

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.020

变压器局部放电监测中的最优小波与脉冲鉴别去噪方法研究

程昌奎, 郑永建, 庞 军, 闵英杰, 粟秋硕

(天府新区供电公司, 成都 610041)

摘要: 文中提出一种用于变压器局部放电在线监测信号的去噪方法,该方法基于尺度相关的最优小波分解去噪算法和脉冲序列分析算法。通过双电流传感器分别耦合流过每一相高压套管和高压套管末屏接地线的脉冲电流,首先采用逐层最优小波分解算法有效地抑制白噪声且减小对脉冲波形造成的畸变,再利用脉冲序列分析算法分析双传感器输出的脉冲序列,达到去除脉冲干扰的目的。实验结果表明,该方法能够鉴别出外部的脉冲干扰,有效地提取出变压器内部的局部放电信号,具有很好的应用价值。

关键词: 变压器; 局部放电; 脉冲干扰; 最优小波分解; 脉冲序列分析算法

Extraction of Partial Discharge Signals from Noises Based on Scale Wavelet Selection and Pulse-sequence Analysis

CHENG Changkui, ZHENG Yongjian, PANG Jun, MIN Yingjie, SU Qiushuo

(Tianfu District Power Supply Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: A de-noising method is presented for partial discharge (PD) online monitoring of transformers on the basis of an improved wavelet de-noising approach and a pulse-sequence analysis method. Dual couplers are used for detecting the PD pulse current flowing through the high voltage bushing of each phase and the grounding wire connected with the measurement terminal of the high voltage bushing. The white noise can be suppressed by the improved wavelet approach while the extracted pulses have small distortion. The extracted pulse sequences of each coupler from white noise contain the PD pulses and pulse-shaped noises. To separate the PD pulses from noisy pulses, the pulse-sequence analysis on the relationship between two pulse-sequences from the dual couplers is performed. The experimental signal processing results show that the measured partial discharges inside the transformers can be separated from white noise and partial discharges occurring on the conductors connected with the high voltage bushings.

Key words: transformer; partial discharge(PD); impulse noise; improved wavelet approach; pulse-sequence analysis

0 引言

强电磁干扰是影响变压器局部放电在线监测灵敏度和精确度的主要原因之一。为了抑制局部放电监测中的电磁干扰,多种用于抗干扰的电子电路^[1-2]以及数字滤波技术^[3-4]得到了应用。局部放电的3种主要电磁干扰为离散谱干扰(discrete spectrum interference, DSI)、白噪声和脉冲干扰。与其他数字化滤波方法相比,小波去噪法^[5-16]具有较强的从强白噪声干扰中提取局部放电脉冲信号的能力,其中小波阈

值法^[7]简单、效果良好;但是,由于基小波和阈值选择对去噪信号畸变具有影响,因此,最优基小波和阈值的選擇是降低小波去噪局部放电信号畸变率及幅值误差的关键问题。

然而,脉冲干扰一直是困扰局部放电在线监测的一大难题。采用双脉冲电流传感器进行变压器局部放电监测,在变压器局部放电监测的定向耦合差动平衡法中得到应用^[1-2]。随着脉冲电流传感器的优化设计与性能的提高,该方法可与数字信号分析技术结合,达到鉴别双传感器输出信号中脉冲干扰的目标。该方法的前提是需要从强背景干扰中提取出

收稿日期:2015-10-17; 修回日期:2015-11-23

脉冲信号,同时保持脉冲信号较小的畸变率。

文中提出了一种尺度相关的最优小波选择方法,用于小波阈值法对局部放电信号进行去噪;同时,采用双脉冲电流传感器监测变压器局部放电信号,实现了对两路信号中脉冲干扰的鉴别。采用基于尺度的最优小波选择方法,能够显著降低小波阈值法去噪对信号的畸变率,有利于对局部放电信号进行波形分析及脉冲干扰鉴别。仿真实验和实验实测数据分析结果表明,该方法提高了监测系统的监测灵敏度和精确度。

1 尺度相关的最优小波选择去噪方法

1.1 算法步骤

给定放电脉冲信号序列 $s=\{s_i;i=1,2,\dots,n\}$,小波阈值法去噪可分为3个基本步骤^[7]:

1)对信号 s 进行离散小波变换,得到小波系数 $w_{j,k}$, k 为第 j 层小波空间的小波系数阶数;

2)各尺度对应的小波系数经过阈值函数处理后,得到估计小波系数 $\hat{w}_{j,k}$;

3)采用阈值处理后的小波系数进行离散小波反变换,得到估计信号 $\hat{s}$ 。

上述算法采用单一基小波进行信号的多尺度分解。文中提出的最优小波算法中,针对信号在各尺度上波形变化,在不同尺度上选择最优基小波对信号进行分解,算法如下。

给定基小波库 $\{\psi_i;i=1,2,\dots,N\}$,按照每层分解的近似信号能量最大原则,逐层选择最优小波。步骤为:

1)从基小波库选择基小波 ψ_1 ,将信号 s 进行一层小波分解,计算尺度系数 $A_1=\{a_{1,j};j=1,2,\dots,n_1\}$;

2)计算 A_1 的能量 $E_1=(\sum a_{1,i}^2)/2$;

3)从基小波库选择另一基小波 $\{\psi_i;i=2,\dots,N\}$,重复步骤 1)、2),计算尺度系数 $A_i=\{a_{i,j};i=2,3,\dots,N; j=1,2,\dots,n_i\}$ 及其能量 $\{E_i;i=1,2,\dots,N\}$;

4)从 $\{E_i;i=1,2,\dots,N\}$ 中选择最大能量,其对应的基小波作为第 1 层分解最优小波对信号进行分解,计算第 1 层分解最优小波系数,其最优尺度系数为 $A_{op,1}=\{a_{op1,j};j=1,2,\dots,n_1\}$;

5)若第 k 层最优小波分解尺度系数为 $A_{op,k}$,令 $X=A_{op,k}$,重复步骤 1)至 3),计算第 k 层分解的最优基小波;

6)根据选定的各尺度最优基小波进行相应尺度的信号分解和重构。

1.2 仿真信号的最优小波分解分析

局部放电脉冲可采用指数衰减波 s_1 和衰减振荡波 s_2 两种函数模拟为:

$$s_1(t)=A(e^{-t/\tau_1}-e^{-t/\tau_2}); \quad (1)$$

$$s_2(t)=A[e^{-t/\tau_1}\cos(\omega_d t-\varphi)-e^{-t/\tau_2}\cos\varphi]。 \quad (2)$$

式(1)、(2)中: A 为信号幅值系数; τ_1 、 τ_2 分别为衰减时间常数; $\omega_d=2\pi f_d$ 为振荡角频率; $\varphi=\arctan(\omega_d/\tau_2)$ 。两种局部放电脉冲仿真信号波形见图 1,各参数分别为: $A=1$, $\tau_1=1\times 10^{-6}$ s, $\tau_2=1\times 10^{-7}$ s, $f_d=1$ MHz。仿真信号采样率为 60 Mbps,幅值分辨率为 12 位。

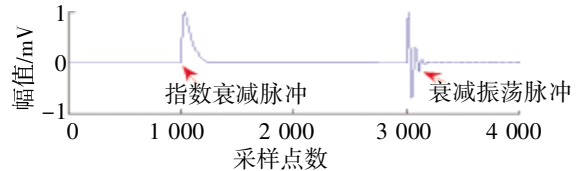


图 1 典型局部放电脉冲仿真波形

Fig. 1 Typical simulative PD pulse waveforms

以 dbN 小波系为例,两种类型局部放电脉冲的 6 层小波分解信号分量的能量分布见图 2。图 2 中对 s_1 和 s_2 进行单一小波分解的基小波分别为 db2 和 db8;对 s_1 进行最优小波分解的 1 至 6 层基小波依次为 db5、db3、db2、db5、db5 和 db15,对 s_2 进行最优小波分解的 1 至 6 层基小波依次为 db6、db6、db7、db14、db7 和 db2。

对白噪声逐层最优小波分解信号分量的能量分布见图 3。图 3 中对白噪声进行最优小波分解的 1 至 6 层基小波依次为 db2、db16、db16、db4、db2 和 db5,同时列出了分别采用 db2 和 db8 对白噪声进行单一小波分解的计算结果。与单一小波分解结果相比,逐层最优小波分解对白噪声在各层分解信号分量能量分布的影响不显著,却有利于对两种类型局部放电脉冲信号的小波分解信号能量最大化集中在低频空间。

1.3 仿真信号去噪结果

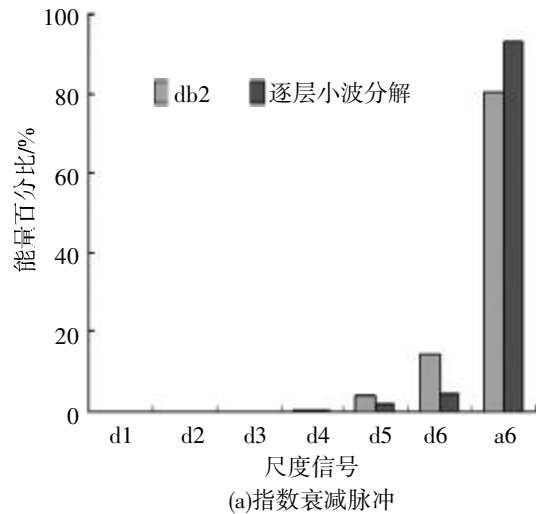
最优小波去噪采用软阈值函数,小波分解的尺度系数不参与阈值化处理。第 j 尺度小波阈值 λ_i 可根据式(3)计算^[7]

$$\lambda_j=\sigma_j\sqrt{2\ln(n_j)}。 \quad (3)$$

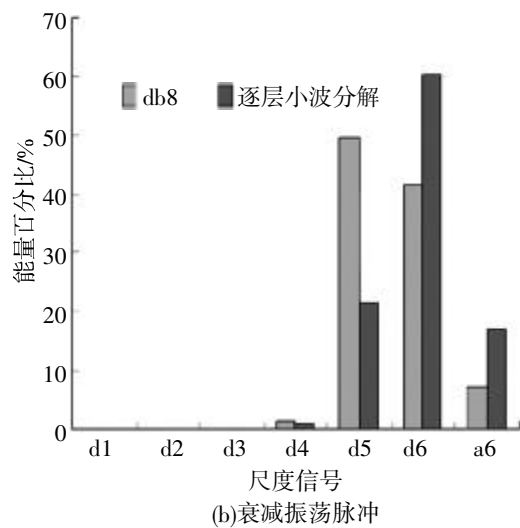
式(3)中: n_i 为 j 尺度的小波系数长度; $\sigma_j=\text{MAD}(|d_{j,i}|,0\leq i\leq 2^{j-1}-1)/q$, $\text{MAD}(\cdot)$ 为取中值函数, q 根据经验可在 0.4~1.0 之间选取,在文[5]中取为 0.674 5。以下的仿真信号实验和实测信号处理均采用软阈值法,阈值计算中 q 取 0.674 5。

波形畸变率 δ 与幅值误差 e 是文中度量去噪信号质量的两个参数为:

$$\delta=1-\frac{\sum_{i=1}^N [x_1(i)-\bar{x}_1][x_2(i)-\bar{x}_2]}{N\sigma_1\sigma_2}; \quad (4)$$



(a)指数衰减脉冲



(b)衰减振荡脉冲

图2 局部放电脉冲6尺度小波分解信号能量百分比
Fig. 2 Energy percentage of decomposed PD signals distributed on 6 scales

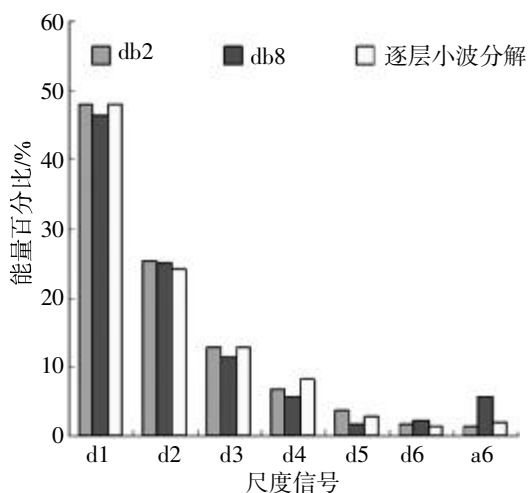


图3 白噪声6尺度小波分解信号能量百分比

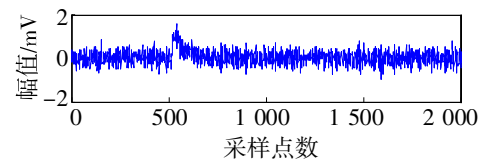
Fig. 3 Energy percentage of decomposed PD signals distributed on 6 scales

$$e = (A_1 - A_2) / A_1 \times 100\% \quad (5)$$

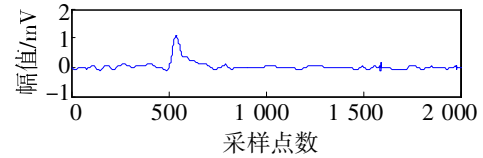
式(4)、(5)中: x_1 和 x_2 分别为原始放电脉冲信号和去噪信号; N 为信号长度; σ_1 和 σ_2 分别为 x_1 和 x_2

的方差; A_1 和 A_2 分别为两个信号的幅值。

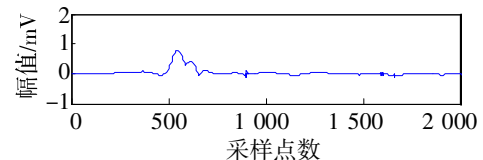
分别采用逐层最优小波和 db2 小波对含噪脉冲信号 s_1 的去噪结果见图4, 信噪比(signal to noise ratio, SNR)为1。分别采用逐层最优小波和 db8 小波对含噪脉冲信号 s_2 的去噪结果见图5, SNR 为1。SNR 分别为1、2、3时的两种类型放电脉冲在采用逐层最优小波和单一小波去噪时的去噪信号质量参数计算结果见表1。由此可见: 逐层最优小波去噪信号的波形畸变率和幅值误差低于单一小波去噪结果; 指数衰减脉冲的逐层最优小波去噪信号的波形畸变率和幅值误差低于衰减振荡型脉冲去噪结果。



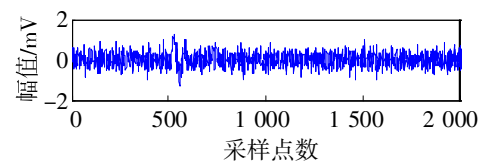
(a)含噪信号



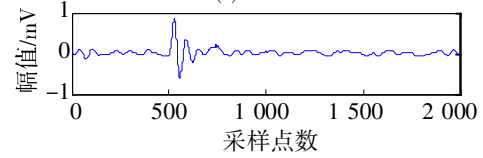
(b)逐层最优小波去噪信号



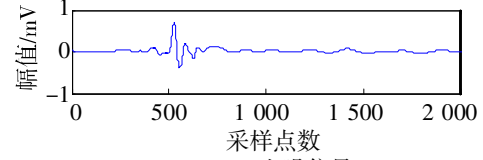
(c)db2 去噪信号

图4 s_1 含噪信号的去噪结果Fig. 4 De-noised results for noised s_1 

(a)含噪信号



(b)逐层最优小波去噪信号



(c)db8 去噪信号

图5 s_2 含噪信号的去噪结果Fig. 5 De-noised results for noised s_2

1.4 现场实测信号的去噪分析

文中给出了某220 kV变电站主变压器上的局

表1 典型局部放电脉冲去噪信号质量参数计算结果

Table 1 Computation results of quality parameters of the typical PD pulses after being de-noised

SNR 信号		逐层最优小波去噪		单一小波去噪	
		δ	$e/\%$	δ	$e/\%$
1	s_1	0.056 0	5.498 1	0.067 2	-24.821 0
	s_2	0.135 8	-18.482 6	0.197 0	-34.005 3
2	s_1	0.025 9	-3.037 3	0.046 7	-23.657 9
	s_2	0.053 8	-14.479 2	0.066 2	-23.325 7
3	s_1	0.011 3	-0.216 1	0.020 2	-11.564 0
	s_2	0.033 7	-1.292 8	0.049 8	-16.130 6

部放电在线监测系统的实测局部放电信号去噪结果见图6。图6(a)为一个工频周期的局部放电信号,其中含有强烈的背景噪声,局部放电脉冲信号完全被背景噪声淹没。图6(b)为采用db8去噪的结果;图6(c)为采用逐层小波去噪的结果。从图6中可以看出:在原始信号和采用db8小波去噪后的信号中无法显示出的微弱脉冲信号在采用逐层最优小波去噪后显现出来了,采用单一小波去噪丢失了大量的局部放电信息,使得局部放电监测灵敏度降低。在现场局部放电监测中如采用逐层最优小波去噪,能提高检测的灵敏度,这显示了该去噪方法在局部放电在线监测系统中良好的应用前景。

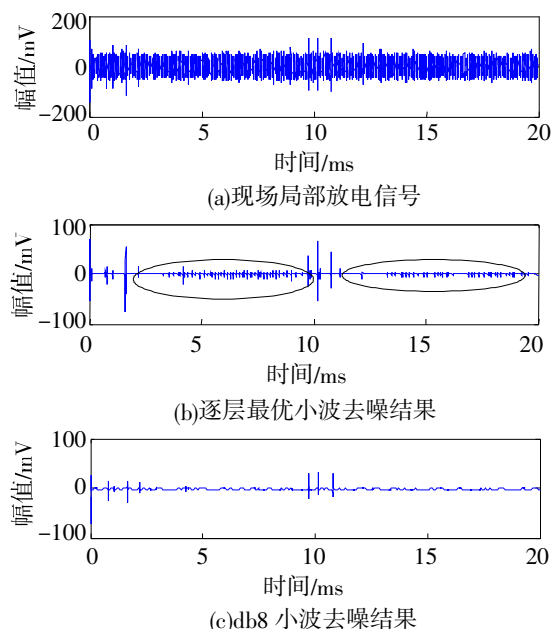


图6 现场局部放电信号去噪结果

Fig. 6 De-noised results of filed measured signal

2 双通道脉冲鉴别法

2.1 变压器局部放电在线监测双电流传感器

安装于220 kV电力变压器套管上的双电流传感器见图7。图7中传感器 C_1 耦合流过套管电容的

脉冲电流,传感器 C_2 耦合流过套管末屏接地线的脉冲电流^[6]。文[17]中研究表明:变压器内部产生的信号在流过两个传感器时产生的响应电压在极性上相反,而外部信号在两个传感器上产生的响应电压极性相同。通过比较两路信号的幅值比来分析双电流传感器检测到的信号可达到鉴别脉冲干扰的目的。



图7 安装于220 kV电力变压器的双电流传感器

Fig. 7 Dual-couplers mounted on a 220 kV power transformer

类似信号 s_1 的脉冲很容易通过极性鉴别加以分析。而在判断类似信号 s_2 的脉冲的极性时,必须对信号进行解调。尽管脉冲持续时间很短会引起解调后的脉冲波形畸变,但只要脉冲幅值变化不大的情况下,其极性依然正确判断。图7中的两个传感器, C_2 输出的脉冲波形类似于信号 s_2 ,而 C_1 输出的脉冲波形类似于信号 s_1 。 C_1 用来辅助区分脉冲噪声,因此解调后引起的脉冲波形畸变是可以接受的。

通过逐一对比 C_1 输出的解调脉冲序列与 C_2 输出的脉冲序列中的对应脉冲的极性和幅值比,可以达到去除外部脉冲干扰的效果,最终得到的脉冲序列仅包含来自变压器内部的局放信号。

2.2 脉冲干扰鉴别实验

实验接线示意图见图8。实验电压为2.3 kV。在油箱外部,利用针—板电极产生电晕脉冲。电晕放电脉冲从同一方向流过双电流传感器,输出电压极性相同。油箱内部,利用棒—棒电极产生环氧板沿面放电脉冲,该脉冲从相反的方向流过双电流传感器。图8中,电容 C_k 用来等效35 kV以上变压器套管电容。

图9~11分别给出了在2.3 kV实验电压下,每种放电源分别在两个传感器上输出的响应波形。在脉冲序列分析过程中,局放信号被认为是以相反的极性或以某一幅值比在同一时刻出现在双电流传感器的信号序列中的。而外部电晕脉冲在两个传感器上的响应极性相同。

从图9、10中可知,试验获得的局部放电信号含有大量的白噪声,会影响脉冲序列分析的结果,故先对试验获得的局部放电信号采用文中的最优小波法

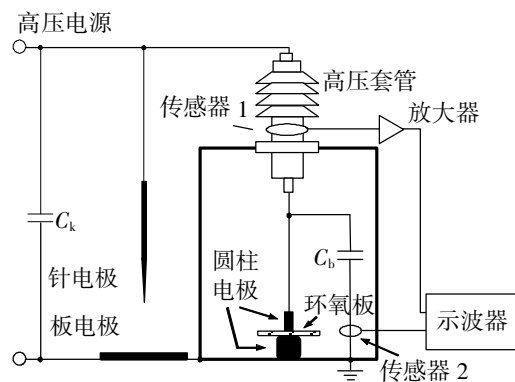
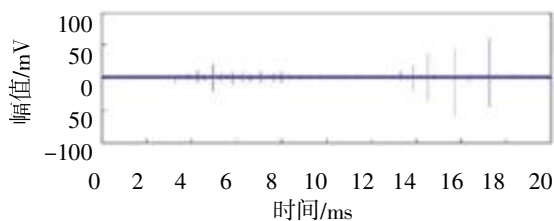
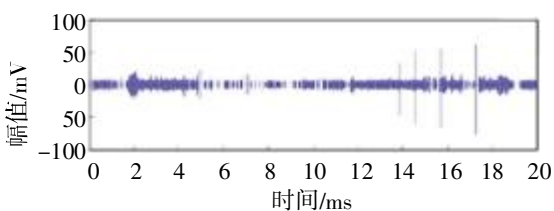


图 8 通过电晕放电和沿面放电分别产生外部和内部脉冲的实验接线图

Fig. 8 PD experiment setup for generating external and internal pulses by a corona source and a surface discharge source



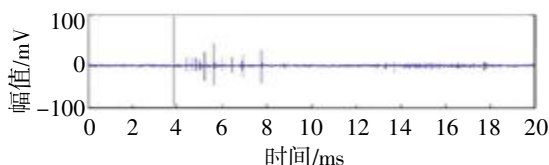
(a) 传感器 C_1



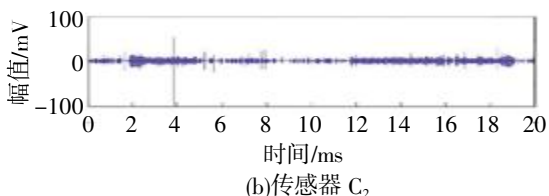
(b) 传感器 C_2

图 9 传感器 C_1 和传感器 C_2 检测到的沿面放电脉冲

Fig. 9 Surface discharge pulses detected by coupler 1 and coupler 2



(a) 传感器 C_1

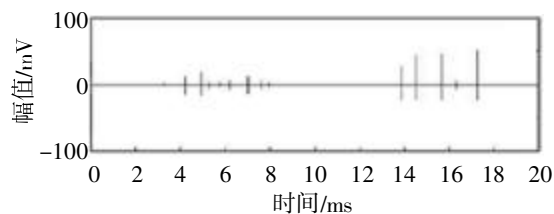


(b) 传感器 C_2

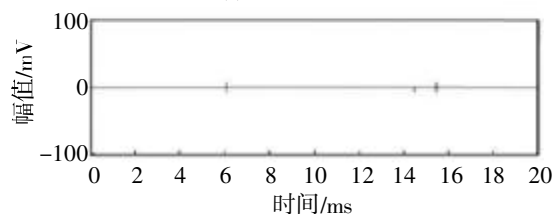
图 10 传感器 C_1 和传感器 C_2 检测到的电晕脉冲

Fig. 10 Corona pulses detected by coupler 1 and coupler 2

进行去噪, 将去噪后的信号再进行脉冲序列分析, 得到图 11 所示的脉冲序列分析结果, 图 11(a) 中为保存下来的局放信号, 而在图 11(b) 中可以看到, 外部电晕脉冲基本得到了抑制。



(a) 沿面放电脉冲

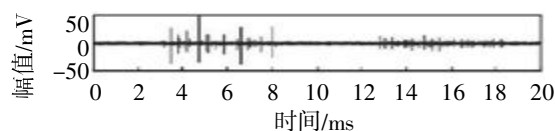


(b) 电晕脉冲

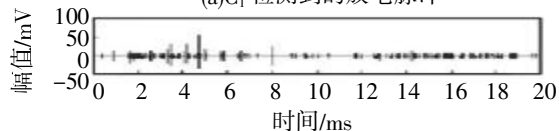
图 11 经脉冲序列分析后的沿面放电脉冲和电晕脉冲

Fig. 11 Signals proceeded by pulse-sequence analysis surface discharge pulses and corona pulses

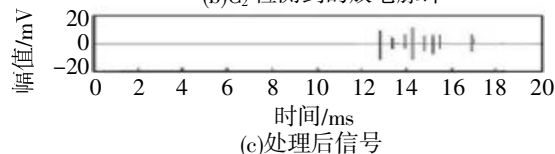
在 2.3 kV 的实验电压下, 将两个放电源同时连接到实验线路中以产生一个混合的脉冲信号。两个传感器各自检测到的信号见图 12(a)、(b)。两路信号经文中最优小波法去噪并进行脉冲序列分析后, 结果见图 12(c)。去噪后的信号中仅包含由沿面放电产生的脉冲信号。



(a) C_1 检测到的放电脉冲



(b) C_2 检测到的放电脉冲



(c) 处理后信号

图 12 两个放电源产生的脉冲信号

以及脉冲序列分析后的信号

Fig. 12 Detected PD pulses generated by the two discharge sources and the proceeded signals by the pulse-sequence analysis

3 结论

文中使用双电流传感器检测变压器内部局部放电信号, 结合逐层最优小波分解去噪算法和脉冲序列分析算法对被检测信号进行了去噪处理, 得到的结论如下:

1) 基于尺度的最优小波分解去噪算法能够有效地从白噪声中提取出局放信号, 对信号的畸变很小,

非常有利于下一步用脉冲序列分析算法抑制脉冲干扰。

2)文中实验证明了双电流传感器检测技术和脉冲序列分析算法的有效性。分析结果表明,采用该方法在提取变压器内部局放信号的时,外部干扰得到了有效抑制。

以上技术已运用于一套变压器局部放电在线监测系统。接下来通过对现场搜集数据的分析将会进一步验证文中提出的算法的有效性。

参考文献:

- [1] 孙才新,罗兵,杜林,等. 变压器局部放电在线监测中抗电磁干扰的定向耦合差动平衡法的研究[J]. 中国电机工程学报,1998,18(5):340-344.
SUN Caixin,LUO Bing,DU Lin,et al. Method of directional difference balance to suppress electromagnetic interference in on-line monitoring partial discharge in transformer[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(5):340-344.
- [2] 李剑,唐炬,孙才新,等. 变压器局放监测抗干扰多端调节的定向耦合差动平衡法研究[J]. 电工技术学报,1998,13(5):47-51.
LI Jian,TANG Ju,SUN Caixin,et al. A method of multi-adjustment and directional difference balance to suppress interference in on-line PD monitoring of transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1998,13(5):47-51.
- [3] NAGESH V,GURURAJ B I. Evaluation of digital filters for rejecting discrete spectral interference in on-site PD measurements[J]. IEEE Transaction on Electrical Insulation,1993,23(1):73-85.
- [4] MA X,ZHOU C,KEMP I J. Automated wavelet selection and thresholding for pd detection[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2002,18(2):37-45
- [5] 李剑,孙才新,杨霁,等. 局部放电在线监测中小波阈值去噪法的最优阈值自适应选择[J]. 电网技术,2006,30(8):25-30.
LI Jian,SUN Caixin,YANG Ji,et al. Adaptive optimal threshold selection of Wavelet-Based threshold de-noising for on-line partial discharge monitoring[J]. Power System Technology,2006,30(8):25-30.
- [6] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans. on Information Theory,1995,41(3):613-627.
- [7] CHANG C S,JIN J,CHANG C,et al. Separation of corona using wavelet packet transform and neural network for detection of partial discharge in gas-insulated substations[J]. IEEE Trans. on Power Delivery,2005,20(2):1363-1369.
- [8] SRIRAM S,NITIN S,PRABHU K M M,et al. Signal de-noising techniques for partial discharge measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(6):1182-1191.
- [9] KAWADA M,TUNGKANAWANICH A,KAWASAKI Z I,et al. Detection of wide-band E-M signals emitted from partial discharge occurring in GIS using wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(2):467-471.
- [10] SATISH L,NAZNEEN B. Wavelet-based denoising of partial discharge signals buried in excessive noise and interference[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2003,10(2):354-367.
- [11] 麦洪,金向朝,李军浩,等. 交流及直流复合电压下油纸绝缘气隙缺陷局部放电特性研究[J]. 变压器,2014,51(12):54-56.
MAI Hong,JIN Xiangchao,LI Junhao,et al. PD characteristic research of air gap defect in oil-paper insulation under AC/DC composite voltage[J]. Transformer,2014,51(12):54-56.
- [12] 杜振波,伍志荣,聂德鑫,等. 特高压换流变压器局部放电超声波检测及定位[J]. 变压器,2014,51(8):59-61.
DU Zhenbo,WU Zhirong,NIE Dexin,et al. Ultrasonic detection and location of partial discharge in UHV converter transformer[J]. Transformer,2014,51(8):59-61.
- [13] 欧阳旭东,柯春俊,杨贤,等. 变压器局部放电 UHF 传感器安装方式对检测灵敏度的影响理论分析[J]. 变压器,2014,51(5):55-57.
OUYANG Xudong,KE Chunjun,YANG Xian,et al. Theoretical analysis of impact to detection sensitivity for installation mode of UHF sensors in transformer PD test[J]. Transformer,2014,51(5):55-57.
- [14] 周凯,李旭涛,黄华勇,等. 电缆终端安装刀痕缺陷的局部放电特性分析[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(10):104-110.
ZHOU Kai,LI Xutao,HUANG Huayong,et al. Analysis of partial discharge characteristics for installing cutting defects in cable terminations[J]. Power System Protection and Control,2013,41(10):104-110
- [15] 苑津莎,尚海昆,王瑜,等. 基于相关系数矩阵和概率神经网络的局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(13):110-115.
YUAN Jinsha,SHANG Haikun,WANG Yu,et al. Pattern recognition for partial discharge based on correlation coefficient matrix and probabilistic neural networks[J]. Power System Protection and Control,2013,41(13):110-115
- [16] LI jian,DU Lin,SUN caixin et al. A practical PD online monitoring system used for transformers[C]//Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials.Himeji,Japan:IEEE,2001:785-788.

程昌奎(1983—),男,博士研究生,从事电气设备技术管理工作。