

SCA-VMD 在变压器声信号降噪中的应用

吴昊, 柴俊, 安帅, 夏澍

(国网上海市电力公司市北供电公司, 上海市 静安区 200072)

Application of SCA-VMD in Noise Reduction of Transformer Sound Signal

WU Hao, CHAI Jun, AN Shuai, XIA Shu

(State Grid Shabei Electric Power Supply Company, SMEPC, Jing'an District, Shanghai 200072, China)

摘要: 针对采集变压器运行声信号时会混入噪声的情况, 提出了基于稀疏分量分析-变分模态分解 (sparse component analysis-variational modal decomposition, SCA-VMD) 分离变压器运行声信号并降噪的方法。基于稀疏特性的欠定盲源分离能够在观测信号数目小于未知源信号数目的情况下实现源信号的有效分离, 变分模态分解 (VMD) 能将一个多分量信号一次性分解为多个单分量信号。以两路观测信号作为输入, 利用稀疏分量分析法 (SCA) 分离得到变压器运行声信号, 再利用 VMD 将分离信号分解为 4 层本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 分量, 通过阈值滤波的方法对高频分量和低频分量进行去噪处理, 利用新的 IMF 分量重构得到去噪信号。仿真试验和实际试验结果表明, 该方法能实现对变压器运行声信号的有效分离和去噪处理。

关键词: 变压器; 降噪; 变分模态分解; 阈值滤波

ABSTRACT: A method based on sparse component analysis-variational modal decomposition (SCA-VMD) was proposed to separate transformer operation sound signal and reduce noise. The under-determined blind source separation based on sparse characteristics can realize the effective separation of source signals when the number of observed signals is less than the number of unknown source signals, and the variational modal decomposition (VMD) can decompose a multi-component signal into multiple single-component signals at one time. The two-channel observation signals were used as input, the transformer operation acoustic signals were separated by SCA, the separated signals were decomposed into four-layer intrinsic mode function (IMF) components by VMD, the high frequency components and low frequency components were denoised by the method of threshold filtering, and the denoising signals were reconstructed by the new IMF

components. The results of simulation and experiment show that this method can effectively separate and de-noising the operating sound signal of transformer.

KEY WORDS: transformer; noise reduction; variational modal decomposition (VMD); threshold filtering

0 引言

电力变压器作为电力系统中最重要电气装备之一, 需要确保其处于可靠的运行状态。变压器在运行中, 其铁心和绕组会产生振动, 经变压器油和箱体传递后向四周辐射混叠后的振声信号。此外, 当变压器发生局部放电时, 往往发出声信号^[1-5]。变压器的振声信号中包含了丰富的变压器运行状态信息, 可以作为判断其运行状态的依据^[6-9]。

但声传感器除采集到变压器运行状态声信号外, 还存在电晕声、环境噪声等信号, 使得变压器有效的运行状态信息淹没在各种干扰当中, 难以进行后续处理。因此, 如何有效提取变压器声信号成为后续正确判断变压器故障的关键。变压器声信号噪声可分为变压器本体噪声和盲源分离 (blind source separation, BSS), BSS 是指在源信号和混合通道参数未知的条件下, 通过观测信号估计原信号与混合通道参数的一种方法。目前常用的有独立分量分析法 (independent component analysis, ICA)、稀疏分量分析法 (sparse component analysis, SCA)。

目前对变压器运行状态声信号中环境噪声的提取和降噪效果并不理想。为更好地将变压器声信号与环境噪声分离, 本文基于势函数的 SCA 算

基金项目: 国家电网公司科技项目 (520914170008)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (520914170008).

法和变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)对声传感器采集信号进行去噪处理。试验结果证明,该方法能够有效分离变电站运行声信号和环境噪声,去噪效果良好。

1 基本原理

1.1 欠定盲源分离

假设有 M 个观测,实际源信号有 N 个,当 $M < N$ 时,称系统满足欠定条件,称其为欠定系统。定义 X 为 M 维传感器观测所得信号, S 为 N 维未知源信号, A 为混合矩阵,三者关系为

$$X = AS \quad (1)$$

将混合矩阵 A 按列分解为基向量 a^j ,则观测到的数据点可表示为 t 时刻混合矩阵基向量与 N 个源信号 t 时刻幅值的和。

$$x^t = \sum_{j=1}^N a^j S_j^t \quad (2)$$

式中 $t=1, \dots, T$ 。

变压器运行中的声信号和交谈语音信号遵循的原则为噪声分布满足 $P\{|n_1[i]| < 3\sigma_1\} = 99.73\%$,可以看出噪声基本分布在 $[-3\sigma_1, 3\sigma_1]$ 区域内,若 $IMF1[i]$ 值落在此区域外,则认为是信号信息予以保留。

$$IMF1[i]' = \begin{cases} IMF1[i], & IMF1[i] \geq 3\sigma_1 \\ 0, & IMF1[i] < 3\sigma_1 \end{cases} \quad (3)$$

信号阈值选择贝叶斯阈值,即

$$\sigma = (\sigma_1^2 / \sigma_x) / \log(n+1) \quad (4)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{\text{Median}(|w_k|)}{0.6745} \quad (5)$$

式中: σ_1^2 为噪声方差估计值; σ_x 为标准差估计值; n 为小波分解尺度; w_k 为小波分解的高频系数; Median 为小波分解的高频系数绝对值的中位数。

IMF4 分量噪声处理如下:

$$IMF4[i]' = \begin{cases} IMF4[i], & IMF4[i] \geq 3\sigma_1 \\ 0, & IMF4[i] < 3\sigma_1 \end{cases} \quad (6)$$

1.2 基于 SCA-VMD 阈值去噪

本文基于 SCA-VMD 阈值法去噪,具体步骤如下。

1) 将 2 路混合信号作为 SCA 输入,通过汉明窗加窗分帧后进行短时傅里叶变换,使其具有频域稀疏特性。

2) 经欠定盲源分离得到初步去噪信号 X_1 。

3) 将 X_1 利用 VMD 进行 4 层 IMF 分解。

4) 将 IMF1 高频分量和 IMF4 低频分量进行 6 层小波分解。

5) 利用 3σ 原则对 IMF1 高频分量和 IMF4 低频分量进行滤波处理。

6) 根据新的 IMF1 和 IMF4,以及 IMF2、IMF3 分量进行信号重构。

2 仿真试验

2.1 信号分离

本文仿真试验依托 Matlab2017b,仿真信号由一路变压器运行声信号和 2 路交谈语音信号组成,均为 8 kHz、16 位 WAV 格式文件。根据变电站声音采集的实际情况,设定混合矩阵 A 的值,将仿真信号混合为 2 路观测信号作为输入。

在 SCA 算法中, λ 和势能函数阈值 δ 直接影响到分离效果的好坏,经过反复测试,选定 $\lambda=5$, δ 值由势能函数曲线总结可以得出,即 $\delta=0.1 \times \max[\varphi(\theta, \lambda)]$ 。文献[7]提出在 VMD 方法中,惩罚因子 α 及分量个数 K 取值不能过大或过小,过大会导致分解分量带宽过窄,无法包含足够的相关信息;过小会导致分量频带太宽,引入冗余噪声且加重计算负担。 K 的取值决定 IMF 分量个数,考虑到后续滤波环节对高频分量和低频分量的处理,取 $K=4$ 。因此仿真试验前令 $\alpha=[200, 1600]$,步长为 100,对多组观测信号进行分解,观察分解情况可得 $\alpha=200$ 时分解效果较好,故在后续试验环节中 α 取值 200。

试验中定义 3 路源信号分别为变压器运行声信号、2 路交谈语音信号,如图 1 所示。

当混合矩阵 $A = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.7 & 0.3 \\ 0.6 & 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$ 时,变压器运行声信号已与 2 路语音信号混合,形成 2 路混合信号。

根据势函数可以得到估计混合矩阵:

根据势函数可以得到估计混合矩阵:

$$A' = \begin{bmatrix} 0.629 & 0.358 & 0.966 \\ 0.777 & 0.934 & 0.259 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于分离过程中对势函数从大到小进行排序, 由于变电站声信号呈周期性, 故势函数总是最大值, 第 1 个分离信号总是变压器运行声信号, 针对分离源信号 1 进行 VMD 滤波处理, 如图 2 所示。

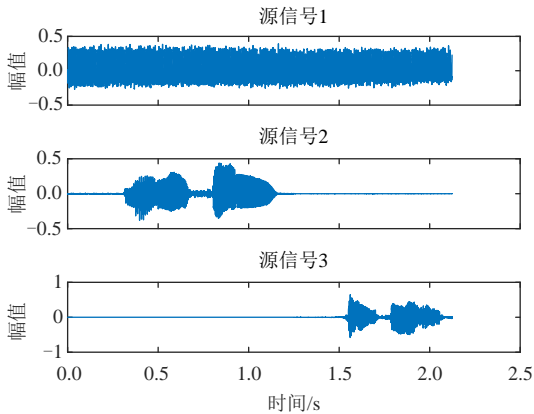


图 1 3 路已知源信号
Fig. 1 Three known source signals

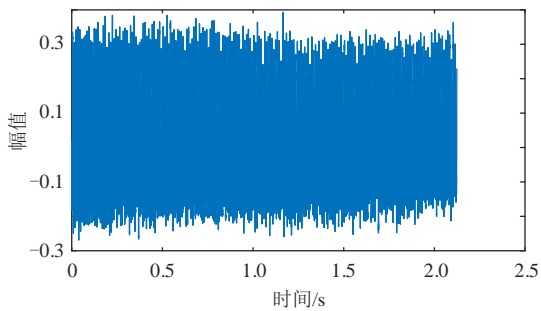


图 2 VMD 滤波处理源信号
Fig. 2 Source signal processing with VMD filter

2.2 滤波效果评价

为检验方法的可行性, 用相关系数 R 评价分离方法的可靠程度。信号的信噪比越大, 均方误差越小, 则信号越接近真实信号, 去噪效果越好, 如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 混合信号由于受 2 路语音

表 1 算法分离去噪效果评价

评价指标	混合信号	分离信号	滤波信号
相关系数	0.572 1	0.901 7	0.959 5
信噪比	1.897 9	5.016 0	10.242 1
均方误差	0.102 2	0.085 3	0.046 8

信号影响, 与变压器运行声信号相似度较低且信噪比小。当进行 SCA 盲源分离后, 相似系数明显增大, 表明分离效果显著; 由于将语音信号分离, 信噪比也有一定提升。当进行 VMD 阈值滤波后, 信噪比明显增大且均方误差很小。因此本算法可以实现混合信号的有效分离及去噪。

3 试验结果分析

试验在某 35kV 变电站内主变压器附近, 距变压器高压侧 1.5 m 处。试验所用语音频率范围 20Hz~20kHz, 灵敏度 -35 dB, 动态范围 >100 dB。试验观测信号如图 3 所示。

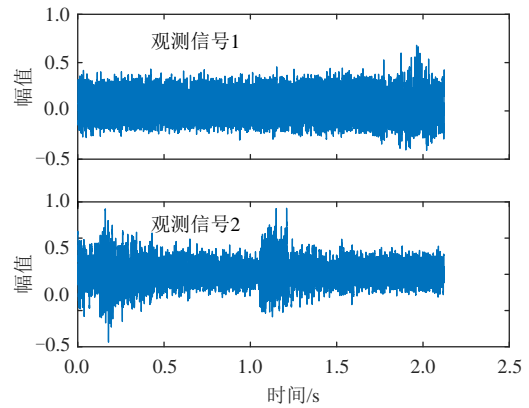


图 3 试验观测信号
Fig. 3 Test observation signal

试验中采集 2 段包含试验人员交谈语音的观测信号作为观测信号输入。试验散点如图 4 所示, 试验势能函数曲线如图 5 所示, 试验分离源信号如图 6 所示。

势能函数曲线有 2 个峰值, 较大值对应的分离信号包含了语音信号, 较小值对应变压器运行状态声信号。这是由于试验结果中未能将语音信号与变压器运行声信号完全分离, 而是看作一个

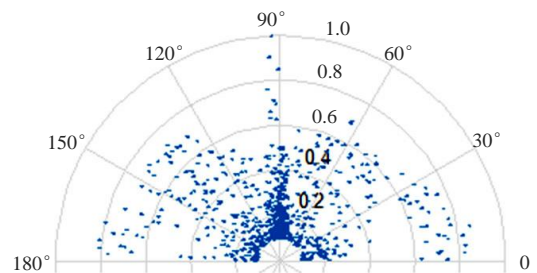


图 4 试验散点图
Fig. 4 Test scatter plot

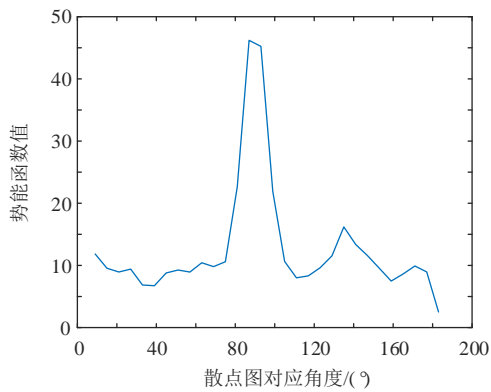


图5 试验势能函数曲线

Fig. 5 Test potential function curve

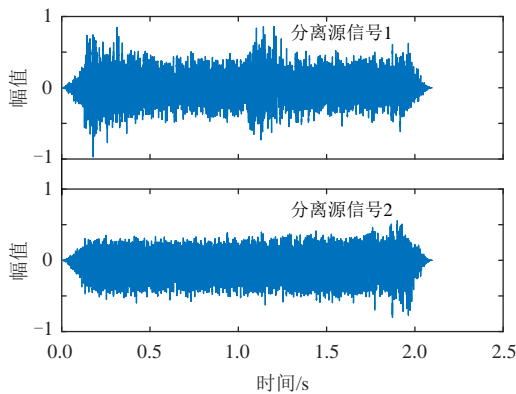


图6 试验分离源信号

Fig. 6 Test separation source signals

整体作为分离源信号输出，导致包含语音信号的分离信号势能更大，因此排在了第一。但试验结果表明算法可以成功分离出变压器运行声信号。

4 结论

1) 通过基于稀疏特性的欠定盲源分离和VMD分解滤波方法对变压器运行声信号进行分离和去噪处理。设置合适的阈值函数对IMF进行细节信息提取，更好地保留了变压器运行声信号的高频、低频部分特性。

2) 由仿真得出，该算法能够实现变压器运行声信号的成功分离，分离得到的变压器声信号排在分离信号首位，再通过VMD阈值滤波实现去噪。采用相关系数、信噪比及均方误差对仿真试验中的分离信号和去噪信号进行评价，各参数均有明显改善，证明算法效果较好。

3) 试验结果中成功分离出变压器运行声信

号，但根据势能函数大小排列会出现分离运行声信号不在第一位的情况，后续工作将继续研究如何正确判断分离信号中的变压器运行声信号。

4) 变压器声信号分离及去噪对变压器声信号特征提取及故障判断有着重要意义，故所提方法有一定的应用前景和使用价值。

参考文献

- [1] 邹亮, 刘晗, 徐亮, 等. 基于改进势函数稀疏分量分析算法的变压器振动自适应提取方法[J]. 高压电技术, 2018, 44(2): 507-517.
- [2] 金潇. 基于声信号的配电变压器故障诊断方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [3] 苏世玮, 郭盛, 高伟, 等. 基于卷积神经网络的变压器振动信号分析[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 127-132.
- [4] Bofill P, Zibulevsky M. Underdetermined blind source separation using sparse representations[J]. Signal Processing, 2001, 81(11): 2353-2362.
- [5] 谢荣斌, 张丽娟, 靳斌, 等. 基于经验模态分解的变压器振动信号盲源分离[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 119-124.
- [6] 王立东, 张凯, 王良润. 改进小波阈值算法在电机振动信号降噪中的应用[J]. 测量技术与仪器仪表, 2015(5): 77-80.
- [7] 唐贵基, 王晓龙. 变分模态分解方法及其在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报, 2016(4): 638-648.
- [8] 高超飞, 刘旭, 王伟, 等. 变压器局放超声传播FEM仿真分析[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(10): 14-22.
- [9] 王立东, 张凯, 王良润. 改进小波阈值算法在电机振动信号降噪中的应用[J]. 测量技术与仪器仪表, 2015(5): 77-80.

收稿日期: 2019-06-16.

作者简介:



吴昊

吴昊(1981), 男, 高级工程师, 研究方向为变电运维, sir_wuhao@qq.com。

(责任编辑 辛培裕)