

# 光学电流互感器实时误差比对分析系统的设计与实现

陈铭明<sup>1</sup>，卢树峰<sup>1</sup>，包玉树<sup>2</sup>，梁 凯<sup>3</sup>，王少华<sup>1</sup>

(1.江苏省电力公司电力科学研究院，江苏 南京 211103；

2.江苏方天电力技术有限公司，江苏 南京 211102；3.无锡供电公司，江苏 无锡 214101)

**摘 要：**伴随智能电网建设的深化推进，国网公司部署在多个省份开展智能化变电站的建设工作，江苏省在220kV 无锡西泾变首次应用光学电流互感器，提高了全站智能化水平，对智能变电站的建设起到了引领和示范作用。光学电流互感器投运后的误差是否会随着运行时间的变化而大幅度变化？特别是在实际运行时各种电磁干扰环境下光学电流互感器还能否稳定运行、误差是否始终合格？此类问题迄今尚没有相关实践数据，因此对光学电流互感器现场运行误差特性进行在线实时比对分析对于全面研究光学电流互感器误差特性、光学电流互感器贸易结算性能评估和智能变电站计量装置配置方案优化均有重要意义。本文首先介绍了光学电流互感器的基本原理和存在问题，然后介绍了误差比对装置的硬件构成和算法设计，最后通过西泾变现场安装、运行验证比对分析系统的可行性。

**关键词：**光学电流互感器；误差；比对系统；计量

## 0 引言

随着智能电网建设的深化推进，国网公司部署在多个省份开展智能化变电站的建设工作，光学电流互感器得到广泛应用，对智能变电站的建设起到了引领和示范作用。各工程、科研相关机构对光学电流互感器投运后的误差运行状况密切关注，开展现场运行误差特性研究、为国网公司提供一线技术支持势在必行。

为了保证光学电流互感器的现场误差良好，在出厂前必须在规程规定的一次电流和二次负载下对光学电流互感器做误差测试，运抵现场安装后再对光学电流互感器做现场误差测试，消除安装环节、现场环境对误差的影响。但在现有的技术条件下，光学电流互感器投运后，对其误差特性缺少跟踪分析能力，导致对光学电流互感器长期运行下的计量特性无法做出准确的评估。相应评价目前尚属空白。

光学电流互感器在出厂前要经过误差测试，合格方允许供货。但由于光学电流互感器对温度、振动均敏感，在经过现场安装后再复测误差往往不再合格。特别是对于光学电流互感器与合并器供货商不同的情况，光学电流互感器在出厂前的误差测试是机遇互感器本体，但现场安装后数字信号是基于合并器送出的数据集，即使互感器本体误差合格，经过合并器环节的数据处理、延时设定等环节后误

差有不同程度的漂移。根据现场运行和计量测试的需要，对光学电流互感器的现场测试必须带合并器一同测试，实际测试数据表明，光学电流互感器现场组装完毕带合并器测试绝大部分甚至全部超差，需要现场调校，然后复测方能在20%以上额定一次电流合格，对于轻载特别是5%额定一次电流以下时，误差漂移、瞬变严重，甚至无法读取合理的数据。光学电流互感器投运后的误差是否会随着运行时间的变化而大幅度变化？特别是在实际运行时各种电磁干扰环境下光学电流互感器还能否稳定运行、误差是否始终合格？此类问题迄今尚没有相关实践数据，因此对光学电流互感器现场运行误差特性进行在线实时比对分析对于全面研究光学电流互感器误差特性、光学电流互感器贸易结算性能评估和智能变电站计量装置配置方案优化均有重要意义。当前，电子式互感器因其在绝缘、通信传输、数据综合处理等方面的优势引起科研界与工程界的高度重视和广泛关注。

误差比对分析装置由采样单元、同步单元、运算单元和传输单元组成，利用现场运行误差实时比对，实现光学电流互感器的现场运行误差数据存储及远程分析，为光学电流互感器的运行误差分析提供数据依据，实现光学电流互感器的实时监测现场运行误差，适用于同时具备光学和电磁式电流互感器的智能变电站。

本文首先介绍了光学电流互感器的基本原理和存在问题，然后介绍了误差比对装置的硬件构成和算法设计，最后通过西泾变现场安装、运行验证比对分析系统的可行性。

## 1 光学电流互感器基本原理

常见的光学电流互感器的工作原理主要为法拉第(Faraday)效应、逆压电效应和磁致伸缩效应。其中以 Faraday 效应为其工作原理的 F 光学电流互感器常采用偏振检测方法或利用 Faraday 效应的非互易性采用 Sagnac 干涉仪实现检测。

光纤内存在的线性双折射对于温度与振动等环境因素变化十分敏感，是 F 光学电流互感器实用化过程中需要解决的关键问题。为此，先后提出了“高圆双折射光纤”、“旋制光纤(Spun HiBi Fiber)”，“扭转光纤(Twisted Fiber)”，“退火光纤”，“几何结构分离线性双折射”、“相向传输”、“扭转加退火”等 10 余种方案。

由于 Faraday 效应具有非互易性。而光纤中的线性双折射具有互易性，二者之间这种差别使得采用 Sagnac 干涉仪实现电流传感成为很有吸引力的方案。Sagnac 干涉仪型 F 光学电流互感器又可分为环形结构和反射结构两种，其原理图如图 1、图 2 所示。

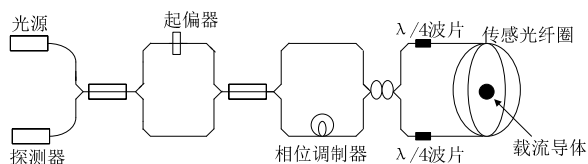


图1 Sagnac环形结构的F光学电流互感器原理图

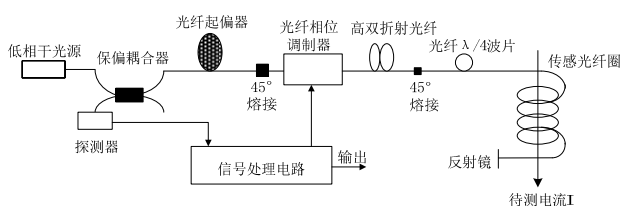


图2 Sagnac反射结构的F光学电流互感器原理图

其中，反射结构的光纤电流互感器具有优良的互易性和较强的抗外界环境干扰能力，是一个具有实用价值的光学电流互感器方案。

## 2 光学电流互感器存在问题

根据光学电流互感器的设计与制造工艺，电流互感器的影响主要表现在置于户外的传感头的精度

上。根据实际情况可分为下面两个温度源的影响：一是缓慢变化的空间上均匀分布的环境温度；二是变化复杂的空间上分布不均匀的温度。在均匀温度场中，传感头中传播的光路径会因此发生变化，进而使得光功率变化。对于这种影响可采用适当的数据处理方法来应对。在非均匀温度场中，光学器件之间发生非均匀的热膨胀，从而使之产生内应力，引起附加温度应力双折射，直接影响线偏振光的偏转角，导致难以消除的测量误差。

光学电流互感器实现的最大困难是其本身的光学系统折射效应会随环境因素变化而变化，从而影响整个系统的精度和稳定性。其根本原因在于光纤的线性双折射效应对测量结果的影响：降低系统灵敏度、可靠性和稳定性，使测量结果与被测电流在光路内的位置有关等。

归结 F 光学电流互感器在应用中应关注的问题如下：

(1) 使用寿命：寿命不仅和设计有关，和材料元器件选择，生产过程的工艺和质量控制也密切相关；

(2) 温度的影响：温度变化对光源、光纤光路、敏感环等带来影响；

(3) 长期运行稳定性：热老化、热循环、温度湿度循环、振动、热冲击、干热、湿热等；

(4) 小电流信号下的测量准确度：由于光学电流互感器通过光学检测来获取信号，其中必定含有光学散粒噪声，光学传感器的输出都会有噪声，其衡量指标与使用信号的宽带有关。所以测试零电流也会有输出，即噪声，不过该噪声的均值为零。目前可测到 1A 的电流。

## 3 误差比对系统的工作原理与结构

误差比对系统由采样单元、同步单元、运算单元和传输单元组成。采样单元，用于光学电流互感器一次电流信号及电磁式电流互感器二次电流信号的采样；同步单元，用于采集到的光学电流互感器一次电流信号及电磁式电流互感器二次电流信号同步；运算单元，用于计算光学电流互感器的一次电流信号和电磁式电流互感器的二次电流信号有效值、相位及频率，并进行实时角差和比差计算，得到实时比对误差数据；传输单元，用于将得到的实时误差数据与后台服务器进行数据交互；

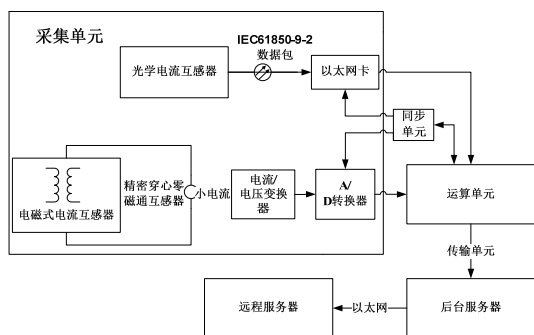


图3 光学电流互感器误差在线比对装置结构图

如图3所示，采样单元包括精密穿心零磁通互感器，用于将电磁式电流互感器5A的二次电流转换成10mA小电流信号；电流/电压变换器，用于小电流信号进行放大，转换成电压信号；A/D转换器采用24位的高精A/D转换器，并以4k的频率对电流/电压变换器输出的电压信号进行采样转换成数字信号，供运算单元处理；以太网卡，用于光学电流互感器接收IEC61850-9-2数据包，并传输给运算单元处理，所述精密穿心零磁通互感器的输入端与电磁式电流互感器的输出端相连接，所述精密穿心零磁通互感器的输出端通过电流/电压变换器与A/D转换器的输入端相连接，所述A/D转换器的输出端与运算单元相连接，所述以太网卡的输入端与光学电流互感器的输出端相连接，所述以太网卡的输出端与运算单元相连接，所述以太网卡与A/D转换器设有同步单元。

同步单元在以太网卡接收IEC61850-9-2数据包的同时记录IEC61850-9-2数据包中0号包所对应的时标信息，并输入给运算单元，运算单元控制A/D转换器的采集频率，实现同步采集，运算单元还通过时标信息和A/D转换器的固有延迟时间进行同步的相位补偿。

运算单元采用DSP处理器进行快速运算，将电磁式电流互感器的二次电流的采样值进行快速傅里叶变换，计算出有效值、相位及频率，然后根据IEC61850-9-2数据包中0号包所对应的时标信息和24Bit AD的固有延迟时间，补偿相位，获得光学电流互感器与电磁式电流互感器的实时比对数据。

传输单元采用ARM处理器，将实时误差数据通过以太网与后台服务器进行数据交互。

系统的硬件框图如图4所示。

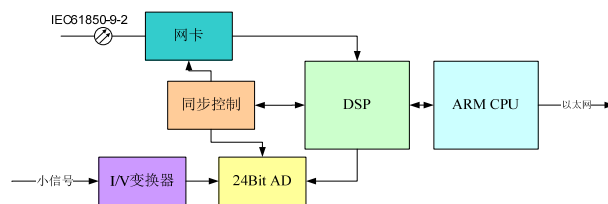


图4 比对系统硬件框图

## 4 比对算法

在线比对算法包括同步算法、误差比对算法和存储传输策略，其中同步是将光学电流互感器和电磁式电流互感器的电流信号进行同步控制，并传输给后续单元以便进行误差比对计算；误差比对是指通过数据处理单元模块进行幅值、频率、相位计算，并将两者进行比对得到实时比对误差；存储和传输策略是指大量比对误差数据本地存储和远程传输的控制策略。

## 5 现场安装实施

为了保证挂网设备和电网设备的安全运行，现场安装设计方案采用传统电流互感器二次电流经精密电流互感器穿心两匝的方式获取二次模拟量电流信号的方式，保证长期挂网运行的安全性，原理图如图，为了验证电流环方式的准确性，比对装置的电流接口配置两套接插件，一套电流环式，一套回路接入式，在条件允许的情况下用短时间回路接入式的误差数据对电流环接入式的误差进行校核。

## 6 结论

随着智能电网建设的深化推进，国网公司部署在多个省份开展智能化变电站的建设工作，光学电流互感器得到广泛运用。但光学电流互感器投运后的误差是否受时间、温度、振动等影响迄今尚没有相关实践数据积累，缺少相应的误差特性研究。

为此，光学电流互感器实时误差比对分析系统的利用现场运行误差实时比，适用于同时具备光学和电磁式电流互感器的智能变电站，实现光学电流互感器的现场运行误差数据存储及远程分析，为光学电流互感器的运行误差分析提供数据依据，实现光学电流互感器的实时监测现场运行误差，保证智能化变电站的电能量计的准确性和可靠性。

### 参考文献：

[1] 王政平,康崇,张雪原,等. 全光纤光学电流互感器研究进

- 展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(3): 36-39.
- [2] 刘延冰, 李红斌, 叶国雄,等. 电子式互感器原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 王巍, 张志鑫, 杨仪松. 全光纤式光学电流互感器技术及工程应用[J]. 供电用, 2009, 26(1): 46-48.
- [4] 肖浩, 刘博阳, 湾世伟, 等. 全光纤电流互感器的温度误差补偿技术[J]. 电力系统自动化, 2007, 35(21): 92-94.
- [5] 王夏霄,张春熹,张朝阳,等. 光纤电流互感器  $\lambda/4$ 波片温度特性及其影响研究[J].激光与红外, 2006, 36(7): 597-599.
- [6] 贾恺, 姚寿铨. 光纤  $\lambda/4$ 波片的温度特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2009, 15(5): 457-460.
- [7] Williams P A, Rose A H, Day G W, et al. Temperature dependence of the verdet constant in several diamagnetic glasses[J]. Appl Opt, 1991, 30(4): 1176-1178.
- [8] 陈文中, 林一, 周健. 数字化变电站全光纤电流互感器准确度校验[J]. 华东电力, 2009, 37(12): 2022-2024.
- [9] SMMONED, ROSEAH, FITZPATRICKGJ. Calibration of an Optical Current Transducer[C]. Proceeding of the International Symposium on High Voltage Engineering'93, Yokohama, Japan, 1993.
- [10] 刘晔,王采堂,苏彦民.光学电流互感器线性双折射效应的补偿研究——神经网络方法[J].光纤与电缆及其应用技术, 1999(5):25-27.
- [11] 童悦.数字化输出的电子式电流互感器在线校验系统研制[J]. 高电压技术, 2010, 36(7):1742-1746.
- [12] 王立辉,伍雪峰,孙健,等. 光纤电流互感器噪声特征及建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(1):62-66.

#### 作者简介:

陈铭明 (1986—), 男, 江苏南通人, 工程师, 从事计量装置管理和研究工作, E-mail: rd1228@163.com。