率是固定的,不能随干扰信号的频率变化而随意调整,通用性较差,且对于从滤波器后进入的干扰信号和频率分布与局放信号相似的外来信号不能滤除^[3]。

2.2 数字陷波器的应用

为弥补模拟滤波器在消除周期性干扰时的不足,文献[4]和文献[5]中提出了一种数字陷波滤波器抑制周期性干扰的方法:首先通过计算获得周期性干扰的频率分布,接下来进行频域分析和计算得到周期性干扰中的各次谐波的主要参数,然后用数字陷波滤波器来抑制周期性干扰,其原理框图如图1所示。

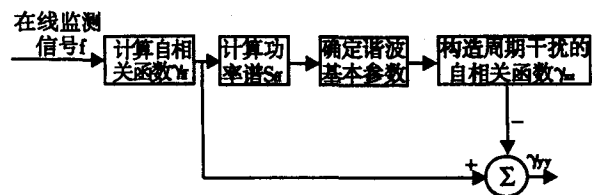


图1 数字陷波滤波器原理图

收稿日期:2006-05-13

作者简介:廖瑞金(1963-),四川遂宁人,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断研究和高压测试技术工作。

在局部放电检测中, 周期性干扰信号并不是单一频率的, 而是占据了多个频率, 为了将各个频段的干扰都消除掉, 文献 [1] 和文献 [6] 采取了级联二阶 IIR 陷波滤波器来抑制周期性干扰, 级联中的每一个二阶滤波器部分都可以独立地滤除某一频段的周期性干扰信号. 模拟实验和现场检测结果分析表明, 级联式 IIR 陷波滤波器在局部放电检测中能够有效抑制周期性干扰, 获得较好的滤波效果^[1,6].

2.3 自适应滤波技术

自适应滤波本质上属于噪声中随机信号的线性均方估计问题, 是维纳滤波理论的一种推广, 常用来检测淹没在宽带噪声中的随机信号, 仅需对当前观察的数据作出处理, 自动调节系统本身的冲击响应特性 (即调节数字滤波器的系数) 以适应信号变化的特性, 从而达到最优化滤波. 自适应滤波器主要由系数可调的数字滤波器和用于调节或修正滤波器系数的自适应算法两部分组成, 其原理如图 2 所示, 从图 2 中可以看出自适应滤波器实质上就是一个噪声抵消器, 只要能得到对噪声信号的最佳估计, 就能得到所要提取信号的最佳估计.

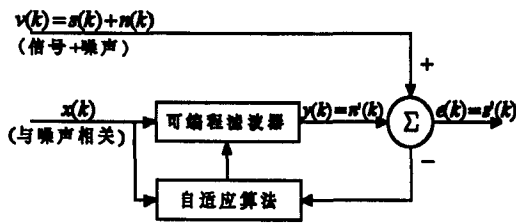


图 2 自适应滤波器原理图

自适应滤波器中最常用的可编程滤波器是 FIR 型滤波器, 最常用的算法有最小均方误差算法 (LMS) 和递归最小平方算法 (RLS)^[7-8].

3 小波包变换抑制周期性窄带干扰

3.1 小波包变换原理

小波变换 (wavelet transform, 简记为 WT) 是近几年发展起来的一种强有力的信号处理工具. 由于局部放电信号为宽频带信号, 经过小波变换后分布在整个尺度空间, 而周期性窄带干扰信号的频率范围有限, 经小波变换后仅仅分布在有限的尺度上, 因此选择合适的尺度, 重新组合滤波器组, 使得输出信号的频带范围不包含周期性窄带干扰信号的频带, 就可以去除周期性窄带干扰.

由二进小波分解原理可知, 每次小波变换是对上一尺度的低频空间进行二进划分, 而高频空间将不会被再次分解, 因而使高频段频率分辨率较差. 正交小波包技术可进一步细分高频部分, 实现了更高频率分辨

率的分解^[4], 使高频部分的信息得以充分的应用, 增强信号处理的灵敏度. 小波包分解示意图如图 3 所示.

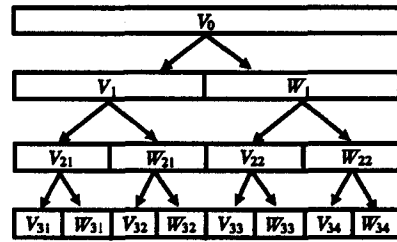


图 3 小波包分解结构图

小波包分解公式:

$$\left. \begin{aligned} x_{2m}^j(n) &= \sum_k h(k-2n)x_m^{j-1}(k), \\ x_{2m+1}^{j+1}(w) &= \sum_k g(k-2n)x_m^{j-1}(k). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

小波包重构公式:

$$x_m^j(n) = \sum_k \bar{h}(n-2k)x_{2m}^{j+1}(k) + \sum_k \bar{g}(n-2k)x_{2m+1}^{j+1}(k), \quad (2)$$

式中 $x_m^j(n)$ 为序列 $f(n)$ 经 j 层小波包分解所得到的第 m 个分解序列; \bar{h}, \bar{g} 分别为 h 和 g 的对偶算子.

对于一个给定的正交小波包基, 一个长度为 $N = 2^L$ 的信号最多有 2^N 种不同的分解方法, 同时一个深度为 L 的完全二叉树的二叉子树的个数也为 2^N . 因此, 这个数字非常庞大, 对每一种情况一一列举是很难想象的, 只要对某个标准能找到一种最优的信号分解的方法和一种有效的算法即可. 通常采用“信息成本”最小的小波包基作为最优基^[9-10]. 将一个实 (或复) 信号 s 的信息成本函数定义为:

$$C(s) = \sum_{k \in Z} \mu(|s(k)|), \mu(0) = 0, \quad (3)$$

式中 μ 为定义在 $(0, +\infty)$ 上的实值函数. 设 H 为 Hilbert 空间, 对 $x \in H$, 取 $s(k) = B^* x(k) = \langle b_k, x \rangle, b_k \in B, B$ 为 H 的一个标准基. 则关于基 B 的信息成本函数为 $C(B^* x)$, 最优基则是使 $C(B^* x)$ 达到最小的基 B . 信息成本函数应是集中度量的, 包括门限函数、熵、 l^2 集中度、能量的对数等, 如门限函数定义为:

$$\mu(\omega) = \begin{cases} |\omega|, & |\omega| \geq \varepsilon \\ 0, & |\omega| < \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

3.2 小波包变换的仿真研究

用小波包变换去除 XLPE 电力电缆中局部放电信号中的周期性窄带干扰时, 目的是找出每个小波包分解尺度的非零系数作为目标函数. 笔者采用门限函数作为优选指标来搜索最优小波基. 通过大量的计算机仿真算法的研究, 由于 db4 小波基函数与笔者的 XLPE 电缆所采集的局部放电信号有最大的相似性, 采用 db4 小波基信号的能量损失最小, 因此, 选取基于 db4

小波基的软阈值法的小波包变换,来去除 XLPE 电缆局部放电的周期性窄带干扰能够达到更佳效果。

局部放电脉冲可以用 4 种不同的数学模型来等效,分别是单指数衰减形式、双指数衰减形式、单指数衰减振荡形式和双指数衰减振荡形式(如图 4(a)所示)。窄带干扰的波形为调幅波或调相波,实际仿真中使用由多个正弦波叠加而成的信号(如图 4(b)所示)。基于 db4 小波基的小波包变换的去噪结果如图 4(c)所示。从图 4 中可以看出:周期性窄带干扰信号得到良好的抑制,信噪比明显提高。

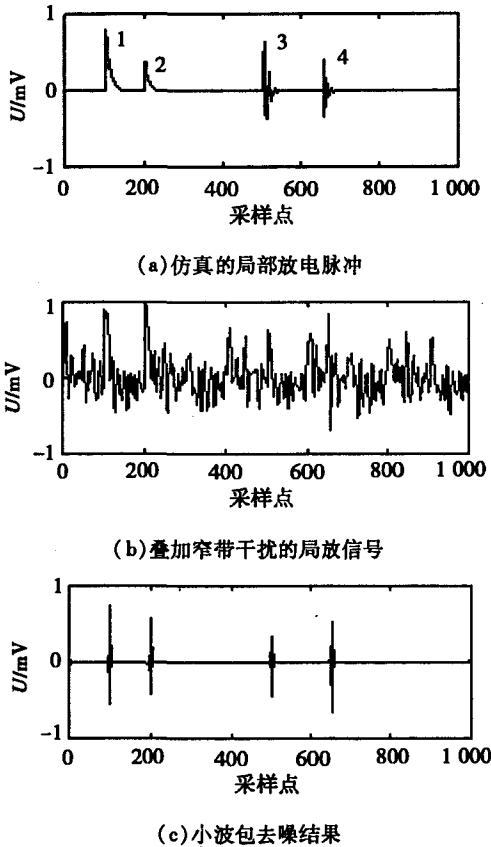


图 4 小波包变换的去噪仿真研究

4 去除周期性窄带干扰的实验室研究

按照图 5 所示的实验原理图,采用脉冲电流法对 XLPE 电缆进行局部放电检测研究,电源为 220 V 交流电源,调压器为 0 ~ 220 V,变压器等级 200 V/50 kV,变比为 1:250,保护电阻 7 kΩ,耦合电容为 1 000 pF,所加的试验电压为 21.5 kV,XLPE 电力电缆的电压等级为 10 kV,示波器为 LeCroy 公司的 Wavepro7100 型(带宽 1 GHz,最大采样率 20 GS/s,存储长度为双通道 48 MB)。示波器采集的局部放电信号波形如图 6(a)、图 7(a)所示(图 6(a)为单一的脉冲波形,图 7(a)为多个局部放电脉冲序列),基于 db4 小波基的软阈值法小波包变换处理结果见图 6(b)、图 7(b)。

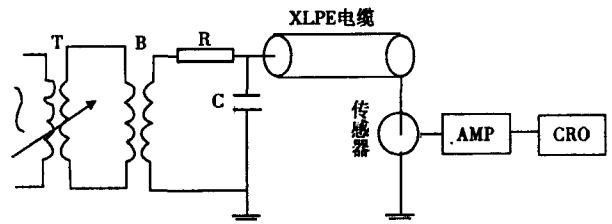


图 5 XLPE 电缆局部放电检测实验接线图

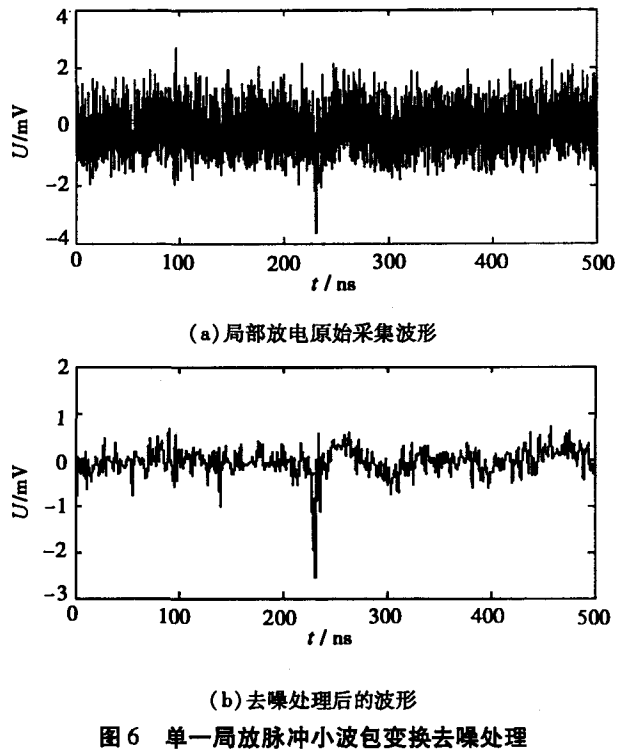


图 6 单一局放脉冲小波包变换去噪处理

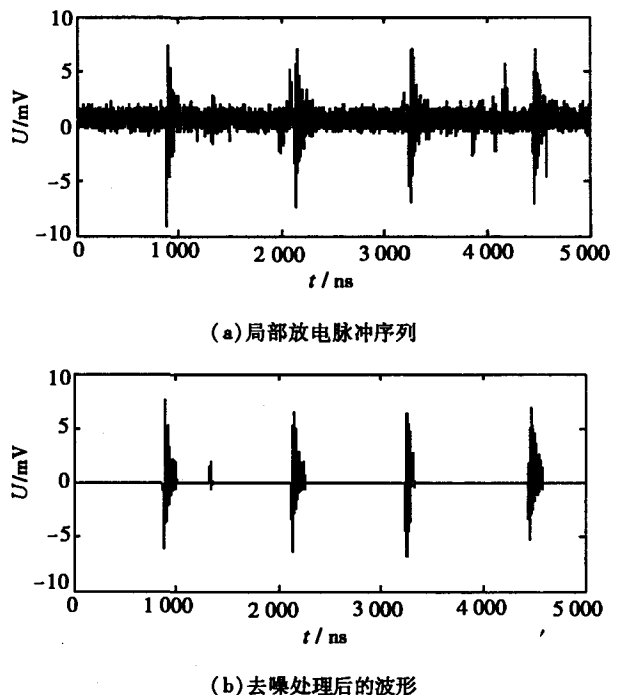


图 7 多个局放脉冲小波包变换去噪结果

从图6、图7的对比可以看出,处理后信噪比提高很大,可以明显分辨局部放电脉冲,而且与局部放电信号的采样率关系不大,即该去噪算法具有较强的自适应能力,不需要考虑信号采样率问题。

5 结论

笔者在介绍了现有去除周期性窄带干扰方法的同时,着重研究了基于db4小波基的软阈值的小波包变换的方法,首先将该方法用于局部放电信号的仿真研究,得到良好的去噪效果,再在XLPE电缆的局部放电检测中,对高档数字示波器采集的局部放电现场波形进行了小波包变换处理,现场的试验结果表明处理效果良好,可以达到提高信噪比、有效分离局放信号和周期性窄带干扰的目的,具有较强的抗干扰能力和自适应能力,即对信号的采样率的适用范围广泛。

参考文献:

- [1] 杨永明,孙才新,严欣平,等.抑制局部放电在线监测中周期性干扰的级联式IIR陷波滤波器的研究[J].电工技术学报,2000,15(5):75-77,68.
- [2] 杨永明,孙才新,顾乐观.一种抑制局部放电在线监测中周期性干扰的新方法[J].高电压技术,1998,24(2):41-43.
- [3] 杨永明,孙才新,李新.局部放电在线监测中干扰的识别及抑制方法的研究[J].仪器仪表学报,1999,20(3):242-243,267.
- [4] 唐炬,孙才新,许中荣,等.局部放电信号中的白噪声和窄带干扰[J].高电压技术,2002,28(12):8-10.
- [5] 王晓蓉,杨敏中,严璋.电力设备局部放电测量中抗干扰研究的现状和展望[J].电网技术,2000,24(6):41-45.
- [6] 乐波,曹戌平,李俭,等.局部放电在线监测中的自适应数字滤波器研究[J].西安交通大学学报,2003,37(6):617-621.
- [7] 于鹏娟,聂卫东.一种可用于局部放电在线检测的数字滤波器[J].变压器,1999,36(2):30-33.
- [8] 赵学梅,王立欣,蔡惟铮.局部放电在线监测中的自适应滤波方法[J].电力系统自动化,1999,23(20):29-32.
- [9] CARRE P, LEMAN H, FEMANDEZ C, et al. Denoising of the Uterine EHG by an Undecimated Wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1998,45(9):1104-1113.
- [10] SHYH-JIER HUANG, CHENG-TAO HSIEH. High-impedance Fault Detection Utilizing a Morlet Wavelet Transform Approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999,14(4):1401-1410.

Suppression of Periodic Narrowband Interferences in Cable Partial Discharge Detections

LIAO Rui-jin, LV Jiang, DU Yan, LU Yun-cai

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030 China)

Abstract: There are background noises and interferences in the signal acquired, due to partial discharge (PD) detection system covers a broad frequency band. To suppress periodic narrowband signal which is a quite serious interference in PD measurement, the existing suppression method is introduced, the new method of wavelet packet transform is mainly studied to de-noise the periodic narrowband in XLPE cable PD detection system, which is based on the db4 basic wavelet using soft threshold. The results of the experiment show that wavelet packet transform is effective in restraining the periodic narrowband interferences to extract the PD pulses in XLPE cable PD monitoring system.

Key words: partial discharge; periodic narrowband interference; wavelet packet transform; XLPE cable

(编辑 李胜春)