

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.03.002

基于改进DTCWT的GIS局部放电信号降噪方法的研究

王永强¹, 张斌¹, 李长元¹, 仲钊¹, 王巨伟¹, 崔博源²

(1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: GIS局部放电产生微弱的特高频信号在外界各种噪声干扰下容易被掩盖,为此利用特高频法检测GIS局部放电必须经过有效降噪处理。文中提出一种基于改进的对偶树复小波(dual-tree complex wavelet transform, DTCWT)局部放电特高频信号降噪方法,该方法是利用DTCWT将含噪信号分解为一系列小波系数,并得到信号在不同变换尺度下的细节分量。利用时域峭度和包络谱峭度将细节分量进行敏感预筛选,极大地提高了后续的最大峭度解卷积(maximum kurtosis deconvolution, MKD)去噪效率。为了验证该方法的有效性与可靠性,进行GIS局部放电特高频信号降噪实测试验,结果表明该方法能有效的对局放信号进行去噪处理,且在较好发挥DTCWT平移不变性等优点的基础上,对细节信号分量的筛选,可改善该局放降噪方法的降噪效果评价指标,并保持其原有的信号特征。

关键词: 改进DTCWT; MKD; 信号降噪; 特高频; 局部放电; 平移不变性

Study on Noise Reduction Method of GIS PD Signal Based on the Improved DTCWT

WANG Yongqiang¹, ZHANG Bin¹, LI Changyuan¹,
ZHONG Zhao¹, WANG Juwei¹, CUI Boyuan²

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Weak UHF signal generated by partial discharge in GIS is easy to cover up by various external noises. Detection of partial discharge in GIS by using UHF method, the effective noise reduction preprocessing must be adopted. This article proposes a kind of improved method of dual-tree complex wavelet transform (DTCWT) partial discharge UHF signal denoise. This method uses DTCWT to decompose noisy signals into a series of wavelet coefficients and obtains the detail components of the signal at different scales. It also uses kurtosises of time-domain signal and of envelope spectrum to pre-filter detail components sensitively which greatly improving the follow up of maximum kurtosis deconvolution(MKD) denoise efficiency. In order to verify the validity and reliability of this new method, an experiment is conducted about GIS partial discharge UHF signal denoise. The result shows that based on the better exerting of DTCWT shift invariance, the method of this paper is available to precisely suppress the noise interference of PD signal. Furthermore the screening of detail signal components can improve the noise reduction effect evaluation and maintain the original PD signal characteristics.

Key words: improved dual-tree complex wavelet transform; maximum kurtosis deconvolution; signal denoise; ultra-high frequency; partial discharge; shift invariance

0 引言

检测气体绝缘金属封闭组合电器(gas insulated

switchgear, GIS)中局部放电所产生的UHF信号是20世纪80年代初期由英国中央电力局开发出来的^[1],并得到了人们的广泛认可。但特高频检测法检测GIS局部放电时易受电磁载波通信、高频信号保护引起的连续周期性干扰以及其他设备产生的脉冲型干扰

收稿日期:2017-08-07; 修回日期:2017-10-14

基金项目:国家电网科技项目(1206112011018)。

Project Supported by Science and Technology Project of the State Grid Corporation(1206112011018).

的影响^[2-3],进而致使微弱的放电信号淹没在各种噪声干扰中,影响监测设备的正常运行。因此在现场GIS局部放电故障检测时如何解决GIS局部放电特高频信号的噪声干扰问题成为有效监测的关键。

利用特高频法检测GIS局部放电,在信号采集、放大与检波过程中都容易受到噪声干扰,而且特高频信号具有中心频率较大、频带宽等特性,降噪过程中保持信号的原始特征仍是一个难点^[3]。最近几年来国内外学者对局部放电特高频信号降噪问题做了大量的研究工作^[4-8],文[4]提出了应用复小波变换对局部放电超高频信号去噪,该方法使用了传统的复小波阈值降噪法,虽然能得到良好的降噪效果,但是无法保证信号的平移不变性,难以保留局部放电信号原始特征;文[5]采用形态学滤波和自适应噪声抵消相结合的方法对GIS局部放电超高频信号的去噪问题进行了研究,该方法虽然与传统小波变换方法相比,能更好地去除白噪声且去噪后信号具有较小的幅值误差和畸变率,但是对于其他类型的噪声干扰效果不明显。

针对上述问题,文中提出基于改进DTCWT的GIS局部放电特高频信号降噪方法。利用包络谱峭度和时域峭度去掉DTCWT分解细节分量中的虚假分量^[9],再利用MKD对DTCWT中有效分量进行去噪和信号增强,最后逆DTCWT变换完成信号重构,获得降噪后的信号^[3]。该方法使用DTCWT能够在保持平移不变性和多方向选择性的情况下进行信号的精确重构,筛选方法可以极大提高MKD滤波效率。实测表明该方法能够很好地分离噪声与非噪声信号,针对局部放电特高频信号进行有效地降噪处理,并保留早期GIS局部放电信号的放电特征。

1 DTCWT和MKD基础

1.1 DTCWT基础

离散小波变换(CWT)因其不具有平移不变性,且计算时数据冗余多、计算代价大等缺点限制了它的进一步发展^[10-11],而DTCWT采用两颗并行的实小波变换树实现对信号的分解和重构,使之具有良好的近似的平移不变性和多方向选择性。相比于CWT而言,DTCWT的数据冗余是有限的^[11-12]。DTCWT两层分解与重构过程见图1。图1中:Tree₁为实部树;Tree₂为虚部树。

DTCWT的函数基是利用小波函数对 $\psi_h(t)$ 和 $\psi_g(t)$ 来满足Hilbert变换对要求, $\psi_h(t)$ 和 $\psi_g(t)$ 作为实部和虚部,复小波可表示为 $\psi(t)=\psi_h(t)+i\psi_g(t)$ 。

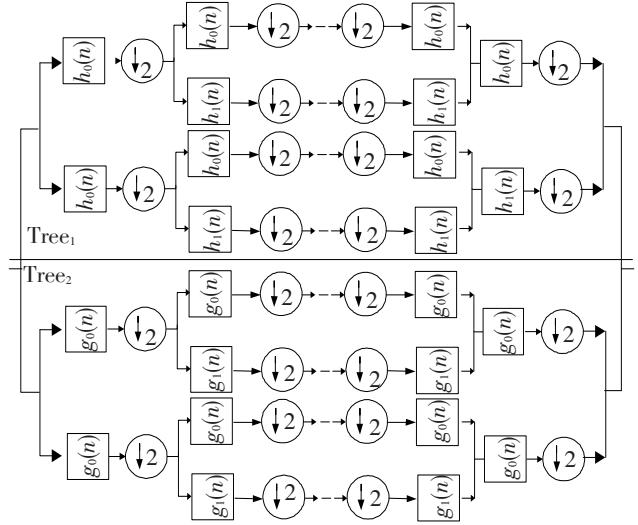


图1 两层DTCWT变换的分解和重构过程

Fig. 1 The decomposition and reconstruction processing of DTCWT

由于DTCWT变换由两个并行的小波变换组成,根据小波理论,上面Tree₁和Tree₂小波变换的小波系数和尺度系数分别可由式(1)-(4)计算:

$$b_i^{\text{reel}}(m) = \int_{-\infty}^{+\infty} 2^{i/2} y(t) \psi_h(2^i t - m) dt \quad (1)$$

$$d_i^{\text{reel}}(n) = \int_{-\infty}^{+\infty} 2^{i/2} y(t) \psi_h(2^i t - n) dt \quad (2)$$

$$b_i^{\text{reel}}(m) = \int_{-\infty}^{+\infty} 2^{i/2} y(t) \psi_g(2^i t - m) dt \quad (3)$$

$$d_i^{\text{reel}}(n) = \int_{-\infty}^{+\infty} 2^{i/2} y(t) \psi_g(2^i t - n) dt \quad (4)$$

因此,可得到DTCWT变换的小波系数和尺度系数^[7]:

$$b_i^\psi(n) = b_i^{\text{reel}}(n) + i b_i^{\text{reel}2}(n) \quad (5)$$

$$d_i^\psi(n) = d_i^{\text{reel}}(n) + i d_i^{\text{reel}2}(n) \quad (6)$$

DTCWT变换的小波系数和尺度系数可由式(7)、(8)进行重构

$$b_i(t) = 2^{i-1/2} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} b_i^{\text{reel}}(n) \psi_h(2^i t - n) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_i^{\text{reel}2}(n) \psi_g(2^i t - k) \right] \quad (7)$$

$$d_i(t) = 2^{i-1/2} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} d_i^{\text{reel}}(n) \psi_h(2^i t - n) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_i^{\text{reel}2}(n) \psi_g(2^i t - k) \right] \quad (8)$$

DTCWT变换后的重构信号可表示为

$$y(t) = b_i(t) + d_i(t) \quad (9)$$

1.2 MKD

1.2.1 MKD原理

MKD本质是一个逆滤波器,通过反作用于信号本身的传递路径,以将原始的输入冲击信号恢复^[13]。

假设输出信号为 $y(i)$,含噪信号为 $\phi(i)$, $i=1,2,\dots,N$, N 是采样点数。可以将MKD逆滤波器 Γ 写成有限冲

击响应滤波器的形式(长度 L), 见式(10)。

$$y(i) = \Gamma(i) \times \phi(i) = \sum_{l=1}^L \Gamma(l) d(i-l) \quad (10)$$

其中 MKD 逆滤波器需要满足式(11)的条件

$$\Gamma(i) \times \phi(t) = \delta(i-t) \quad (11)$$

式(11)中, t 为延迟量。

将目标函数设为峭度最大化的输出信号 $y(i)$, 如式(12)所示。

$$K[\Gamma(x)] = \sum_{i=1}^N y^4(i) / [\sum_{i=1}^N y^2(i)]^2 \quad (12)$$

求最优逆滤波器 f 的系数, 即目标函数的一阶导数为零, 如式(13)所示。

$$Y = X\Gamma \quad (13)$$

$$Y = \sum_{i=1}^N y^2(i) \sum_{i=1}^N (y^3(i) \phi(i-x)) / \sum_{i=1}^N y^4(i) \quad (14)$$

$$X = \sum_{i=1}^N \phi(i-l) \phi(i-x) \quad (15)$$

$$\Gamma = \sum_{i=1}^L \Gamma(i) \quad (16)$$

式(14)为输出与输入的互相关矩阵; 式(15)为输入信号的 Toeplitz 自相关矩阵; 式(16)是 MKD 滤波器的参数。

1.2.2 MKD 实现过程与参数选择

MKD 逆滤波器实现步骤如下:

1) 计算 Toeplitz 自相关矩阵 X ;

2) 将 MKD 滤波器参数进行初始化;

$$\Gamma: \Gamma^{(0)} = 1 \quad (17)$$

3) 根据式(10)计算输出信号;

$$y(i) = \sum_{j=1}^L \Gamma^{(j-1)}(l) d^{(j-1)}(i-l) \quad (18)$$

式(18)中, J 是总迭代计算次数。

4) 通过式(14)计算 $Y^{(j)}$;

5) 更新 $\Gamma^{(j)} = X^{-1}Y$;

6) 计算迭代终止条件。

$$\delta = Kur(\Gamma^{(j)}) - Kur(\Gamma^{(j-1)}) \quad (19)$$

式(19)中, δ 为收敛误差, 将 δ 与设定值对照, 当其大于 δ 迭代终止; 否则返回 3), 继续循环。其收敛误差一般取 0.01。

MKD 实现过程中, 滤波器长度是影响滤波效果最大的因素。过长的滤波器, 也会伴随着计算量的增加, 所以在满足要求的前提下应尽量减少滤波器长度, 其长度在 512~1 024 之间。

2 改进 DTCWT 的降噪方法

改进的 DTCWT 降噪方法是利用 DTCWT 法将

含噪信号分解为一系列能体现局部放电信号特征的细节分量^[14]。但若将所有分量均作为信号特征, 则会导致特征量的数目过于庞大, 且并非所有的分量都包含放电信号, 有些 DTCWT 变换细节分量与放电紧密相关, 其他则体现的是噪声信号。于是文中提出改进方法, 根据时域峭度和包络谱峭度, 筛选出敏感的分量并根据最大峭度解卷积原理分别对其进行 MKD 解卷积降噪; 最后将降噪后的各 DTCWT 变换分量逆 DTCWT 变换完成信号重构, 获得降噪后的信号。利用此方法进行局部放电的特高频信号降噪, 不仅能够很好地将放电信号与噪声分离, 还具有有限冗余、平移不变性和保持原始信号特征等特点。改进的 DTCWT 降噪方法的具体步骤如下:

1) DTCWT 的分解层数的确定, 层数的不同将影响降噪的精度和降噪计算速度, DTCWT 法分解层数确定应结合实际的硬件采样速率、存储空间以及软件计算速度;

2) 含噪信号的 DTCWT 分解, 含噪信号为 $\phi(i)$ 信号进行 n 层对偶树复小波变换, 将第 i 层小波变换系数 $w_i = w_i^{re} + iw_i^{im}$ 通过对偶树复小波变换逆过程重构, 得到第 i 层小波分量^[15]。信号不同变换尺度下的细节信号分量可以组成一个矩阵为

$$D_n = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1(1) & d_1(2) & \cdots & d_1(k) \\ d_2(1) & d_2(2) & \cdots & d_2(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_n(1) & d_n(2) & \cdots & d_n(k) \end{pmatrix} \quad (20)$$

式(20)中: $D_j = (d_j(1), d_j(2), \cdots, d_j(k)), j=1, 2, \cdots, n$, 表示 DTCWT 分解所得到的第 i 层细节信号分量。

3) 信号分量筛选, 从时域看, 当某些 DTCWT 变换细节信号分量的峭度值较大时, 说明这些分量中含有较多的局放脉冲成分, 即原信号分解后, 局放信号保留在这些分量中。信号 D_i 的峭度计算公式为

$$Kur(d) = \frac{\frac{1}{n} \sum (d_i - \bar{d})^4}{Std(x)^4} \quad (21)$$

从包络域看, 如果能看到明显突出的局放特征频率, 说明这些细节信号分量中含有较多的局放信号。包络计算公式如式(22)所示, 其中 HT 代表 Hilbert 变换。

$$env(t) = \sqrt{x(t)^2 + \{HT[x(t)]\}^2} \quad (22)$$

基于以上分析提出一种敏感 DTCWT 变换细节信号分量筛选算法, 先计算各分量的包络谱峭度值和时域峭度值的乘积($index TE$)如式(23)所示, 然后选择 $index TE$ 较大的分量(敏感的分量)进行重构。

$$index TE = \{Kur(x) \times Kur[FFT(env(x))]\} \quad (23)$$

4) MKD 降噪以及信号重构, 为继续增强信号的

冲击特征,降低噪声干扰,将筛选出的敏感DTCWT细节信号分量,进行MKD降噪处理,然后将其逆DTCWT变换进行信号重构,逆变换后得到该分量降噪后信号。计算信噪比等一系列去噪效果评价参数,用于检验降噪后的信号是否符合要求,见图2。

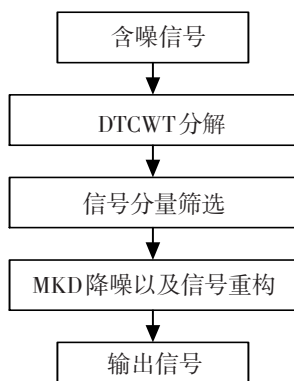


图2 改进的DTCWT降噪方法基本流程图

Fig. 2 The noise reduction method flow diagram of improved DTCWT

3 实例验证

为了验证所提出方法的有效性和实用性,采用了内置式平面螺旋天线对局部放电信号进行检测^[16-17],并采用文中提出的方法对所采集的数据信号进行了降噪处理。

3.1 GIS局部放电特高频信号采集

为了准确的采集到实际的GIS局部放电特高频信号,搭建了252 kV GIS局部放电实验仿真平台^[18],试验系统包括:252 kV GIS模型、250 kV 无局放电源、局部放电检测仪、相位采集装置、内置天线、UHF放大器、宽带示波器及缺陷模型等组成。试验平台示意图见图3。

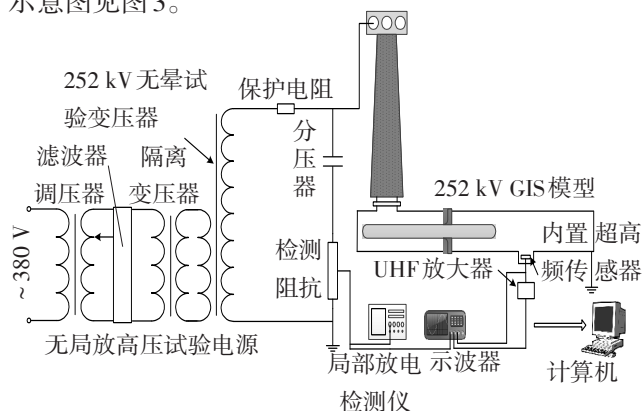


图3 GIS试验平台示意图

Fig. 3 The experimental circuit wiring diagram

GIS试验平台采用的是单相设计,其结构剖视图见图4。整个GIS试验平台高4 150 mm,长5 000 mm,同时带有一个1 000 mm的T型分支腔体,高压套管

采用复合式套管,采用5个盆式绝缘子将整个GIS试验平台分成了6个独立的试验腔体,每个腔体侧面都安装有充气阀门,在局部放电故障模型的每个腔体侧面都开有操作手孔;将天线内置,方便观察局部放电情况,还在每个腔体上开设了两个内置传感器孔和观察孔,内置传感器孔直径为100 mm,拔口高度为100 mm,观察孔直径为130 mm。由于在进行GIS典型绝缘缺陷局部放电试验的时候,需要多次更换局部放电模型,为避免SF₆气体的浪费,在满足试验条件的基础上,选择其中一个腔体进行试验。真空泵选用德国BUSCH R5系列真空泵,真空计选用数字皮拉尼真空计。

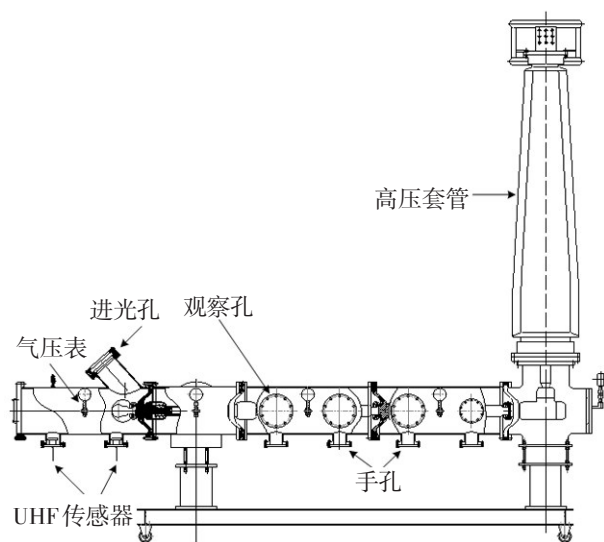


图4 GIS模型剖视图

Fig. 4 The sectional view of GIS model

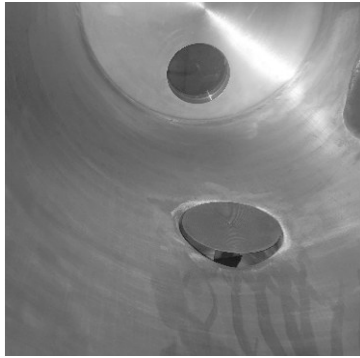
采集信号所需的小型化螺旋天线安装于GIS手孔内,但并未完全伸入GIS腔体内部,为保证该安装方式不会影响GIS腔体内部绝缘,在天线前段加上有机绝缘介质板,以保证密封和天线与高压导体隔离^[9]。将设计好的局部放电模型安装固定于GIS导电杆上,以提供有效的局部放电信号源。天线安装见图5(a),局部放电模型安装见图5(b)。

小型化螺旋天线的增益为4.5 dB,因此采集局放信号极其微弱。为了使检测更加准确,将天线采集的信号经射频放大器进行放大,射频放大器放大倍数为40 dB,频带宽度为300 MHz~2.5 GHz,射频放大器的输出信号由屏蔽传输线传输给监控主机,并保存与记录数据。

3.2 特高频信号去噪

将得到典型的局部放电信号进行实例验证,设计了针—板放电模型,模型参数见表1。

实测局部放电单脉冲信号见图6(a),采样点数为3 000点。为了更好地验证算法的有效性与可行



(a) 天线安装位置示意图



(b) 放电模型位置示意图

图5 天线与放电模型安装示意图

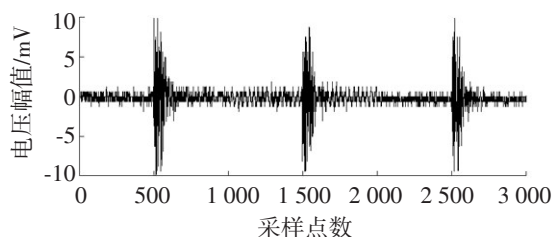
Fig. 5 The installation of antenna and discharge model

表1 针—板放电模型参数

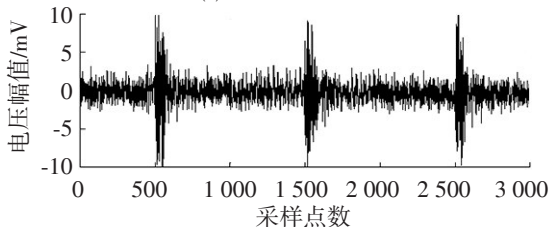
Table 1 The model parameters of pin-to-plate discharge

参数	电极直径/mm	电极长度/mm	尖锥角/(°)	曲率半径/mm	电极间距/mm
数值	4	10.5	30	0.5	10

性,在图6(b)所示的局部放电信号中添加了高斯白噪声,便于验证方法的有效性^[20]。



(a) 原始局部放电信号



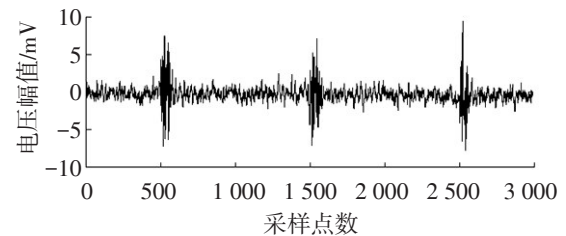
(b) 加入白噪声局部放电信号

图6 局部放电测量信号

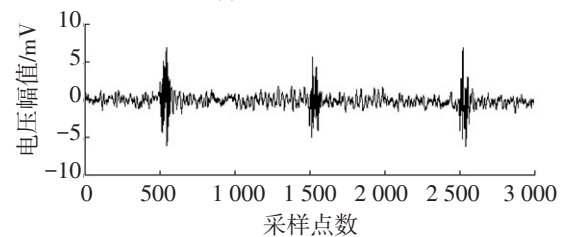
Fig. 6 The partial discharge signal diagram

采用文中所提出的方法对上述含噪信号进行了降噪处理,降噪结果见图7(a),该试验设置的特高频信号长度 N 为3 000,DTCWT分解层数为5,时域峭

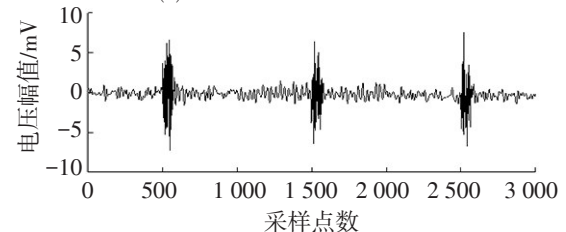
度和包络谱峭度的乘积($index TE$)值为前三的DTCWT细节信号分量进行重构,噪声边缘方差值小于0.01;同时,也对上述含噪信号采用了DTCWT和MKD降噪以及传统的DTCWT阈值降噪进行了相应的降噪对比处理,见图7(b)、(c)。



(a) 改进DTCWT降噪



(b) DTCWT和MKD降噪法



(c) DTCWT阈值降噪

图7 3种方法降噪后信号图

Fig. 7 Noisereduction signal diagram of three ways

为了更直观地看出这3种降噪方法的降噪效果,分别引入信噪比(SNR),变化趋势参数(VTP)和波形相似系数(NCC)作为特高频局放信号去噪效果评价的指标^[21]。其中, VTP 代表的是原理想局放信号与去噪后局放恢复信号波形振荡变化趋势相似度,其值越接近1,效果越理想; NCC 用于评价两波形相似程度,其取值为 $[-1, 1]$,且越接近1,两波形越相似,其计算公式见式(24)-(26)。

$$SNR = 20 \lg \frac{\max_{i=1}^n s(i)}{\max_{i=1}^n n(i)} \quad (24)$$

$$VTP = \frac{\sum_{i=2}^n [f(i) - f(i-1)]}{2 \sum_{i=2}^n [s(i) - s(i-1)]} + \frac{\sum_{i=2}^n [f(i-1) - f(i)]}{2 \sum_{i=2}^n [s(i-1) - s(i)]} \quad (25)$$

$$NCC = \frac{\sum_{n=1}^n s(n) f(n)}{\sqrt{[\sum_{n=1}^n s^2(n)] [\sum_{n=0}^n f^2(n)]}} \quad (26)$$

式(24)-(26)中: $s(n)$ 为原始局部放电特高频信号;

$f(n)$ 为降噪后的信号; $s(i)$ 为原始信号; $n(i)$ 为噪声信号。

计算处理后整体脉冲波形的输出信噪比(SNR)、变化趋势参数(VTP)和波形相似系数(NCC)比较见表2。

表2 输出信噪比(SNR)、变化趋势参数(VTP)和波形相似系数(NCC)比较

Table 2 The comparison of output SNR VTP and NCC

性能测定 指标	DTCWT 阈值	DTCWT和 MKD	改进 DTCWT
SNR/dB	8.095	9.511	20.527
VTP	1.423	1.884	1.031
NNC	0.891	0.765	0.987

从表2可以看出,3种降噪方法的信噪比SNR均比含高斯白噪声的实测信号SNR要高,说明3种方法均有一定的降噪效果,且文中所提出的改进DTCWT的降噪算法信噪比最高,降噪效果最优;另外,从变化趋势参数(VTP)和波形相似系数(NCC)来看,文中所提出的方法最接近于1,波形拟合度最好;而DTCWT阈值降噪与DTCWT和MKD降噪相比,后者的信噪比较前者高,但波形拟合度不好。

由图7可知,文中的局放信号去噪方法结果准确性最高,而且波形没有明显畸变,较好地保持了原有的特高频局放信号的特征。

4 结论

文中提出一种改进DTCWT的GIS局部放电信号降噪方法,并通过实测信号验证了该方法的有效性,进而得出以下结论:

1)利用改进DTCWT降噪方法对局部放电特高频信号进行降噪能够很好地将放电信号与噪声分离,拥有较高的信噪比,以及能够保持早期局放信号特征。

2)DTCWT的精确重构性、平移不变性与有限冗余性在信号降噪方面效果显著,但是仅用DTCWT阈值降噪,无法很好地发挥DTCWT的以上优点,降噪效果不明显。

3)对DTCWT分解的细节信号分量进行筛选,可以提高信号的降噪效果。

参考文献:

[1] 钱 勇,黄成军,江秀臣. 基于超高频法的 GIS 局部放电在线监测研究现状及展望[J]. 电网技术,2005,29

(1):40-42.

QIAN Yong, HUANG Chengjun, JIANG Xiuchen. Present situation and prospect of ultrahigh frequency method based research of on-line monitoring of partial discharge in gas insulated switchgear[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 40-42.

[2] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

WANG Changchang, LI Fuqi, GAO Shengyou. On-line monitoring and fault diagnosis of power equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

[3] 王 雷,刘尚合,魏 明,等. 基于经验模式分解的电晕放电辐射信号阈值降噪处理方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2280-2285.

WANG Lei, LIU Shanghe, WEI Ming, et al. Threshold denoising method of signal radiated from corona discharge based on empirical mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2280-2285.

[4] 许中荣,唐 炬,张晓星,等. 应用复小波变换对电力变压器局部放电超高频信号去噪研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 27-32.

XU Zhongrong, TANG Ju, ZHANG Xiaoxing, et al. Denoising of UHF partial discharge signal by complex wavelet transform for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 27-32.

[5] 杨志超,范立新,杨成顺,等. 形态学滤波与自适应噪声抵消在GIS局部放电超高频信号去噪中的应用[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 41-45.

YANG Zhichao, FAN Lixin, YANG Chengshun, 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): 41-45.

[6] 王永强,谢 军,律方成. 基于改进量子粒子群优化稀疏分解的局放信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 320-325.

WANG Yongqiang, XIE Jun, LYU Fangcheng. PD signal denoising method based on improved quantum-behaved particle swarm optimization sparse decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 320-325.

[7] 张毅刚,郁惟镛,黄成军,等. 基于小波包及隐式马尔科夫模型的局放信号去噪[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1269-1272.

ZHANG Yigang, YU Weiyong, HUANG Chengjun, et al. Wavelet package based partial discharge denoising using hidden markov model[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2004, 38(8): 1269-1272.

[8] 张宇辉,刘梦婕,黄南天,等. 频率切片小波变换在局部放电信号分析中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2283-2293.

- ZHANG Yuhui, LIU Mengjie, HUANG Nantian, et al. Application of frequency slice wavelet transform in partial discharge signal analysis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2283-2293.
- [9] ANTONI J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(1): 108-124.
- [10] 高红武. 变压器局部放电超高频信号传播特性及小波包去噪方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- GAO Hongwu. Study on propagation characteristics and wavelet packet-based denoising of ultra-high-frequency signals of partial discharges in transformers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [11] 陈志新. 对偶树复小波分析及其应用[M]. 北京: 对外经济贸易大学出版社, 2014.
- CHEN Zhixin. Research on dual-tree complex wavelet transform and its application[M]. Beijing: University of International Business and Economics Press, 2014.
- [12] 陈志新, 徐金梧, 杨德斌. 基于复小波块阈值的降噪方法及其在机械故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 200-204.
- CHEN Zhixin, XU Jinwu, YANG Debin. Denoising method of block thresholding based on DT-CWT and its application in mechanical fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 200-204.
- [13] 隋文涛, 张 丹, WANG Wilson. 基于EMD和MKD的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 55-59.
- SUI Wentao, ZHANG Dan, WANG Wilson. Fault diagnosis of rolling element bearings based on EMD and MKD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(9): 55-59.
- [14] SAWALHI N, RANDALL R B, ENDO H. The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearings using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(6): 2616-2633.
- [15] 王奉涛, 陈守海, 闫达文, 等. 对偶树复小波流形域降噪方法及其在故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 161-163.
- WANG Fengtao, CHEN Shouhai, YAN Dawen, et al. Noise reduction based on dual tree complex wavelet transform-unfolding and its application in fault diagnosis[J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(20): 161-163.
- [16] 王彩雄. 基于特高频法的GIS局部放电故障诊断研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- WANG Caixiong. Research on partial discharge fault diagnosis in GIS based on UHF[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [17] 孙才新, 许高峰, 唐 炬, 等. 检测GIS局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 89-94.
- SUN Caixin, XU Gaofeng, TANG Ju, et al. Model and performance of inner sensors used for partial discharge detection in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 89-94.
- [18] 律方成, 金 虎, 王子建, 等. 252 kV GIS局部放电实验仿真平台的设计[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 21-23.
- LYU Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. Design of the 252 kV GIS partial discharge experimental simulation platform[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 21-23.
- [19] 张 微. GIS设备局部放电检测技术的试验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- ZHANG Wei. Experimental study on partial discharge detection technology of GIS equipment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [20] 孙才新, 李 新, 杨永明. 从白噪声中提取局部放电信号的小波变换方法研究[J]. 电工技术学报, 1999, 14(3): 47-50.
- SUN Caixin, LI Xin, YANG Yongming. The method of drawing the PD signals from white noise by wavelet analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(3): 47-50.
- [21] 唐 炬, 高 丽, 彭 莉, 等. 非平稳振荡局放信号去噪效果评价参数研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 66-70.
- TANG Ju, GAO Li, PENG Li, et al. Study on new evaluation parameters for denoising performance of non-stationary oscillating partial discharge signals[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 66-70.
- 王永强(1975—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断系统等方面研究(通信作者)。
- 张 斌(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。
- 李长元(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。
- 仲 钊(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。
- 王巨伟(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。
- 崔博源(1981—), 男, 高工, 主要从事高压开关设备研制及试验技术方面的研究工作。