

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104203

基于改进 SVD_EMD 的绝缘子泄漏电流去噪方法*

王立宪¹ 马宏忠¹ 戴 锋²

(1. 河海大学能源与电气学院 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司 南京 211102)

摘要: 泄漏电流是表征气体绝缘输电线路(GIL)内部绝缘子性能优劣的重要指标,在实际工程中泄漏电流信号的采集常受窄带信号与白噪声信号的干扰,进而影响对于绝缘子性能的准确评估,常用泄漏电流去噪方法多依赖于经验参数与人工设定。针对以上问题,提出利用奇异值曲率谱对奇异值变换(singular value decomposition, SVD)进行改进,去除窄带信号干扰;然后引入正负白噪声组,利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)对含有白噪声信号的泄漏电流信号进行分解,在分解过程中对模态分量进行去噪处理,保留最终模态分量即为无噪泄漏电流信号。信号仿真与现场实测结果均表明所提方法可以有效实现 GIL 绝缘子泄漏电流去噪。

关键词: 泄漏电流;绝缘子;奇异值分解;经验模态分解;去噪;气体绝缘输电线路

中图分类号: TM835;TN978 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Improved singular value and empirical mode decomposition algorithm on leakage current denoising

Wang Lixian¹ Ma Hongzhong¹ Dai Feng²

(1. College of Energy and Electrical Engineer, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: Leakage current is an important indicator to characterize the performance of GIL internal insulator. In practical engineering, the acquisition of leakage current signal is often interfered by narrow-band signal and white noise signal, which affects the accurate evaluation of insulator performance. The common methods of leakage current denoising rely on empirical parameters and manual settings. In order to solve the above problems, singular value decomposition (SVD) is improved by using singular value curvature spectrum to remove narrowband signal interference. Then, the positive and negative white noise groups are introduced, and the leakage current signal with white noise is decomposed by empirical mode decomposition (EMD). In the decomposition process, the modal component is denoised, and the final modal component is the noiseless leakage current signal. The results of signal simulation and field measurement show that the proposed method can effectively denoise the leakage current of GIL insulator.

Keywords: leakage current; insulator; singular value decomposition; empirical mode decomposition; denoising; GIL

0 引言

气体绝缘输电线路(gas insulated line, GIL)作为我国能源电力互联网建设中的重要特高压新基建设备,在苏通特高压交流 GIL 综合管廊工程等众多大型输电项目中得到了广泛的应用^[1-4]。GIL 设备运行过程中,内部的金属颗粒污染物在机械应力与强电场的加持下,会造成

绝缘子绝缘裂化^[5],文献[6]表明金属颗粒污染物的存在会使 GIL 内部绝缘子绝缘性能降低 50%以上。

目前对 GIL 绝缘子绝缘性能进行评估的最好方法是对其表面的泄漏电流进行检测^[7],然而在实际工程中,泄漏电流的监测往往会受到脉冲信号与白噪声的干扰,影响工作人员对于绝缘子绝缘性能的精确判别,故对 GIL 绝缘子表面泄漏电流进行去噪处理具有一定的必要性。

在噪声信号处理方面,国内外提出了经验小波变换

收稿日期:2021-04-20 Received Date:2021-04-20

* 基金项目:中国博士后科学基金(2020M671318)、江苏省自然科学基金(BK20190490)、国网江苏省电力公司重点科技项目(J2020040)资助

(empirical wavelet transform, EWT)^[8-10]、经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD)^[11-13]、奇异值分解 (singular value decomposition, SVD)^[14-16] 等方法。但经验小波变换本身属于非自适应性方法,去噪效果依赖于人工设置的母小波与分解尺度等参数,方法的去依赖性较差;EMD 在处理非平稳、非线性信号方面相较于传统的小波变换具有一定的优越性,但是当信号频率相近时,EMD 分解会产生端点效应、模式混叠等问题;文献[17]将 SVD 应用于局部放电信号去噪,但在处理过程中,待分析信号与白噪声信号的奇异值差别不明显,导致最后的去噪效果不够理想。目前的去噪方法多依赖于人工参数的设定,在实际应用中去噪精度欠佳;同时,对于 GIL 绝缘子泄漏电流中脉冲噪声和白噪声形成的混合噪声去噪效果不够理想。

针对现有研究方法的不足,本文对传统 SVD 方法进行了改进,引入曲率描述奇异值变化规律,通过曲率的特殊变化点选择特殊奇异值序列,并利用此序列重构泄漏电流信号与脉冲信号,自适应的去除脉冲信号等窄带噪声干扰,得到仅含有白噪声的泄漏电流信号;对于含有白噪声的泄漏电流信号,引入正负白噪声信号组,利用 EMD 对其模态分量进行逐阶分解,保留最终模态分量即为无噪泄漏电流信号,在分解过程中解决传统 EMD 方法的端点效应,引入的白噪声正负相抵解决模式混叠问题。

本文提出的方法无需人工设置分解水平与阈值等变量,也无需重构模态分量。利用仿真信号和实测信号的去噪结果验证了文中方法的有效性。

1 泄漏电流去噪方法理论基础

1.1 基于曲率谱的改进 SVD 算法

设含噪泄漏电流信号为 $f = [x(1), x(2), \dots, x(n)]$, Hankel 矩阵构造如下:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(m) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(m+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(n-m+1) & x(n-m+2) & \cdots & x(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $1 < m < n$ (n, m 均为整数)。

令 $T = n - m + 1, K = n - T + 1$, 则对矩阵 \mathbf{H} 的 SVD 分解结构为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}_{T \times T} \cdot \mathbf{S}_{T \times K} \cdot \mathbf{V}_{K \times K}^T \quad (2)$$

式中: \mathbf{U} 与 \mathbf{V} 分别表示 $T \times T$ 与 $K \times K$ 维的正交矩阵, $\mathbf{S} = \text{diag}(e_1, e_2, \dots, e_p)$, $p = \min(K, L)$ 代表奇异值序列。

文献[18]表明奇异值可以重构窄带信号,但有效奇异值个数与奇异值数值比对仍需人工确定。

由矩阵 \mathbf{H} 可以看出,相邻两个行向量呈高度相关性

(相邻两个行向量之间相差一个数据点),所以矩阵的秩 $r \ll \min(n, T)$ 。在 SVD 中,非零奇异值的个数等于矩阵的秩,所以对于理想泄漏电流信号 $\min(n, T)$ 来说,其由前 r 个非零奇异值代表,后面的奇异值均趋近于 0,奇异值曲线在 r 处发生转折。

而对于含有窄带噪声的泄漏电流信号,其噪声序列的自相关函数为:

$$R(\xi) = b^2 \delta(\cdot) \quad (3)$$

式中: b 为 ξ_i 的标准差; $\delta(\cdot)$ 为 Kronecker 函数。

由式(3)可知,对于任意相邻且相差一位数据的子序列,二者均不相关。对于含有窄带噪声的 Hankel 矩阵,其秩 $r = \min(n, T)$,由其所代表的噪声序列奇异值呈一条近乎平滑的直线,无转折点。

基于以上分析,本文引入曲率描述奇异值的变化情况,从而分离窄带噪声的奇异值范围。

奇异值曲线 $y = d(x)$ 的曲率谱计算公式为:

$$C_i = \frac{|y''(i)|}{(1 + y'(i)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, p - 1$; $y''(i)$ 为二阶导数,可表示为 $e_{i+1} - 2e_i + e_{i-1}$; $y'(i)$ 为一阶导数中向前与向后差分中绝对值较小的差分。

对应奇异值曲线 y 的每个数据点 i ,均有一个曲率 C_i 与之对应,令 $C_1 = 0$,将曲率序列 $\{C_1, C_2, \dots, C_{p-1}\}$ 记为奇异值曲率谱,其数值的大小代表了奇异值序列中个点的转折情况,在某个数据点的数值越大,其转折程度越大。奇异值曲率谱中的最大曲率点 C_k 为奇异值序列方向最大改变点,即奇异值曲线延伸方向转换点。

因此,该点即为区别窄带噪声与仅含白噪声干扰的泄漏电流信号分界点。利用二阶导数进行判断,若 $y''(k) < 0$, 则 $r = k$, $y''(k) > 0$, 则 $r = k - 1$, 引入曲率谱后对矩阵 \mathbf{H} 的 SVD 分解结构可表示为:

$$\mathbf{H}_s = \mathbf{U}_{T \times r} \cdot \mathbf{S}_{r \times r} \cdot \mathbf{V}_{K \times r}^T \quad (5)$$

根据改进 SVD,去除窄带噪声信号 f_n ,筛选出含白噪声信号的泄漏电流信号 f_w 可表示为:

$$f_w = f - f_n \quad (6)$$

1.2 基于正负白噪声组的改进 EMD 分解法

EMD 对于信号的分解基于自身时间序列尺度特征,因而不用人工预先设定基函数,正是由于此特征,EMD 在处理非平稳与非线性信号时相较于经验小波包变换等方法具有更高的去噪效果,但 EMD 所带来的模式混叠与端点效应是制约其分解准确性的最大因素。为解决此问题,本文采取在待分析信号中加入 0.3 倍均方根值的正负白噪声信号组方法,在 EMD 分解过程中进行模态去噪,而在信号分解过程中,正负白噪声信号组可以相互抵消,不影响分解的准确性,具体流程如下。

1) 经验模态分解得到的模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 可表示为:

$$s(t) = \sum_{a=1}^n c_a(t) + r_m(t) \quad (7)$$

式中: $a = 1, 2, \dots, n$ 表示第 i 个模态分量; n 为分解水平; $r_m(t)$ 为剩余分量。

2) 加入 k 组 0.3 倍均方根值的正负白噪声信号组 $w_{k\pm}(t)$:

$$s(t) + w_{k\pm}(t) = \sum_{a=1}^n c_{a,k\pm}(t) + r_k(t) \quad (8)$$

式中: $c_{a,k\pm}(t)$ 表示加入正负白噪声信号组的第 k 个模态分量; n 为分解水平; $r_k(t)$ 为剩余分量。

3) 将得到的模态信号进行多次集总平均:

$$c_{a,k\pm}(t) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m c_{a,k\pm}(t) \quad (9)$$

4) 将对应分量进行均值化处理, 消去噪声信号干扰:

$$c_a(t) = \frac{1}{2} c_{a,k\pm}(t) \quad (10)$$

5) 将模态信号 $c_a(t)$ 再次进行 EMD 分解:

$$\begin{cases} c_1(t) \xrightarrow{EMD} e_1(t) + r_1(t) \\ c_k(t) + r_{k-1}(t) \xrightarrow{EMD} e_k(t) + r_k(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $e_k(t)$ 表示经 EMD 分解后的模态分量。

6) 基于正负白噪声组的改进 EMD 分解法最终可表示为:

$$s(t) \longrightarrow \sum_{a=1}^n d_a(t) + r_a(t) \quad (12)$$

式中: $d_a(t)$ 为最终模态分量, $r_a(t)$ 为剩余分量。

1.3 算法流程

1) 对原始含噪泄漏电流信号进行曲率谱 SVD 分解, 计算含噪泄漏电流信号曲率谱;

2) 确定最大曲率 C_i , 并计算 $y''(i)$, 根据 $y''(i)$ 数值确定 Hankel 矩阵的秩 r , 得到窄带信号表征 e_i 。

3) 根据步骤 2) 去除窄带噪声信号干扰, 将含有白噪声信号的泄漏电流信号进行改进 EMD 分解去噪。

4) 确定最后模态分量即为所得去噪完成后泄漏电流无噪信号。

方法流程如图 1 所示。

2 仿真信号分析

2.1 仿真泄漏电流信号

绝缘子泄漏电流主要有基次、三次和五次谐波分量组成, 本文用倍数正弦函数表示:

$$f(t) = 10\sin(\omega t) + 2\sin(3\omega t) + 0.5\sin(5\omega t) \quad (13)$$

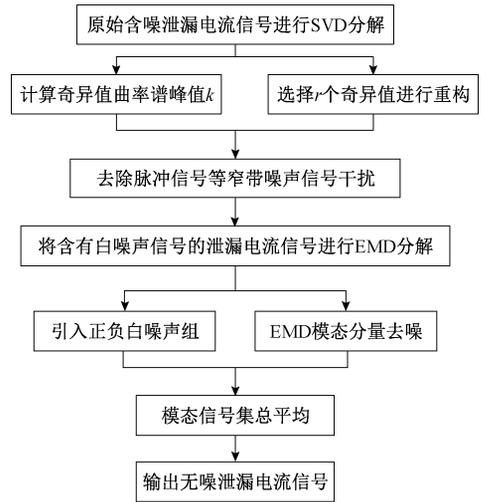


图 1 去噪方法流程

Fig. 1 Flow of denoising method

信号幅值 $A = 7.87 \text{ mA}$, 衰减系数 $\tau = 0.02 \mu\text{s}$, 三次谐波与基次谐波幅值之比 $K = 0.2$, 得到的无噪声泄漏电流如图 2 所示。

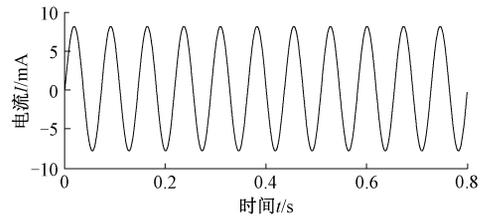


图 2 仿真无噪泄漏电流信号

Fig. 2 Simulation of noiseless leakage current signal

实际工程中 GIL 内部绝缘子泄漏电流主要受脉冲电流信号等窄带噪声与白噪声干扰, 故本文设置 11、18 以及 26 kHz 3 个频段的正弦信号叠加模拟脉冲信号 $h(t)$ 干扰, 以 -3 dB 高斯白噪声模拟白噪声信号 $w(t)$ 干扰, 得到含有窄带噪声信号和白噪声信号的泄漏电流信号如图 3 所示。

$$f^*(t) = 10\sin(\omega t) + 2\sin(3\omega t) + 0.5\sin(5\omega t) + w(t) + h(t) \quad (14)$$

2.2 算法去噪评价标准

文献[19]表明有效值、三次谐波与基次谐波幅值之比可以作为表征泄漏电流的特征量, 故文中将算法评价指标定为:

- 1) 去噪后泄漏电流有效值 I_e 。
- 2) 去噪后三次谐波与基次谐波幅值之比 K 。
- 3) 去噪后信噪比 (signal to noise ratio, SNR):

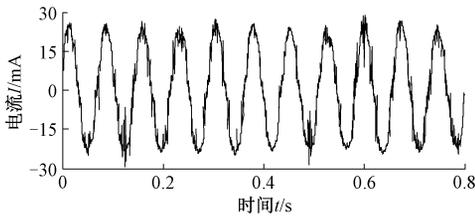


图 3 加入白噪声和窄带噪声的仿真泄漏电流信号
Fig. 3 Simulation of leakage current signal with white noise and narrowband interference

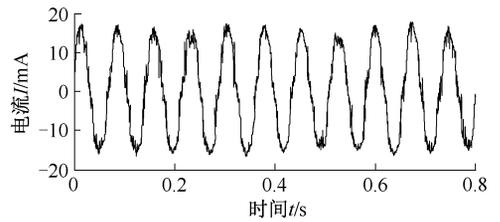


图 5 去除窄带干扰后的含噪泄漏电流信号
Fig. 5 Noisy leakage current signal after removing narrowband interference

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^N s(i)^2}{\sum_{i=1}^N [f(i) - s(i)]^2} \quad (15)$$

4) 降噪率 (noise reduction ratio, NRR):

$$NRR = 10(\lg \sigma_1^2 - \lg \sigma_2^2) \quad (16)$$

式中: σ_1 和 σ_2 为含噪与去噪后的泄漏电流信号标准差。SNR 与 NRR 越大表示去噪效果越好。

2.3 仿真去噪效果分析

对泄漏电流信号 $f^*(t)$ 进行 SVD 分解,得到的曲率谱如图 4 所示。

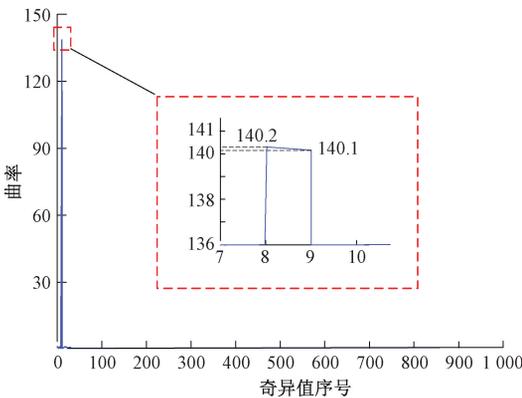


图 4 奇异值曲率谱

Fig. 4 Singular value curvature spectrum

由图 4 可以看出, SVD 曲率谱中曲率最大值为 C_8 , 计算后得到 $y''(8) > 0$, 故 $r=7$, 即窄带噪声信号 f_n 可由 $e_1 \sim e_7$ 重构得出, 去除窄带噪声后的泄漏电流信号如图 5 所示。

对去除窄带噪声后含有白噪声干扰的泄漏电流信号进行改进 EMD 分解, 分解结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 在改进 EMD 算法不断的去噪分解过程中, 最后模态分量 IMF7 已经较好的达到去除白噪声信号干扰的效果, 与原始仿真信号对比如图 7 所示。

为验证本文方法对于泄漏电流的去噪效果, 将本文方法与 EMD 方法^[11]、A-SVD 方法^[20]、SSVD 方法^[21]进行

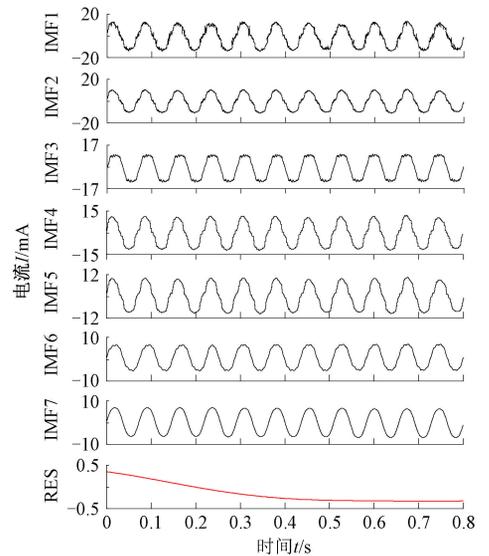


图 6 改进 EMD 分解

Fig. 6 Improved EMD breakdown

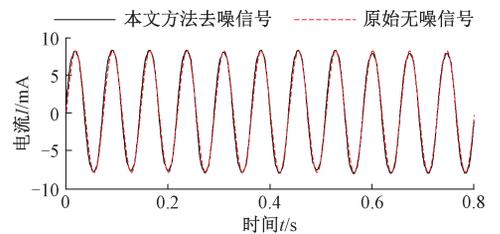


图 7 泄漏电流去噪后与原始信号对比

Fig. 7 Comparison between the original signal and the denoised leakage current

对比, 结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 传统 EMD 方法并不能有效去除脉冲噪声的干扰, 得到的泄漏电流信号在峰值处仍残留部分脉冲噪声干扰; A-SVD 方法与 SSVD 方法相较于传统 EMD 方法虽然对脉冲噪声干扰起到了一定的去噪效果, 但对于白噪声不能起到良好的去噪效果, 造成最终泄漏电流信号波形的畸变与幅值的失真; 通过对比, 本文方法在去除 GIL 绝缘子泄漏电流中的混合噪声方面具有良好

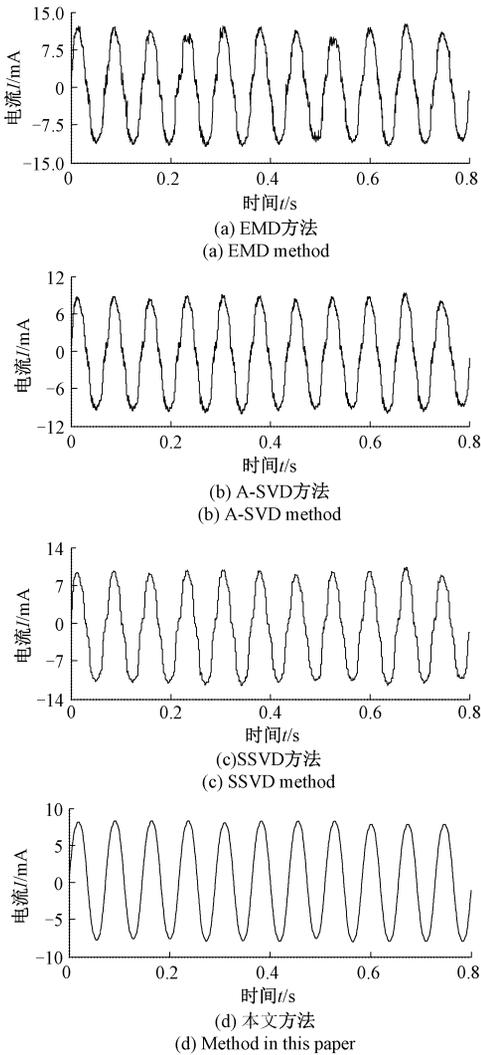


图 8 仿真泄漏电流信号去噪效果对比
Fig. 8 Comparison of denoising effect of simulated leakage current signal

的效果,得到的无噪泄漏电流波形与仿真波形近乎一致,评价指标如表 1 所示,无噪泄漏电流信号幅值 $A = 7.87 \text{ mA}$,有效值为 6.05 mA ,三次谐波与基次谐波幅值之比 $K=0.2$ 。

表 1 去噪评价指标
Table 1 Denoising evaluation index

评价指标	EMD 方法	A-SVD 方法	SSVD 方法	本文方法
I_e / mA	8.74	6.84	7.94	6.08
K	0.167	0.179	0.181	0.192
SNR	-0.31	2.63	5.31	6.78
NRR	4.77	8.89	14.32	18.76

通过表 1 可以看出,本文方法去噪后的泄漏电流有效值与比值 K 最接近与无噪仿真泄漏电流,同时 SNR 与

NRR 的数值在 4 种方法中也是最大,通过以上对比分析,验证了本文方法对于 GIL 绝缘子泄漏电流信号混合噪声抑制具有良好的效果。

3 实测信号分析

3.1 实测泄漏电流信号

本文以 220 kV 三相通气型 GIL 为测试对象,对其污秽绝缘子泄漏电流进行了测取,等值附盐密度 0.08 mg/cm^2 ,非可溶沉积物密度 0.45 mg/cm^2 ,泄漏电流通过阻值 50Ω 的无感电阻进行采集,测点设置示意图如图 9 所示(红色框线区域),测得含有混合噪声的泄漏电流如图 10 所示。



图 9 实测现场
Fig. 9 Site of the detection

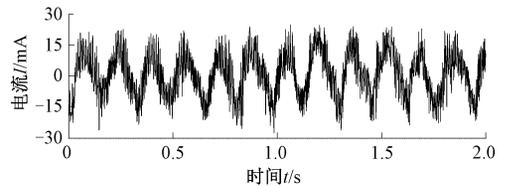


图 10 实测泄漏电流信号
Fig. 10 Field measured leakage current signal

3.2 实测泄漏电流信号去噪效果对比

将现场测得含有混合噪声的泄漏电流利用 EMD 方法、A-SVD 方法、SSVD 方法与文中方法进行处理,得到处理结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出,含噪泄漏电流信号经传统 EMD 方法处理过后仍存在大量的脉冲噪声与白噪声干扰;A-SVD 方法与 SSVD 方法相较于传统 EMD 方法去噪效果较好,但 A-SVD 方法不能完全消除脉冲噪声的干扰,导致在泄漏电流信号波形峰值处仍存在脉冲干扰,SSVD 方法对于脉冲信号去噪效果稍好,但由于不能完全消除白噪声的干扰,同样造成了泄漏电流信号波形的畸变;本文方法对于脉冲噪声与白噪声均起到了良好的去噪效果,较好的恢复了原始泄漏电流信号。

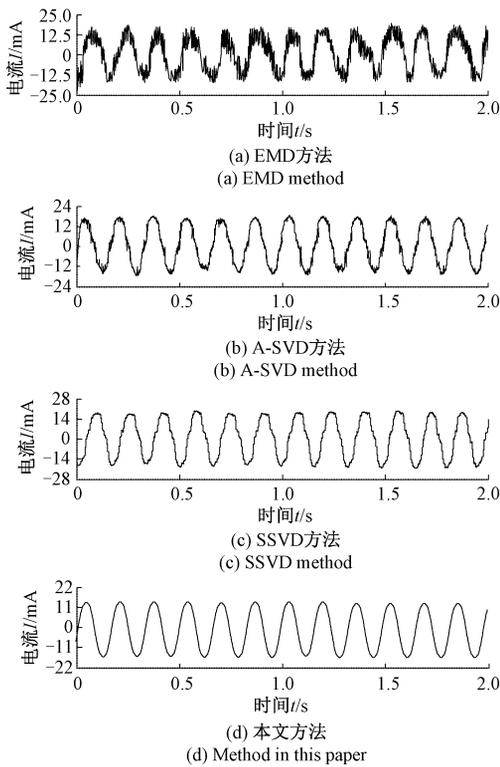


图 11 实测泄漏电流信号去噪效果对比
Fig. 11 Comparison of denoising effect of measured leakage current signal

表 2 去噪率

Table 2 NRR Contrast

评价指标	EMD 方法	A-SVD 方法	SSVD 方法	本文方法
NRR	10.90	24.24	36.54	44.78

结合表 2 数据可以发现,对于 GIL 绝缘子泄漏电流去噪效果较好的是 SSVD 方法($NRR = 36.54$)与本文方法($NRR = 44.78$),结合图 10 可知,本文方法在具有较高去噪率的同时去噪效果优于 SSVD 方法,故所提方法在 GIL 绝缘子泄漏电流去噪方面更具有优势。

4 结 论

本文提出引入奇异值曲率谱改进 SVD 算法去除泄漏电流中窄带信号干扰,提出引入正负白噪声组在 EMD 分解过程中对模态分量进行降噪去除泄漏电流中白噪声干扰,有效提取了无噪泄漏电流信号。本文所述方法无需依赖经验参数与人工设置阈值等参数,消除了算法对于人工经验的依赖性,提高了算法本身的自适应性。根据文中算法与其他算法的对比和实测分析,本文方法可以更好的实现对于 GIL 污秽绝缘子泄漏电流的混合噪声抑制,有利于实际工程应用中对 GIL 中绝缘子绝缘裂化

程度与绝缘性能进行精准评估。

参考文献

[1] 肖登明, 阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 699-707.
XIAO D M, YAN J D. Application and development of gas insulated transmission line (GIL) [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 699-707.

[2] 黄志高. 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
HUANG ZH G. Gas insulated transmission line(GIL) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.

[3] 贾云飞, 汲胜昌, 吕亮. GIL 内金属微粒在直流电压下的运动特性分析[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 124-131.
JIA Y F, JI SH CH, LYU L. Motion characteristic of metal particles in GIL under DC voltage [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 124-131.

[4] 李鹏, 颜湘莲, 王浩, 等. 特高压交流 GIL 输电技术研究及应用 [J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3161-3167.
LI P, YAN X L, WANG H, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.

[5] 王健, 常亚楠, 王靖瑞, 等. 基于捕捉效用分析的直流 GIL 微粒陷阱设计与参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 5050-5060.
WANG J, CHANG Y N, WANG J R, et al. Design and optimization of particle traps in DC GIL based on the capture effect analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 5050-5060.

[6] 李庆民, 王健, 李伯涛, 等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 849-860.
LI Q M, WANG J, LI B T, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860.

[7] 黄海宏, 颜碧琛, 赵常威, 等. 氧化锌避雷器泄漏电流检测的优化 FFT 分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4): 87-94.
HUANG H H, YAN B CH, ZHAO CH W, et al. Optimized FFT analysis for leakage current detection of zinc oxide arrester [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(4): 87-94.

[8] 吴建章, 梅飞, 潘益, 等. 基于改进经验小波变换的

- 电能质量扰动检测新方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 142-151.
- WU J ZH, MEI F, PAN Y, et al. Novel detection method of power quality disturbance based on IEWT [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 142-151.
- [9] 刘春, 谢皓, 肖奕霖, 等. EWT 算法在 ECG 信号滤波中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1835-1842.
- LIU CH, XIE H, XIAO Y L, et al. Research on empirical wavelet transform algorithm in ECG signal filtering [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1835-1842.
- [10] 夏峰, 卢才武, 顾清华. 无人机采场图像二维经验小波变换降噪研究[J]. 测绘科学, 2021, 46(1): 108-113.
- XIA F, LU C W, GU Q H. Research on 2D empirical wavelet transform noise reduction of UAV stope images [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(1): 108-113.
- [11] 孙博, 张建文, 潘磊落. 基于 EMD 的局部放电去噪方法的研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 89-93.
- SUN B, ZHANG J W, PAN L L. Study on de-noising method of partial discharge based EMD [J]. Insulating Materials, 2014, 47(3): 89-93.
- [12] 颜上取, 汤昊, 刘备, 等. 基于压缩感知的 HIFU 回波信号降噪研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 19-25.
- YAN SH Q, TANG H, LIU B, et al. Research on HIFU echo signal denoising based on compressed sensing technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(11): 19-25.
- [13] 程铁栋, 吴义文, 罗小燕, 等. 基于 EWT_Hankel_SVD 的矿山微震信号特征提取及分类方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 181-191.
- CHENG T D, WU Y W, LUO X Y, et al. Feature extraction and classification method of mine microseismic signals based on EWT_Hankel_SVD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 181-191.
- [14] 饶显杰, 周凯, 汪先进, 等. 基于改进 SVD 算法的局部放电窄带干扰抑制方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 705-713.
- RAO X J, ZHOU K, WANG X J, et al. Suppression of narrow-band noise of partial discharge based on improved SVD algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 705-713.
- [15] 赵学智, 陈统坚, 叶邦彦. 变结构 SVD 算法及其在信号分离中的应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 11-21.
- ZHAO X ZH, CHEN T J, YE B Y. Variable structure SVD algorithm and its application to signal [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 11-21.
- [16] 崔少华, 李素文, 汪徐德. BP 神经网络和 SVD 算法联合的地震数据去噪方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 12-19.
- CUI SH H, LI S W, WANG X D. Joint de-noising method of seismic data via BP neural network and SVD algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2): 12-19.
- [17] 周凯, 黄永禄, 谢敏, 等. 短时奇异值分解用于局放信号混合噪声抑制[J]. 电工技术学, 2019, 34(11): 2435-2443.
- ZHOU K, HUANG Y L, XIE M, et al. Mixed noises suppression of partial discharge signal employing short-time singular value decomposition [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2019, 34(11): 2435-2443.
- [18] 徐永干, 姜杰, 唐昆明, 等. Hankel 矩阵和奇异值分解的局部放电窄带干扰抑制方法[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2762-2769.
- XU Y G, JIANG J, TANG K M, et al. A method of suppressing narrow-band interference in partial discharge based on matrix Hankel and singular value decomposition [J]. Power Grid Technology, 2020, 44(7): 2762-2769.
- [19] 赵世华, 巢亚锋, 孙利朋, 等. 基于小波变换与 EEMD 的绝缘子泄漏电流去噪方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(9): 216-220.
- ZHAO SH H, CHAO Y F, SUN L P, et al. Research on insulator leakage current de-noising method based on wavelet transform and EEMD [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(9): 216-220.
- [20] ASHTIANI M, SHAHRTASH S. Partial discharge de-noising employing adaptive singular value decomposition [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 775-782.
- [21] 刘宇舜, 周文俊, 李鹏飞, 等. 基于广义 S 变换模时频矩阵的局部放电特高频信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 211-220.
- LIU Y SH, ZHOU W J, LI P F, et al. Partial discharge

ultrahigh frequency signal denoising method based on generalized S-transform modular time-frequency matrix [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 211-220.

作者简介



王立宪, 2015 年于南京师范大学获得学士学位, 现为河海大学硕士研究生, 主要研究方向为 GIL 设备运行状态监测与故障预警。

E-mail: 837213579@qq.com

Wang Lixian received his B. Sc. degree from Nanjing Normal University in 2015. Now he is a M. Sc. candidate at Hohai University. His main research interests

include operation condition monitoring and fault early warning of GIL equipment.



马宏忠, 1989 年于东南大学获得学士学位, 1994 年于东南大学获得硕士学位, 2002 年于东南大学获得博士学位, 现为河海大学教授, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断。

E-mail: hhumhz@163.com

Ma Hongzhong received his B. Sc. degree from Southeast University in 1989, M. Sc. degree from Southeast University in 1994, Ph. D. degree from Southeast University in 2002. Now he is a professor at Hohai University. His main research interests include condition monitoring and fault diagnosis of power equipment.