

变压器局部放电在线监测加权阈值小波降噪方法研究

刘明军, 王鹏, 周求宽, 康琛

(国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 有效抑制现场强干扰是变压器局部放电在线监测的关键技术之一。在分析各种阈值策略特点的基础上, 提出采用多阈值策略加权算法确定小波阈值, 利用改进阈值对局部放电信号进行小波降噪。计算机仿真及现场信号分析表明, 改进阈值小波降噪后信号符合相似性和光滑性准则, 同时能够较好地保证信号的局部化特征。改进阈值的小波分解重构能够从复杂现场干扰中有效提取局部放电信号, 可用于变压器局部放电在线监测。

关键词: 变压器; 局部放电; 小波变换; 加权阈值; 在线监测

Study on weighted threshold wavelet noise reduction method for transformer partial discharge on-line monitoring

LIU Mingjun, WANG Peng, ZHOU Qiukuan, KANG Chen

(State Grid Jiangxi electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: It is one of the key problems to effectively suppress on-site interferences in on-line partial discharge (PD) monitoring for power transformer. Based on the analysis of the characteristics of various threshold strategies, a multi-threshold strategy weighted algorithm is proposed to determine the wavelet threshold which is used to suppress the interference in transformer PD signals. Computer simulation and on-site signals analysis show that wavelet noise reduction method meets the similarity and smoothness criteria, while the local feature of PD signal is to be preserved. PD signals could be accurately extracted from the complex on-site interference through the improved threshold wavelet transform, which can be used for on-line partial discharge monitoring to power transformer.

Key words: transformer; partial discharge (PD); wavelet transform; weighted threshold; on-line monitoring

0 引言

电力变压器位于电力系统中最重要的设备之列, 其可靠运行对电力系统的稳定、经济运行有重大意义。变压器故障统计分析表明^[1], 由绝缘故障引发的大型变压器事故比例较高。而造成变压器绝缘老化和破坏的主要原因之一是局部放电, 在绝缘介质击穿之前往往表现为局部放电逐步发

展和增强。因此, 变压器局部放电在线监测对提高电力系统的安全性和可靠性具有相当大的实用价值。

大型变压器内部缺陷的早期局部放电信号比较微弱, 而运行中的变压器周围往往存在强大的干扰噪声源。图1给出了来自现场局部放电在线监测系统的原始信号, 可见局部放电信号相对噪声

信噪比很低，几乎淹没在复杂的现场干扰中。现场各种干扰根据其时域特征的不同可以分为连续的周期性干扰、脉冲型干扰和白噪声等，而脉冲型干扰又可分为随机型脉冲干扰和周期型脉冲干扰。

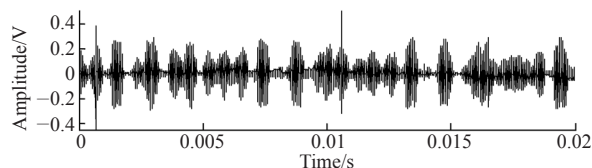


图1 在线监测系统捕获的现场局部放电原始信号

Fig.1 Original PD signals from on-line monitoring system

如何有效地抑制干扰成为局部放电在线监测的关键。针对周期性窄带干扰，目前采用的抑制方法主要有FFT阈值滤波^[2]、自适应滤波^[3]、陷波滤波器^[4]和数学形态滤波器^[5]。小波变换法^[6-8]用于白噪声和随机干扰抑制效果较理想。阈值滤波和陷波器法使原始局部放电能量损失较大，现场中干扰频带发生变化时，滤波器参数难以确定，降噪效果不甚理想；自适应滤波虽然能够根据信号自动调节参数，但收敛速度较慢，稳定性较差，难以应用于在线监测。IIR陷波滤波器对于多谐波成分的周期性干扰存在参数调整困难、滤波时间长等问题。由于在正交小波中，正交基的选取比传统方法更接近于实际放电信号本身，所以通过小波变换可以更容易地分离出噪声。本文应用构建的dB小波提出采用多阈值策略加权算法，对变压器局部放电信号小波降噪方法进行了系统研究。

1 小波降噪原理

1.1 基本降噪模型

一个信号 $f(n)$ 被噪声污染后为 $s(n)$ ，那么基本的噪声模型就可以表示为

$$s(n) = f(n) + \sigma e(n) \quad (1)$$

式中， $e(n)$ 为噪声； σ 为噪声强度，定义噪声 $w(n) = \sigma e(n)$ 。

在最简单的情况下可以假设 $e(n)$ 为高斯白噪声， $\sigma=1$ 。小波变换的目的就是要抑制 $e(n)$ 以恢复 $f(n)$ 。从统计学的观点来看，这个模型是一个随

时间推移的回归模型，这种分解方法也可以看作是在正交基上对函数 f 的无参估计。在这个噪声模型下，用小波变换对信号进行降噪的原理如图2所示。

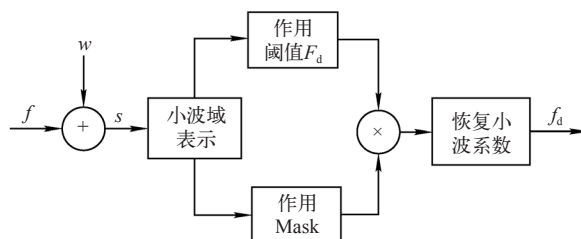


图2 小波变换用于信号降噪原理框图

Fig.2 Diagram of noise reduction using wavelet transform

1.2 小波变换用于信号降噪

小波变换是一种时间窗和频率窗都可以改变的时频联合分析方法，在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，而在高频部分表现出相反的特性。因此，小波变换在时频域都具有很强的表征信号局部特征的能力。包含强干扰的局部放电信号属于非平稳随机信号，对该信号进行降噪必须符合以下两个准则。

1) 光滑性准则。在大部分情况下，降噪后的信号应该至少和原信号具有同等的光滑性。

2) 相似性准则。降噪后信号和原信号的方差估计应该是最坏情况下的方差最小。

小波基是Banach空间中的无条件正交基，通过选择合适的阈值生成最小方差估计的降噪信号，可以完全满足信号降噪的两个基本要求。原始放电信号在小波域的能量相对集中，表现为能量密集区域的信号分解系数绝对值比较大，而噪声信号的能量谱相对分散，所以其系数的绝对值较小，通过作用阈值的方法可以过滤掉绝对值小于一定阈值的小波系数，从而达到降噪的效果。

小波变换用于局部放电信号降噪包含以下三个步骤。

1) 信号分解。选定一种基小波，对信号进行 n 层小波分解。

2) 作用阈值。对分解得到的各层系数选择合适的阈值，对系数作用阈值处理。

3) 重建信号。将处理后的系数通过小波重建

恢复原始信号。

2 小波函数的选取及阈值估计

2.1 小波函数的选取

同傅里叶分析不一样，小波分析的基（小波函数）不是唯一存在的，实际小波选取要符合相似性准则。如果选择的小波对信号具有较高的相似性，则变换后能量相对集中，可以有效减少计算量。对局部放电信号而言，通常用式（2）决定的相关系数 γ 来评估放电脉冲信号和小波原子的相似性，即

$$\gamma = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (2)$$

式中， x_i 为局部放电脉冲信号数据序列； $\bar{x}$ 为 x_i 的均值； y_i 为小波原子的数据序列； $\bar{y}$ 为 y_i 均值。

γ 值越大，表示放电信号和所选小波的相似性越高。局部放电信号具有上升沿陡峭、低幅值、持续时间短及衰减快的特性。与局部放电信号的特性相比，支撑正交小波Daubechies（dB）小波函数族有较高的相似性。在dB小波函数族中，dB5小波支集长度为9，消失矩为5，使得变换后的能量更集中，同时具备较好的边界特性。分解层数对降噪效果影响也较大，分解越细，低频部分将会得到更好地抑制，但增加分解层数需要更多的处理时间。综合考虑以上因素，本文选择5层dB5小波分解对局部放电信号进行降噪。

2.2 阈值估计

小波取阈值等价于通过一个局部自适应于信号正则性的核做平均后估计信号，取阈值的风险接近于极小化极大。选取的阈值必须刚好大于噪声的最大水平，并且通常来说，较低的阈值可以减少去噪风险，但往往不能取得令人满意的降噪效果。小波取阈值首先必须对信号噪声方差 σ^2 进行估计，然后结合小波分解系数采用相应的阈值策略估计阈值。

2.2.1 统一阈值

Donoho和Johnstone提出了统一阈值的概念^[9-10]，并证明在所有的对角估计子中，因子 $2\log_e N$ 是最优的，统一阈值计算公式为

$$T = \sigma \sqrt{2\log_e N} \quad (3)$$

式中， σ^2 为从信号中估计的噪声方差（ σ 为标准差）； N 为各级小波细节系数长度，由该公式计算各级分层阈值。

若 M 是 P 个均值为零、方差为 σ_0^2 的独立高斯随机变量的绝对值中位，则可以证明

$$E\{M\} \approx 0.674 \cdot 5\sigma_0 \quad (4)$$

式中， $E\{M\}$ 为 M 数学期望。

通过忽略 f 的影响，采用细节系数的中位 M 来估计噪声 W 的方差，计算公式为

$$\tilde{\sigma} = \frac{M}{0.674 \cdot 5} \quad (5)$$

将式（5）代入式（3）可得到如下计算统一阈值的等价公式

$$T = \frac{M \sqrt{2\log_e N}}{0.674 \cdot 5} \quad (6)$$

以上对 f 影响的忽略是可行的，事实上 f 只对极少数大幅值起作用，并且在实际信号中这些对中位值 M 的影响很小。

2.2.2 Birge – Massart阈值

Birge – Massart阈值策略包含两个经验系数 M 和 α ，计算规则如下。

1) 给定一个指定的分解层数 j ，对 $j+1$ 及更高层所有系数均保留。

2) 对第 i 层（ $1 \leq i \leq j$ ）保留绝对值最大的 n_i 个系数， n_i 由下式确定

$$n_i = M(j+2-i)^\alpha \quad (7)$$

式中， M 和 α 为经验系数，缺省情况下取 $M=L(1)$ ， $L(1)$ 也就是第1层分解后小波系数的长度，一般情况下， M 应该满足 $L(1) \leq M \leq 2L(1)$ ； α 在降噪情况下取 $\alpha=3$ 。

2.2.3 惩罚阈值

惩罚阈值从Donoho – Johnstone方法派生而来，类似于式（6）给出的统一阈值，因子用 $\log_2 N$ 替换，计算公式为

$$T = \frac{M(0.393\ 6 + 0.182\ 9 \log_2 N)}{0.674\ 5} \quad (8)$$

式中, M 和 N 的定义与式(6)相同。

3 仿真信号降噪分析

3.1 仿真局部放电信号

局部放电信号是超宽频带信号,从局部放电点沿变压器绕组传播到检测点的过程会产生较大的振荡和衰减,因此在现场检测到的局部放电信号一般为衰减振荡信号。局部放电脉冲在理论上可以用以下两种模型来表示^[11]

$$f_1(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(f_c 2\pi t) \quad (9)$$

$$f_2(t) = A(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(f_c 2\pi t) \quad (10)$$

式中, A 为信号幅值; τ 为衰减系数; f_c 为振荡频率。

仿真局部放电信号取一个工频周期,在其中加入模拟载波通信干扰和白噪声,得到的信号为

$$yn = f(t) + c(t) + \sigma(t) \quad (11)$$

式中, $L(t)$ 为仿真放电脉冲信号; $c(t)$ 为载波通信干扰; $w(t)$ 为白噪声。

3.2 多阈值策略加权小波降噪算法

选取dB5小波对信号进行5层分解,得到各级分解系数。根据噪声估计各级阈值如表1所示。采用以上三种阈值对仿真信号进行降噪,得到的降噪信号如图3所示。其中 y_{d1} 为统一阈值降噪结果, y_{d2} 为惩罚阈值降噪结果, y_{d3} 为Birge-Massart阈值策略降噪结果。

表1 仿真信号分层小波阈值

Tab.1 Wavelet threshold of simulation PD signals

层数	策略	统一 阈值	B-M 阈值	惩罚 阈值
1		2.611 8	1.986 7	1.620 2
2		0.756 3	0.573 3	0.454 9
3		0.755 2	0.443 5	0.439 7
4		0.636 1	0.384 8	0.358
5		0.671 2	0.239 1	0.364 8

由降噪后信号可知,统一阈值降噪信号太过于光滑,失去了信号本身的一些信息,不符合相

似性准则。惩罚阈值降噪后毛刺较多,仍然存在明显的噪声信号。由表1的各级阈值可以看出,统一阈值较大,去除了部分有用信号,增加了去噪风险。惩罚阈值刚好与之相反,阈值较小,降噪效果不理想。Birge-Massart阈值降噪效果较好,但对信号幅值有一定的影响。因此,本文提出采用多阈值策略加权的方法,得到改进的分层阈值 $T_w(j)$,计算公式为

$$T_w(j) = \sum_{i=1}^N w_i(j) T_i(j) \quad 1 \leq j \leq \text{lev} \quad (12)$$

式中, i 为阈值策略标识; j 为小波系数级; lev 为分解层数; N 为总的阈值策略数; $T_i(j)$ 为第 i 种阈值策略确定的第 j 级阈值; $w_i(j)$ 为对应的权重。

对确定的级数 $j=j_0$ 而言,权值系数 $w_i(j_0)$ 满足以下约束式

$$\sum_{i=1}^N w_i(j_0) = 1 \quad 1 \leq j_0 \leq \text{lev} \quad (13)$$

本文采用5级小波分解以及三种阈值策略加权,因此 $\text{lev}=5$, $N=3$ 。

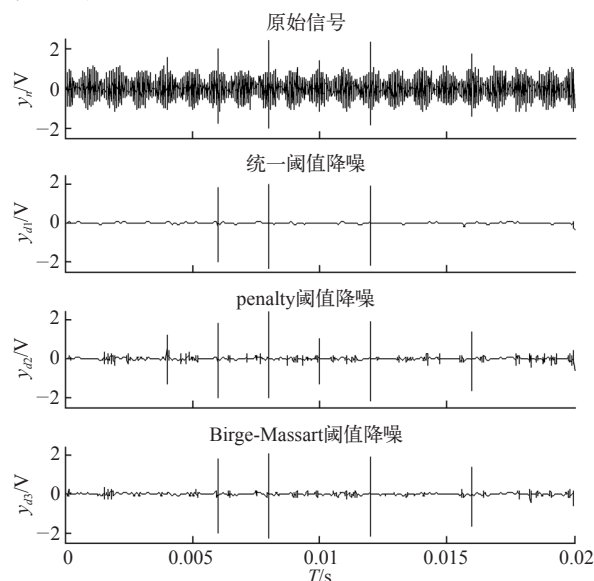


图3 仿真信号三种阈值降噪结果

Fig.3 Denoised results using 3 threshold methods of simulation PD signals

4 现场实际信号降噪分析

现场局部放电信号来自笔者开发的变压器在线监测系统,系统现在某电厂500 kV开关站

运行, 获取了包括变压器试验、运行及停电(检测现场干扰)等情况下的局部放电信号。通过在变压器铁心接地线安装电流传感器耦合电脉冲信号, 局部放电无论发生在变压器高压、中压和低压侧, 在铁心接地线上都有较好的响应。分析现场数据发现, 局部放电信号包含大量的干扰信号, 有的甚至淹没在干扰中。图4中 y_n 是一个工频周期的局部放电原始信号, 其他为小波分解系数, 其中 A_5 为第5级近似系数, D_i ($1 \leq i \leq 5$) 为第 i 级细节系数。 D_2 表明小波分解到第二层时, 干扰已经基本被剥离。

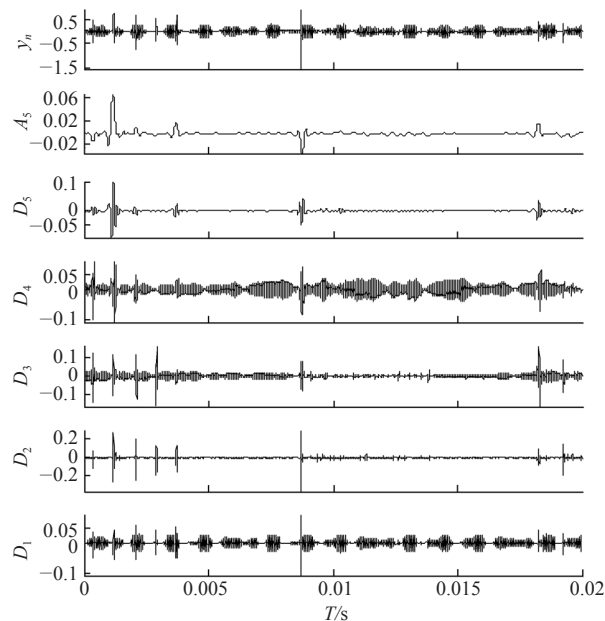


图4 现场信号各级小波分解系数

Fig.4 Wavelet decomposition coefficients of on-site PD signal

采用以上三种阈值策略计算的阈值如表2所示。图5显示了各阈值策略的降噪效果, 其中 y_n 为原始信号, $y_{d1} \sim y_{d4}$ 为降噪信号。各级阈值的规律与仿真信号基本一致, 统一阈值降噪效果较理想, 但信号局部特征丢失严重; 惩罚阈值普遍偏小, 降噪后仍然存在部分干扰; Birge-Massart阈值对幅值较小的脉冲衰减较大, 部分正负极性脉冲衰减至单极性(图5中 y_{d3} 的前5个脉冲)。

根据各阈值策略的特点, 由式(12)计算得到加权阈值 $T_w(j)$ 如表2所示。利用 $T_w(j)$ 对原始信号进行降噪, 得到的降噪信号如图5中 y_{d4} 所示。比较 y_{d3} 和 y_{d4} 信号的前5个脉冲, 可以发现加权阈值明显

表2 现场信号分层小波阈值

Tab.2 Wavelet threshold of on-site PD signals

层数	策略	统一 阈值	B-M 阈值	惩罚 阈值	加权 阈值
1		0.467 9	0.749 8	0.290 2	0.502 6
2		0.023 1	0.265 4	0.013 9	0.100 8
3		0.131 7	0.131 6	0.076 7	0.113 3
4		0.262 8	0.103 4	0.148	0.171 4
5		0.020 4	0.013 2	0.011 1	0.014 9

改善了Birge-Massart阈值带来的信号幅值衰减问题, 同时保证了较好的信号局部化特征。

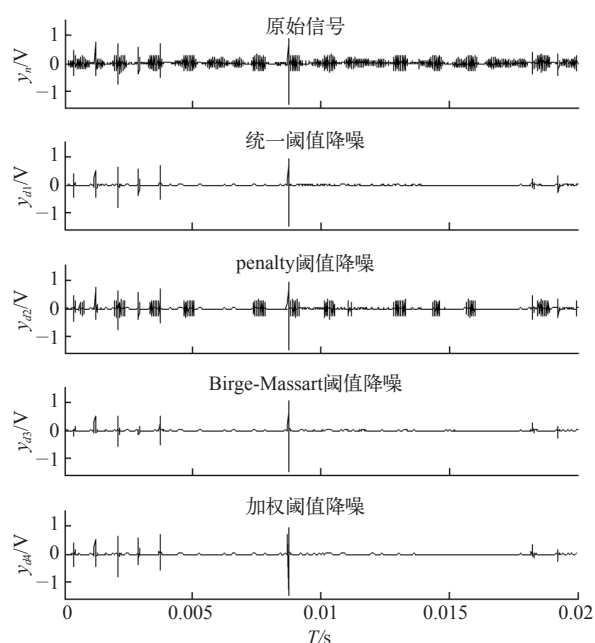


图5 现场信号改进阈值降噪结果

Fig.5 Denoising results using improved threshold methods of on-site PD signals

5 结束语

比对了各种基小波与局部放电脉冲的相似性, 选取相似度较高的dB5小波作为降噪基小波。仿真和现场信号分析表明, dB5小波用于变压器局部放电信号降噪效果明显。在分析各种阈值策略特点的基础上, 提出采用多阈值策略的加权阈值进行小波降噪, 数据分析表明加权阈值兼备各阈值策略的特点, 信号降噪后保证了相似性和光滑性准则, 降噪效果良好。采用的加权阈值对各级阈值采用相同的权值, 如何根据各级噪声估计自适应选择合适的阈值权值, 优化多阈值策略加权

算法,成为下一步研究工作的重点。

参考文献

- [1] 赵凯, 陈丽娟, 吴玉鹏, 等. 2004年全国电力可靠性统计分析[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 1-8.
ZHAO Kai, CHEN Lijuan, WU Yupeng, et al. Statistical analysis of national electric power reliability in 2004[J]. Electric Power, 2005, 38(5): 1-8.
- [2] 谢良聘, 朱德恒. FFT频域分析算法抑制窄带干扰的研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 6-8.
XIE Liangpin, ZHU Deheng. Research on narrow band interference suppression by FFT frequency domain analysis algorithms[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 6-8.
- [3] Khan S Z. A new adaptive technique for on-line partial discharge monitoring[J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 700-705.
- [4] 杨永明, 孙才新, 高大全, 等. 用直接陷波法抑制局部放电监测系统中周期性干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 62-64, 69.
YANG Yongming, SUN Caixin, GAO Daquan, et al. Study on suppression of periodic interference in partial discharge monitoring system by direct notch method[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 62-64, 69.
- [5] 刘云鹏, 律方成, 李成榕, 等. 基于数学形态滤波器抑制局部放电窄带周期性干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 169-173.
LIU Yunpeng, LV Fangcheng, LI Chengrong, et al. Research on suppressing narrow-band periodic interference of partial discharge based on mathematical morphological filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 169-173.
- [6] 唐炬, 许中荣, 孙才新, 等. 应用复小波变换抑制GIS局部放电信号中白噪声干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 31-34.
TANG Ju, XU Zhongrong, SUN Caixin, et al. Application
- of complex wavelet transform to suppression of white noise disturbance in partial discharge signal of GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 31-34.
- [7] 黄成军, 郁惟镛. 基于小波分解的自适应滤波算法在抑制局部放电窄带周期干扰中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 107-111.
HUANG Chengjun, YU Weiyong. Application of adaptive filtering algorithm based on wavelet decomposition in suppressing narrowband periodic interference of partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 107-111.
- [8] 唐炬, 谢颜斌, 朱伟, 等. 用于复小波变换的EWC阈值法抑制周期性窄带干扰[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 43-47.
TANG Ju, XIE Yanbin, ZHU Wei, et al. EWC threshold method for complex wavelet transform to suppress periodic narrow band interference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 43-47.
- [9] Donaho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(1): 425-455.
- [10] Donaho D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [11] Yang L, Judd M D. Recognising multiple partial discharge sources in power transformers by wavelet analysis of UHF signals[C]. IEE Proceedings-Science. Measurement and Technology, 2003, 150(3): 119-126.

作者简介



刘明军

刘明军, 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为变电设备状态在线监测与带电检测技术研究与应用。

(收稿日期: 2018-07-03) **EA**