

# 一种全光纤电流互感器早期故障诊断方法研究

刘占元<sup>1</sup>, 牛晓晨<sup>1</sup>, 苏红<sup>2</sup>, 陈勉舟<sup>3</sup>, 程含渺<sup>4</sup>

- (1. 先进输电技术国家重点实验室, 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209;
2. 国网辽宁省电力有限公司盘锦供电公司, 辽宁 盘锦 124010;
3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074;
4. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 210019)

**摘要:** 全光纤电流互感器的一些故障在早期以测量异常的形式表现出来, 本文从识别测量异常方向, 提出了一种基于相位差不变原理的早期故障诊断方法。首先阐述了不变相位差原理, 即在电网频率相对稳定的条件下等时间间隔截取信号, 采用数值求解方法可求解出一个仅与时间间隔有关的相位差。以此相位差作为比对标准, 通过分析实际相位差的变化情况, 可识别全光纤电流互感器是否发生测量异常, 为早期故障诊断提供辅助判据。为验证所提方法的可行性, 开展了验证实验。结果表明, 当全光纤电流互感器受外部干扰而发生测量异常时, 本文所提的方法能识别出测量异常。以此为基础研发的全光纤电流互感器故障预警系统, 已在辽宁某智能变电站投入运行。

**关键词:** 全光纤电流互感器; 故障诊断; 相位测量; 相位差不变; 数值求解

DOI: 10.12067/ATEEE1808061

文章编号: 1003-3076(2019)11-0010-07

中图分类号: TM743

## 1 引言

全光纤电流互感器是由光纤传感元件和数据处理单元组成的新型电流测量设备, 属于电子式互感器, 具有抗电磁干扰强的优点, 广泛应用于智能变电站<sup>[1,2]</sup>。全光纤电流互感器是后续测控、保护以及计量设备的电流数据源, 一旦发生故障, 后果严重<sup>[3]</sup>。2012年, 某省一座220kV智能变电站在投运后不久, 一台全光纤电流互感器发生故障, 导致电流数据异常, 进而引起继电保护跳闸, 造成线路意外停电。对于此类高压测量设备, 若能通过技术手段, 提前发现故障, 对降低故障影响具有重要意义。目前, 以状态评估为基础的早期故障诊断在变压器、断路器等高压主设备上已经有了较广泛的应用, 而对全光纤电流互感器的早期故障诊断研究较少<sup>[4,5]</sup>。2011年, 中国电力科学研究院对国内主流厂家包括全光纤电流互感器在内的电子式互感器开展了全性能试验, 结果表明, 全光纤电流互感器的测量故障一般不是突发性的, 而是存在一个渐变过程, 在故障早

期以测量误差异常的形式表现出来<sup>[6]</sup>。这为提前发现全光纤电流互感器故障提供了可能性, 即通过分析全光纤电流互感器的测量误差, 实现早期故障诊断。

为评估全光纤电流互感器的测量误差, 传统手段是采用标准器与被测试互感器进行比对, 又称为误差校验。文献[7,8]对离线电子式互感器校验方法进行了研究, 文献[9,10]进一步研究了在线校验技术, 可在不停电情况下测试电子式互感器的测量误差。这些方法均可用于全光纤电流互感器误差校验, 但只适用于计量检验, 不能满足全光纤电流互感器早期故障诊断的实时性和长期性要求。近年来, 一些学者对基于电子式互感器输出数据驱动的在线自诊断方法开展了探索性研究。文献[11-15]研究了基于小波变换方法的电子式互感器故障诊断, 可以识别某些突变性测量故障, 其实质是以经验输出作为比对标准。文献[16]研究了基于电流观测器的电子式电流互感器渐变故障诊断方法, 通过构建变压器和输电线路模型得到预测电流值作为比对

收稿日期: 2018-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(E070401)、国家电网公司科技项目(SGRIDL7125012;2017YF-03)

作者简介: 刘占元(1981-), 男, 天津籍, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光纤传感及电力传感设备;

陈勉舟(1978-), 男, 湖北籍, 博士研究生, 主要研究方向为电子式互感器及电能计量技术(通讯作者)。

标准,采用预测值与实测值的残差构建被分析数据对象,从而实现渐变故障诊断。这些方法对研究全光纤电流互感器测量误差评估具有借鉴意义。

总结现有研究成果,若要评估全光纤电流互感器的测量误差,必须通过技术手段建立一个比对标准。基于此思路,本文提出了一种基于相位不变原理的全光纤电流互感器早期故障诊断方法,将全光纤电流互感器的采样数据等间隔截取,采用数值方法求解出仅与时间间隔有关的相位差。以此相位差作为比对标准,通过分析实际相位差的变化是否有异常,实现早期测量故障诊断。该方法可为全光纤电流互感器现场运维决策提供辅助判据,具有较好的实用价值。

## 2 全光纤电流互感器

全光纤电流互感器属于光学电流互感器(Optical Current Transformer, OCT),一般基于 Faraday 旋光效应,即线偏振光在电流产生的磁场作用下通过磁光材料,其偏振面会发生旋转,旋转角  $\theta$  正比于磁场  $H$  沿着线偏振光通过材料路径  $l$  的线积分。 $\theta$  的数学计算表达式为:

$$\theta = V \int H dl \quad (1)$$

式中,  $V$  为 Verdet 常数,定义为每单位光程每单位场强的旋转角,由磁光材料自身的性质决定。若将光路设计成围绕被测载流导线  $N$  圈的等周长闭合回路,则式(1)变为闭合环路的线积分,结合全电流定律可得:

$$\theta = VN i \quad (2)$$

式中,  $i$  为被测电流大小。当互感器设计完成后,  $V$  和  $N$  即为确定值,通过检测偏振角度  $\theta$  改变的大小,即可计算出被测一次电流。实际应用中,全光纤电流互感器有不同的光路结构,检测方法也有差异,其整体结构如图1所示。

全光纤电流互感器质量轻、无饱和、安装空间小、抗干扰能力强,但由于光纤的线性双折射对温度和振动等环境因素变化十分敏感,性能受温度和振动影响显著,所以运行可靠性相对传统电磁式互感器有所降低。因此,研究针对全光纤电流互感器的早期故障诊断方法,对预防故障具有重要意义。

## 3 全光纤电流互感器故障诊断方法

### 3.1 理想条件下的相位差不变原理

在交流电力系统稳定无扰动运行时,截取两

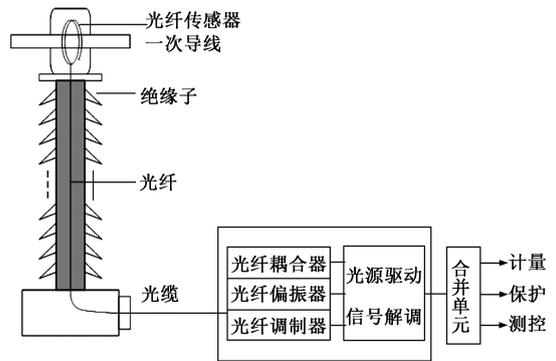


图1 全光纤型电流互感器结构原理框图

Fig.1 Structure of all fiber current transformer

段不同时刻的电网电压或电流信号,信号的初相位之差应仅与截取信号的时间间隔有关,而与截取信号的起始时刻无关,该特性定义为相位差不变性。假设电网波形信号的幅值归一化解析式  $s(t)$  为:

$$s(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (3)$$

式中,  $\omega_0$  为电压信号的频率;  $\varphi_0$  为电压信号在  $t$  时刻的初相。在  $t + \Delta t$  时刻,电压波形信号的幅值归一化解析式  $s(t + \Delta t)$  为:

$$s(t + \Delta t) = \cos(\omega_0 t + \omega_0 \Delta t + \varphi_0) \quad (4)$$

由式(4)可知,电压信号在  $t + \Delta t$  时刻的初相为  $\omega_0 \Delta t + \varphi_0$ ,即在  $t$  和  $t + \Delta t$  时刻截取的信号的初相位之差为  $\omega_0 \Delta t$ ,该值仅与  $\Delta t$  有关,而与  $t$  无关。图2进一步直观地说明了相位差不变原理。

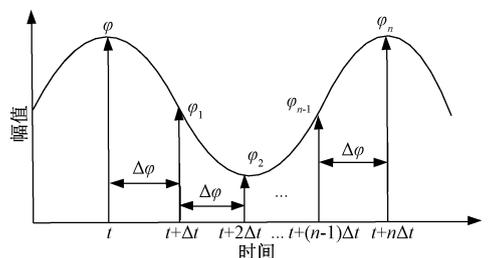


图2 相位差不变原理

Fig.2 Principle of phase difference invariance

假设频率为  $\omega$  的正弦波在  $t$  时刻所取信号的初相位为  $\varphi$ ,则  $t + \Delta t, t + 2\Delta t, \dots, t + n\Delta t$  时刻的初相位分别为  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ ,则  $\varphi_l$  与  $\varphi_m (1 \leq l < m \leq n)$  的相位差  $\Delta\varphi$  为:

$$\Delta\varphi = (m - l)\omega\Delta t \quad (5)$$

式中,  $l$  和  $m$  为序号。在电网稳定无扰动运行情况下,若等时间间隔截取信号,则相位差  $\Delta\varphi$  是恒定不变的。

### 3.2 非理想条件的近似相位差不变性

在理想条件下,相位差不变原理显然正确。然而,在实际情况下,电网电压或电流波形参数是不断变化的,尤其是电流的幅值波动较大,相位差不变原理成立的条件不存在。为了利用相位差不变性原理,需要对幅值和频率引起的相位变化进行补偿,以尽可能接近相位差不变。

#### (1) 幅值波动条件下的相位变化求解

电流幅值波动规律并不能用简单的解析式精确描述,但对于分析短时间内的电流信号,可以用指数函数逼近幅值变化。指数函数  $g(t)$  解析式为:

$$g(t) = e^{-at} \quad (6)$$

式中,  $a$  定义为幅值波动系数。结合式(3),实际电流的幅值归一化解析式  $f(t)$  为:

$$f(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi_0) e^{-at} \quad (7)$$

式中,当  $a < 0$  时,幅值增大;当  $a = 0$  时,幅值不变,等同于式(3);当  $a > 0$  时,幅值衰减。以下通过数值方法,求解  $f(t)$  的初相位  $\varphi_0$ 。

对式(7)进行傅里叶变换,得到频域函数  $F(\omega)$  为:

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} S(\omega) * G(\omega) \quad (8)$$

式中,  $S(\omega)$  和  $G(\omega)$  分别为  $s(t)$  和  $g(t)$  的傅里叶变换,其表达式为:

$$S(\omega) = \pi [e^{-j\varphi_0} \delta(\omega + \omega_0) + e^{j\varphi_0} \delta(\omega - \omega_0)] \quad (9)$$

$$G(\omega) = \frac{1}{a + j\omega} \quad (10)$$

式中,  $\delta(\omega + \omega_0)$  和  $\delta(\omega - \omega_0)$  为冲击函数。将式(9)和式(10)代入式(8),并取  $\omega = \omega_0$ , 可得:

$$F(\omega_0) = \frac{1}{2} \left( e^{-j\varphi_0} \frac{1}{a + j2\omega_0} + e^{j\varphi_0} \frac{1}{a} \right) \quad (11)$$

将欧拉公式代入式(11),可得:

$$F(\omega_0) = \frac{1}{2} \left( \frac{\cos\varphi_0 - j\sin\varphi_0}{a + j2\omega_0} + \frac{\cos\varphi_0 + j\sin\varphi_0}{a} \right) \quad (12)$$

将式(12)变形为复数的一般表达式:

$$F(\omega_0) = \frac{a^2 \cos\varphi_0 - a\omega_0 \sin\varphi_0 + 2\omega_0^2 \cos\varphi_0}{a^3 + 4a\omega_0^2} + j \frac{2\omega_0^2 \sin\varphi_0 - a\omega_0 \cos\varphi_0}{a^3 + 4a\omega_0^2} \quad (13)$$

由式(13)可以得出,信号的初始相位  $\theta_0$  为:

$$\theta_0 = \arctan \frac{2\omega_0^2 \sin\varphi_0 - a\omega_0 \cos\varphi_0}{a^2 \cos\varphi_0 - a\omega_0 \sin\varphi_0 + 2\omega_0^2 \cos\varphi_0} \quad (14)$$

从式(14)可知,幅值波动情况下,信号的初始相位不再等于  $\varphi_0$ , 它们之间的初相位差不仅与时间间隔有关,还与幅值波动系数有关。若能通过数学方法求解出  $\varphi_0$ , 则  $\varphi_0$  仍然是与幅值波动无关的。

假设对截取信号进行时域采样,采样值序列为  $\Delta\varphi'_1, \Delta\varphi'_2, \dots, \Delta\varphi'_{n-1}$ , 采样值的离散傅里叶变换为:

$$F(\omega) = X_p(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_p(n) e^{-j2\pi nk/N} \quad (15)$$

当  $\omega = \omega_0$  时,由式(15)得到的傅里叶变换值可以写为:

$$F(\omega_0) = A + jB \quad (16)$$

式中,  $A$  和  $B$  分别为复数的实部和虚部。比较式(13)和式(16),应有实部和虚部分别相等,即有式(17)成立:

$$\begin{cases} \frac{a^2 \cos\varphi_0 - a\omega_0 \sin\varphi_0 + 2\omega_0^2 \cos\varphi_0}{a(a^2 + 4\omega_0^2)} = A \\ \frac{2\omega_0^2 \sin\varphi_0 - a\omega_0 \cos\varphi_0}{a(a^2 + 4\omega_0^2)} = B \end{cases} \quad (17)$$

式(17)有2个未知数  $a$  和  $\varphi_0$ , 可以借助 Matlab 工具使用数值方法求解。

#### (2) 频率波动修正

实际测量结果表明,正常情况下,电网频率波动一般在 0.04Hz 以内<sup>[17]</sup>。由频率变化引起的相位变化  $\Delta\Phi$ , 可由式(18)近似计算:

$$\Delta\Phi = \Delta f \Delta T \quad (18)$$

式中,  $\Delta f$  为频率偏移量;  $\Delta T$  为时间间隔。由于电流负荷波动较大,在修正频率波动引起的相位变化时宜使用幅值稳定的电压信号。

#### (3) 实际条件下的相位差分布

因为幅值波动条件下求解的信号初相位是一个近似值,而且频率波动修正也是近似值,而且考虑到全光纤电流互感器的数字化采样触发具有随机性,所以实际条件下的相位差分布应该是一个在小范围随机波动的量。

为了验证这个猜想,在辽宁某 220kV 变电站进行了实测,测量间隔为 1s,测量总时长约 7h。原始测量数据如图 3 所示,统计分布如图 4 所示。从图 3 和图 4 可以看出,在实际运行条件下,用上述方法所得的相位差在  $\pm 1.5^\circ$  的范围内波动,且近似正态分布。

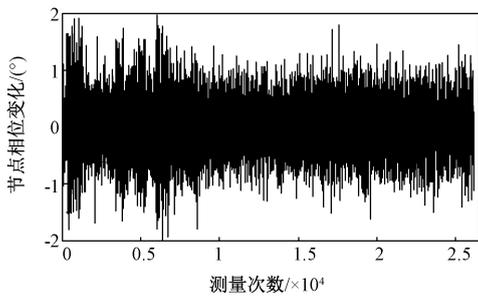


图3 原始测量数据

Fig.3 Original data

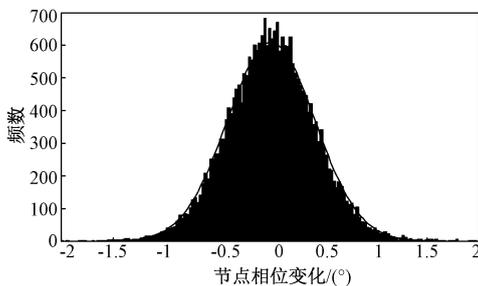


图4 原始测量数据的统计分布

Fig.4 Distribution of original data

### 3.3 故障诊断实施步骤

从3.2节分析可知,在正常情况下,等时间间隔截取信号的相位差应是平稳随机量,服从正太分布。因此,可以通过假设检验或者平稳性检验的方法判断是否有测量异常。假设检验针对单次测量结果,易产生错误判断结果,本文选择平稳性检验作为主要检测手段,具体实施步骤如下。

#### (1) 获取分析数据

由电子式互感器的输出数据,获取待分析的数据对象。如图1所示,等间隔截取信号采样数据,通过数值求解方法计算每段信号的初始相位,得到序列 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ ,再进行差分运算得到相位差序列 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \dots, \Delta\varphi_{n-1}$ 。

#### (2) 平稳性检验

对数据进行平稳性检验,其目的是判断电子式互感器相位测量状态是否有异常情况。记相位差数据 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \dots, \Delta\varphi_{n-1}$ 为 $\{X_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ),如果该序列的数字特征满足以下条件:①均值 $E(X_i)$ 是与 $i$ 无关常数;②方差 $Var(X_i)$ 是与 $i$ 无关的常数;③协方差 $Cov(X_i, X_{i+k})$ 是只与间隔 $k$ 有关,而与 $i$ 无关的常数;则该时间序列是平稳的,即 $\{X_i\}$ 由平稳随机过程生成。时间序列的平稳性可以通过样本自相关函数或序列统计特性检验,后者

比前者更准确,但更复杂,本文选择通过自相关函数的特性检验序列的平稳性。样本自相关函数为:

$$\gamma_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (19)$$

随着 $k$ 的增加,随机平稳序列的样本自相关函数数值迅速下降且趋近于0,而非平稳序列下降缓慢或者在0附近有较大震荡。

#### (3) 检测结论

若相位差序列不平稳,则全光纤电流互感器可能发生测量异常;若相位差序列平稳,则全光纤电流互感器测量状态应正常。故障诊断实施流程图如图5所示。

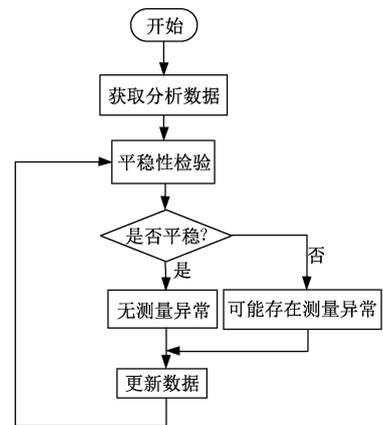


图5 自诊断实施步骤

Fig.5 Conducting steps of self-diagnosis

## 4 仿真实证

用数值仿真的方法对本文所提方法进行了仿真,仿真条件设置为:①电网频率随机波动为0.02Hz;②电流幅值波动系数 $|a| < 0.3$ ,即幅值每秒波动幅度不超过26%;③全光纤电流互感器的相位测量异常变化速度为 $1.2^\circ/\text{s}$ ;④截取信号采用滑动窗方法,滑动时间 $\Delta t$ 取采样时间间隔 $250\mu\text{s}$ 。

在上述条件下,可以生成3组全光纤电流互感器的仿真数据,如图6所示。前100组(序号为1~100)数据为正常随机波动,表示测量状态正常;中间100组(序号为101~200)数据逐渐递增,表示相位测量误差不断往正方向偏移;最后100组(序号为201~300)数据逐渐递减,表示电子式互感器相位测量误差不断往负向偏移。

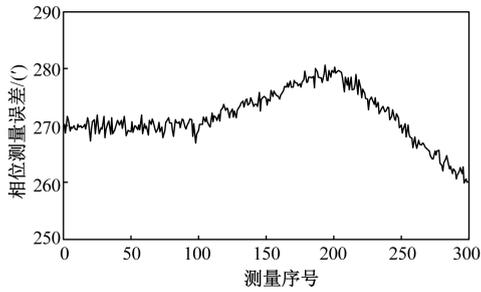


图6 仿真相位差序列

Fig.6 Set of simulation phase difference sequences

对3组数据分别进行平稳性检验,结果如图7~图9所示。图7中,样本自相关函数迅速归零,表明相位差序列是平稳随机的;图8和图9中,样本自相关函数归零十分缓慢,表明相位差序列是非平稳的。仿真结果与预期一致,说明当全光纤电流互感器发生测量异常时,相位差会变成非平稳序列。

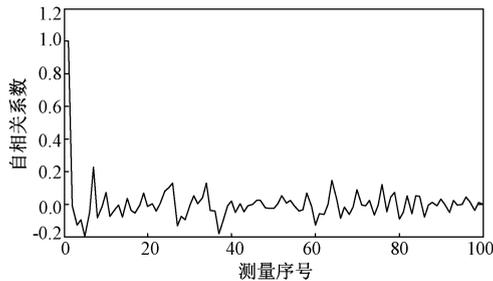


图7 前100组数据的自相关函数

Fig.7 Correlation function of first 100 sets of data

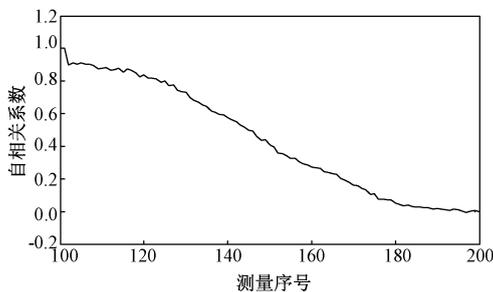


图8 中间100组数据的自相关函数

Fig.8 Correlation function of second 100 sets of data

## 5 实验测试及应用

为了进一步验证本文所提的方法,搭建了测试平台,主要包括磁场发生器、电场发生器、被试互感器、供电电压测量装置、互感器校验仪。其中,被试品为国内某主流厂家的组合式互感器,电流测量原理为全光纤,额定电流600A;磁场发生器采用大直

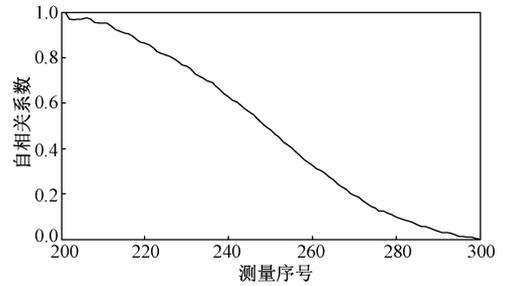


图9 后100组数据的自相关函数

Fig.9 Correlation function of last 100 sets of data

径亥姆霍兹线圈;电场发生器采用电极板。实验平台如图10所示。

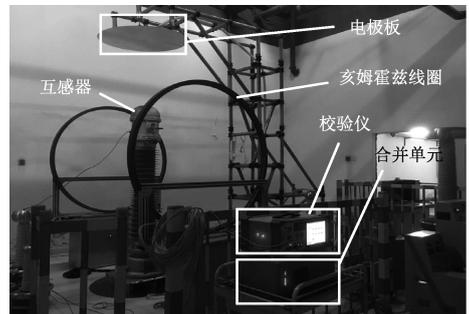


图10 实验平台

Fig.10 Testing platform

实验基本原理为:首先,互感器处于正常工作状态;然后,用电磁场发生装置产生强烈外部干扰,模拟全光纤电流互感器本身发生测量异常;通过互感器校验仪实时计算互感器的电流测量误差,并采用本文所提方法,实时评估互感器是否有测量异常;最后,验证本文所提的方法能否准确识别影响量施加时刻。为了获得最佳实验效果,需要寻找影响最显著的影响量施加方式。根据反复测试,当电场和磁场按图10中所示方向施加时,对互感器的电流测量误差影响最大。

实验在20%电流负荷点进行。开始时,互感器先正常运行;从 $T_1$ 时刻开始,控制升压器和升流器,交替产生不同强度的干扰电磁场,从而影响被试互感器的测量误差。采用本文所述的方法计算电流测量相位差,减小幅值变化和频率波动因素的影响,计算时间间隔取1s,截取部分实验数据如图11所示。

可以看出,在正常情况下,相位差序列在 $\pm 0.8^\circ$ 范围内波动;从 $T_1$ 时刻开始,施加误差干扰量后,相位差序列波动范围增加了一倍多,表明全光纤电流互感器的测量相位误差出现异常,通过平稳性检验可得出一致结论。

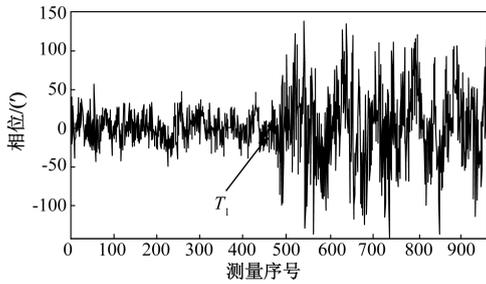


图 11 电流相位差序列

Fig.11 Sequence of current phase errors

基于该方法的全光纤电流互感器故障预警系统,已经在辽宁某智能变电站安装试运行,同时监测站内9台全光纤电流互感器。截至目前,成功预警了一起早期故障。经现场排查,原因是光纤熔接点发生松动。

## 6 结论

本文对全光纤电流互感器早期故障诊断方法开展了研究,具体针对表现为测量异常的早期故障诊断。本文的核心思想是获得一个在理论上不变的参考值,通过比较实际观测值与参考值的差异,判断是否有测量异常。与现有方法相比,本文所提的方法有两个主要特点:①依据电网运行的客观规律构建理论参考值,进一步降低了对经验和模型的依赖,因此可以获得准确度更高的参考值;②该方法仅依据全光纤电流互感器的输出值,无需加装任何传感器,实施简单,所以有良好的实际应用价值。

本文也有不足之处,一是当故障仅表现为幅值测量异常时,本方法无能为力;二是当电网频率和电流幅值剧烈波动时,准确度会显著下降。后续可研究如何利用全站互感器的测量信息,进一步减小参考标准值序列的方差,以获得更高的测量异常识别准确度。

## 参考文献 (References):

[1] 郭少朋, 韩立, 徐鲁宁, 等 (Guo Shaopeng, Han Li, Xu Luning, et al.). 光纤传感器在局部放电检测中的研究进展综述 (Review of research on fiber optic sensors for partial discharge detection) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy), 2016, 35 (3): 47-53.

[2] 王红星, 张国庆, 郭志忠, 等 (Wang Hongxing, Zhang Guoqing, Guo Zhizhong, et al.). 电子式互感器及其在数字化变电站中应用 (Electronic transformer

and its application in digital substations) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2009, 29 (9): 115-120.

- [3] 张斌 (Zhang Bin). 电子式互感器应用对继电保护影响的研究 (Study on the influence of electronic transformer application on relay protection) [D]. 天津: 天津大学 (Tianjin: Tianjin University), 2010.
- [4] 李春茂, 周妹末, 袁海满, 等 (Li Chunmao, Zhou Momo, Yuan Haiman, et al.). 基于 DGA 的粗糙集与决策信息融合变压器故障诊断 (Fault diagnosis of transformer based on rough set theory) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy), 2018, 37 (1): 84-90.
- [5] 陈沛龙, 刘君, 马晓红, 等 (Chen Peilong, Liu Jun, Ma Xiaohong, et al.). 基于振动信号统计特性的变压器绕组状态监测 (Condition monitoring of transformer windings based on statistics feature of vibration signal) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering & Energy), 2018, 37 (9): 74-80.
- [6] 刘彬, 叶国雄, 郭克勤, 等 (Liu Bin, Ye Guoxiong, Guo Keqin, et al.). 电子式互感器性能检测及问题分析 (Quality test and problem analysis of electronic transformer) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2012, 38 (11): 2972-2980.
- [7] 范洁, 程含渺, 季欣荣, 等 (Fan Jie, Cheng Hanmiao, Ji Xinrong, et al.). 基于时间数字转换器的数字输出电子式互感器校验系统 (TDC-based calibration system of electronic transformer with digital output) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2014, 34 (10): 164-168.
- [8] Djokic B, So E. Calibration system for electronic instrument transformers with digital output [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2005, 54 (2): 479-482.
- [9] 李振华, 李红斌, 张秋雁, 等 (Li Zhenhua, Li Hongbin, Zhang Qiuyan, et al.). 一种高压电子式电流互感器在线校验系统 (Electronic transformer and its application in digital substations) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 29 (7): 229-237.
- [10] 童悦, 李红斌, 张明明, 等 (Tong Yue, Li Hongbin, Zhang Mingming, et al.). 一种全数字化高压电流互感器在线校验系统 (An all-digital on-line calibration system for high voltage current transformer) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2010, 25 (8): 59-64.
- [11] 杨雪东 (Yang Xuedong). 基于小波-分形理论电子式互感器故障诊断方法研究 (Research on fault diagnosis method of electronic transformer based on wavelet

- fractal theory) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2012.
- [12] 熊小伏, 杨雪东, 刘年 (Xiong Xiaofu, Yang Xuedong, Liu Nian). 基于站间信息的电子式互感器故障协同诊断方法 (A collaborative diagnosis method of electronic transformer fault based on the inter-substation information) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (21): 80-83.
- [13] 熊小伏, 何宁, 于军, 等 (Xiong Xiaofu, He Ning, Yu Jun, et al.). 基于小波变换的数字化变电站电子式互感器突变性故障诊断方法 (Diagnosis of abrupt-changing fault of electronic instrument transformer in digital substation based on wavelet transform) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2010, 34 (7): 181-185.
- [14] 罗超 (Luo Chao). 电子互感器运行故障诊断系统研究 (Research on fault diagnosis system of electronic instrument transformer) [D]. 武汉: 湖北工业大学 (Wuhan: Hubei University of Technology), 2013.
- [15] 王涛, 张宁, 刘琳, 等 (Wang Tao, Zhang Ning, Liu Lin, et al.). 有源电子式互感器故障诊断技术的研究与应用 (Research and application of electronic transformer fault diagnosis) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (18): 74-79.
- [16] 王洪彬, 唐昆明, 徐瑞林, 等 (Wang Hongbin, Tang Kunming, Xu Ruilin, et al.). 数字化变电站电子式互感器渐变故障诊断方法研究 (Diagnosis of soft fault of electronic transformer in digital substation) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (24): 53-58.
- [17] 熊卫斌, 李鹏, 张昆, 等 (Xiong Weibin, Li Peng, Zhang Kun, et al.). 南方电网频率演变机制与改善分钟级波动的探索 (Mechanism of frequency evolution of china southern power grid and exploration on improving minute level fluctuation) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2012, 36 (9): 244-249.

## Research on early fault diagnosis method for all optical fiber current transformers

LIU Zhan-yuan<sup>1</sup>, NIU Xiao-chen<sup>1</sup>, SU Hong<sup>2</sup>, CHEN Mian-zhou<sup>3</sup>, CHENG Han-miao<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology,

Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. Panjin Power Supply Company, Sate Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Panjin 124010, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan 430074, China; 4. State Grid Jiangsu Electric Power Company Ltd. Research Institute,

Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Some faults of optical fiber current transformers will be shown in the form of phase anomaly in the early stage. From the view of abnormal measurement detection, an early fault diagnosis method of fiber optical current transformer based on the invariance principle of phase difference has been proposed in this paper. The concept of the phase difference invariance principle is first introduced, which is to intercept signals at equal time intervals under the condition of relatively stable frequency of the power grid, and a phase difference only related to the time interval can be solved by numerical analysis. By using the phase difference as the comparison standard, by analyzing the change of the actual phase difference, it can judge whether the phase measurement anomaly occurs in the electronic transformer and provides the auxiliary criterion for the early fault diagnosis. To verify the feasibility of the proposed method, a lab verification test is carried out. And the test result indicates that the proposed method can identify the measurement anomaly once the abnormal measurement occurs due to the external interferences. Based on the method, the developed fault warning system for all optical fiber current transformers has been put into operation in an intelligent substation in Liaoning Province.

**Key words:** optical fiber current transformer; fault diagnosis; phase measurement; invariance of phase difference; numerical solution