

DOI: 10.7667/PSPC151487

基于 CEEMD-EEMD 的局部放电阈值去噪新方法

王恩俊, 张建文, 马晓伟, 马鸿宇

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为了解决局部放电信号去噪过程中自适应性不足, 提出了基于完全经验模态分解和总体平均经验模态分解(CEEMD-EEMD)的局部放电阈值去噪新方法。首先将放电信号进行 CEEMD 分解, 其次对分解出来的固有模态函数进行 EEMD 分解, 根据数理统计的知识将分解后的信号进行阈值去噪。利用该算法对局部放电的仿真信号和实测信号进行去噪处理, 并与常规的小波去噪算法比较分析。仿真和实验的去噪结果表明, 基于 CEEMD-EEMD 的局部放电阈值去噪方法取得了良好的去噪效果, 验证了该方法的有效性, 从而为局部放电信号的预处理提供了一种新思路。

关键词: 局部放电; 完全经验模态分解; 总体平均经验模态分解; 阈值去噪; 小波去噪

A new threshold denoising algorithm for partial discharge based on CEEMD-EEMD

WANG Enjun, ZHANG Jianwen, MA Xiaowei, MA Hongyu

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: To solve the problem that the adaptability of partial discharge signals is not insufficient in denoising process, a new algorithm of partial discharge thresholding denoising based on complete ensemble empirical mode decomposition and ensemble empirical mode decomposition is proposed. Firstly, the discharge signals should be decomposed by CEEMD. Secondly, the intrinsic mode functions which have been broken out by CEEMD should be decomposed by EEMD. Thirdly, the thresholding denoising of decomposed signals is carried on based on the knowledge of mathematical statistics. This paper makes use of the new algorithm to denoise for simulation signals and measured signals and to compare with the conventional wavelet denoising algorithm. The simulation results and experimental results show that the thresholding denoising algorithm for partial discharge based on CEEMD-EEMD gets a satisfactory effect, showing validity of the method, which provides a new way for the partial discharge signals to denoise.

Key words: partial discharge; CEEMD; EEMD; thresholding denoising; wavelet denoising

0 引言

局部放电在线监测是一种广泛用于检测电力设备绝缘性能的重要手段^[1-7]。由于在提取局部放电信号的过程中, 会存在大量的干扰信号, 尤其是白噪声, 因此, 如何从被污染的信号中准确提取出局部放电信号成为局部放电在线监测的关键。

局部放电信号是一种非线性强, 不平稳的放电信号。目前, 针对局部放电信号的去噪方法主要有 FFT^[8], 小波自适应阈值去噪^[9]等方法。虽然它们在去噪方面取得了很大的成果^[10-12], 但是由于 FFT 适用于平稳信号的去噪, 而小波变换去噪不具有自适应性, 与人的经验有关, 去噪后的效果不是令人满意。

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,

EMD)具有良好的时频特性, 能够较好的处理非线性, 非平稳信号, 而且具有很强的自适应性, 在信号去噪方面发挥着重要的作用^[13-14]。EMD 算法直观简单, 具有正交性、完备性和自适应性等特点, 然而它却存在着严重的模态混叠现象, 这对于信号去噪分析很不利。为了解决这个问题, Huang^[15]等人通过研究白噪声信号, 提出了总体平均经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)。之后, Torres^[16]等人提出了完全经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD), 该方法通过向每个尺度的剩余分量中添加不同的高斯白噪声, 然后求其平均值, 从而使分解的结果很彻底, 进一步减轻了模态混叠, 减少了虚假分量。

由于 CEEMD 能够使分解结果彻底, 且模态混叠的现象大大减轻, 所以本文首先利用 CEEMD 将含噪信号分解, 其次利用 EEMD 对分解出的各个模态函数再次分解, 根据数理统计的知识本文提出了基于 CEEMD-EEMD 的局部放电阈值去噪新方法。

1 基本原理

1.1 CEEMD 的原理

CEEMD 算法的具体步骤如下:

(1) 对 $x(t) + \varepsilon_0 w^j(t)$ 进行 n 次 EMD 分解, 获得 IMF_1 。

$$IMF_1(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n IMF_1^i(t) \quad (1)$$

(2) 由第一步获得剩余残量 r_1 。

$$r_1(t) = x(t) - IMF_1(t) \quad (2)$$

(3) 分解 $r_1(t) + \varepsilon_1 E_1(w^j(t))$, $i=1, \dots, n$, 将它的第一个固有模态函数作为 CEEMD 的 IMF_2 。

$$IMF_2(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_1(r_1(t) + \varepsilon_1 E_1(w^j(t))) \quad (3)$$

(4) 以此类推得到第 k 个剩余残量 r_k 。

$$r_k(t) = r_{(k-1)}(t) - IMF_k(t) \quad (4)$$

(5) 分解 $r_k(t) + \varepsilon_k E_k(w^k(t))$, $i=1, \dots, n$, 将它的第一个固有模态函数作为 CEEMD 的 $IMF_{(k+1)}$ 。

$$IMF_{(k+1)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i(r_k(t) + \varepsilon_k E_k(w^k(t))) \quad (5)$$

(6) 若剩余残量中至多有 1 个极值点, 则分解结束。否则再次返回到步骤 4-6 中进行计算, 直到剩余残量满足条件^[17], 最终获得的剩余残量 $R(t)$ 。

$$R(t) = x(t) - \sum_{k=1}^K IMF_k \quad (6)$$

所以
$$x(t) = \sum_{k=1}^K IMF_k + R(t) \quad (7)$$

式(7)说明 CEEMD 能够完全分解, 并且可以获得精确的重构信号。式(3)中出现的运算符号 $E_j(\cdot)$, 表示获得 EMD 分解的第 j 个固有模态函数, 式(6)中 K 表示获得 IMF 的总个数。

EEMD 的原理限于篇幅问题, 在此不再赘述。

1.2 阈值的选择和能量门限法

白噪声满足 $N(0, \delta^2)$ 的正态分布, 白噪声经过分解后得到的固有模态分量仍满足正态分布的规律^[17], 而局部放电信号却不具有这种规律, 由此可以将放电信号视为粗差, 结合阈值函数可以实现噪声和信号的分离。数理统计^[18]表明, 3δ 准则是粗差检测的常用准则之一, 基本思想就是: 随机误差

服从正太分布, 误差的绝对值主要集中在均值附近, 用公式可以表示如下:

$$p\{-3\delta < z - u < 3\delta\} = 0.9974 \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 利用 3δ 准则的方法可以将小于阈值绝对值的白噪声去除, 从而将局部放电信号分离出来。

由于端点效应的影响, EMD 分解得到的固有模态函数中会有虚假的固有模态分量, 为了抑制这种现象, 利用能量门限法^[19]来识别虚假的 IMF 。能量门限法的核心思想: 每个进行 CEEMD 分解的信号都是由能量大小相近的信号分量组成, 经过 CEEMD 分解得到的 IMF 也应该有相同等级的能量, 因此能量相对较小的 IMF 可以认为是伪 IMF 。

$$M_i = \sum_{t=1}^N IMF_i(t)^2 \quad (9)$$

$$e_i = \frac{M_i}{\max(M)} \quad (10)$$

对 e_i 设置阈值, 去除虚假的固有模态函数。

2 基于 CEEMD-EEMD 阈值去噪

文献[17]提出了基于 EMD 的局部放电阈值去噪算法。该算法一方面没有考虑 EMD 分解所存在的模态混叠和端点效应, 且将分解出的第一个固有模态函数当成高频噪声直接滤除, 这样会丢失局部放电信号的信息, 不利于局部放电信号的模式识别; 另一方面在对去噪信号的评价上, 其是基于均方根误差和局部相关指数, 不能全方位的反映去噪性能的好坏。鉴于此, 本文提出了基于能量门限法的 CEEMD-EEMD 阈值去噪算法, 其算法流程图见图 1。

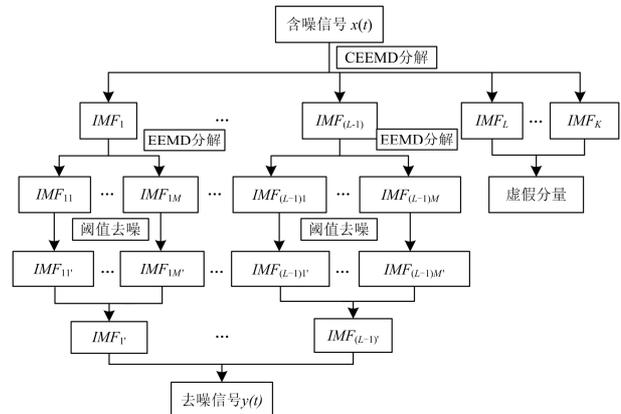


图 1 基于 CEEMD-EEMD 阈值去噪算法流程图

Fig. 1 Threshold denoising algorithm flowchart based on CEEMD-EEMD

3 仿真信号的分析

由于得到的局部放电信号是衰减型的, 因此构

造两种衰减信号来模拟局部放电。

(1) 单指数衰减模型

$$S_1(t) = A e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

(2) 双指数衰减模型

$$S_2(t) = A(e^{-1.3\frac{t}{\tau}} - e^{-2.2\frac{t}{\tau}}) \quad (12)$$

式中: A 为信号的幅值; τ 为衰减系数。式(11)、式(12)中的 $A=1 \text{ mV}$, $\tau=1 \mu\text{s}, 2 \mu\text{s}, 3 \mu\text{s}$, 采样频率 $f=10 \text{ MHz}$ 。添加的信号白噪声满足 $w \sim N(0, 0.15^2)$ 。图 2 给出了理想的局部放电信号和含有白噪声的局部放电信号, 图中的 N 表示的是采样点数。

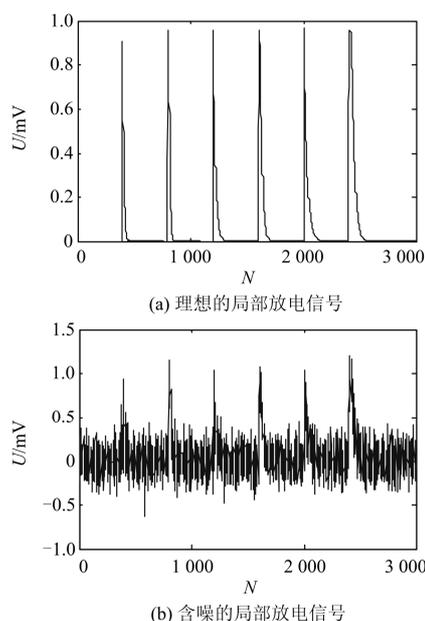


图 2 局部放电的仿真信号

Fig. 2 Simulation signals of partial discharge

首先对含噪信号进行 CEEMD 分解, 得到 11 个固有模态函数, 其中 IMF 是剩余残量, 见图 3。

在对非线性强的局部放电信号去噪的过程中, 为了解决模态混叠的现象, 本文提出对分解后的固有模态信号用 EEMD 进行分解, 这样可以使模态混叠的现象大大减轻。为了消除端点效应的影响, 本文设置能量门限阈值 $e_i \geq 0.1$, 由表 1 可知, 最后的三个 IMF 是虚假分量, 应当舍弃。

表 1 固有模态函数能量值

Table 1 Energy values of intrinsic mode functions

IMF	1	2	3	4	5	6
e	1.000	0.863	0.842	0.755	0.634	0.578
IMF	7	8	9	10	11	
e	0.432	0.176	0.085	0.009	0.006	

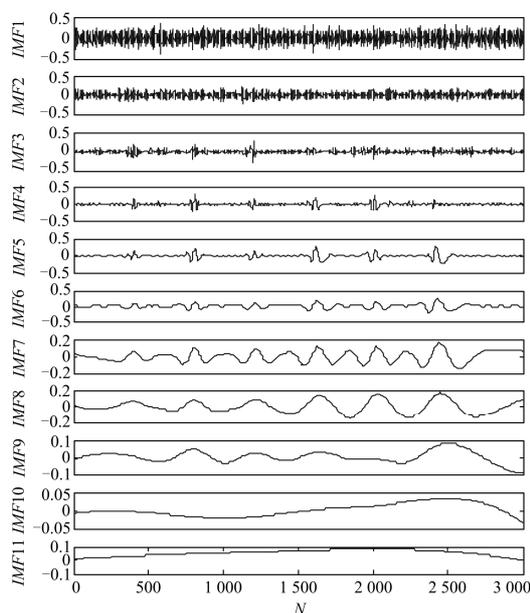


图 3 固有模态函数

Fig. 3 Intrinsic mode functions

为了与本文提出的方法做比较, 分别采用小波阈值去噪算法和基于 EMD 的阈值去噪算法与其对比。对于小波去噪算法, 选用的母小波是 db2 和 db8, 采用的阈值是基于 3δ 准则, 分解层数为 6 层。图 4 中(a)、(b)、(c)分别是 db2 小波去噪, db8 小波去噪和基于 EMD 的阈值去噪, 图 4(d)是本文提出的方法进行局部放电去噪。

图 4 中(a)、(b)比较, 可以看出(a)去噪后的波形要比(b)更接近于原始信号, 这是因为仿真信号的波形与 db2 母小波的波形更匹配。图 4(c)、图 4(d)进行比较, (d)比(c)保留的放电信息要多, 且波形与原始信号的波形近似相同, 因为分解后的固有模态函数经 EEMD 再次分解后模态混叠现象减轻, 显露出更多的局部放电细节信息, 并且利用能量门限阈值法抑制了端点效应。而图 4(c)、图 4(d)无论从信号的波形上, 还是从保留的信息量上来看, 都要比(a)、(b)要好。

图 4 定性比较了去噪后局部放电信号的波形, 为了定量的评价去噪效果, 本文从信噪比(SNR), 幅值误差(MSE), 波形相似系数(NCC)和波形畸变率(JBL)^[20]四个不同的指标全方位进行比较。

信噪比和幅值误差是从宏观上衡量去噪的效果, 信噪比越大, 幅值误差越小, 说明去噪效果越好; 波形相似系数和波形畸变率是从微观上衡量去噪的效果, 波形相似系数越大, 波形畸变率越小, 说明波形畸变的越小, 去噪效果越好。表 2 给出了不同去噪算法在四个评价指标上值的大小。

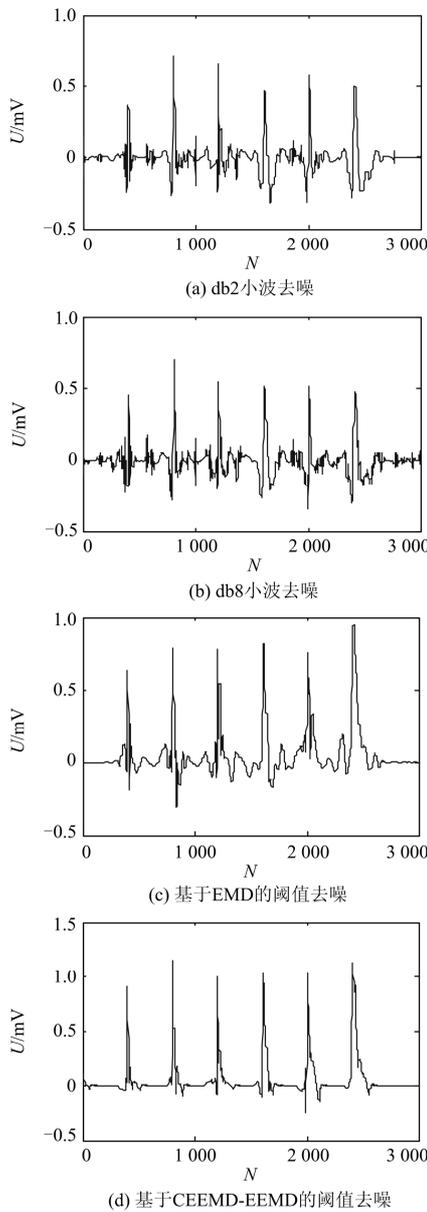


图 4 仿真信号去噪

Fig. 4 Simulation signal denoising

表 2 不同去噪算法的评价指标值

Table 2 Evaluating indicator values for different denoising algorithms

	SNR	MSE	NCC	JBL
db2 小波	5.4389	0.0043	0.8453	0.1594
db8 小波	5.1782	0.0046	0.8356	0.1646
基于 EMD 的阈值去噪	5.7994	0.0062	0.8143	0.1860
基于 CEEMD-EEMD 的阈值去噪	5.5930	0.0042	0.8794	0.1248

由表 2 可以看出, db2 的 SNR 比 db8 的要高 5.03%, MSE 低 6.52%, NCC 高 1.16%, JBL 低

3.26%, 对于小波去噪, 综合来说, db2 小波去噪效果要更好一些; 对于 CEEMD-EEMD 的阈值去噪来说, 虽然 SNR 比基于 EMD 的阈值去噪低 3.56%, 但是 MSE 低 32.26%, NCC 高 8.00%, JBL 低 32.9%。综合评价可知, 基于 CEEMD-EEMD 的阈值去噪算法要优于基于 EMD 的阈值去噪算法, 而基于 CEEMD-EEMD 的阈值去噪算法和 db2 小波去噪算法进行比较, 它的各项指标都要优于 db2。

4 实测信号的分析

利用本文提出的去噪方法对实测的局部放电信号进行去噪, 在高压实验室中进行了三种类型的局部放电实验^[21], 分别是固体绝缘内气隙放电, 油中电晕放电, 油中沿面放电。图 5 是固体绝缘内气隙放电去噪前后图形, 图 6 是油中电晕放电去噪前后图形, 图 7 是油中沿面放电去噪前后图形。从去噪后的图形来看, 去噪效果非常好, 有利于局部放电的模式识别。

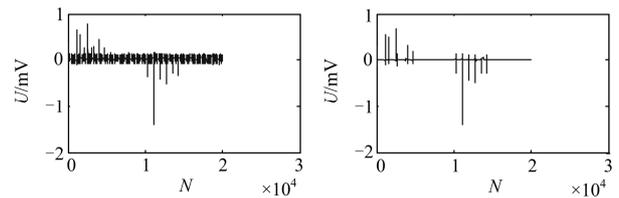


图 5 气隙放电去噪前后图形

Fig. 5 Graphics of air gap discharge before and after denoising

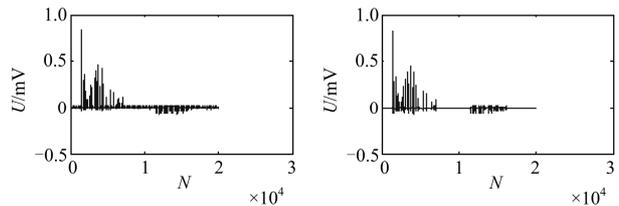


图 6 电晕放电去噪前后图形

Fig. 6 Graphics of corona discharge before and after denoising

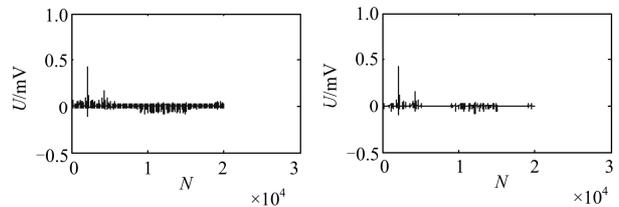


图 7 沿面放电去噪前后图形

Fig. 7 Graphics of creeping discharge before and after denoising

5 结论

本文对局部放电的仿真信号利用传统的去噪算法和新算法进行去噪, 首先从去噪后的波形上直观

的看出新算法去噪效果最好, 然后从四个去噪评价指标上定量的分析得出新算法有较强的去噪能力, 最后利用新算法对实测的局部放电信号进行去噪, 取得了良好的去噪效果, 为局部放电信号的预处理提供了一种新思路。

参考文献

- [1] 魏云冰, 王东晖, 韩立峰, 等. 一种基于 MIA 的油浸式变压器放电性故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 41-47.
WEI Yunbing, WANG Donghui, HAN Lifeng, et al. A novel method for discharging fault diagnosis and location of oil-immersed power transformers based on MIA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 41-47.
- [2] 徐长宝, 庄晨, 蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.
XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipments' state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.
- [3] 公茂法, 张言攀, 柳岩妮, 等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 113-117.
GONG Maofa, ZHANG Yanpan, LIU Yanni, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 113-117.
- [4] 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.
- [5] 杨志超, 范立新, 杨成顺, 等. 基于 GK 模糊聚类和 LS-SVC 的 GIS 局部放电类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 38-45.
YANG Zhichao, FAN Lixin, YANG Chengshun, et al. Identification of partial discharge in gas insulated switchgears based on GK fuzzy clustering & LS-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 38-45.
- [6] 孙帆, 张勇, 徐路强, 等. 一台 750 kV 高压电抗器局部放电故障分析[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 135-139.
SUN Fan, ZHANG Yong, XU Luqiang, et al. PD fault analysis of a 750 kV shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 135-139.
- [7] 康荣波, 林瀚伟, 杨明发. 中高压电气设备在线监测装置供电技术综述[J]. 电器与能效管理技术, 2016(6): 1-7.
KANG Rongbo, LIN Hanwei, YANG Mingfa. Review on power supply technology for on-line monitoring device of middle and high voltage electrical equipment[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(6): 1-7.
- [8] 赵敏. FFT 变换与小波变换在变压器局部放电信号去噪中的应用[J]. 变压器, 2009, 46(5): 28-31.
ZHAO Min. Application of FFT and wavelet transforms to noise elimination of transformer partial discharge signals[J]. Transformer, 2009, 46(5): 28-31.
- [9] 李剑, 杨洋, 程昌奎, 等. 变压器局部放电监测逐层最优小波去噪算法[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 56-60.
LI Jian, YANG Yang, CHENG Changkui, et al. Optimum wavelet de-noising algorithm for partial discharge online monitoring of transformers[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 56-60.
- [10] VIGNESHWARAN B, VMAHESWARI R, SUBBURAJ P. An improved threshold estimation technique for partial discharge signal denoising using wavelet transform[C] // 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies.
- [11] 王立欣, 诸定秋, 蔡维铮. 局部放电在线监测中基于小波变换的阈值消噪算法研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 46-48.
WANG Lixin, ZHU Dingqiu, CAI Weizheng. Wavelet transform based denoise algorithm by thresholding in online partial discharge detection[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 46-48.
- [12] 杨霖. 基于小波多尺度变换的局部放电去噪与识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
YANG Ji. Research on denoising and recognition of partial discharge based on wavelet multiscale transform[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.

[13] 贾嵘, 徐其惠, 田录林, 等. 基于经验模态分解和固有模态函数重构的局部放电去噪方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 13-18.
JIA Rong, XU Qihui, TIAN Lulin, et al. Denoising of partial discharge based on empirical mode decomposition and intrinsic mode function reconstruction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 13-18.

[14] 张冠英, 曹旺林, 李长伟, 等. 基于集合经验模态分解的串联型故障电弧辨识方法[J]. 电器与能效管理技术, 2016(5): 7-12.
ZHANG Guanying, CAO Wanglin, LI Changwei, et al. Series arc fault identification method based on EEMD[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(5): 7-12.

[15] HUANG N E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454(1971): 903-995.

[16] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2011: 4144-4147.

[17] 李天云, 高磊, 聂永辉, 等. 基于经验模式分解处理局部放电数据的自适应直接阈值算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 29-34.
LI Tianyun, GAO Lei, NIE Yonghui, et al. A new adaptive direct-threshold algorithm to partial discharge data processing based on empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 29-34.

[18] 王清河, 常兆光, 曹晓敏, 许晓捷. 随机数据处理方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011.

[19] 臧怀刚, 李清志. 改进的 EMD 方法在局部放电信号提取中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 78-81.
ZANG Huaigang, LI Qingzhi. Application of improved emd method on extraction of partial discharge signal[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(11): 78-81.

[20] 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 nonstationary oscillating partial discharge signals[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 66-70.

[21] 林海渊, 林碧莺, 张秀霞. 交流电晕放电下 SF6 气体分解物的光谱检测[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 52-59.
LIN Haiyuan, LIN Biying, ZHANG Xiuxia. Spectra measurement of SF6 gas decomposition under AC corona discharges[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 52-59.

收稿日期: 2015-08-21; 修回日期: 2015-09-24

作者简介:

王恩俊(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断研究; E-mail: 15610031270@163.com

张建文(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断研究, 高电压与绝缘检测技术;

马晓伟(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断研究。

(编辑 张爱琴)