DOI: 10.7667/PSPC180136

基于 EMD-ICA 的高压电缆局部放电信号去噪研究

刘震宇[1]，刘振英[2]，范贺明[1]

(1. 国网冀北电力有限公司承德供电公司，河北 承德 067000；2. 承德昊源电力承装集团有限公司，河北 承德 067000)

摘要：为了解决高压电缆绝缘监测系统在实际工作环境中采集的局部放电(PD)脉冲信号含有噪声的问题，提出了一种融合 ICA 的 EMD 去噪算法。详细介绍了该算法的去噪原理。该算法的优点在于不仅有效地去除了局部放电脉冲信号中的噪声，而且还很好地保留了 PD 信号的完整性。经过实验室模拟实验和现场在线绝缘监测实验，可以看出该算法取得了很好的去噪效果，证实了该算法的有效性与可靠性。

关键词：高压电缆；EMD；去噪；局部放电信号

Study on signal de-noising of high voltage cable partial discharge based on EMD-ICA

LIU Zhenyu[1], LIU Zhenying[2], FAN Heming[1]

(1. Chengde Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Chengde 067000, China;
2. Chengde Haoyuan Electric Loading Group Limited, Chengde 067000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the high voltage cable insulation monitoring system collects the noise of the partial discharge pulse signal in the actual working environment, this paper presents an EMD denoising algorithm based on ICA. The principle of denoising of the algorithm is introduced in detail. The advantage of the algorithm is that it not only effectively removes the noise in the PD signal but also retains the integrity of the PD signal well. After laboratory simulation experiments and on-site monitoring of on-line insulation, we can see from the experimental results that the algorithm has a good effect of denoising, which proves the effectiveness and reliability of the algorithm.

This work is supported by Henan Joint Project of National Natural Science Foundation of China (No. U1404522).

Key words: high voltage cable; EMD; denoising; partial discharge signal

0 引言

现在高压电缆在实际的生活和工业生产中应用比较广泛，高压电缆绝缘性能的好坏在极大程度上影响着配电设备的安全稳定运行。对电缆进行实时在线绝缘监测是电缆长期、连续和安全稳定运行的重要保证，它不仅关系着供电质量的高低还关乎到工业安全高效的生产。电缆在实际的工作环境中会有很多噪声干扰。因此，在检测电缆的局部放电(Partial Discharge, PD)信号的过程中无法避免地会采集到噪声信号，当采集到的噪声信号较大时 PD 信号就会被噪声信号所淹没，不仅影响了电磁耦合传感器对 PD 信号的检测，而且还降低了绝缘监测系统的准确性[1]。为了提高采集信号的信噪比从而保证在线绝缘监测的精确度，采取有效的去噪方法去除噪声是至关重要的。文献[2]中谈到了基于一种窗函数短时傅里叶变换的去噪算法。该算法的变换性质限制了自身的使用范围，而且还不能确切地反应信号的频率情况，故在宽频带区域对 PD 信号与噪声的区分性较低。文献[3-9]中采用小波变换来对 PD 信号进行降噪，但其去噪性能是由小波函数的最高能量值决定的，实际去噪效果不具有普遍适用性。文献[10-11]中是采用空域相关算法处理含噪 PD 信号。此算法容易将高频部分的 PD 信号误判为噪声信号给去除以及把低频部分的噪声信号误判为 PD 信号给保留。这不但导致一些噪声无法消除而且不能完整地保留 PD 信号。本文提出一种基于 EMD-ICA 的局部放电信号去噪方法，用此算法将检测到的局部放电信号进行 EMD 分解，而后得到若干 IMF 分量；把各个 IMF 分量同局放信号对比，得到噪声与信号的分界 IMF 量；通过 ICA 消除该 IMF 分量上的噪声，之后把降噪后的分界量同其余

基金项目：国家自然科学基金河南联合项目资助 (U1404522)

的 IMF 累加，重构后从而得到降噪后的局放信号。

1　EMD 基本原理及存在的问题

经验模态分解(EMD)假设信号是由很多不同的内蕴模态函数构成的，其步骤是将含噪信号 $x(t)$ 中的全部极大值点和极小值点连在一起，便可获取上包络线 $x_{\max}(t)$ 与下包络线 $x_{\min}(t)$。然后计算上、下包络线的平均值 $m_1(t)$；将原信号 $x(t)$ 减 $m_1(t)$ 得 $h_1(t)$。接着把 $h_1(t)$ 视为 $x(t)$，继续上述步骤，可以求得 $h_{11}(t)=h_1(t)-m_{11}(t)$，此时 $m_{11}(t)$ 为 $h_1(t)$ 的上、下包络线均值；若 $h_{11}(t)$ 还不是 IMF 分量，则继续运行上述运算 k 次得 $h_{1k}(t)=h_{1(k-1)}(t)-m_{1(1-k)}(t)$。

经验模态分解(EMD)把含噪信号分解为若干 IMF 频率从高到低，分解层数越大则 IMF 频率就越低，噪声影响 IMF 分量的作用就越小。实际测得的局放信号往往在时频域的特点与噪声相似，因此 EMD 处理后会产生了模态混叠现象，这一现象很大程度上干扰了降噪的效果。

2　基于 EMD-ICA 的降噪算法

2.1 EMD 中模态混叠辨识

在高压电缆的局放信号检测中，需要获取实时的相关数据，为了及时处理信号中的噪声部分，尽可能提升降噪的效果，本文采用互相关系数对 EMD 中的混叠进行辨识[12]。由 EMD 分解步骤可知，在分解后 m 个 IMF 分量 $imf_1, imf_2, \cdots, imf_m$ 中，噪声影响 IMF 的能力不断减小，信号影响 IMF 的能力逐渐增强，所以要在 m 个 IMF 分量中明确信号与噪声的分界 imf_k，求得分界 imf_k 方法如下：

首先，从式(1)求出原信号与各 IMF 间的互相关系数。

$$R(x,imf_i)=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[x(t)-\bar{x}\right]\left[imf_i(t)-\overline{imf_i}\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left[x(t)-\bar{x}\right]^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left[imf_i(t)-\overline{imf_i}\right]^2}} \tag{1}$$

式中：$x(t)$ 为原信号；$imf_i(t)$ 为第 i 个 IMF 分量；N 为采样点数量，且 $\bar{x}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x(t)$，$\overline{imf_i(t)}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}imf_i(t)$。

然后，在式(1)计算的多个互相关系数中，确定第一个 $R(x,imf_i)$ 在取局部极小值时对应的 IMF 分量，剩余的 IMF 分量就是分界值记为 imf_k；把前 $k-1$ 个 IMF 视为噪声除掉，把第 k 个 IMF 进行 ICA 分析，处理后的信号再与剩余的 IMF 重构，这样就达到了局放信号降噪的目的。

2.2 标准独立成分分析的数学模型

独立成分分析(ICA)假设含噪信号由若干个源信号线性叠加在一起，并且各个源信号拥有统计独立性。其线性模型[13]为

$$\boldsymbol{x}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{s} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 表示源信号由 N 个数据组成的矩阵；$\boldsymbol{A}$ 为 $N\times N$ 混叠矩阵，为 N 个源信号的混合方式；$\boldsymbol{s}=(s_1,s_2,\cdots,s_n)^{\mathrm{T}}$ 为 N 维的源信号向量。ICA 的关键是根据局放信号 $x_i=(i=1,2,\cdots,N)$ 的信息，求得混叠矩阵 $\boldsymbol{A}$，然后通过 $\boldsymbol{s}=(s_1,s_2,\cdots,s_n)^{\mathrm{T}}$，反演得到原信号 $\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^{\mathrm{T}}$。

本文利用 ICA 盲源分离处理 IMF 中的原始信号，达到降噪效果。但由上述模型可得，ICA 需要多个输入信号，而 IMF 分界量只有一个信号，所以就要构造 N 个观测信号作为 ICA 的输入。EMD 分解后的局部放电信号，往往第一个 IMF 分量是噪声，本文借鉴信号时序平移思想构造 ICA 的多维输入[14]把局放信号经 EMD 分解后的第一个 IMF 分量向左平移 p 个位置，移动后多余的部分平移到此时序序列的右边界，循环上述步骤可得不同的混杂信号，把获得的混杂信号与其余的 IMF 重构，将得到的多个新含噪信号作为 ICA 的输入量，此时新的含噪信号与原信号相比信号特征几乎一致。

2.3 基于负熵最大化的 Fast ICA 算法

目前主流 ICA 算法有 infomax 法、FastICA 法及最大似然估计法等[15]。快速独立分量分析[16](Fast Independent Component Analysis, FastICA)算法又称固定点(Fixed-Point)算法，是一种快速寻优迭代算法，能够有效地将混合信号中的各个独立分量分离开 FastICA 的目的是在混合矩阵与源信号都未知的情况下，通过找到合适的解混矩阵 $\boldsymbol{W}$，满足

$$S_1=\boldsymbol{W}\boldsymbol{X}\approx S \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{X}$ 为监测信号经线性变换后的白化矩阵；S_1 为 S 的近似表达。

FastICA 是为了寻找一个方向使得 $\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}(\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}X)$ 拥有最大的非高斯性。通常情况下 FastICA 选取负熵的近似式子，以此作为非高斯性的度量。

$$N_{\mathrm{g}}(Y)=\left\{E\left[\varphi(Y)-E\left[\varphi(Y_{\mathrm{gauss}})\right]\right]\right\}^2 \tag{4}$$

式中：E 为数学期望；$\varphi(y)$ 为非线性函数。

2.4 EMD-ICA 的降噪步骤

含噪的局放信号经 EMD 分解后，在获得的 m

个 IMF 分量中寻找噪声和信号的分界 $imf_k(k<m)$，将大于 imf_k 频率的 IMF 分量作为噪声消除，然后采用 ICA 对产生模态混叠的分量 imf_k 作降噪处理，把消噪后的 imf_k 与剩余的 IMF 分量重构，最后便得降噪后的局部放电信号，算法流程如下[17]：

第 1 步：含噪局放信号 $x(t)$ 经 EMD 分解后的 m 个不同尺度的 IMF 分量，记为 $Q=\{imf_1, imf_2,\cdots, imf_k,\cdots, imf_m\}(k<m)$。

第 2 步：按式(1)求取原信号 $x(t)$ 和分量 imf 的互相关系数，利用 2.3 节中所提算法在 Q 中确定信号和噪声间的分界 imf_k。

第 3 步：将 Q 中的第一个分量 imf_1 以 2.2 节中所用的循环移位方法，产生 n 个新的信号，记为 $S=\{s_1(t), s_2(t),\cdots, s_n(t)\}$，若令 $imf^a(t)=\sum_{i=k+1}^{m} imf_i(t)$，则 S 与 $imf^a(t)$ 累加可获得 n 个新的含噪信号作为 FastICA 算法的输入，令 n 个新的含噪信号为 $x_i(t)=imf^a(t)+s_i(t)$，$i=1,2,\cdots,n$。

第 4 步：将 $x_i(t)$ 作为 FastICA 的 n 维输入，利用 FastICA 滤除 imf_k 中所含噪声，把消噪后的 imf_k 记为 imf_k'。

第 5 步：将 imf_k' 与 $imf_k{}^a$ 重构，即得消噪后的局放信号，即 $x(t)=imf_k'(t)+imf^a(t)$。

3　实验室及现场降噪效果测试分析

3.1　实验室降噪测试分析

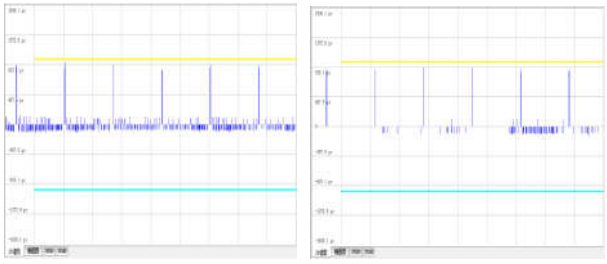
在研究了 EMD-ICA 的降噪算法后，并将该算法应用于基于双 CPU 的电缆在线绝缘监测系统。由于大部分城市供电采用 10 kV 高压电缆供电[18]，故在实验室中先用 10 kV 高压尖端放电模拟产生 PD 信号，接着向 PD 信号中加入噪声信号[19-23]，再用本文所提出的方法对含有噪声的 PD 信号进行去噪，最后通过实验的结果来分析该算法在实验室环境下的去噪效果。实验室模拟图如图 1 所示。



图 1　实验室模拟装置图

Fig. 1 Laboratory simulation device diagram

实验室模拟实验去噪前后的对比如图 2(a)与图 2(b)所示。



(a) 去噪前　　(b)去噪后

图 2　实验室测试去噪效果图

Fig. 2 Field test denoising effect map

通过实验室模拟实验以及实验的结果，我们可以初步证明该方法去除噪声的有效性。

3.2　现场降噪测试分析

在实验室环境下噪声的影响比较小，但在提取实际运行中的高压电缆的局部放电数据时，噪声的影响是十分严重的。为了验证在线监测系统应对实际运行电缆下的去噪能力，将该系统安装于某 35 kV 变电所，通过现场测试绝缘受损的电缆，来检验该方法在实际环境中的去噪效果。现场测试装置图如图 3 所示。

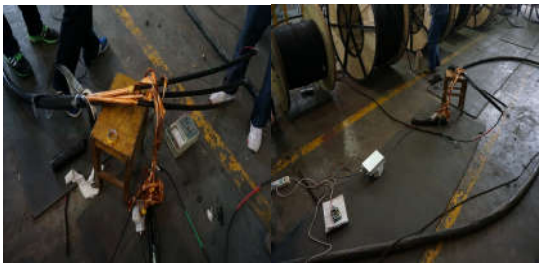
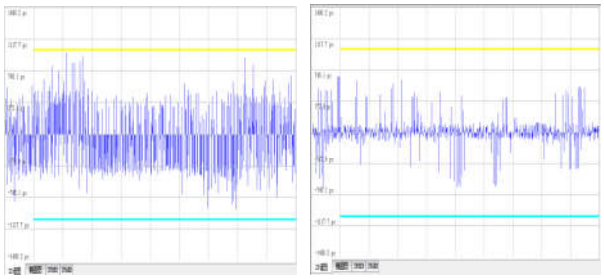


图 3　现场测试实验

Fig. 3 Tests of field

现场测试实验降噪前后的对比如图 4(a)与图 4(b)所示。



(a) 去噪前　　(b)去噪后

图 4　现场测试去噪效果图

Fig. 4 Field test denoising effect map

通过现场实验得到去噪波形，进一步证明了运用 EMD-ICA 算法进行去噪具备较好的降噪能力，从而说明该算法的可行性与实用性。

4 结论

本文将 EMD-ICA 算法运用于高压电缆绝缘监测中的 PD 信号去噪。通过实验室模拟实验和现场测试实验，表明本文所提出的 EMD-ICA 算法具有很好的去噪效果，不仅很好地去除了噪声，而且还保留了 PD 信号的完整性，提高了高压电缆在线绝缘监测系统的精确度，有效地解决了电缆绝缘监测过程中受噪声干扰的问题。

参考文献

[1] 夏向阳, 张琦, 李明德, 等. 证据理论与模糊理论集成的 XLPE 电缆绝缘状态评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 13-18.
XIA Xiangyang, ZHANG Qi, LI Mingde, et al. Research on insulation assessment of XLPE cables based on evidence and fuzzy theory integrated method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20):13-18.

[2] LUO G, ZHANG D, KOH Y K, et al. Time-frequency entropy-based partial-discharge extraction for nonintrusive measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 1919-1927.

[3] 欧阳明鉴, 杜伯学, 魏国忠. 小波变换在局部放电声信号提取中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(4): 16-19.
OUYANG Mingjian, DU Boxue, WEI Guozhong. Research of online monitoring of high voltage cable insulation degradation of coal mine[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(4): 16-19.

[4] 许珉, 杨艳伟, 申克运, 等. 基于小波变换的电缆短距离开路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 112-116.
XU Min, YANG Yanwei, SHEN Keyun, et al. Cable short open-circuit fault location based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 112-116.

[5] MAHESWARI R V, SUBBURAJ P, VIGNESHWARAN B, et al. Partial discharge signal denoising using adaptive translation invariant wavelet transform-online measurement[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2014, 9(2): 695-706.

[6] 孙曙光, 庞毅, 王景芹, 等. 一种基于新型小波阈值去噪预处理的EEMD谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 42-48.
SUN Shuguang, PANG Yi, WANG Jingqin, et al. EEMD harmonic detection method based on the new wavelet threshold denoising pretreatment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 42-48.

[7] 徐洁, 付强. 基于小波分析的脉搏波信号去噪[J]. 计算机仿真, 2012, 29(9): 235-238.
XU Jie, FU Qiang. Denoising of pulse wave signal based on wavelet analysis[J]. Computer Simulation, 2012, 29(9): 235-238.

[8] 李文, 刘霞, 段玉波, 等. 基于小波熵与相关性相结合的小波模极大值地震信号去噪[J]. 地震学报, 2012, 34(6): 841-850.
LI Wen, LIU Xia, DUAN Yubo, et al. Wavelet modulus maxima denoising of seismic signals based on combined wavelet entropy and correlation[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(6): 841-850.

[9] 陈晓娟, 王文婷, 贾明超, 等. 基于小波熵自适应阈值的语音信号去噪新方法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(3): 753-755.
CHEN Xaojuan, WANG Wenting, JIA Mingchao, et al. New denoising method for speech signal based on wavelet entropy and adaptive threshold[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(3): 753-755.

[10] 肖倩, 王建辉, 方晓柯, 等. 一种基于互相关函数的小波系数相关阈值去噪方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 318-321.
XIAO Qian, WANG Jianhui, FANG Xiaoke, et al. A wavelet coefficient threshold denoising method based on a cross-correlation function[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2011, 32(3): 318-321.

[11] 彭云辉, 刘云峰, 杨小冈, 等. 基于空域相关的激光陀螺信号滤波方法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 493-496.
PENG Yunhui, LIU Yunfeng, YANG Xiaogang, et al. Spatial correlation denoising for signal of laser gyro[J]. Infrared & Laser Engineering, 2007, 36(4): 493-496.

[12] 史林军, 周佳佳, 温荣超, 等. 基于经验模态分解与小波分析相结合的风电功率平滑控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 9-16.
SHI Linjun, ZHOU Jiajia, WEN Rongchao, et al. Power smoothing control of wind power based on combination of empirical mode decomposition and wavelet analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 9-16.

[13] HYVÄRINEN A, OJA E. Independent component analysis:

algorithms and applications[J]. Neural Networks, 2000, 13(4): 411-430.

[14] KOPSINIS Y, MCLAUGHLIN S. Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4): 1351-1362.

[15] PHAM H P, DÉRIAN N, CHAARA W, et al. A novel strategy for molecular signature discovery based on independent component analysis[J]. International Journal of Data Mining & Bioinformatics, 2014, 9(3): 277-304.

[16] HYVARINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 626-634.

[17] 王恩俊, 张建文, 马晓伟, 等. 基于CEEMD-EEMD的局部放电阈值去噪新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 93-98.
WANG Enjun, ZHANG Jianwen, MA Xiaowei, et al. A new threshold denoising algorithm for partial discharge based on CEEMD-EEMD[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 93-98.

[18] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.

[19] 董爱华, 苏英. 基于多小波的煤矿井下动力电缆故障定位研究[J]. 工矿自动化, 2014, 40(5): 37-42.
DONG Aihua, SU Ying. Research of fault location of underground power cable based on multi-wavelet[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(5): 37-42.

[20] 李华春, 金甲杰, 杨文虎. 基于FPGA的XLPE电缆局部放电在线监测技术[J]. 电线电缆, 2009(3): 42-44.
LI Huachun, JIN Jiajie, YANG Wenhu. On-line monitoring technology of XLPE cable partial discharge based on FPGA[J]. Electric Wire and Cable, 2009(3): 42-44.

[21] 马星河, 马利, 周涛, 等. 矿用电缆绝缘监测PD信号降噪新方法的研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 123-127.
MA Xinghe, MA Li, ZHOU Tao, et al. Research on new method of monitoring PD signal noise reduction by mine cable insulation[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(1): 123-127.

[22] 朱庆东, 赵煦, 柴琦, 等. 基于放电幅值-放电次数联合相位分布特征的局部放电识别[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 108-113.
ZHU Qingdong, ZHAO Xu, CHAI Qi, et al. Partial discharge identification based on discharge amplitude-discharge frequency according to phase[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 108-113.

[23] 周云龙,张岗.基于集合经验模态分解样本熵和LIBSVM的离心风机故障诊断方法[J]. 热力发电, 2017, 46(2): 114-119.
ZHOU Yunlong, ZHANG Gang. A new fault diagnosis method for centrifugal fans based on ensemble empirical mode decomposition sample entropy and LIBSVM[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 114-119.

收稿日期：2018-01-30；　修回日期：2018-03-09

作者简介：

刘震宇(1976—)，男，硕士，高级工程师，从事电力系统检修与运行管理工作；E-Mail: liuzhenyu2000@sina.com

刘振英(1978—)，男，高级工程师，从事电力系统电力工程技术管理工作；E-Mail: lzy3091@sina.com

范贺明(1985—)，男，工程师，从事电力系统运维与检修管理工作。E-Mail: 75112007@qq.com

(编辑　张爱琴)