

基于改进经验模态分解的泄漏电流去噪方法

陈小娣¹, 王俊雄², 安韵竹¹, 吴玉涛³, 杨浩瀚²

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000;
3. 国网山东省电力公司潍坊供电公司, 山东 潍坊 261000)

摘要: 为了有效地监测金属氧化物避雷器的绝缘工况, 提出一种基于改进经验模态分解的泄漏电流去噪方法。首先, 依据泄漏电流波形和幅值的综合相似度对信号端点进行延拓以抑制端点效应, 进而根据本征模态函数的平滑度和相关性的综合指标重构无噪声干扰的泄漏电流信号; 然后, 通过坐标下降法对权重参数进行动态修正和更新, 保证重构信号的合理性和准确性; 最后, 通过仿真和实验验证所提方法可以有效去除泄漏电流信号中的噪声干扰, 且能判定出异常监测值, 符合工程的实际要求。

关键词: 金属氧化物避雷器; 泄漏电流; 经验模态分解; 端点效应; 波形匹配; 坐标下降法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.012 中图分类号: TM862 文章编号: 1673-9140(2023)06-0115-08

A method for leakage current denoising based on improved empirical mode decomposition

CHEN Xiaodi¹, WANG Junxiong², AN Yunzhu¹, WU Yutao³, YANG Haohan²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Taian Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Taian 271000, China; 3. Weifang Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Weifang 261100, China)

Abstract: In order to effectively monitor the insulation condition of metal oxide arresters, a leakage current denoising method based on improved empirical mode decomposition is proposed. Firstly, the end point is extended to suppress the end effect by considering both waveform and amplitude similarity comprehensively, and then the leakage current signal without noise is reconstructed according to the comprehensive index that incorporates the smoothness and correlation of the intrinsic mode function. Subsequently, the weight parameters were dynamically adjusted and updated through the coordinate descent method to ensure the rationality and accuracy of the reconstructed signals. Finally, through analysis of simulated and measured data, it is confirmed that the proposed method can effectively eliminate the noise interference in the leakage current signal, and identify abnormal monitoring values, meeting the practical requirements of engineering.

Key words: metal oxide arrester; leakage current; empirical mode decomposition; end effect; waveform matching; coordinate descent method

金属氧化物避雷器(metal oxide arrester, MOA)是电力系统中重要的保护设备^[1-10], 因其内部的非

线性电阻片为氧化锌, 故得名为“金属氧化物避雷器”。MOA 用于保护输变电设备免受雷击等过电压

收稿日期: 2023-01-06; 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(51807113)

通信作者: 安韵竹(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统过电压及其防护、气体介质放电等研究; E-mail: anyunzhu2006@126.com

危害,保护原理:非线性电阻片在正常工作电压条件下具有较高阻值,对外相当于断路;而当发生雷击等过电压现象时,非线性电阻片的阻值迅速减小,对外相当于短路,此时大量电荷通过MOA流向大地,从而避免瞬态过电压对输变电设备造成冲击^[2-4]。然而,MOA的绝缘性能会因长期受到各种因素的影响而逐渐下降,因此,要正常发挥MOA对输变电设备的保护作用,就必须在线监测MOA的绝缘工况^[1-2]。MOA的绝缘性能可通过泄漏电流,尤其是其中的阻性电流分量来反映^[5-6]。然而,当MOA处于正常运行状态时,其阻性电流的幅值极小,易受到各类干扰的影响,因此,监测装置测得的阻性电流信号往往含有较为复杂的噪声成分^[7],无法客观真实地反映MOA的绝缘工况,故必须先对泄漏电流信号进行去噪处理^[7-8],再通过监测装置对去除噪声干扰后的信号进行判断。

MOA阻性电流去噪方法主要有形态学滤波法^[9-10]、小波阈值去噪方法^[11]以及经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)法^[12-17]等。其中,通过形态学滤波法去噪存在选取结构元素及其长度的困难;小波阈值去噪方法具有计算效率高的优势,然而难以确定最佳分解层数、小波基和阈值^[14]问题,使得该类方法在实际应用中受到局限;EMD作为一种处理非平稳信号的方法可用于去除阻性电流中的噪声,然而端点效应和模态混淆等问题使得该类方法的实际去噪效果并不稳定。针对该问题,提出基于综合匹配测度的泄漏电流波形延拓方法,以抑制EMD的端点效应。

此外,现有许多研究的工作重点是对整段MOA泄漏电流的测量信号进行去噪,评价依据也往往基于整段信号的计算,而MOA的绝缘工况监测要求对当前最新测得的泄漏电流信号进行即时处理,以避免因监测系统对噪声信号的错误告警造成的人力物力资源浪费,以及对真实异常信号的遗漏告警而引发电力事故^[8]。因此,本文提出一种基于END算法的MOA泄漏电流动态重构方法,基于当前时刻最新测量信号值动态调整重构分量的权重,并在充分评估当前最新测量信号有效性的基础上,去除泄漏电流监测信号中的噪

声,可有效避免遗漏对异常信号的告警。

1 基于EMD的泄漏电流去噪方法

1.1 MOA的基本结构

MOA的等效电路如图1所示,其中 R 和 C 分别为MOA内部的等效非线性电阻和定值电容^[9],流经 R 和 C 的电流分别为阻性电流 i_R 和容性电流 i_C ,两者的矢量和为泄漏电流 i 。MOA的泄漏电流特别是其中的阻性电流分量是MOA绝缘工况监测的重要指标,监测系统根据泄漏电流的监测值与告警阈值的关系判定MOA的绝缘性能是否发生异常,若泄漏电流的监测值超出告警阈值则发出告警信息。然而在电网稳定运行条件下,MOA泄漏电流的幅值为微安级,极易受测量环境中的各类噪声干扰,因此,在根据泄漏电流幅值判定MOA绝缘状态是否正常之前,需要先对MOA的泄漏电流进行处理,去除其中的噪声干扰,以保证监测工作的有效性。

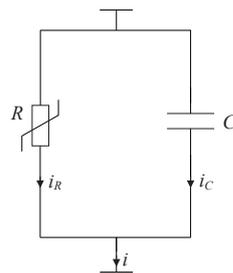


图1 MOA的等效电路

Figure 1 Equivalent circuit diagram of MOA

1.2 EMD去噪方法

EMD去噪方法通过将泄漏电流信号 $c(t)$ 分解为若干本征模态函数(intrinsic mode function, IMF),再按照模态分界点对泄漏电流信号进行重构^[12],达到去除噪声的目的。假设泄漏电流监测信号 $c(t)$ 经过EMD分解得到 n 个IMF分量,即 $f_1(t) \sim f_n(t)$,则 $c(t)$ 可表示为

$$c(t) = R_{es}(t) + \sum_{i=1}^n f_i(t) \quad (1)$$

式中, $R_{es}(t)$ 为残余分量。

EMD去噪方法不需要预先选取基函数,故其在同类去噪方法中具有一定优势^[13]。然而,EMD

去噪方法基于样值插条法计算信号上下包络线,容易在信号端点处发生发散现象,而当前最新测得的监测信号必然是信号的末端点,故不能被有效地去噪和还原。因此,抑制端点效应是将 EMD 应用于 MOA 绝缘工况监测中的首要任务。

2 改进的经验模态分解法

2.1 改进的波形匹配延拓法

信号波形的趋势和幅值是信号波形匹配的关键要素。本文提出一种兼顾波形和幅值相似度的匹配测度对信号序列进行延拓,同时为了提高匹配效率,根据波形的极值点划分匹配范围。具体步骤如下。

1) 将 MOA 泄漏电流信号的末端点(右端点)与其临近的第 1 个极值点之间的信号记为待匹配波形段,如图 2(a)中的 c_m ,该段波形内共有 m 个测量值。

2) 由于本案例中待匹配波形的左端点为极大值点,因此,以泄漏电流信号的极大值点为起始点,分别截取 4 段长度为 m 的信号序列(如图 2(a)中的 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4),计算 a_i 与 c_m 的波形相似参数 γ_i 和幅值相对误差 δ_i ,即

$$\gamma_i = \frac{\sum_{n=1}^m a_i(n) c_m(n)}{\sqrt{\left[\sum_{n=1}^m a_i^2(n) \right] \left[\sum_{n=1}^m c_m^2(n) \right]}} \quad (2)$$

$$\delta_i = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \left| \frac{a_i(n) - c_m(n)}{c(n)} \right| \times 100\% \quad (3)$$

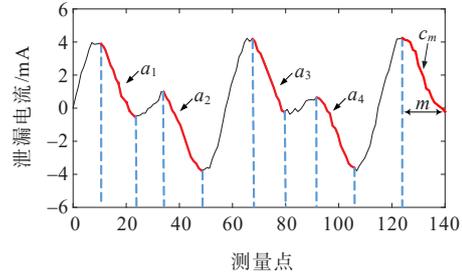
3) 将 γ_i 和 δ_i 分别归一化处理计算综合匹配测度:

$$\alpha_i = \frac{\delta_i'}{\gamma_i'} \quad (4)$$

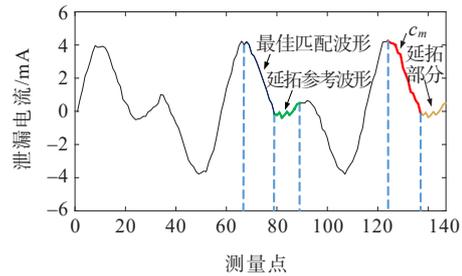
式中, γ_i' 、 δ_i' 分别为归一化处理的 γ_i 和 δ_i 。

选择综合匹配测度 α_i 最小的信号段为最佳匹配波形。根据式(2), a_4 与 c_m 的波形相似度最高, γ_4 达到了 0.81,然而根据图 2(a)不难看出,两者的幅值差异较大,其综合测度 α_3 达到了 0.94。相比之下, a_4 的综合匹配测度仅为 0.19,故将 a_3 选为最佳匹配波形,并将其后续 m 个测量点构成的信号段作为

延拓参考波形。将延拓参考波形延拓至泄漏信号末端点之后的波形(140 个测量点之后的信号段)如图 2(b)所示。



(a) 未经延拓的泄漏电流信号



(b) 延拓后的泄漏电流信号

图 2 波形匹配延拓法

Figure 2 Waveform matching extension method

根据 a_3 和 a_4 延拓并对比真实信号的波形如图 3 所示,可以看出,基于综合匹配测度选取的最佳匹配波形 a_3 延拓的信号波形更接近真实的信号波形。通过波形延拓,将泄漏电流信号原端点转移至信号内部,有效抑制 EMD 去噪方法在原端点处发生端点效应,而兼顾波形和幅值的匹配测度可以使得匹配过程更合理准确。

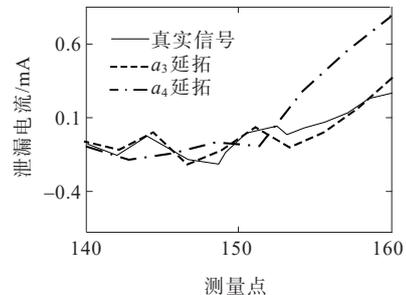


图 3 2 种延拓效果对比

Figure 3 Comparison of effects using two extension methods

2.2 泄漏电流信号的动态重构

将泄漏电流监测信号分解为若干 IMF 分量后,需要根据一定原则选取部分分量重构泄漏电流原始信号,而未参与重构的分量即被视作噪声分量。

2.2.1 泄漏电流信号重构指标

在MOA长期稳定运行过程中,泄漏电流的总体趋势是平稳的,而环境中各类噪声干扰会使泄漏电流的实测信号剧烈波动。据此,可通过各IMF分量的平滑度评估其为泄漏电流的有效成分的可能性。对于长度为 N 的IMF分量信号序列 $f_i(t)$,其平滑度为

$$r_a = \frac{\sum_{t=1}^N \{ \Delta [\Delta f_i(t)] \}^2}{\sum_{t=1}^N [\Delta f_i(t)]^2} \quad (5)$$

其中,“ Δ ”代表信号序列的差分运算, $\Delta f(t) = f(t) - f(t-1)$ 。

MOA泄漏电流中的噪声干扰广泛分布于整个频带范围内,采用低通或高通的处理方式均不能有效抑制这些噪声。而由于噪声干扰波形一般呈无规律性的随机波动,因此,可根据IMF分量与泄漏电流测量信号波形趋势间的相似性重构原始信号,即两者的总体趋势越相似,该IMF分量为泄漏信号有效成分的可能性就越大。信号序列 $c(t)$ 与 $f_i(t)$ 的趋势相似性可通过相关系数 r_b 计算,即

$$r_b = \frac{\text{cov} [c(t), f_i(t)]}{\sqrt{\text{cov} [c(t)]} \cdot \sqrt{f_i(t)}} \quad (6)$$

其中, $\text{cov}(x, y)$ 表示信号序列 x 与 y 的协方差。

根据式(5)、(6)可以看出,信号序列越光滑,其平滑度 r_a 越小;而信号序列之间的相似程度越高,其相关性指标 r_b 越大。因此,本文 r_a 、 r_b 的重构指标 r_{ab} 可以评估各个IMF分量为泄漏电流信号有效成分的可能性。 r_{ab} 的计算方式为

$$r_{ab} = \omega_1 r'_a - \omega_2 r'_b \quad (7)$$

式中, r'_a 、 r'_b 分别为 r_a 、 r_b 的归一标准化值; ω_1 、 ω_2 分别为 r_a 、 r_b 权重系数,本文采用等权重。

2.2.2 泄漏电流信号的动态重构

本文对泄漏电流信号的重构思路为先判定最新监测信号的有效性,再对其重构去噪。与传统EMD去噪方法不同,所提方法对泄漏电流信号的重构不是将部分IMF分量完全丢弃,而是根据各IMF分量成为泄漏电流信号有效成分的可能性对其附加相应的权重参数,并结合历史监测数据和最新的监测数据动态更新重构权重参数,具体步骤

如下。

1) 对EMD分解的IMF分量根据式(7)计算重构指标 r_{ab} ,将分量由大到小重新排序为 $f_1 \sim f_n$,并将分量 f_i 的权重设置为1,剩余分量按照其指标与 f_i 指标的比例设置权重参数:

$$c'(t) = R_{es}(t) + \sum_{i=1}^n a_i f_i(t) \quad (8)$$

式中, $a_i = r_{abi}/r_{ab1}$, r_{abi} 、 r_{ab1} 分别为IMF分量 f_i 、 f_1 的重构指标。

2) 判断下一个监测信号 $c(t+1)$ 是否属于 $c(t)$ 的95%置信区间,即判断 $c(t+1)$ 是否满足:

$$c(t+1) \in 1.96 \left(\mu \pm \delta / \sqrt{L} \right) \quad (9)$$

式中, μ 、 δ 分别为信号序列 $c(t)$ 的均值、标准差; L 为信号序列长度。

若 $c(t+1)$ 不满足式(9),即该测量值超出了由历史测量信号构建的95%置信区间,即可认为 $c(t+1)$ 为异常的泄漏电流信号,需告警提示并对MOA绝缘工况进行检查;若 $c(t+1)$ 满足式(9),则判定 $c(t+1)$ 为正常的含有噪声的泄漏电流信号,并继续进行第3)步。

3) 对 $f_1 \sim f_n$ 和残余分量 $R_{es}(t)$ 按照波形匹配原则分别进行波形延拓并叠加,得到泄漏电流的预测值:

$$\hat{c}'(t+1) = \hat{R}_{es}(t+1) + \sum_{i=1}^n a_i \hat{f}_i(t+1) \quad (10)$$

式中, $\hat{R}_{es}(t+1)$ 、 $\hat{f}_i(t+1)$ 分别为延拓后的 $R_{es}(t)$ 、 $f_i(t)$ 在 $t+1$ 时刻(当前最新监测时刻)的值。

假设 $c(t+1) = \sum_{i=k+1}^n \Delta a'_i f_i(t)$,残差 $\varepsilon = c(t+1) - \hat{c}(t+1)$,判定残差的 r_{abe} 是否满足:

$$r_{abe} \leq r_{abn} \quad (11)$$

式中, r_{abn} 为IMF分量 f_n 的重构指标。

式(11)反映了当前权重参数能否根据平滑度和相关性充分还原泄漏电流信号,若 r_{abe} 不满足式(11),即残差的重构指标大于当前最小的重构指标 r_{abn} ,说明在残余信号中还存在未参与重构的有效成分。因此,需要对当前权重参数进行修正,修正的目标是通过修正 $a_1 \sim a_n$,使得残差的重构指标 r_{abe} 不高于 r_{abn} ,即目标函数 $J(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 满足:

$$J(a_1, a_2, \dots, a_n) = r_{abe} - r_{abn} \leq 0 \quad (12)$$

采用坐标下降(coordinate descent)法倒序修正权重参数 a_i ,即从具有最小重构指标分量 f_n 的权重参数 a_n 开始,依次修正 $a_{n-1} \sim a_1$,直至 $J(a_1, a_2, \dots, a_n) \leq 0$;在对参数 a_i 进行优化时(假设为第 k 轮优化),固定其他权重参数并寻找在该条件下令 $J(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 取得最小值的 a_i ,即

$$a_i^{k+1} = \underset{a_i}{\operatorname{argmin}} J(a_1^k, \dots, a_{i-1}^k, a_i^{k+1}, a_{i+1}^k, \dots, a_n^k) \quad (13)$$

式中, k 为优化轮次。

对于参数 a_i 的优化搜索步长 h_i 设置为 $a_i/10$,并据此将 $[0, a_{i-1}]$ 等分为 $1/h_i$ 个区间,以各区间端点作为 a_i 并计算对应的目标函数值,并按式(13)确定 a_i 的最优值。值得注意的是,此处将相邻参数 a_{i-1} 作为当前优化参数 a_i 的修正上限,是为了确保修正过程中 a_i 不会无限度地增大,而是受初始 $a_1 \sim a_n$ 的相对大小关系限制,在各自的合理范围内进行修正优化。若 $J(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 在某个权重参数的优化过程中满足式(12),则优化终止,并以当前的权重参数组合重构泄漏电流信号。

所提 MOA 泄漏电流的监测去噪方法流程如图 4 所示,可以看出,所提方法的关键在于 2 次判定:① 是否告警,即判定 $c(t+1)$ 是否在监测信号的预测范围内,若不在该范围内则将该监测值视作异常信号,需要发出告警并进行后续处理;若在该范围内

则继续进行第 2 次判定;② 重构参数 a_i ,即判定当前的重构参数 a_i 是否符合最新的监测值 $c(t+1)$,若符合则保持当前参数并继续对泄漏电流信号进行重构和预测;反之则通过坐标下降法修正权重参数。由于在某时段内,MOA 泄漏电流信号及其所受的噪声干扰是相对稳定的,因此权重参数经过若干次更新将趋于稳定;另一方面,利用最新监测值对参数保持更新能最大程度保证重构泄漏电流信号的客观性和准确性。

3 仿真和实验

分别通过 Matlab 软件和国网某供电公司提供的 MOA 实际监测数据验证本文所提方法的效果。仿真和实验中采用的 4 种对比方法分别为形态滤波法(方法 1)、小波阈值法(方法 2)、EMD 方法(方法 3)以及本文所提方法(方法 4)。4 种方法去噪效果的评价指标分别为平均相对误差、信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)以及去噪前后的噪声抑制比(noise rejection ratio, NRR)^[14]。平均相对误差 MRE 按照式(3)计算;对于信号 $c(n)$,其 SNR、NRR 的计算方式为

$$c_{\text{SNR}} = 10 \lg \frac{\sum_{n=1}^N |c(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |c(n) - c'(n)|^2} \quad (14)$$

$$c_{\text{NRR}} = 10 \lg \left(\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \right) \quad (15)$$

式(14)、(15)中, $c(n)$ 、 $c'(n)$ 分别为无噪声的原始信号和去噪处理后的信号; σ_1^2 、 σ_2^2 分别为信号 $c(n)$ 去噪前、后的信号方差。

3.1 软件仿真测试

为了验证所提方法的有效性,基于 Matlab 平台,根据式(15)生成 500 个 MOA 的泄漏电流监测数据。仿真信号中添加丰富的噪声成分^[15-18]:高频噪声、低频噪声、白噪声和随机脉冲,如表 1 所示,具体设置为

$$c(t) = 0.05 \sin(0.2\omega t) + 0.2 \sin(\omega t) + 0.1 \sin(100\omega t + \pi/3) + \alpha(t) + \beta(t) \quad (16)$$

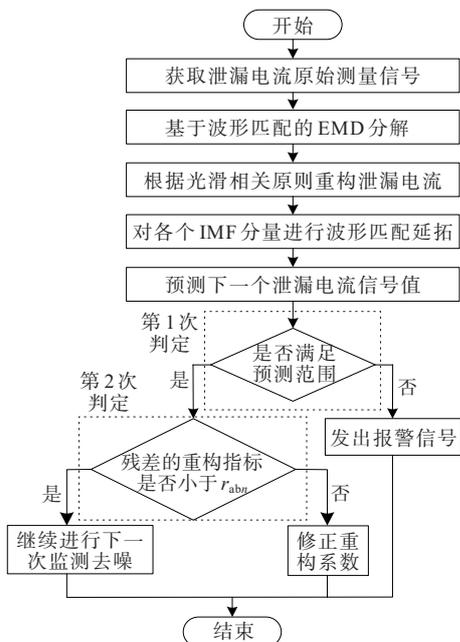


图 4 计算流程

Figure 4 Calculation flowchart

其中, $\omega = 314 \text{ rad/s}$ 。噪声干扰前、后的监测信号波形如图5所示。

表1 泄漏电流仿真信号的组成成分

Table 1 Components of leakage current simulation signal

信号成分	物理含义	信号成分	物理含义
$\sin(\omega t)$	基波电流	$\alpha(t)$	高斯白噪声
$\sin(0.2\omega t)$	低频波动	$\beta(t)$	随机脉冲
$\sin(100\omega t + \pi/3)$	高频噪声		

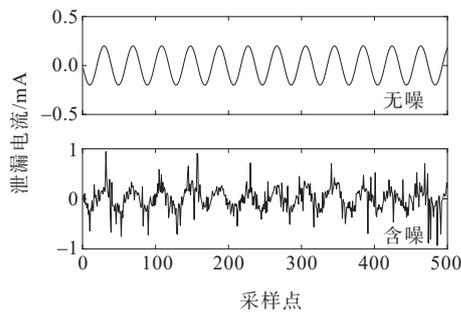


图5 泄漏电流信号(无噪)及其监测信号(含噪)

Figure 5 Leakage current signal (without noise) and monitoring signal (with noise)

所提方法首先对泄漏电流监测信号的前400个监测点进行基于波形匹配延拓的EMD分解,得到6个IMF分量 $f_1 \sim f_6$ 和一个残余分量,如图6所示。根据式(5)~(7)计算各IMF分量的重构指标 $r_{ab1} \sim r_{ab6}$,并按照式(8)~(13)的流程,通过滑动窗口方式对后100个监测点依次进行处理并更新权重参数。本次测试的初始权重参数和最终稳定的权重参数 $a_1 \sim a_6$ 如表2所示;所提方法和其他3种对比方法最终得到的信号波形如图7所示;效果指标MRE、SNR、NRR如表3所示。

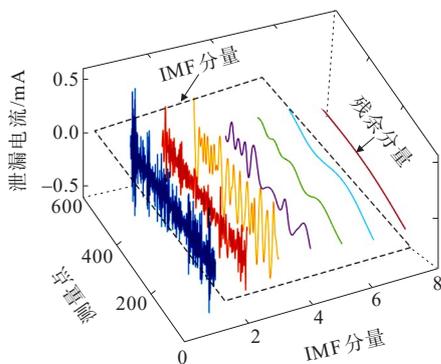


图6 EMD的分解结果

Figure 6 Decomposition results of EMD

表2 优化前、后的权重参数

Table 2 Weight parameters before and after optimization

阶段	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
初始	0.11	0.26	0.43	1.00	0.62	0.65
稳定	0.02	0.04	0.61	1.00	0.52	0.49

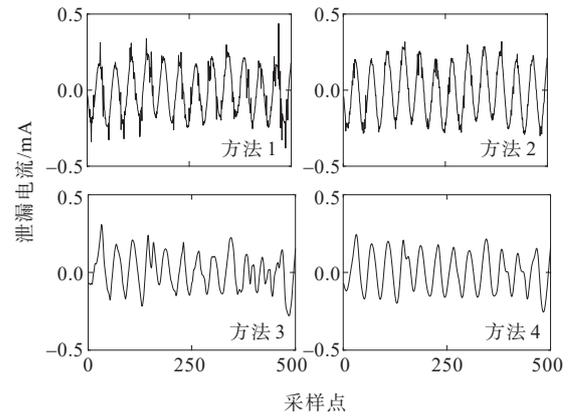


图7 4种方法的去噪结果

Figure 7 Denoising results of 4 methods

表3 方法1~4的效果对比

Table 3 The effects comparison of methods 1 to 4

方法	$\sigma_{\text{MRE}}/\%$	c_{SNR}/dB	c_{NRR}/dB
1	4.762 3	9.761 9	4.202 1
2	2.192 5	12.558 5	5.074 4
3	1.251 3	17.902 8	8.155 7
4	0.794 8	19.409 6	9.402 9

仿真过程中方法1经过多次测试选取相对合适的结构元素及其长度,然而效果仍不理想;与方法1类似,方法2选取的分解层数、基函数及阈值直接影响其去噪效果,因此该方法的平均准确度较低;相比之下,方法3的效果较好,然而由于该方法向原始信号引入了白噪声,且在测试过程中需要多次调试参数,加剧了去噪效果的不稳定性。根据表3,方法4的MRE、SNR和NRR指标均优于方法1~3,同时,根据图7中各方法得到的去噪信号波形可以看出,方法4得到的信号波形更加平滑且与真实信号波形最为相似。

3.2 MOA的实际监测数据验证

采用国网某供电公司提供的220 kV电压等级的某段MOA绝缘损坏前的泄漏电流监测数据检验所提方法的实用性,如图8所示。第714个采样时刻MOA发生绝缘损坏,此时泄漏电流监测值突增为121.72 μA 。根据该供电公司的MOA告警规则,

即当泄漏电流监测值大于等于 2 倍初值(初值为泄漏电流往年的年平均值)时,在线监测装置发出告警。案例中的泄漏电流初值(2021 年)约为 59.5 μA ,告警门限为 119 μA 。

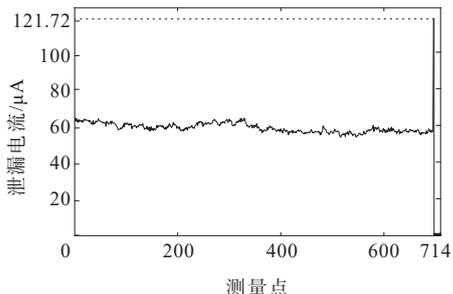


图 8 MOA 泄漏电流的实测数据

Figure 8 Actual measurement data of MOA leakage current

计算 4 种方法的噪声抑制比,如表 4 所示,可以看出,相比于其他 3 种方法,所提方法能够抑制更多的噪声。方法 3、4 的整体处理结果如图 9 所示,可以看出,相比于方法 3,方法 4 能够还原得到更加平滑稳定的泄漏电流信号。

表 4 方法 1~4 的噪声抑制比

Table 4 NRR of methods 1 to 4

方法	c_{NRR}/dB	方法	c_{NRR}/dB
1	5.63	3	10.02
2	6.86	4	14.68

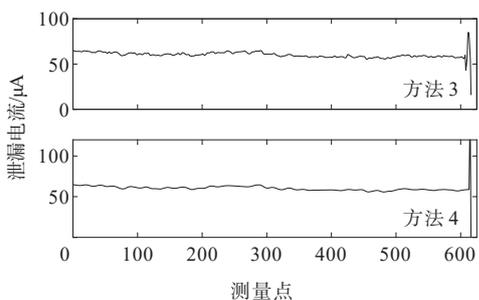


图 9 方法 3、4 的整体去噪结果对比

Figure 9 Comparison of overall denoising results of method 3 and method 4

特别地,方法 3、4 对告警信号的处理结果对比如图 10 所示,方法 4 判断出第 714 个监测信号采样点异常,保留了其幅值而未进行处理,因此监测装置可正常发出告警;而经方法 3 处理后该监测信号的幅值降为 88.31 μA ,低于告警门限值(119 μA),导致监测设备遗漏对该异常监测值的告警。

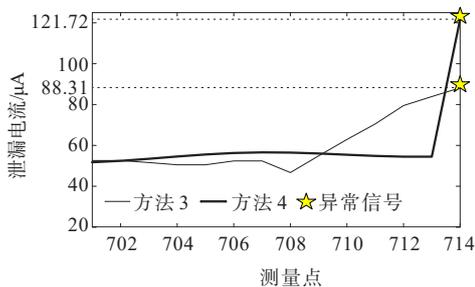


图 10 方法 3、4 对告警信号的处理结果对比

Figure 10 Comparison of alarm signals in processing of method 3 and method 4

4 结语

本文提出了一种改进 EMD 算法的 MOA 泄漏电流动态重构方法,在仿真和实验中均取得了比同类方法更为理想的效果。相比传统的 EMD 类方法,所提出的方法具有如下创新:

- 1) 根据波形趋势和幅值相似度综合匹配波形,提高波形匹配精度;
- 2) 对实测泄漏电流信号采用 2 步判定,避免监测系统的漏告警和误告警;
- 3) 综合信号序列平滑度和相关性重构泄漏电流信号,并根据实测信号动态更新重构参数,保证 IMF 分量对最新监测信号的解释能力。

在未来将对 IMF 分量的重构指标、重构权重参数搜索方法等开展进一步研究。

参考文献:

[1] 于忠江,梁景峰,李文星,等.MOA 在线监测存在的问题探讨[J].电瓷避雷器,2020(6):144-150.
YU Zhongjiang, LIANG Jingfeng, LI Wenxing, et al. Discussion on the problems of MOA online monitoring[J]. Insulators and Surge Arresters,2020(6):144-150.

[2] 段长君,闫军,霍峰,等.500 kV 金属氧化物避雷器的运行状态带电诊断[J].电力科学与技术学报,2014,29(4): 106-110.
DUAN Changjun, YAN Jun, HUO Feng, et al. Charged state diagnostic for 500kV metal oxide arrester[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(4): 106-110.

[3] KHODSUZ M, MIRZAIIE M, SEYYEDBARZEGAR S. Metal oxide surge arrester condition monitoring based on analysis of leakage current components[J]. International

- Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 66: 188-193.
- [4] 李斌,屈璐瑶,朱新山,等.基于多尺度特征融合的绝缘子缺陷检测[J].电工技术学报,2023,38(1):60-70.
LI Bin, QU Luyao, ZHU Xinshan, et al. Insulator defect detection based on multi-scale feature fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1):60-70.
- [5] 赵丹丹,周越,张嘉旻,等.外部因素对金属氧化物避雷器特征参数的影响研究[J].电瓷避雷器,2017(6):32-37+247.
ZHAO Dandan, ZHOU Yue, ZHANG jiamin, et al. Influence of external factors on characteristic parameters of metal oxide surge arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(6):32-37+247.
- [6] 肖戎,胡晓斌,苏小青,等.基于声发射波关联维数的避雷器异常放电识别[J].电网与清洁能源, 2022, 38(1): 40-45.
XIAO Rong, HU Xiaobin, SU Xiaoqing, et al. Identification of abnormal discharge of arresters based on correlation dimension of acoustic emission wave[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1):40-45.
- [7] 杨仲江,曹洪亮,李鹏飞,等.基于遗传算法的金属氧化物避雷器在线监测[J].高电压技术,2015,41(9):3104-3109.
YANG Zhongjiang, CAO Hongliang, LI Pengfei, et al. On-line monitoring of metal oxide arrester using genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3104-3109.
- [8] 贾勇勇,高尚,司鑫尧,等.基于高阻并联避雷器接地方式的柔性直流配电网保护方法[J].电力系统自动化, 2020,44(10):166-173.
JIA Yongyong, GAO Shang, SI Xinyao, et al. Protection method of flexible DC power distribution network based on grounding mode with high resistor and arrester in parallel[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10):166-173.
- [9] 杨鹏,陈海东,杨宁,等.金属氧化物避雷器泄漏电流新型去噪方法研究[J].电瓷避雷器,2019(5):99-104.
YANG Peng, CHEN Haidong, YANG Ning, et al. Research on a new de-noising method for leakage current of metal oxide arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 99-104.
- [10] 王文浩,何文林,董学松,等.金属氧化物避雷器泄漏电流在线监测数据自适应滤波算法[J].高压电器,2013,49(9):91-94.
WANG Wenhao, HE Wenlin, DONG Xuesong, et al. Self-adaptive filtering algorithm for on-line monitoring data of leakage current of zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9):91-94.
- [11] 徐艳,陈冰冰,马宏忠,等.基于EMD-PSD的OLTC振动信号特征提取方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):3-10.
XU Yan, CHEN Bingbing, MA Hongzhong, et al. Vibration signal feature extraction method of the on-load tap changer based on EMD-PSD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5):3-10.
- [12] 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(6): 216-220.
ZHAO Shihua, CHAO Yafeng, SUN Lipeng, et al. Research on insulator leakage current de-noising method based on wavelet transform and EEMD[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6):216-220.
- [13] 杨海晶,饶宇飞,李朝晖,等.基于随机模拟和EMD的含风光电力系统AGC调频储能定容[J].电力科学与技术学报,2022,37(5): 58-65+99.
YANG Haijing, RAO Yufei, LI Zhaohui, et al. Energy storage capacity determination for AGC frequency modulation in the power system with wind and photovoltaic power based on the stochastic simulation and EMD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5):58-65+99.
- [14] 阮莹,叶行文,邓明锋,等.基于自适应VMD和A-SVD的MOA在线监测方法[J].中国电力,2021,54(10):177-185.
RUAN Ying, YE Xingwen, DENG Mingfeng, et al. A new online monitoring method for MOA based on A-VMD and A-SVD[J]. Electric Power, 2021, 54(10):177-185.
- [15] 何贵先,行鸿彦,徐伟,等.互补集成经验模态分解在MOA监测中的应用[J].高压电器,2018,54(12):225-231.
HE Guixian, XING Hongyan, XU Wei, et al. Application of complete ensemble empirical mode decomposition in MOA monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 225-231.
- [16] 陈凤林.一种新的基于EMD模态相关的信号去噪方法[J].西华大学学报(自然科学版),2009,28(6):20-24.
CHEN Fenglin. A new approach to signal de-noising based on EMD mode relevance[J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2009, 28(6):20-24.
- [17] 袁娜,黄建才,朱永利,等.基于EEMD阈值的绝缘子泄漏电流去噪的研究[J].电瓷避雷器,2012(4):28-32.
YUAN Na, HUANG Jiancai, ZHU Yongli, et al. Research on de-nosing of insulator leakage current based on EEMD threshold[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(4):28-32.
- [18] 王雪,莫娟,张冠军,等.MOA新在线检测系统及其仿真研究[J].高电压技术,2003,29(7):37-39.
WANG Xue, MO Juan, ZHANG Guanjun, et al. A new online detecting system of MOA and its simulation[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(7):37-39.