

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.026

# 基于 CEEMDAN-ZCR 的光纤电流互感器非线性误差识别

王立辉<sup>1</sup>, 张文鹏<sup>1</sup>, 安义岩<sup>2</sup>

(1. 东南大学仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 内蒙古自治区 呼和浩特 010020)

**摘要:**针对光纤电流互感器(FOCT)漂移、变比波动等非线性误差难以识别的问题,文中提出一种基于自适应噪声完备集合经验模态分解(CEEMDAN)-过零率(ZCR)的FOCT误差识别方法。首先,利用CEEMDAN算法对FOCT输出电流信号进行分解,得到包含非线性误差特征的固有模态分量(IMF),构成原始误差向量数据集;然后,对比不同误差下的分量数量,利用ZCR算法计算不同误差下各个IMF的ZCR指标,用于将IMF分类;最后,根据ZCR指标将IMF信号分为3类,并叠加重组为3个分量,构建出分解结果数量稳定的IMF信号,根据不同分量的特征实现误差识别。实验结果表明:基于CEEMDAN-ZCR的误差识别方法能够有效识别2种误差,漂移误差特征主要集中在IMF中第三层(C3),变比误差主要集中在IMF中第二层(C2)。

**关键词:**光纤电流互感器(FOCT);漂移误差;变比误差;自适应噪声完备集合经验模态分解(CEEMDAN);过零率(ZCR);误差识别

中图分类号:TM452

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)04-0199-06

## 0 引言

光纤电流互感器(fiber optic current transformer, FOCT)因其绝缘性能好、可靠性高、频域宽和具有良好的瞬态特性等优点,在高压直流输电工程中得到了大量应用<sup>[1-2]</sup>。作为一次系统的测量元件,其稳定可靠运行是继电保护、测控、电能计量的重要保证。理想情况下,FOCT的光回路、调制回路及受到的法拉第磁光效应是线性的,但其光回路、调制回路受站内高温、低温、振动、电磁干扰及自身老化等因素影响,测量结果会发生偏移<sup>[3-4]</sup>,性能会发生劣化甚至导致运行事故。

FOCT作为一种光学干涉仪器,其内部结构复杂,使用了许多光学器件和电子器件<sup>[5]</sup>,因此各结构组件的性能和寿命是设备长期可靠工作的关键所在,任意环节发生故障均会导致设备故障。当FOCT不同部位发生故障时,输出信号会表现出不同特征<sup>[6]</sup>。为提升FOCT的测量性能,在传感环的温度特性及双折射<sup>[7]</sup>、 $\lambda/4$ 波片产生的相位延迟<sup>[8]</sup>及保偏光纤的偏振耦合<sup>[9]</sup>等方面已有了大量研究,文献[10-11]通过提高光源功率、增加传感头圈数、调整相位调制偏置工作点等方法提高了FOCT受噪声影响时输出信号的信噪比。为明确FOCT的故障机理,依托现场故障<sup>[12]</sup>分析了低温<sup>[13]</sup>、光回路与调制回路故障<sup>[14]</sup>等故障现象,建立故障树,实现

了故障定位<sup>[15]</sup>。为判断FOCT运行状态,文献[16]在调制信号中加入了周期性误差,文献[17]采用微元法构建了新型旋转光纤Mueller矩阵,文献[18]利用小波理论提取故障特征,并结合分形理论进行故障识别与定位。以上研究主要围绕FOCT本体、信号处理等开展,对输出信号产生的非线性误差缺少有效的识别方法。文献[19]提出的自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)具有严格的数学模型和坚实的理论基础,能避免经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)、总体经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)等产生二等模态混叠、分解不完备的现象,且分解效率更高,被广泛应用于信号滤波、分解等领域。

针对FOCT非线性误差特性,文中提出了一种基于CEEMDAN-过零率(zero-crossing rate, ZCR)的FOCT误差识别方法,通过CEEMDAN算法对误差信号分解得到固有模态分量(intrinsic mode function, IMF);利用ZCR算法,计算得到各分量的ZCR指标;依据指标将信号重组为3段,得到能表征FOCT故障的信号。该方法能快速提取FOCT的误差特征,可满足误差特征快速辨识的需求,为提高直流输电工程中FOCT的运行可靠性提供参考。

## 1 非线性误差特性建模

基于法拉第磁光效应的反射式FOCT原理如图

收稿日期:2022-02-10;修回日期:2022-04-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2501603);

国家电网有限公司科技项目(5700-202018483A-0-0-00)

1 所示<sup>[20]</sup>。超发光二极管光源(1 310 nm)发出的光经过偏振器与 45° 熔接点后,形成 2 束正交的线偏振光。线偏振光通过保偏光纤,连接到反射模式的传感光纤线圈。线圈入口处的由椭圆芯光纤制成的  $\lambda/4$  波片产生左右圆偏振光波。两偏振光在传感光纤圈中受到法拉第效应形成相位差。在回程中,被反光镜反射后偏振方向互换,产生双倍相位差。经  $\lambda/4$  波片后恢复为 2 束正交的线偏振光,通过 45° 熔接点后,在偏振器处发生干涉后进入光电探测器(PIN)。光波偏振面转过的角度为:

$$\Delta\theta = 4VNI \quad (1)$$

式中:  $V$  为光纤的 Verdet 常数;  $N$  为光纤的传感环圈数;  $I$  为待测电流。

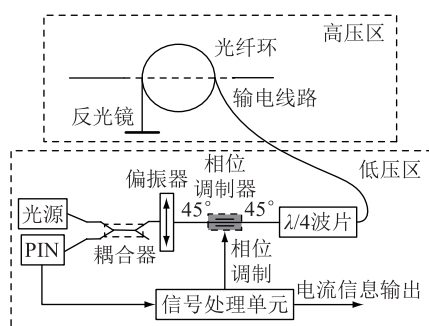


图 1 FOCT 原理

Fig.1 Principle of FOCT

FOCT 故障主要体现为完全失效故障、固定偏差故障、精度下降故障、漂移偏差故障及变比偏差故障<sup>[12]</sup>。完全失效故障时,故障现象明显,信号输出容易判别;固定偏差故障由测量装置设备的精确度引起<sup>[13]</sup>;精度下降故障体现为噪声,主要由传感器内部的随机游走噪声、斜坡噪声、量化噪声和正弦噪声等组成<sup>[21]</sup>。由于保护装置内部已经对随机噪声、系统偏差等线性误差进行了预处理<sup>[22]</sup>,因此文中主要围绕漂移和变比相关的非线性误差展开研究。

FOCT 受温度或振动影响,内部磁光材料性能变差;随着使用时间增加,部分器件也会发生老化,导致互感器一次侧和二次侧信号变比逐渐改变,且精度逐渐下降。信号测量值随着时间变化而变化,产生非线性误差。漂移误差表现为一段逐渐增加的漂移量,其误差模型为:

$$f_1(t) = k_1(t - t_s) + r_1 \quad (2)$$

式中:  $f_1(t)$  为漂移误差;  $t$  为采样时刻;  $k_1$  为漂移常数;  $t_s$  为故障发生时刻;  $r_1$  为发生漂移误差时附带的随机噪声。

当 FOCT 内部光源、光纤等材料受到外界因素影响时,器件本身参数发生变化,导致输出电流信

号与正常信号相比存在一定偏差。FOCT 的输出信号与调制信号幅值成正比关系,当调制回路发生故障使幅值发生变化时,会产生 FOCT 变比误差,其误差模型为:

$$f_2(t) = k_2 \sin(\omega t + \varphi) + r_2 \quad (3)$$

式中:  $f_2(t)$  为变比误差;  $k_2$  为变比误差系数;  $\omega$  为角频率;  $\varphi$  为相位;  $r_2$  为发生变比误差时附带的随机噪声。

FOCT 的非线性误差数学模型可表述为:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + f(t) \quad (4)$$

式中:  $x(t)$  为  $t$  时刻的测量值;  $A$  为真实值幅值;  $f(t)$  为非线性误差,包含  $f_1(t)$  与  $f_2(t)$ 。

## 2 非线性误差模态特征分解

CEEMDAN 算法在 EMD 算法的基础上进行发展,不仅集成了 EMD 算法可以分解任何信号的优点,还能在一定程度上减少模态混叠现象。同时,CEEMDAN 算法克服了 EEMD 算法分解不完备、重构误差大和有残余噪声的问题,循环迭代耗时也只有 EEMD 算法的一半<sup>[23-24]</sup>。

CEEMDAN 算法可将非平稳信号分解为各个 IMF 之和的形式,且无须设定拟合基函数,可根据数据自身的尺度特征进行分解,适用于各种类型的信号分解。CEEMDAN 算法在分解的每一阶段都添加自适应的白噪声,计算唯一的残余信号,因此可有效避免模态混叠效应、端点效应,提高信息序列分解的准确度。针对 FOCT 输出信号的非线性特点,使用 CEEMDAN 算法能有效地从原始输出信号中提取含有故障特征的 IMF。

$$x_i(t) = x(t) + \varepsilon \omega_i(t) \quad (5)$$

式中:  $x_i(t)$  为第  $i$  次添加噪声之后的信号序列;  $x(t)$  为 FOCT 原始信号序列,由式(4)给出;  $\varepsilon$  为幅值,为自适应系数;  $\omega_i(t)$  为每次分解加入的单位方差均值为 0 的高斯白噪声序列。

记  $c_1(t)$  为 FOCT 信号在  $N$  次 EMD 的平均值,模型为:

$$c_1(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{1,i}(t) \quad (6)$$

式中:  $c_{1,i}(t)$  为信号  $x_i(t)$  在 EMD 的第  $i$  个 IMF。

得到  $N$  次 EMD 的余量序列  $r_{1,i}(t)$  后进行平均,得到  $r_1(t)$ ,表示为:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (7)$$

采用 EMD 算法将  $N$  次高斯白噪声分解,获得 IMF,与残余分量  $r_1(t)$  相加,再通过 EMD 算法,取均值得到的第一个 IMF,将其作为 FOCT 信号的第

二个分量  $c_2(t)$ 。

$$c_2(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_1(r_1(t) + \varepsilon E_1(\omega_i(t))) \quad (8)$$

式中:  $E_1(\cdot)$  为通过 EMD 算法提取的第一个 IMF。

则第二个残余分量为:

$$r_2(t) = r_1(t) - c_2(t) \quad (9)$$

计算  $k+1$  次, 获得第  $k$  阶段的残余分量  $r_k(t)$  和第  $k+1$  个 FOCT 信号分量  $c_{k+1}(t)$  分别为:

$$r_k(t) = r_{k-1}(t) - c_k(t) \quad (10)$$

$$c_{k+1}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_k(r_k(t) + \varepsilon E_k(\omega_i(t))) \quad (11)$$

式中:  $E_k(\cdot)$  为通过 EMD 算法提取的第  $k$  个 IMF。若残余分量的极值点个数大于等于 2, 则停止 EMD, 得到最后的余量序列  $r(t)$  和分量  $c_k(t)$ 。则 FOCT 误差信号序列  $x(t)$  最终分解为:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K c_k(t) + r(t) \quad (12)$$

CEEMDAN 将 FOCT 误差信号分解为含  $K$  个 IMF 的误差序列。

对于不同的误差情况, CEEMDAN 算法分解得到的分量数量不完全相同, 因此文中选择运行速度快且有效的 ZCR 指标进行统计分析。ZCR 是指每帧内信号通过零值的次数, 是信号分析中的一种特征参数, 用于反映信号的频率信息。对有时间横轴的连续信号, 能观察到时域波形通过横轴的情况; 对离散的时间信号, 若相邻的采样具有不同的代数符号则视为发生了过零。根据式 (13) 分别计算每个 IMF 的 ZCR, 并根据计算结果对 IMF 进行重组。

$$Z = \frac{1}{2} \sum_{x=1}^T |\text{sgn}(c(x)) - \text{sgn}(c(x-1))| \quad (13)$$

式中:  $Z$  为信号的 ZCR;  $T$  为信号的长度;  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数;  $c(x-1)$ ,  $c(x)$  分别为 IMF 中相邻的第  $x-1$  和第  $x$  个数据点。

针对 FOCT 的正常状态与 2 种误差状态, 结合 CEEMDAN 算法与 ZCR 算法, 分别分析正常状态与故障状态下的输出信号, 确定故障特征。首先, 利用 CEEMDAN 算法对 FOCT 输出电流信号进行分解, 得到包含非线性误差特征的 IMF, 构成原始误差向量数据集; 然后, 对比不同误差下的分量数量, 利用 ZCR 算法计算不同误差下各个 IMF 的 ZCR 指标; 最后, 根据 ZCR 指标将 IMF 信号分为 3 类, 进行叠加重组, 构建出分解结果数量稳定的 IMF 信号, 根据不同分量的特征实现误差识别。利用不同误差下 3 个分段具有的不同特征, 实现对 FOCT 的误差特征提取。

### 3 实验验证

采用如图 2 所示的实验平台进行 FOCT 的误差仿真验证。FOCT 由光纤传感器头、电缆管理盒和电子单元组成, 采用开环检测原理; 电流发生装置选用 PDC4000A 高精度直流实验装置, 用于发出一条侧电流, 峰值设置为  $\pm 100$  A, 通过 FOCT 传感头形成电流回路, 二次侧采样率为 4 kHz。设置基准电流源模块, 使其增加漂移与变比误差模拟信号, 形成非线性误差源信号。



图 2 实验平台

Fig.2 Experiment platform

图 3(a) 为漂移误差信号及变比误差信号的时域波形。其中, 漂移误差信号含有漂移分量, 表现为最大值大于 100 A 且最小值大于 -100 A; 变比误差信号幅值成比例增大, 表现为最大值大于 100 A 且最小值小于 -100 A, 如图 3(b) 所示。

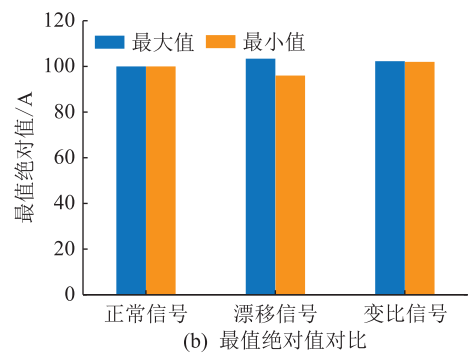
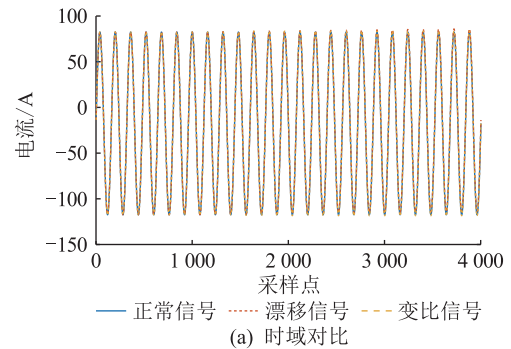


图 3 不同故障下输出信号波形及最大值绝对值对比

Fig.3 Comparison of output signal waveforms and absolute maximum values under different faults

分别对正常、漂移误差、变比误差 3 种信号进行

CEEMDAN, 设置白噪声幅值  $\varepsilon = 0.02$ , EMD 的分解次数  $N = 50$ , 设置 EMD 最大循环迭代次数为 200 次, 得到的分解数量分别为 14、12、14。根据 ZCR 指标, IMF5 的 ZCR 值均为 49, IMF6 的 ZCR 值均为 50, IMF1—IMF4、IMF7—IMF9 的 ZCR 值较大, 其他分量的 ZCR 值均小于 49。因此, ZCR 指标将 CEEMDAN 的分解结果分为 3 段, 并按照 ZCR 指标计算结果, 对分解得到的 IMF 进行信号重构, 得到分解数量稳定、能明显表征误差特征的分解信号。

对于正常信号, 其分解结果中 IMF1—IMF4、IMF7—IMF9 包含了 CEEMDAN 算法分解时的噪声, IMF5、IMF6 为工频电流信号, IMF10—IMF14 则为低频信号, 幅值小于 1。对于漂移误差信号, 其分解结果中 IMF1—IMF4、IMF7—IMF9 包含分解时的噪声, IMF5、IMF6 为工频电流信号, IMF10—IMF12 包含了具有低频特征的漂移误差信号。对于变比误差信号, 其分解结果中 IMF1—IMF4、IMF7—IMF9 为噪声信号, IMF5、IMF6 为电流信号, 且变比偏差误差的特征信息包含在 IMF6 中。因此重组 IMF1—IMF4、IMF7—IMF9, 得到重组信号 IMF1, 记为 C1; 重组 IMF5、IMF6, 得到重组信号 IMF2, 记为 C2; 将剩下信号进行重组, 得到重组信号 IMF3, 记为 C3。

图 4 展示了漂移误差的重构结果。漂移误差的误差信息主要集中在 C3 部分, 是一段逐渐向上偏移的信号, 表现为渐变故障。通过对低频信号的幅值进行连续判断, 可以诊断漂移误差。

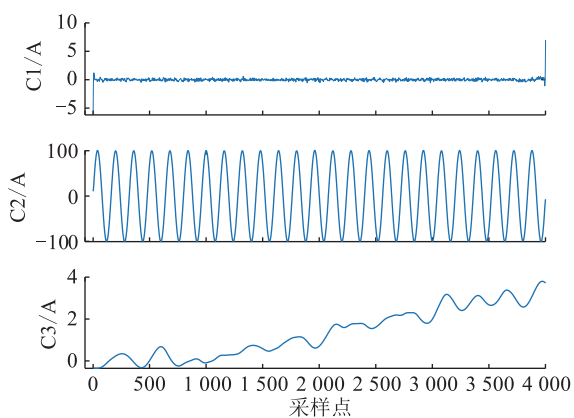


图 4 漂移误差信号的重构结果

Fig.4 Recombination results of drift error signal

图 5 展示了变比误差的重构结果。变比误差的误差信息主要集中在 C2, 是一段幅值变化的正弦波信号。通过将 C2 中的信号与正常信号作对比, 可以诊断变比误差。

对于漂移误差, 取漂移误差信号与正常信号的残差信号作为残差分量, 与文中算法提取的 C3 进行对比, 如图 6 所示。可以看出, 从采样点 1 000 开

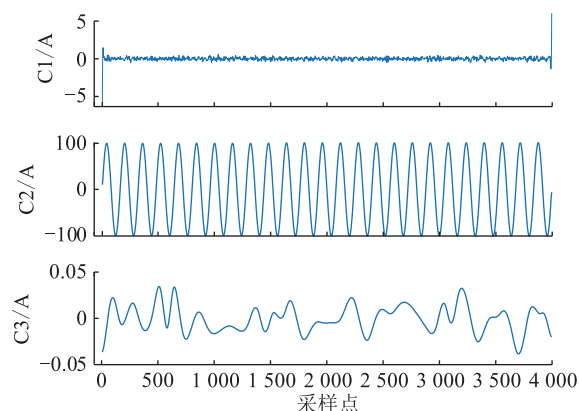


图 5 变比误差信号的重构结果

Fig.5 Recombination results of ratio error signal

始, 信号存在漂移误差。C3 可以很好地表示漂移误差, 证明了算法对漂移误差提取的有效性。

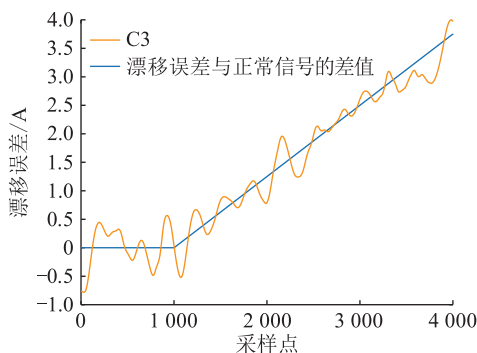


图 6 漂移结果对比

Fig.6 Comparison of drift results

对于变比误差, 取变比误差信号与正常信号的比值作为变比量, 计算文中算法所得到的 C2 与正常信号的比值, 两者对比, 如图 7 所示。可以看出, 从采样点 1 500 开始, 信号发生变比, 含有变比误差。C2 可以很好地表示变比误差, 证明了算法对变比误差提取的有效性。

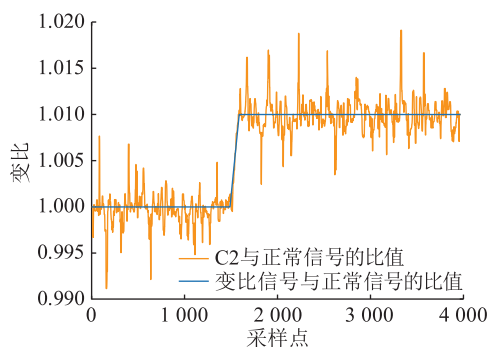


图 7 变比结果对比

Fig.7 Comparison of ratio results

## 4 结语

针对 FOCT 漂移、变比波动等非线性误差问题,

文中设计了基于 CEEMDAN-ZCR 的 FOCT 非线性误差识别方法,分析了 FOCT 漂移、变比等非线性误差的数学模型。利用 CEEMDAN 算法对 FOCT 信号进行分解,不同种类的误差信号分解得到不同数量的 IMF。利用 ZCR 算法计算各个 IMF 的 ZCR 指标,将 IMF 信号重组为 3 组分量,构建出分解结果数量稳定的 IMF 信号,不同误差信号在 3 个分量表现出不同的特征。漂移误差的故障特征主要集中在 C3,表现为一段向上漂移的信号;变比误差的误差特征集中在 C2,表现为一段比值增大的变比信号。通过判断 3 个重组分量信号所具有的不同特征,从而能准确获取 FOCT 的误差特征并进行误差识别。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020012)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 赵俊,石磊,黄堃,等. 新型特高压全光纤直流电流互感器性能研究[J]. 电力电子技术,2020,54(9):19-22.  
ZHAO Jun,SHI Lei,HUANG Kun,et al. Study of the performance of new extra-high voltage all fiber optical direct current transformer[J]. Power Electronics,2020,54(9):19-22.
- [2] 罗苏南,王耀,丁晔,等. 柔性直流输电用 $\pm 500$  kV 直流全光纤电流互感器研制及测试[J]. 高压电器,2017,53(6):48-55.  
LUO Sunan,WANG Yao,DING Ye,et al. Development and test of  $\pm 500$  kV DC fiber optical current transducer for flexible HVDC system[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(6):48-55.
- [3] 王红星,关远鹏,胡春潮,等. 全光纤电流互感器温度误差研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):200-204.  
WANG Hongxing,GUAN Yuanpeng,HU Chunchao,et al. Temperature error of fiber optic current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(12):200-204.
- [4] MÜLLER G M,FRANK A,YANG L,et al. Temperature compensation of interferometric and polarimetric fiber-optic current sensors with spun highly birefringent fiber[J]. Journal of Light-wave Technology,2019,37(18):4507-4513.
- [5] 肖智宏,程嵩,张国庆,等. 全光纤电流互感器灵敏度特性研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):212-216.  
XIAO Zhihong,CHENG Song,ZHANG Guoqing,et al. Research on sensitivity characteristic of fiber optic current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):212-216.
- [6] 李传生,赵伟,王家福,等. 直流光纤电流互感器谐波测量误差机理及改善[J]. 中国激光,2017,44(9):0910002.  
LI Chuansheng,ZHAO Wei,WANG Jiafu,et al. Harmonic measurement error mechanism and performance improvement of direct-current fiber-optic current transformer[J]. Chinese Journal of Lasers,2017,44(9):0910002.
- [7] 陈旭宇,黄堃,曾中梁,等. 闭环全光纤电流互感器温度补偿方法研究[J]. 传感技术学报,2019,32(4):576-579.  
CHEN Xuyu,HUANG Kun,ZENG Zhongliang,et al. Research on temperature compensation method of closed loop all fiber current transformer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2019,32(4):576-579.
- [8] 肖悦娣,蒋晓勇,陈华. 宽带光纤  $\lambda/4$  波片的温度特性[J]. 红外与激光工程,2018,47(12):299-304.  
XIAO Yueyu,JIANG Xiaoyong,CHEN Hua. Temperature characteristics of broad-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate[J]. Infrared and Laser Engineering,2018,47(12):299-304.
- [9] 童维军,杨晨,刘彤庆,等. 光纤传感用新型特种光纤的研究进展与展望[J]. 光电工程,2018,45(9):180243.  
TONG Weijun,YANG Chen,LIU Tongqing,et al. Progress and prospect of novel specialty fibers for fiber optic sensing[J]. Opto-Electronic Engineering,2018,45(9):180243.
- [10] 李岩松,王兵,刘君,等. 全光纤电流互感器测量性能的优化分析与实验研究[J]. 电工技术学报,2018,33(17):4146-4153.  
LI Yansong,WANG Bing,LIU Jun,et al. Optimization analysis and experiment study on measurement performance of all-fiber optical current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(17):4146-4153.
- [11] 樊占峰,白申义,杨智德,等. 光学电流互感器关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(3):67-74.  
FAN Zhanfeng,BAI Shenyi,YANG Zhide,et al. Research on key technology of optical current transformer[J]. Power System Protection and Control,2018,46(3):67-74.
- [12] 阮思烨,王德林,徐凯,等. 直流输电系统电子式电流互感器故障统计分析[J]. 电网技术,2018,42(10):3170-3175.  
RUAN Siye,WANG Delin,XU Kai,et al. ECT fault statistical analysis of DC transmission system[J]. Power System Technology,2018,42(10):3170-3175.
- [13] 王传川,白世军,李毅,等. 低温环境下电子式电流互感器激光供电情况的分析与研究[J]. 高压电器,2020,56(5):135-142.  
WANG Chuanchuan,BAI Shijun,LI Yi,et al. Analysis and research on laser power supply condition of electronic current transformer under low temperature environment[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(5):135-142.
- [14] 庞福滨,李鹏,魏旭,等. 正弦波调制的全光纤电流互感器故障机理分析[J]. 电力系统自动化,2020,44(17):153-160.  
PANG Fubin,LI Peng,WEI Xu,et al. Analysis on fault mechanism of fiber-optical current transformers with sine wave modulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(17):153-160.
- [15] 陈浩敏,王军龙,李俊一,等. 基于故障模式与影响分析法和故障树的全光纤电流互感器故障诊断专家系统[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(2):1-8.  
CHEN Haomin,WANG Junlong,LI Junyi,et al. Fault diagnosis expert system for fiber optical current transducer based on failure mode and effect analysis and fault tree[J]. Proceedings of

- the CSU-EPSA, 2019, 31(2):1-8.
- [16] 郭金刚, 司磊, 袁志军, 等. 光纤电流互感器光路故障自诊断告警算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21):172-177.  
GUO Jingang, SI Lei, YUAN Zhijun, et al. Self-diagnosing alarm algorithm for optical path fault of fiber optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21):172-177.
- [17] 胡浩亮, 黄俊昌, 黄宇豪, 等. FOCT 中旋转光纤的 Mueller 矩阵模型[J]. 电子测量技术, 2020, 43(16):94-98.  
HU Haoliang, HUANG Junchang, HUANG Yuhao, et al. Mueller matrix model of spun fiber for FOCT[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(16):94-98.
- [18] 杨雪东. 基于小波-分形理论的电子式互感器故障诊断方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.  
YANG Xuedong. A study of electronic transformer fault diagnosis based on wavelet-fractal theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [19] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Prague, Czech Republic. IEEE, 2011:4144-4147.
- [20] WANG L H, ZHANG W P, PANG F B. Error characteristic analysis of fiber optic current transformer with sine modulation [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65:102620.
- [21] 胡蓓, 肖浩, 李建光, 等. 光纤电流互感器的噪声分析与信噪比优化设计[J]. 高电压技术, 2017, 43(2):654-660.  
HU Bei, XIAO Hao, LI Jianguang, et al. Noise analysis and SNR optimization design of fiber optical current transformers [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2):654-660.
- [22] 王尉军, 殷慧. 线路电子式互感器渐变性故障诊断方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1):136-140.  
WANG Weijun, YIN Hui. Diagnosis method of soft fault of line electronic transformer [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1):136-140.
- [23] 蒋玲莉, 谭鸿创, 李学军, 等. 基于 CEEMDAN 排列熵与 SVM 的螺旋锥齿轮故障识别[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1):33-40, 198.  
JIANG Lingli, TAN Hongchuan, LI Xuejun, et al. Fault diagnosis of spiral bevel gear based on CEEMDAN permutation entropy and SVM [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1):33-40, 198.
- [24] CHEN S, HUO X, ZHAO H, et al. Axial unbalance identification of GyroWheel rotor based on multi-position calibration and CEEMDAN-IIT denoising [J]. Measurement, 2021, 183:109852.
- [25] JOO S, CHOI J, KIM N, et al. Zero-crossing rate method as an efficient tool for combustion instability diagnosis [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 123:110340.

作者简介:



王立辉

王立辉(1979),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为无人系统智能巡检导航、视觉处理、智能算法等(E-mail:wlhseu@163.com);  
张文鹏(1996),男,硕士在读,研究方向为精密仪器、智能传感信息处理技术;  
安义岩(1989),男,硕士,工程师,从事高压试验及绝缘检测工作。

## Nonlinear error recognition of FOCT based on CEEMDAN-ZCR

WANG Lihui<sup>1</sup>, ZHANG Wenpeng<sup>1</sup>, AN Yiyang<sup>2</sup>

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** Focusing on the problem that it is difficult to distinguish the nonlinear errors such as drift error and ratio error of fiber optic current transformer (FOCT), an error recognition method based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) and zero-crossing rate (ZCR) is proposed. Firstly, the output signal of the FOCT is decomposed using CEEMDAN algorithm to obtain the intrinsic mode functions (IMF) containing nonlinear error characteristics, which constitutes the original error vector data set. Then, the number of components under different errors is compared. The ZCR index of each IMF component under different errors is calculated by ZCR algorithm. The results are used to classify the IMF. Finally, the IMF component signals are divided into three categories according to the ZCR index. IMF components are superimposed and reorganized into three components, and IMF component signals with stable number of decomposition results are constructed. Error identification is realized according to the expression forms of different components. Experiment results show that the CEEMDAN-ZCR based error recognition method can effectively identify the two kinds of errors. The drift error characteristics are mainly concentrated in the third layer of IMF (C3), and the variation ratio error is mainly concentrated in the second layer of IMF (C2).

**Keywords:** fiber optic current transformer (FOCT); drift error; ratio error; complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN); zero-crossing rate (ZCR); error recognition

(编辑 陆海霞)