

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.12.034

## 互补集成经验模态分解在MOA监测中的应用

何贵先<sup>1,2</sup>, 行鸿彦<sup>1,2</sup>, 徐 伟<sup>1</sup>, 季鑫源<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开发实验室, 南京 210044)

**摘要:** 针对金属氧化物避雷器在线监测中提取持续电流信号含噪声的问题,提出了基于互补集成经验模态分解(CEEMDAN)的避雷器持续电流去噪方法。将含噪电流信号分解成一系列固有模式函数(IMF),对分解后的IMF进行自相关分析,选出有用信号和含噪分量,对含噪的IMF进行SG(savitzky-golay)滤波去噪,将滤波后的模式分量与剩余的分量进行重构得到消噪后的持续电流信号。MATLAB仿真结果表明:正常情况和老化情况下的MOA去噪后的持续电流均方根误差(正常: $3.209\ 8\times 10^{-5}$ ,老化:0.002 5)比去噪前的(正常: $2.450\ 9\times 10^{-4}$ ,老化:0.017 3)均降低了一个数量级,说明该方法有效消除了噪声对避雷器持续电流信号提取的影响,保证了MOA进一步监测分析的准确性。

**关键词:** 互补集成经验模态分解;金属氧化物避雷器;持续电流;自相关函数;SG滤波

### Application of Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition in MOA Monitoring

HE Guixian<sup>1,2</sup>, XING Hongyan<sup>1,2</sup>, XU Wei<sup>1</sup>, JI Xinyuan<sup>1</sup>

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** According to the detection of continuous current of metal oxide arrester (MOA) comprises lots of noises, a de-noise method is proposed based on Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition (CEEMDAN). The detection signals with noise of MOA can be decomposed into a series of intrinsic mode functions (IMFs), and then the IMFs are analyzed by auto correlation. In order to get useful components and noise components, the Savitzky-Golay filter is used to de-noise. After filtering, the remaining components are restricted into a new signal. A typical surge arrester has been simulated in MATLAB, and the result shows that by de-noising of the continuous current of MOA, the root mean square error can be reduced by one order of magnitude (normal  $3.209\ 8\times 10^{-5}$ , aging 0.002 5), while the model before de-noising (normal  $2.450\ 9\times 10^{-4}$ , aging 0.017 3), and the effectiveness of the proposed method is verified, the accuracy of MOA monitoring results are improved.

**Key words:** complete ensemble empirical mode decomposition; metal oxide arrester; continuous current; autocorrelation function; savitzky-golay filter

## 0 引言

金属氧化物避雷器(MOA)是电力系统重要的过

电压保护设备,对电力系统及其设备的安全有效运行具有重要的意义<sup>[1-5]</sup>。然而,金属氧化物避雷器长期在线工作受到温度、湿度、各类过电压等的影响

收稿日期:2018-05-11; 修回日期:2018-07-29

基金项目:国家自然科学基金(61671248,41605121);江苏省高校自然科学研究重大项目(15KJA460008);江苏省“信息与通信工程”优势学科。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(61671248,41605121), Major Projects of Natural Science Research in Universities of Jiangsu Province(15KJA460008), the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions(PAPD).

会逐渐出现老化劣化等现象最终丧失保护作用;特殊情况下,受损的MOA会出现爆炸现象,给设备以及工作人员的安全带来很大的危害。因此,对运行中的金属氧化物避雷器进行在线监测具有十分重要的意义。已有的研究成果表明,持续电流<sup>[6]</sup>(全电流)由阻性分量(有功电流)和容性分量(无功电流)组成,当MOA老化劣化时,其阻性分量明显增大,导致流过避雷器的持续电流显著增加。因此可以通过监测避雷器的持续电流阻性分量来对避雷器的运行状况进行实时在线监测。

目前学者对避雷器的在线监测的研究方法<sup>[7-14]</sup>主要是通过谐波法、容性电流补偿法、TDMA等方法来提取持续电流,从而对MOA的运行状况进行分析。上述方法之中,准确地获取持续电流波形是判断避雷器运行状态的关键。电网中常含有大量的谐波以及噪声,电网中所应用的10 kV金属氧化物避雷器运行时的持续电流通常在 $\mu\text{A}$ 级,极其微弱的持续电流信号不易检测,极易被噪声所淹没。单纯从电网中所提取的持续电流含有大量噪声以及环境应力的干扰,且CT二次侧真实信号小,不易获得。因此,从持续电流信号中提取其阻性电流分量之前,首先对监测数据进行有效的消噪以及平滑处理,为后续的监测奠定基础<sup>[15-19]</sup>。文[18]运用改进阈值的平移不变量小波消噪的方法对所提取的含噪电流进行去噪处理,能够较为准确地提取淹没在噪声中的电流信号。然而小波去噪自身受到小波基、阈值等选取的影响,使得小波分解的方式不唯一,对进一步进行阻性电流的提取分析等造成不利影响,且小波去噪的自适应性有较大局限。文[19]通过EEMD阈值去噪对避雷器的泄漏电流进行研究,给出了几种EEMD阈值选择对电流去噪的影响,但EEMD加入噪声并对加噪后的信号进行独自分解,其分解不具有关联性,且各层EMD分解的模式数量不确定,给平均取值带来了困难。文[20-21]进一步提出了改进的互补集成经验模态分解,解决了信号分解不具关联性以及分解层数不确定所带来的问题,使得其分解层数减少,进一步提高了重构信号的准确性。

文中对CEEMDAN在金属氧化物避雷器监测中的应用进行了研究。针对模态分解算法在信号重构时难以区分含有小噪声IMF分量的问题,提出了基于自相关和SG滤波的CEEMDAN算法。利用自相关在噪声分析中的优势,分析各阶IMF分量的自相关性,找出含噪的IMF分量进行SG滤波,将滤波后的IMF分量和不含噪声的分量进行信号重构,提取出淹没在噪声中的持续电流信号,比较去噪前后

避雷器持续电流信号的均方根误差,利用均方根误差衡量去噪效果。

## 1 MOA模型

使用最为广泛的MOA模型之一见图1。图1中,避雷器持续电流 $i_x$ 由非线性电阻产生的阻性电流 $i_R$ 和电容产生容性电流 $i_C$ 共同组成, $u$ 为避雷器两端的电压。三者的关系见式(1)

$$i_x = i_R + i_C \quad (1)$$

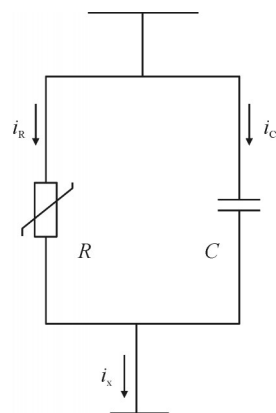


图1 MOA等效模型

Fig. 1 Equivalent model of MOA

MOA阀片中的非线性电阻模型采用文[6]所使用的电流区模型,电流区的非线性表达式表示为

$$i_R = I_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^\alpha \quad (2)$$

式(2)中: $I_0$ 、 $U_0$ 分别为参考电流和钳位电压; $i_R$ 为阻性电流; $\alpha$ 为避雷器非线性电阻自身的非线性特性所决定的常数。MOA阀片的电压与阻性电流的关系见图2。其中, $\alpha=25$ 表示金属氧化物避雷器未老化或受潮, $\alpha=15$ 表示避雷器刚刚开始老化或受潮时的情况。

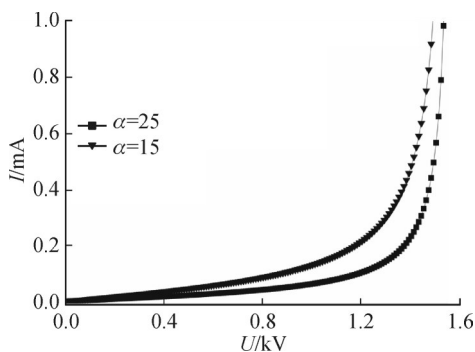


图2 MOA电压、电流关系

Fig. 2 Relation of MOA voltage and current

由图2可以看出,当避雷器老化时,电压相同时持续电流增大,因此可以通过监测持续电流的变化来判断避雷器的运行状态。

## 2 基于自相关和SG滤波的CEEMDAN算法

### 2.1 自相关函数分析和SG滤波

自相关函数<sup>[22-23]</sup>揭示了同一时间序列在不同时刻的取值之间的自相关程度。根据噪声的统计特性,随机噪声在零处的自相关函数值最大,在其他时刻具有弱的关联性和随机性,因此自相关函数值迅速减小为零或接近于零。对于持续电流信号而言,其自相关函数在零点处取得最大值,但由于信号之间存在关联性,因此在非零点处的值一般不为零且其函数值随着时间的变化而变化。变化规律有别于噪声信号。

对经分解后得到的IMF分量进行自相关函数分析,第*i*个IMF分量的自相关函数可以表示为: $R_i(t_1, t_2) = E[c_i(t_1)c_i(t_2)]$ ,并采用归一化函数对自相关函数进行归一化处理,表示为: $\rho_i(\tau) = R_i(\tau)/R_i(0)$ 。

在噪声起主导作用模态分量中,除了含有噪声外还含有少量的有用信号成分。因此需对含噪分量进行SG平滑滤波去噪处理。SG滤波去噪是在时域内对信号进行处理,选取某数据点长度为*n*的领域作为滑动窗口,利用窗口的平移,对领域内的各个数据采用一元*p*阶多项式进行最小二乘拟合,得出滑动窗口中心点的最佳拟合值,该值即为去噪后的函数值。

### 2.2 EMD算法

经验模态分解(EMD)是将非线性非平稳信号分解为有限个频率由大到小的固有模态函数(IMF)和一个剩余信号之和。固有模态函数需满足两个条件:

1)信号的局部极大值点和极小值点的数目与过零点的数目相等或至多相差一个。

2)在任意时间点上,由局部极值构成的上下两条包络线的均值要为零或接近于零。

对于一个给定的信号*x*,经过EMD分解后,可以将信号*x*表示为

$$x(n) = \sum_{k=1}^K c_k(n) + r_k(n) \quad (3)$$

式(3)中: $c_k$ 为第*K*个固有模态函数;*K*为IMF的总数; $r_k(n)$ 为剩余信号。

### 2.3 CEEMDAN算法

EMD作为一种时频域信号处理方法,具有很强的自适应性。对非线性非平稳信号进行分析时,若信号中含有异常干扰信号存在时,EMD分解会产生模态混叠现象<sup>[24]</sup>。EMD的改进方法EEMD以及CEEMD通过在信号中加入白噪声或白噪声对,在一定程度上解决了EMD的模态混叠效应,但由于所加入的白噪声之间不存在关联,对加入噪声的信号各

自进行EMD分解时IMF分解不完全,且无法保证各自分解所得到的IMF数量一致,使得在取平均值时造成较大的误差。

1)产生*I*个(*I*足够大)与原始持续电流信号*x*等长得白噪声,并将*I*个白噪声进行EMD分解,取每个白噪声分解后的第*i*个IMF分量作为新的白噪声分别加入原始持续电流信号中,得到*I*个新的加噪后的信号,

$$x_i(n) = x(n) + \beta_0 E_i(w^i(n)) \quad i=1, 2, 3 \dots I \quad (4)$$

式(4)中: $x_i(n)$ 为第*i*次加入噪声后的信号; $w^i(n)$ 为产生的与原始持续电流信号等长的第*i*个白噪声; $E_i(w^i(n))$ 为将第*i*个白噪声进行EMD分解后得到的第*i*个IMF分量; $\beta_0$ 为常数。

2)求加噪后的信号 $x_i(n)$ 的所有局部极值点,用三次样条插值函数分别连接局部极大值和极小值点,得到加噪后信号的上下包络线,计算各加噪后信号的上下包络线平均值并将*I*个平均包络线值做平均处理,得到第一个剩余分量为

$$r_1 = \sum_{i=1}^I M(x_i(n))/I \quad i=1, 2, 3 \dots I \quad (5)$$

式(5)中, $M(x_i(n))$ 表示第*i*个包络线平均值。

3)计算此时(*k*=1)的第1个IMF分量, $c_1(n) = x(n) - r_1(n)$ 。

4)将白噪声分解后得到的第2个IMF分量分别加入到剩余分量 $r_1$ 中,即 $r_1(n) + \beta_1 E_2(w^i(n))$ ,根据步骤2)所示的方法求得持续电流的第2个IMF

$$c_2(n) = r_1(n) - \sum_{i=1}^I M(r_1(n) + \beta_1 E_2(w^i(n)))/I \quad (6)$$

5)重复步骤2)~4)可以分别得到第3、4...*k*个剩余分量 $r_k(n)$

$$r_k = \sum_{i=1}^I M(r_{k-1}(n) + \beta_{k-1} E_2(w^i(n)))/I \quad (7)$$

6)根据所得到的剩余分量可以进一步计算得到第*k*个IMF

$$c_k = r_{k-1}(n) - r_k(n) \quad (8)$$

7)计算每阶IMF的自相关函数值。

8)求各阶IMF的归一化自相关函数方差,判断各IMF分量的噪声含量,得到含噪分量, $c_1(n) - c'_1(n)$ 。

9)对含噪的IMF进行SG滤波,得到去噪后的IMF分量, $c'_1(n) - c''_1(n)$ 。

10)将滤波后的固有模态函数与剩余分量进行重构得到消噪后的持续电流

$$x'(n) = \sum_{k=1}^i c'_k(n) + \sum_{k=i}^I c_k(n) + R_k(n) \quad (9)$$

基于自相关和SG滤波的CEEMDAN算法流程图见图3。

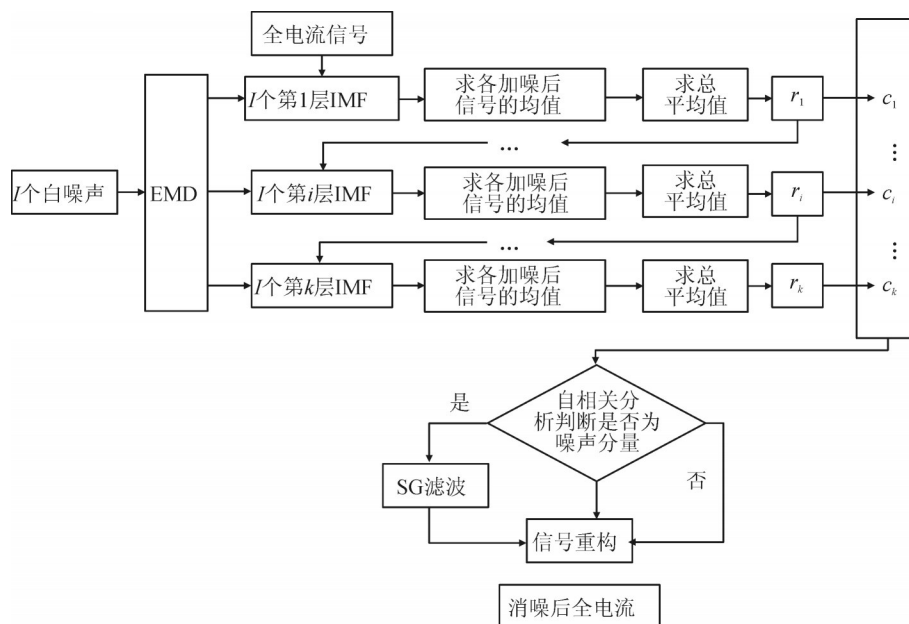


图3 基于自相关和SG滤波的CEEMDAN算法

Fig. 3 CEEMDAN algorithm based on autocorrelation and SG filter

### 3 仿真结果及分析

为了验证基于自相关和SG滤波的CEEMDAN算法在MOA监测中运用的有效性,利用MATLAB的Simulink平台对10 kV的金属氧化物避雷器漏电流测量进行仿真<sup>[25]</sup>。仿真使用图1的MOA等效模型以及式(2)所示的非线性电阻小电流区域,运行电压为5.35 kV、频率为50 Hz、晶介电容值取500 pF,并加入白噪声源。

仿真试验分为2组,参照组采用正常的MOA,设置非线性系数 $\alpha=25$ ;试验组为老化劣化的MOA,仿真中将非线性系数设置为 $\alpha=15$ 。

#### 3.1 未老化的MOA仿真分析

在MATLAB中对未老化的MOA的情况进行仿真分析,将得到的含噪持续电流信号进行CEEMDAN去噪处理,得到结果见图4。其中 $x(n)$ 为加噪后得到的MOA仿真持续电流信号, $C_1-C_{10}$ 为分解得到的各IMF分量, $R$ 为余量。

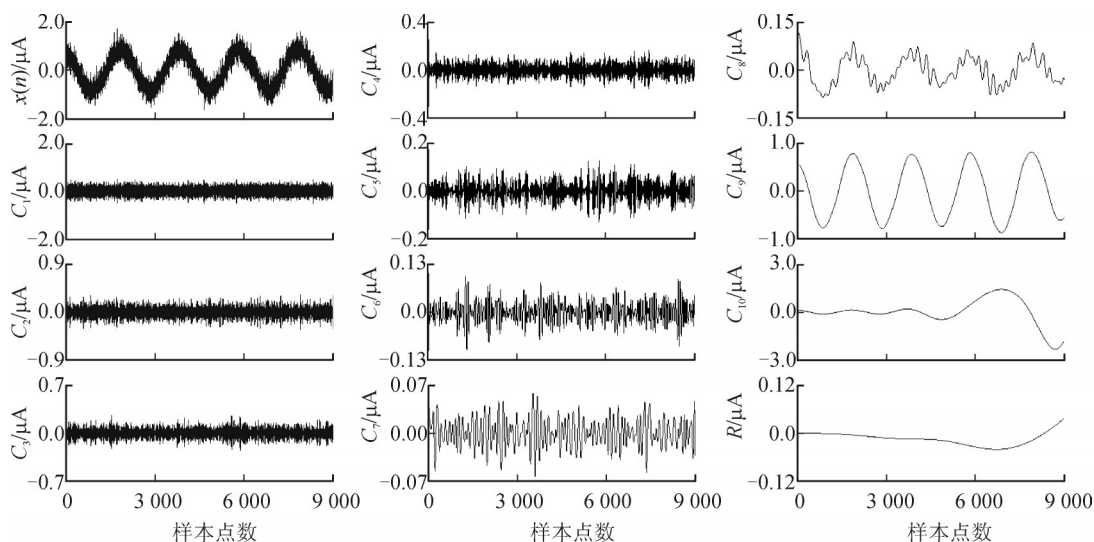


图4 基于CEEMDAN的未老化MOA持续电流信号IMF分量

Fig. 4 IMF components of continuous current of un-aging MOA based on CEEMDAN

MOA持续电流信号经分解后得到10阶模态分量,分别计算每阶模态分量的归一化自相关函数,结果见图5。从图5可以看出,前7阶模态分量具有很好的噪声自相关性能,可以认为这7阶分量中含有大量噪声,只含有少量的有用信号,因此对 $C_1-C_7$ 进行SG滤波并

和剩下没有进行滤波处理的 $C_8-C_{10}$ 进行重构,得到了去噪后的MOA持续电流。图6(a)、(b)分别为含噪和去噪后的MOA持续电流信号。为了进一步验证去噪效果,提取未加噪的MOA持续电流信号,并分别求取含噪持续电流信号与去噪后信号的均方根误差(RMSE),得

到去噪后的RMSE为 $3.2098 \times 10^{-5}$ 相比去噪前所得到的 $2.4509 \times 10^{-4}$ 的RMSE降低了一个数量级。

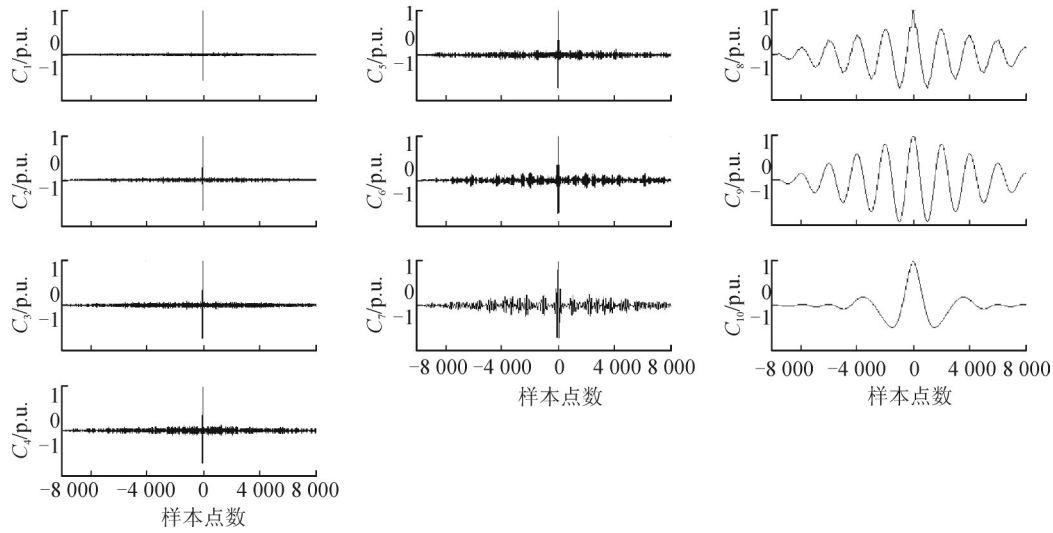


图5 未老化MOA持续电流各IMF的归一化自相关函数

Fig. 5 Autocorrelation functions of un-aging MOA continuous current IMF components

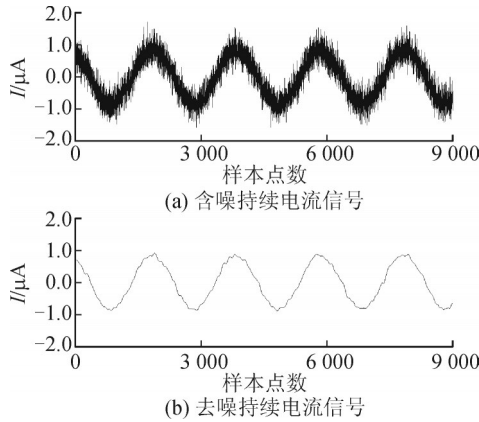


图6 原始MOA持续电流值信号和去噪后的持续电流信号

Fig. 6 Continuous current of un-aging MOA for de-noising and initial signals

### 3.2 老化劣化MOA仿真分析

对老化劣化的MOA进行仿真,结果见图7(a)。

对得到的含噪持续电流信号进行CEEMDAN分解,

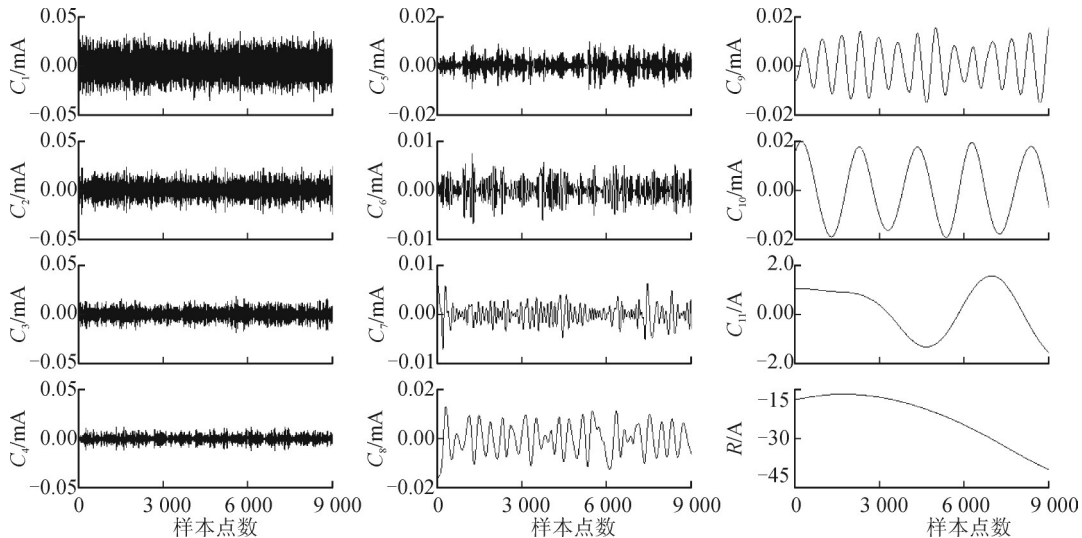


图8 老化劣化MOA持续电流信号IMF分量

Fig. 8 IMF components of continuous current of aging MOA based on CEEMDAN

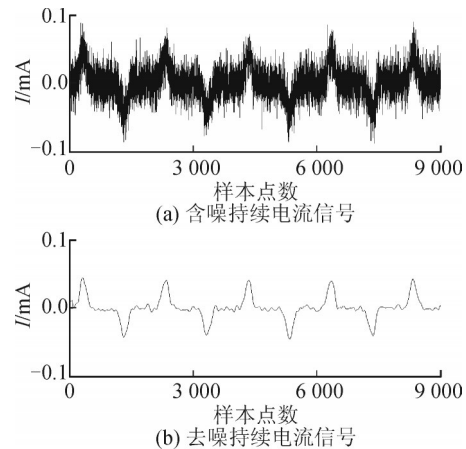


图7 老化劣化MOA原始持续电流值信号和去噪后的持续电流信号

Fig. 7 Continuous current of aging MOA for de-noising and initial signals

得到如图8所示的结果。

MOA持续电流信号经分解得到11阶模态分量,分别计算各阶模态分量的自相关函数,结果见图9,分析图9可以知道 $C_1$ ~ $C_7$ 噪声自相关性好,对 $C_1$ ~ $C_7$ 进行SG滤波,并对滤波后的信号再次进行自相关分析,并根据得到的自相关结果可以得知 $C_5$ ~ $C_7$ 含有少量有用

信号, $C_1$ ~ $C_4$ 为噪声部分。因此再对 $C_5$ ~ $C_7$ 进行SG滤波,并将滤波后模态函数与没有进行滤波处理的模态分量 $C_8$ ~ $C_{11}$ 进行重构,结果见图7(b)。分别求含噪声信号和去噪后信号的均方根误差,得到去噪后的RMSE为0.002 5,相比去噪前0.017 3的RMSE降低了一个数量级。

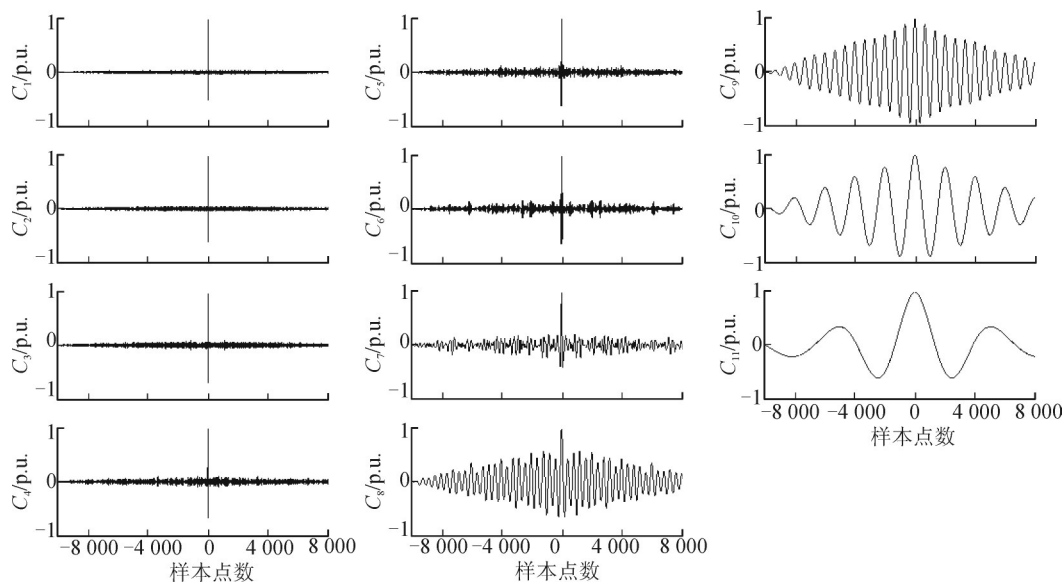


图9 老化劣化MOA持续电流各IMF的归一化自相关函数

Fig. 9 Autocorrelation functions of aging MOA continuous current IMF components

分析图6、7可以看出,去噪后的持续电流波形明显变得清晰,老化劣化的避雷器持续电流信号幅值大于未老化的MOA持续电流幅值。在持续电流波形畸变很严重的情况下,采用基于自相关和SG滤波的CEEMDAN对避雷器持续电流监测数据进行处理,仍可以有效滤除电网中噪声以及环境应力对MOA持续电流提取的干扰,从而确保了对MOA在线运行状况进一步诊断和识别的准确性,为10 kV配电网MOA的在线监测情况提供可靠的依据。

#### 4 结语

持续电流是MOA在线监测的重要指标,电网中10 kV MOA正常运行时,持续电流幅值小且波形为正弦波;老化后的MOA持续电流增大,波形发生严重畸变,不再是正弦波。直接从电网中提取的避雷器持续电流极易受到噪声干扰,无法从波形上直接判断避雷器的状况。基于自相关和SG滤波的CEEMDAN的去噪方法,可以很好地抑制MOA持续电流在线监测数据存在的各种噪声干扰而对电流数据自身影响很小,去噪后的持续电流RMSE提升效果明显,能较为准确地提取被噪声淹没的持续电流信号,为后续判断MOA在线运行状况以及故障诊断分析提供了有力的依据,提高了MOA监测的准确性和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 张志鹏,杨仲江. MOA谐波阻性电流补偿算法的研究[J]. 高压电器,2013,49(4):49-53.  
ZHANG Zhipeng, YANG Zhongjiang. Study on the harmonic resistive current compensation algorithm of MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 49-53.
- [2] 陈景亮,姚学玲. MOV阻性电流谐波补偿法的研究[J]. 高电压技术,2007,33(3):53-57.  
CHEN Jingliang, YAO Xueling. Investigation of harmonic compensation technique for measuring MOV resistive current[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 53-57.
- [3] 王黎明,张军广,赵晨龙,等. 绝缘子饱和受潮条件下持续电流预测方法[J]. 高电压技术,2014,40(5):1416-1423.  
WANG Liming, ZHANG Junguang, ZHAO Chenlong, et al. A forecast method for leakage current of contaminated insulator under saturated moist[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1416-1423.
- [4] 邵涛,周文俊,闫华光,等. 电压谐波对金属氧化物避雷器持续电流及其阻性分量的影响[J]. 电网技术,2004,28(8):55-59.  
SHAO Tao, ZHOU Wenjun, YAN Huaguang, et al. Influence of voltage harmonics on leakage and its resistive component of MOA[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 55-59.
- [5] 郭良峰,杜林,魏钢,等. 在线监测获取的电力系统过电压波形分析[J]. 高压电器,2010,46(6):64-68.  
GUO Liangfeng, DU Lin, WEI Gang, et al. Analysis of over-voltage in power system based on on-line monitoring de-

- vice[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 64-68.
- [6] 交流无间隙金属氧化物避雷器: GB 11032—2010[S]. 2010.  
Metal-oxide surge arresters without gap for a. c. systems: GB 11032—2010[S]. 2010.
- [7] STOJANOVIC Z N, STOJKOVIC Z M. Evaluation of MOSA condition using leakage current method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 52(1): 87-95.
- [8] 曹洪亮, 杨仲江, 华荣强, 等. 改进的MOA阻性电流算法研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 32-36.  
CAO Hongliang, YANG Zhongjiang, HUA Rongqiang, et al. Study on algorithm of resistive current of MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 32-36.
- [9] 张振洪, 臧殿红. 氧化锌避雷器在线监测方法的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 126-129.  
ZHANG Zhenhong, ZANG Dianhong. Study on the on-line monitoring method of metal oxide surge arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 126-129.
- [10] 王文利, 李燕青, 律方成. 金属氧化物避雷器在线检测的改进补偿法研究[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 192-194.  
WANG Wenli, LI Yanqing, LYU Fangcheng. Study on improved capacitive current compensation method of leakage current through MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(3): 192-194.
- [11] 朱宝森, 宋 璠, 魏新芳. 基于电压过零点电流幅值分析的MOA阻性电流提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 165-172.  
ZHU Baosen, SONG Fan, WEI Xinlao. An extracting method based on analysis of current magnitude at zero-point of voltage for resistive current of MOA[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 165-172.
- [12] 段大鹏, 江秀臣, 孙才新, 等. 基于正交分解的MOA泄漏电流有功分量提取方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 56-61.  
DUAN Dapeng, JIANG Xiuchen, SUN Caixin, et al. Extracting algorithm of active power component of MOA leakage current based on orthogonal decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 56-61.
- [13] KHODSUZ M, MIRZAEI M. A modified time-delay addition method to extract resistive leakage current of MOSA[J]. Journal of the Institution of Engineers, 2015, 3(4): 1-7.
- [14] YALLA1 M K, Palakaluri V. A new modified shifted current technique to diagnose the surge arrester condition[C]// International Journal of Engineering Research & Technology. [S.l.]: [s.n.], 2012: 1-5.
- [15] 徐志钮. 介损在线监测去噪方法的有效性[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 909-917.  
XU Zhiniu. Validity of noise reduction method in dielectric loss on-line monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 909-917.
- [16] 丁国成, 律方成, 刘云鹏, 等. 数学形态学用于抑制MOA在线监测现场干扰[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 44-46.  
DING Guocheng, LYU Fangcheng, LIU Yunpeng, et al. Research of mathematical morphology in restraining interference in on-site monitoring of metal oxide surge arrester[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 44-46.
- [17] 谭向宇, 许学勤, 孙 福, 等. 新型自适应广义形态滤波在MOA在线监测数据处理中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 25-29.  
TAN Xiangyu, XU Xueqin, SUN Fu, et al. Application of novel self-adaptive generalized morphological filter to MOA on-line monitoring data processing[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 25-29.
- [18] 董莉娜, 胡 可, 王微波, 等. 小波消噪在10 kV金属氧化物避雷器在线检测中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 891-896.  
DONG Lina, HU Ke, WANG Weibo, et al. Application of wavelet de-noise in on-line detection of 10 kV metal oxide arresters[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 891-896.
- [19] 赵 腾, 姚 毅, 周芯竹. 基于EEMD阈值的MOA避雷器泄漏电流去噪的研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31): 231-236.  
ZHAO Teng, YAO Yi, ZHOU Xinzhu. Research on de-noising of MOA leakage current based on EEMD threshold[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(31): 231-236.
- [20] COLOMINAS M, SCHLOTTHAUER G, TORRES M E. Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing[J]. Biomedical Signal Processing & Control, 2014, 14(1): 19-29.
- [21] TORRES M E, COLOMINAS M, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[J]. Brain Research Bulletin, 2011, 125(3): 4144-4147.
- [22] 行鸿彦, 朱清清. 基于集成经验模态分解的海杂波去噪[J]. 电子学报, 2016, 44(1): 1-7.  
XING Hongyan, ZHU Qingqing. The sea clutter de-noising based on ensemble empirical mode decomposition[J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 44(1): 1-7.
- [23] 王 可. 基于经验模态分解的滚动轴承故障振动信号消噪研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2012.  
WANG Ke. De-noising study of rolling bearing fault vibration signal based on empirical mode decomposition[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2012.
- [24] 王 姣, 李振春, 王德营. 基于CEEMD的地震数据小波阈值去噪方法研究[J]. 石油物探, 2014, 53(2): 164-172.  
WANG Jiao, LI Zhenchun, WANG Deying. A method for wavelet threshold denoising of seismic data based on CEEMD[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(2): 164-172.
- [25] 黄绍平, 李永坚, 赵毅君. 基于MATLAB的MOA过电压保护性能仿真[J]. 高电压技术, 2003, 29(12): 15-16.  
HANG Shaoping, LI Yongjian, ZHAO Yijun. The simulating study on overvoltage protection capability of metal oxide arrester based on MATLAB[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(12): 15-16.
- 何贵先(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为避雷器在线监测。
- 行鸿彦(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为气象仪器设计与计量、雷电防护技术等。