

用于 PD 信号去噪的 dbN 序列 有效复小波构造研究

唐 炬, 万凌云, 张晓星, 谢颜斌

(重庆大学 高电压与电工理论新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 根据正交小波构造的条件, 采用替换实小波共轭复根的方法, 构造了与 dbN 序列正交实小波具有相同幅频特性、不同相频特性的复小波, 指出了共轭复根数与构造复小波数的关系, 给出了构造有效复小波应满足的条件, 即共轭复根的虚部绝对值小于 0.01 且与实部绝对值之比也小于 0.01 时, 不能构造有效的复小波。同时, 用构建的 dbN 序列复小波对 4 种典型仿真局部放电 (PD) 信号的去噪研究表明, 不同类型的仿真 PD 信号对应应有 dbN 序列去噪最优复小波, 而且与相应的实小波去噪进行了对比, 进一步证明了复小波用于 PD 信号去噪的优越性。

关键词: 复小波; 共轭复根; 局部放电; 去噪

中图分类号: TM 83

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)10-0019-05

现场存在的强烈电磁干扰使得气体绝缘组合电器 GIS (Gas Insulated Switchgear) 中十分微弱的局部放电 PD (Partial Discharge) 信号被淹没在噪声之中, 因此, 必须设法对干扰加以有效抑制。传统的去噪方法大都基于快速傅里叶变换 (FFT)^[1], 对 GIS 局部放电信号的去噪效果也并不理想。小波变换在时域和频域同时具有良好的局部性, 从中提取故障信号特征参数, 因而得到广泛应用。特别是文献[2]提出的复小波变换, 能够通过调节实小波的共轭复根, 构造出具有相同幅频特性、不同相频特性的复小波, 使之与信号更加适应, 从而具有更强的去噪能力。根据 dbN 实小波的特点, 研究发现, 用这种方法构造的复小波不是唯一的, 不同的实小波可构造出不同的复小波, 同一个实小波也可能会对应多个复小波。这里采用置换实小波共轭复根的方法, 研究了构造 dbN 复小波序列的方法与条件以及不同类型 PD 信号去噪所对应的 dbN 序列最优复小波。

1 dbN 序列复小波构造方法与条件

1.1 构造复小波的方法

文献[3]指出, 只要保持实小波滤波器的幅频特性、改变其相频特性的方法, 就能够获得与现有实小波相同特性 (正交、紧支撑、消失矩和正则性等) 的复小波。通常滤波器 $h(n)$ 可表示为式 (1) 的 z 变换形式。

$$\hat{h}(z) = h_0 \cdot \left(\frac{1+z}{2} \right)^p \prod_{i=1}^p (z - \lambda_i) \cdot \prod_{i=1}^M (z - z_i)(z - z_i^*) \quad (1)$$

式中 λ_i 为不等于 ± 1 的实数; z_i, z_i^* 为互位共轭复数。

设 $z_i = a - jb$, 则 $\bar{z}_i = a + jb$, 可知:

$$|z - \bar{z}_i|^2 = A^2 \quad (2)$$

$$|z_i z - 1|^2 = A^2 \quad (3)$$

$$z - \bar{z}_i = A e^{j\theta} \quad (4)$$

$$\bar{z}_i z - 1 = A e^{j\bar{\theta}} \quad (5)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{b - \sin \omega}{-a + \cos \omega} \right) \quad (6)$$

$$\bar{\theta} = \arctan \left(\frac{a \sin \omega + b \cos \omega}{a \cos \omega - b \sin \omega - 1} \right)$$

且当 $b=0$ 时, 上述式 (2)~(5) 依然成立。

式 (2) 和 (3) 说明 $z - z_i$ 和 $\bar{z}_i z - 1$ 具有相同的幅频特性; 式 (4) 和 (5) 说明 $z - z_i$ 和 $\bar{z}_i z - 1$ 具有不同的相频特性。它表明对改变小波相频特性有贡献的是复根, 实根仅改变小波滤波器系数对称性。因此, 可以用 $z_i^* z - 1$ 代替 $z - z_i$, 或用 $z_i z - 1$ 代替 $z - z_i^*$ (包括 $z_i = \lambda_i$, λ_i 为实数) 来实现复小波滤波器的构造。

可以证明^[3], 通过上述变换得到的复滤波器自动满足正交滤波器的自对偶性、独立性、精确重构性, 其规范性条件只要在构建时加以考虑, 那么所构建的复滤波器组必然满足正交滤波器的所有条件。所有复小波都与其低通复滤波器系数 ch 唯一对应, 因此, 构造了复小波的低通滤波器就得到了相应的复小波。

1.2 构造有效复小波的条件

dbN ($N=2, 3, \dots, 12$) 序列实小波在电力系统非平稳信号的提取中得到了广泛应用^[4], 对 PD 信号的去噪也取得了较满意的效果^[5]。因此, 作者以 db 实小波为基础, 用上述方法构造其对应的复小波, 作为对 PD 信号去噪应用研究的复小波。

由上面的分析可知, 要构造 db 复小波, 必须要求 db 实小波至少有一对共轭复根, 根据式 (1) 求得 db2~db6 实小波全部共轭复根如表 1 所示。

如果某一 db 实小波拥有 2 对或 2 对以上的共轭复根, 根据组合原则, 能构造出多个复小波。以 db3 实小波为例, 它有 2 对共轭复根, 理论上能构造

出 3 个相频特性完全不同的复小波。表 2 给出了由 db3 实小波构造的 3 个复小波的低通滤波器系数。

表 1 dbN 实小波的共轭复根
Tab.1 Conjugate roots of dbN real wavelets

dbN	共轭复根			
db2	1.000 0± j2.090 8×10 ⁻⁸			
db3	1.000 1± j0.000 2	-0.287 3± j0.152 9		
db4	1.000 0± j0.000 1	-0.284 1± j0.243 2		
db5	1.004 3± j0.003 1	0.998 4± j0.005 0	-0.277 1± j0.306 5	-0.337 2± j0.091 3
db6	1.004 9± j0.003 6	0.998 1± j0.005 8	-0.269 4± j0.354 7	-0.337 1± j0.156 4

表 2 由 db3 实小波滤波器生成复小波滤波器
Tab.2 Complex wavelet filters constructed
from db3 real wavelet filter

n	实滤波器 系数 h	复滤波器系数		
		*ch ₁	ch ₂	ch ₁₂
0	0.332 7	0.035 22- j2.336 5×10 ⁻¹⁰	-0.066 3+ j0.085 6	0.066 3- j0.085 6
1	0.806 9	-0.135 0- j3.240 3×10 ⁻⁹	0.110 5+ j0.085 6	0.110 5+ j0.085 6
2	0.459 9	-0.085 43+ j1.501 3×10 ⁻⁹	0.662 9- j0.171 2	-0.662 9+ j0.171 2
3	-0.135 0	0.459 8+ j7.043 6×10 ⁻¹⁰	0.662 9- j0.171 2	0.662 9- j0.171 2
4	-0.085 4	0.806 9+ j3.475 2×10 ⁻⁹	0.110 5+ j0.085 6	-0.110 5- j0.085 6
5	0.035 2	0.332 7- j2.206 9×10 ⁻⁹	-0.066 3- j0.085 6	-0.066 3- j0.085 6

注:ch 的下标表示所置换共轭复根的位置,如“1”代表置换第 1 对复根,“12”则代表置换 1、2 两对复根。

db3 实小波的第 1 对共轭复根其虚部近似于 0,且远小于实部,采用它构造复滤波器 ch₁ 其虚部比实部小 7~9 个数量级,这样的滤波器近似于舍去虚部的实滤波器,在滤波过程中,虚部的作用可忽略, ch₁ 仅相当于改变了 h 的对称性^[3],没有改变其相频特性,所以 ch₁ 所对应复小波的性质与 h 对应的实小波近似。因此,采用这样的共轭复根构造的复滤波器是“无效的”。由此可见,db3 实小波仅有一对可被置换的共轭复根,即 ch₂、ch₁₂ 为同一共轭复根所构造,差别很小,可以看做是同一个复滤波器。

出现无效复滤波器 ch₁ 的原因是使用了虚部远小于实部的共轭复根来构造复滤波器,通过大量的算例研究初步发现,当共轭复根的虚部绝对值小于 0.01 且其与实部绝对值之比也小于 0.01 时,构造出的复滤波器可认为只有改变对称性的实滤波器,而没有复小波应具有改变相频特性的低通滤波器。因此,将可用于构造有效复小波的共轭复根称为有效共轭复根。表 3 给出了实小波 dbN(N=2,3,⋯,12)的共轭复根数、有效共轭复根数和可构造复滤波器数。

由此可见,共轭复根数和有效共轭复根数都随 N 的增大而增大,可构造的有效复滤波器个数也随之巨增。例如 db12 实小波,它构造出 2 047 个有效

表 3 dbN 序列实小波构造复滤波器数
Tab.3 Amounts of complex filter
constructed by dbN real wavelets

dbN	共轭复根数	有效共轭 复根数	可构造有效 复滤波器数
db2	1	0	0
db3	2	1	1
db4	2	1	1
db5	4	2	3
db6	4	2	3
db7	5	3	7
db8	7	7	127
db9	8	7	127
db10	8	8	255
db11	10	9	511
db12	11	11	2047

复小波。由于 db8 以上实小波可能构造的有效复小波数量巨大,因此,在下面的研究中主要是在 db2~db7 所构造的有效复小波中选择最优复小波。

2 复小波变换去白噪声的仿真研究

2.1 描述去噪效果参数的定义

对 PD 信号去噪应满足 2 个基本原则,即去噪算法能有效地提取信号,即去噪后信号的信噪比高;去噪后信号的畸变小。因此,引入波形相似性参数 NCC^[6](Normalized Correlation Coefficient),用以描述去噪前后波形的相似性,结合去噪前后的信噪比(SNR)进行综合评价,其定义分别为

$$NCC = \frac{\sum_{n=1}^N s(n)f(n)}{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^N s^2(n)\right)\left(\sum_{n=0}^{N-1} f^2(n)\right)}} \quad (7)$$

其中,s 是原始信号,f 是去噪后的信号。NCC 的值在 -1~1 之间,-1 代表变换前后的波形反向;0 代表两波形正交;1 则代表完全相同。NCC 大的波形其幅值不一定高,因为 NCC 只描述 2 个波形的相似程度,与波形幅值、能量衰减的多少无关。

$$SNR = 20 \lg \left[\frac{\max_{i=1}^N \{s(i)\}}{\max_{i=1}^N \{n(i)\}} \right] \quad (8)$$

其中,s(i)是原始信号,n(i)是噪声信号。SNR 越大说明信号越强噪声越低,通常认为 SNR>10 dB 后去噪效果非常好,完全能达到对信号后续识别的要求。

2.2 复合信息去噪的仿真算例

采用常用的单指数衰减脉冲、双指数衰减脉冲、单指数衰减振荡脉冲和双指数衰减振荡脉冲作为模拟不同 PD 类型的仿真研究信号^[3]。为对后面实测的超高频 PD 信号进行应用,设每个脉冲的采样率均为 20 GS/s(1 GS 为 10⁹ 个采样点),采样点数 n 为 2 000,幅值做归一化处理,其幅值 A_m 为标么值(p.u.),并将其分别编号为①②③④,如图 1 所示。用算法生成一组随机数作为白噪声^[7],其模的最大值为 2,与图 1(a)所示信号叠加后,得如图 1(b)所示 SNR=-6.02 dB 的染噪信号(图中 n 为采样点数,下同)。

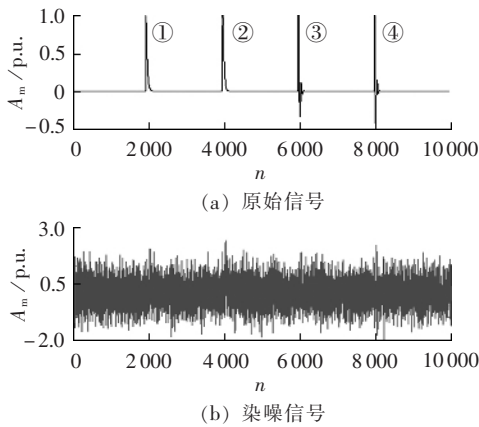


图 1 仿真 PD 信号
Fig.1 Simulative PD signals

用 $dbN(N=2,3,\cdots,12)$ 实小波构造了相应的复小波,并用这些复小波对图 1(b)所示的染噪信号进行复小波变换去噪,分解层数取为 1~9,阈值为实部和虚部独立作用的复阈值算法^[8-10](具体的复阈值算法将在后续文章中详细介绍),研究发现当去噪后信号 $SNR>10\text{ dB}$ 时,其复小波去噪效果主要由 NCC 决定,即认为 NCC 大的去噪效果好。图 2 和表 4 给出了 4 种 PD 仿真信号在不同复小波去噪下能达到的最大 NCC 值和对应的 SNR。为便于观察对比,将 4 种 PD 仿真信号最优去噪波形进行归一化处理,其峰值为 1,放在同一图中并放大,如图 2(e)所示。各 PD 仿真信号对应的最优复小波见表 4。

由表 4 可知,不是所有信号都能在同一种复小波下达到最优去噪效果^[11-12],即使是同一实小波构

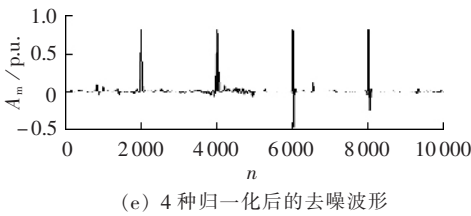
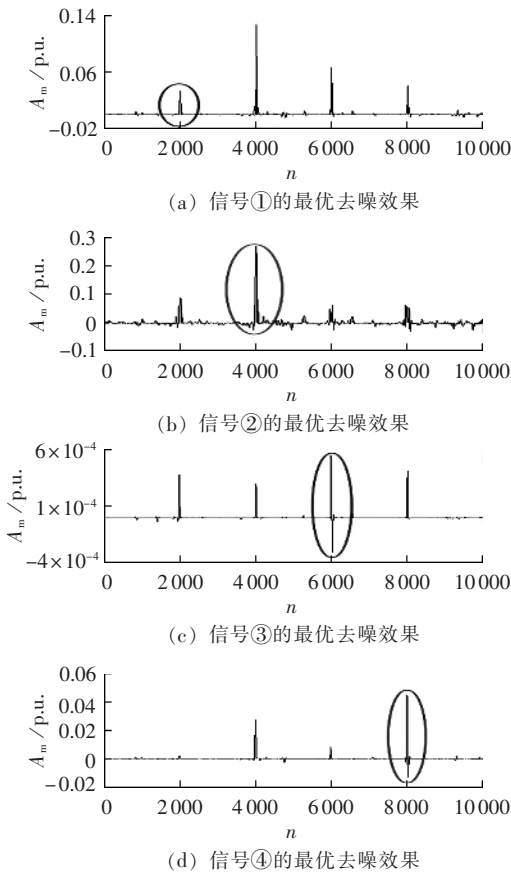


图 2 复小波下各信号的最优去噪效果
Fig.2 Optimal denoising effect of complex wavelets for different signals

表 4 复小波下各仿真信号的最优去噪效果
Tab.4 Optimal denoising effect of complex wavelets for different simulative signals

缺陷类别	B_r	G	K	SNR/dB	NCC
①	db7	全部	5	15.60	0.87
②	db11	全部	5	20.21	0.94
③	db7	第 5 对	5	17.23	0.92
④	db3	第 1 对	5	24.32	0.95

注: B_r 为对应实小波; G 为所置换根; K 为分解层数;
SNR 为去噪后的值。

造的不同复小波,其去噪特性也有很大差别,信号 ①和③在 db7、信号②在 db11、信号④在 db3 复小波下分别达到最优,也就是说,这些复小波的相频特性与信号更加匹配,它们更适合信号的提取。

2.3 与实小波去噪的对比

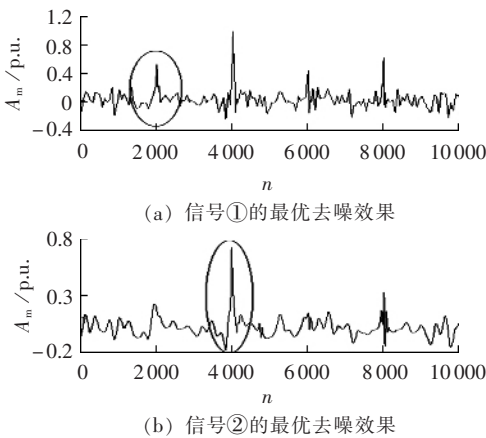
为验证复小波变换去噪的优越性,对图 1 所述信号进行实小波变换^[13]。为便于对比,仍用 $dbN(N=2,3,\cdots,12)$ 对染噪信号做去噪处理,分解层数取为 1~9,各信号最优的去噪效果见表 5 和图 3。

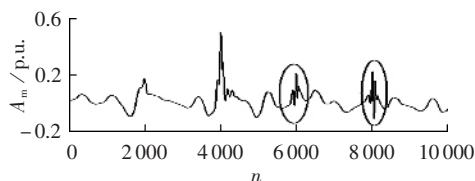
对比图 2 和表 4 可看出,同样的信号和噪声用实小波去噪的效果远不如复小波去噪,其信号 ①②③和④的 SNR 很低,不能达到 $SNR>10\text{ dB}$ 的要求,且 NCC 也小。

表 5 实小波下各仿真信号的最优去噪效果
Tab.5 Optimal denoising effect of complex wavelets for different simulative signals

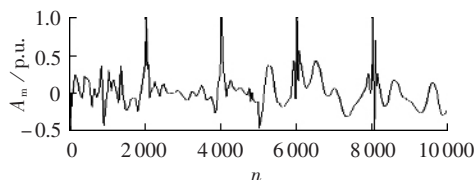
缺陷类别	对应实小波	K	SNR/dB	NCC
①	db3	6	6.14	0.6273
②	db4	7	7.37	0.6407
③	db5	8	5.76	0.3462
④	db5	8	5.08	0.5686

注: K 为分解层数;SNR 为去噪后的值。





(c) 信号③④的最优去噪效果



(d) 4 种归一化后的去噪波形

图 3 实小波下各信号的最优去噪效果

Fig.3 Optimal denoising effect of real wavelets for different signals

3 实测 GIS PD 信号去噪

由于无法得到未染噪实测 PD 信号的波形,只以 NCC 为标准选取母小波欠妥。由表 4 可知,由 db7 实小波构造的复小波对模拟信号①③有最优的去噪能力,对于信号②④其去噪效果见表 6。虽然其去噪的 NCC 不是最高,但考虑到白噪的随机性,db7 对所有信号均有较好的去噪性能。因此,以下仅用 db7 实小波构造的复小波对实验室实测的各种模拟 PD 信号去噪。

表 6 db7 复小波对仿真信号②和④的去噪效果

Tab.6 Denoising effect of db7 complex wavelet for simulative signal ② and ④

仿真信号	G	K	SNR/dB	NCC
②	全部	5	18.90	0.9094
④	第 3 对	5	15.75	0.9389

注:参数含义同表 4。

为检验文中所构复小波对实测 PD 信号的去噪能力,从模拟 GIS 装置^[14]上分别获取了①金属突出物、②金属微粒、③绝缘子表面污染和④绝缘子与高压导体间气隙 4 种绝缘缺陷产生的超高频 PD 信号^[15],实测波形如图 4 所示。

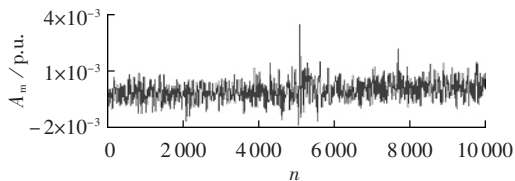
由于无法得到未染噪实测 PD 信号的波形,不能准确计算去噪后信号的 NCC 和 SNR,这里采用噪声抑制比^[16](NRR)评价去噪效果。其定义如下:

$$\text{NRR} = 10(\lg \sigma_1^2 - \lg \sigma_2^2) \quad (9)$$

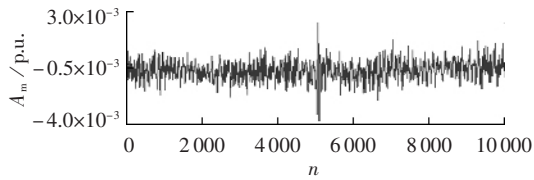
式中 σ_1, σ_2 为噪声偏差, NRR 的值越大,说明去噪效果越好。

用 db7 实小波和与此构造的复小波对实验室实测得到的模拟 PD 信号进行复小波变换,分解层数均为最佳的 5 层,对信号进行去噪的结果如图 5 和表 7 所示。

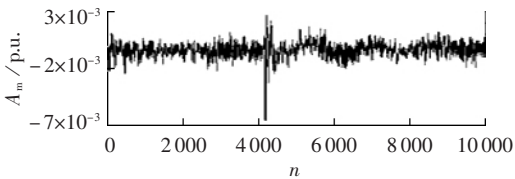
限于篇幅略去 db7 实小波去噪后的波形,但从表 7 可以看出复小波对实测 PD 信号的去噪效果优于实小波,其 SNR 均大于 10,能满足对后续处理的要求,而实小波的 SNR 都小于 10。



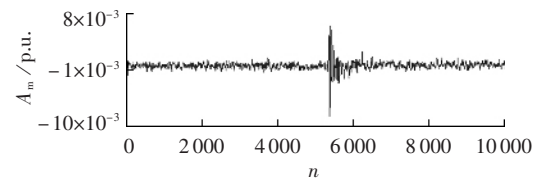
(a) 实测金属突出物缺陷 PD 信号



(b) 实测金属微粒缺陷 PD 信号



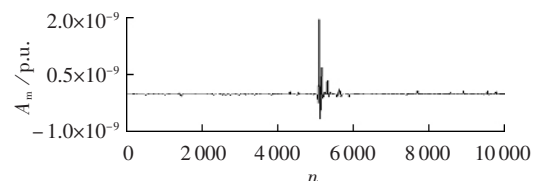
(c) 实测绝缘子表面污染缺陷 PD 信号



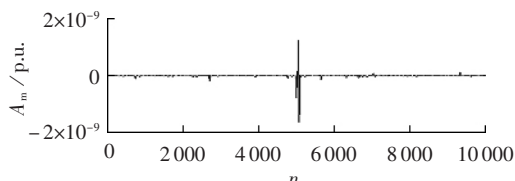
(d) 实测绝缘子与高压导体间气隙缺陷 PD 信号

图 4 PD 信号实测波形

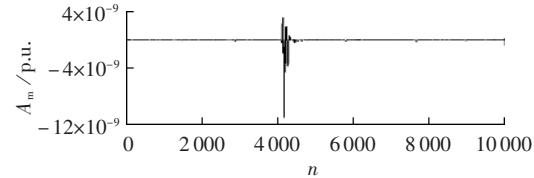
Fig.4 Measured PD signals



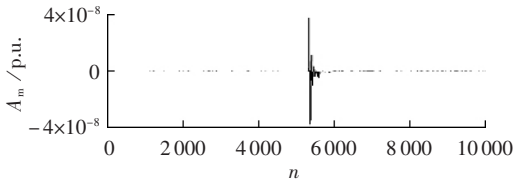
(a) 金属突出物缺陷去噪信号



(b) 金属微粒缺陷去噪信号



(c) 绝缘子表面污染缺陷去噪信号



(d) 绝缘子与高压导体间气隙缺陷去噪信号

图 5 复小波变换抑制白噪声

Fig.5 Complex wavelet transform for suppressing white noise

表 7 实测信号的 db7 实小波和复小波去噪效果

Tab.7 Denoising effect of db7 real and complex wavelets for measured signals

缺陷类别	复小波			实小波		
	SNR _{ini} /dB	N	K	SNR/dB	K	SNR/dB
①	2.13	第 3 对	5	16.07	5	9.11
②	1.96	第 3 对	5	12.93	5	6.21
③	4.12	全部	5	17.21	5	7.87
④	5.87	第 4、5 对	5	19.03	5	10.23

注:SNR_{ini}为原始信号值;N 为所置换复根数;SNR 为去噪后的值;K 为分解层数。

4 结论

a. 采用所提方法构造复小波时,如果实小波共轭复根的虚部绝对值小于 0.01,且其与实部绝对值之比也小于 0.01,构造出的复滤波器可认为只有改变对称性的实滤波器,而没有复小波应具有改变相频特性的低通滤波器,所构造复小波不是有效复小波,能构造有效复小波的有效共轭复根数不多于所有的共轭复根。

b. 在 dbN(N=2,3,⋯,12)构造的复小波中,不同类型的 PD 信号对应有不同的最优去噪复小波。通过大量的仿真与实测研究,对 4 种典型仿真和模拟 PD 信号的去噪研究表明,复小波比实小波用于超高频 PD 信号的去白噪更优越,既达到高的信噪比,又能使原始波形畸变较小。

参考文献:

[1] 高胜友,朱德恒,谈克雄,等. 变压器局部放电在线监测信号处理技术的研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(9):1181-1183.
GAO Sheng - you,ZHU De - heng,TAN Ke - xiong,et al. Signal processing technique for on - line partial discharge monitoring of power transformers[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2003,43(9):1181-1183.

[2] 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):30-34.
TANG Ju,XU Zhong - rong,SUN Cai - xin,et al. Application of complex wavelet transform to suppress white - noise interference in GIS PD signal[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(16):30-34.

[3] 唐炬. 组合电器局放在线监测外置传感器和复小波抑制干扰的研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
TANG Ju. Study on outer sensor and complex wavelet suppression interference in PD detecting of GIS[D]. Chongqing:Chongqing University,2004.

[4] 陈祥训. 正交紧支复小波的生成及其在电力系统的应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(7):83-88.
CHEN Xiang - xun. Complex compactly supported orthonormal wavelets and their applications in power system[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(7):83-88.

[5] JUDD D,FARISH O,HAMPTON B F. The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS[J]. IEEE Trans Dielect Elect Insulaion,1996,3(4):213-228.

[6] HE Hai - bo,CHENG Shi - jie,ZHANG You - bing,et al. Analysis of reflection of signal transmitted in low - voltage power line with complex wavelet [J]. IEEE Trans Power Delivery,2004,19(1):86-91.

[7] 苏金明,张莲花,刘波. Matlab 工具箱应用[M]. 北京:电子工业出版社,2004.

[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的研究[J]. 电力系统自动化,2005,29(7):1-5.
TANG Ju,XIE Yan - bin,ZHU Wei,et al. Suppression of narrow - band interference with EWC threshold method for complex wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(7):1-5.

[9] SARDY S. Minimax threshold for denoising complex signals with waveshrink [J]. IEEE Trans Signal Processing,2004,48(4):1023-1028.

[10] DONOHO D L. De - noising by soft - thresholding [J]. IEEE Trans on IT,1995,41(3):612-627.

[11] MA X,ZHOU C,KEMP I J. Automated wavelet selection and thresholding for PD detection[J]. IEEE Trans Electrical Insulation,2002,18(3):37-45.

[12] CHANG C S,JIN J,KUMAR S,et al. Denoising of partial discharge signals in wavelet packets domain[J]. IEE Procees - dings on Science and Measurement Technology,2005,152(3):129-140.

[13] 唐炬,孙才新,彭文雄. GIS 局部放电检测中的小波包变换提取信号研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(5):25-29.
TANG Ju,SUN Cai - xin,PENG Wen - xiong. Extracting partial discharge signals from white noise by wavelet packet transform in GIS[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(5):25-29.

[14] 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 Cai - xin,XU Gao - feng,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.

[15] BELL R,CHARLSON C,HALLIDAY S P. High voltage onsite commissioning tests for gas - insulated substations using UHF partial discharge detection[J]. IEEE Trans Power Delivery,2003,18(10):1187-1191.

[16] 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 Yun - peng,LÜ Fang - cheng,LI Cheng - rong,et al. Study of the mathematical morphological filter in suppressing periodic narrow bandwidth noise of PD[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):169-173.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

唐 炬(1960-),男,四川蓬溪人,教授,博士,博士研究生导师,主要从事高压电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究(E-mail:cqtangu@vip.sina.com);
万凌云(1981-),男,重庆人,硕士研究生,从事 GIS 设备在线监测研究;
张晓星(1976-),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事电气设备局部放电模式识别研究;
谢颜斌(1980-),男,重庆人,硕士研究生,从事 GIS 设备在线监测的信号处理研究。

Constructing db/ N complex wavelets for PD signal denoise

TANG Ju, WAN Ling-yun, ZHANG Xiao-xing, XIE Yan-bin

(The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: According to the conditions of orthogonal wavelet construction, the complex wavelets are constructed by replacing the conjugate complex roots, which, compared with db/ N real orthogonal wavelets, have the same amplitude spectrum and different phase spectrum. The relationship between the number of conjugate complex root and the number of complex wavelet that can be constructed is indicated. The conditions of constructing complex wavelets are given: if both the absolute value of imaginary part of conjugate complex root and its ratio to the absolute value of real part are less than 0.01, the valid complex wavelets can not be constructed. The db/ N complex wavelets are constructed to denoise four typical simulative PD (Partial Discharge) signals. Results show that different types of simulative PD signal have different optimal complex wavelets and the application of complex wavelet in PD signal denoise is more favorable than the real wavelet.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50577069).

Key words: complex wavelet; conjugate complex roots; partial discharge; denoise