

# 全光纤电流互感器可靠性诊断技术研究

介绍了目前主要的两类电子式电流互感器，即全光纤和空心线圈式的故障特点，分析对比了两类电流互感器的故障诊断设计方法，并对全光纤电流互感器的自诊断功能进行了测试，给出测试结果。分析和试验证明，全光纤电流互感器采用闭环控制系统，能够对互感器的光路、电路故障进行完善的自诊断，对电路电子误差漂移进行抑制，与传统的空心线圈式电流互感器相比，具有更可靠、更完善的可靠性诊断能力，符合智能电网信息化、自动化和互动化的要求，其应用对于大力推进超高压、特高压智能电网建设有着重要意义。

徐长宝 高吉普 鲁彩江/贵州电网有限责任公司电力科学研究院  
刘东伟 李永兵/易能乾元(北京)电力科技有限公司

## 0 引言

国家电网公司规划建设“以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展为基础，具有信息化、自动化和互动化特征的智能电网”。在智能电网的体系中，智能变电站是智能电网的基础和重要环节，为智能电网稳定运行以及柔性调度提供精准的数据和可靠的服务，而电子式互感器又是智能变电站的关键核心设备<sup>[1]</sup>。与传统互感器相比，电子式互感器具有绝缘简单、无谐振和磁饱和问题、无二次短路或开路危险、测量准确度高以及动态范围大等优点<sup>[2]</sup>，是建设统一坚强智能电网的基础设备，其可靠性与安全性也直接影响到电网的可靠与安全运行。

智能电网对互感器等一次设备在安全性、准确性及智能化等方面提出了更高要求。目前主要采取数字滤波的方式对电子式互感器的数据有效性进行诊断<sup>[3]</sup>，其有效性与实时性较差，不能完全满足电网准确快速继电保护的需求。目前应用的电子式电流互感器主要包括

罗氏(Rogowski)线圈式与全光纤式两种。罗氏线圈电子式电流互感器由于其传感原理及有源式结构，存在抗干扰能力差、易产生故障数据等问题。全光纤电流互感器(Fiber Optic Current Transformer, FOCT)是一种基于法拉第磁光效应的新型传感器，克服了其他电子式互感器所存在的问题，是国际上公认的电流互感器技术发展方向<sup>[4]</sup>。全光纤电流互感器采用闭环控制技术，在此基础上能够实现闭环环路中各环节的故障自诊断。

本文分析了典型电子式互感器的故障原因，对比了两种互感器故障特点及故障诊断设计方法，最后对全光纤电流互感器自诊断功能进行了试验验证。

## 1 电子式电流互感器故障特点分析

电子式电流互感器在受到外界干扰等异常状况下会输出故障数据，如果互感器自身无法及时诊断出该数据故障并置数据无效位，将可能引起后端继电保护系统的误动作。由于电子式互感器基于现代电子及通信技术的特点，分析其产生故障数据的主要原因如下。

1) 外界电磁干扰。主要指来自一次侧高压电场或磁场的串扰与耦合，及来自二次侧转换电路电源的各种浪涌或脉冲群干扰<sup>[5]</sup>。

2) 信号处理电路元器件的性能下降或失效。电子式互感器采用了现代数据采样转换及光通信技术，光电子器件的性能下降或失效将导致电子式互感器的故障输出。



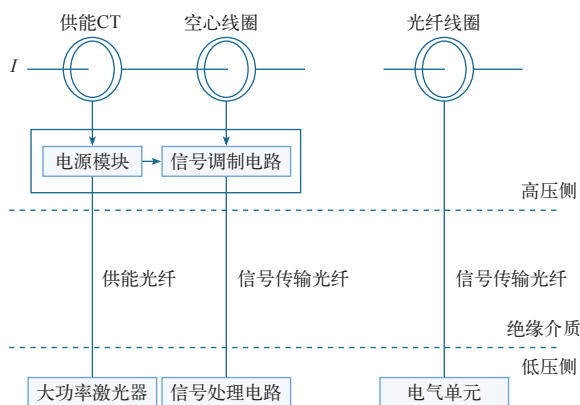
徐长宝/高级工程师

### 关键词/Keywords

空心线圈互感器·  
全光纤电流互感器·  
自诊断·  
闭环控制·

## 1.1 空心线圈电子式电流互感器故障特点分析

空心线圈电子式互感器基于法拉第电磁感应原理，其原理如图1a所示，由空心线圈、供能CT、高压侧信号调制电路（又称采集器或远端模块）、高压侧电源模块、绝缘子、低压侧大功率激光器和低压侧信号处理电路等组成。基本原理是：以空心线圈为电流传感单元，信号调制电路将高压侧含有被测电流信息的电压信号转换成数字信号，变换成光信号后通过信号传输光纤以光脉冲的形式传输至低压侧的信号处理电路。高压侧的供能方法一般是采取复合供能方式：一次电流较大时，采用高压侧辅助CT给高压侧的调制电路供电，一次电流较小时，切换为激光供能<sup>[6]</sup>。



(a) 空心线圈电子式电流互感器 (b) 全光纤电子式电流互感器

图1 电子式电流互感器组成

根据空心线圈电子式电流互感器特点，分析其故障特点如下。

1) 高压侧电磁场干扰。干扰通过空心线圈直接送至信号调制电路，从而导致互感器的输出数据异常。

2) 高压侧放电直接破坏信号调制电路。由于信号调制电路直接置于高压侧，和空心线圈直接导线连接，高压放电会通过空心线圈直接窜入信号调制电路，从而导致电路损坏；这种破坏还无法通过屏蔽回避，因为必须要为信号留出通路。即有用和有害信号都是电信号，都会通过通路加到信号调制电路上。

3) 电子器件的失效或性能下降造成的数据

失真。互感器信号调制电路中的关键电子器件，如AD采集器可能存在失效或由基准参考源变化而引起的准确度下降等问题，由于互感器为开环数据采集方式，无法甄别采样数据是否反映真实电流，只能误报。上述现象在现场运行中经常出现。其中双AD措施降低了以上故障出现的几率。分析可知，空心线圈电子式电流互感器由于其敏感原理及工作方式的原因，存在抗干扰能力差、自诊断功能不完善等问题。

## 1.2 全光纤电流互感器故障特点分析

法拉第磁光效应于1845年由法拉第发现。当线偏振光在光纤环圈中传播时，穿过环圈的电流所产生的磁场将对光偏振角度产生影响，通过检测光偏振角度的变化可获知电流大小。法拉第磁光效应为实现对高压电流量的无接触测量提供了可能。全光纤电流互感器工作原理如图2所示，光源发出的连续光经过耦合器到达偏振器后被转化为线偏振光，以 $45^\circ$ 进入相位调制器分解为两束正交的线偏振光，沿光纤的两个轴（X轴、Y轴）传播。在相位调制器上施加合适的调制算法，两束正交的线偏振光的相位会发生预期的改变，两束受到调制的光波进入了光纤线圈，在电流产生的磁场作用下，两束光波之间产生正比于载体电流的相位角。经反射镜反射后两束光波返回到相位调制器，到达偏振器后发生干涉，干涉光信号经过耦合器进入光电探测器，探测器输出的电压信号被信号处理电路接收并运算，运算结果通过数字接口输出。当一次母线没有电流时，两束光信号的相位差为零，信号处理电路输出也为零；当有电流通过时，两束光信号存在一个相位差，通过对相位差进行解调，得到被测电流的数字值并输出<sup>[7-9]</sup>。

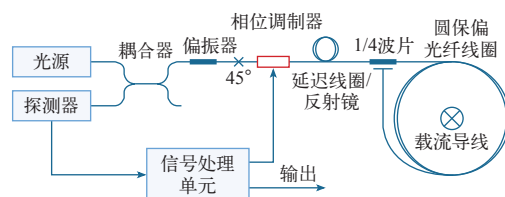


图2 全光纤电流互感器工作原理图

由于全光纤电流互感器为无源式互感器，通过光纤下传的光信号只携带被测电流信息，所以一次侧的任何干扰和放电均不会对互感器输出产生影响，对电气单元的安全也没有任何影响，即上述空心线圈的故障模式被全光纤电流互感器克服。其故障模式主要为互感器光学或电子元器件的失效所引起的互感器故障，所以只要能实现在线实时自诊断就能提高可靠性。

## 2 电子式电流互感器的自诊断设计

### 2.1 空心线圈电子式电流互感器故障诊断设计

空心线圈电子式电流互感器易受到干扰而产生故障数据输出，为了降低故障数据产生几率，现在220 kV及以上电压等级继电保护系统普遍采用配置两个保护用传感元件，每个传感元件由两路独立的采样系统进行采集（双AD系统），两路采样系统的数据通过同一通道输出至合并单元（MU），如图3所示<sup>[10]</sup>。继电保护系统通过对四路采样数据的比较判断，实现对互感器故障数据诊断的目的。

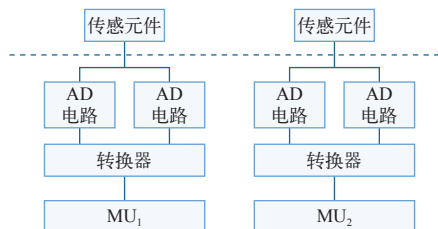


图3 空心线圈电子式电流互感器双AD系统配置

由分析可知，双套互感器系统可以有效降低保护误动作几率，而单套互感器中的双AD采样不能完全避免电磁场干扰等所引起的故障，且可能由于采样数据不一致导致保护系统频繁自锁。

### 2.2 全光纤电流互感器自诊断设计

全光纤电流互感器的故障主要以器件或部组件的失效为主，可分为三部分，包括光路故障、CPU故障以及采集电路故障。其中，光路故障包括光纤断裂、光学元器件损坏造成的无光或者光功率衰减；采集电路故障包括AD、DA芯片损坏与误差漂移，如表1所示。以上故障模式涉及元器件如

图4所示。在全光纤电流互感器上设计了在线实时自诊断系统，这些故障均可以通过闭环检测进行有效诊断，从而能够及时向后端发送故障报警信号，避免由于互感器本身故障造成的保护误动。

表1 全光纤电流互感器故障分析

| 序号 | 组件   | 故障模式      |
|----|------|-----------|
| 1  | 光路   | 无光        |
|    |      | 光功率衰减     |
| 2  | CPU  | 无输出       |
| 3  | 采集电路 | AD、DA损坏   |
|    |      | AD、DA电子漂移 |

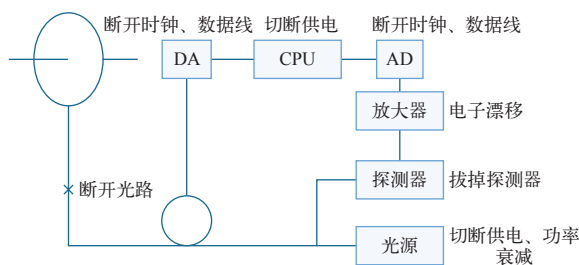


图4 全光纤电流互感器自诊断功能测试故障点

## 3 全光纤电流互感器自诊断功能测试

为了检验全光纤电流互感器的故障自诊断能力，依据表1对互感器各项故障模式进行有效性测试。在分别施加图4所述的各种故障模式时，记录互感器输出情况并观察MU的状态指示灯，或通过校验仪计算互感器误差，测试结果如下。

### 3.1 光路故障

#### (1) 无光

将光路中的任意一段光纤人为折断，输出数据帧中品质位被置位（表示数据不可用），同时MU报警灯亮；切断光源供电，输出品质位被置位，同时MU报警灯亮。

#### (2) 光衰减

逐渐降低光源驱动电流（光信号减弱），输出数据误差变化不大，最大误差低于0.5%；直到光源功率降低至正常值的30%时，输出品质位被置位，MU报警灯亮。

### 3.2 CPU故障

将CPU电路供电电源断开，互感器无输出数

据, MU报警灯亮。

### 3.3 采集电路故障

#### (1) AD和DA芯片出现故障

将AD或者DA芯片的时钟信号(CLK)端断开后, 输出品质位被置位, MU报警灯亮。将AD或者DA芯片的低位管脚断开, 输出数据变化小于0.5%; 将AD或者DA芯片的高位管脚断开, 输出品质位被置位, MU报警灯亮。

#### (2) AD模拟电路的电子漂移

产品闭环正常工作时对电子漂移有很好的抑制效果。分别将互感器设置为开环工作方式和闭环工作方式, 如图5所示, 调节放大器的放大倍数, 观察校验仪的测量误差变化, 具体测试数据如表2所示。结果表明, 开环工作的输出误差随模拟电子漂移的变化而线性改变, 而闭环工作模式对电子漂移有很好的抑制效果。如果闭环失效或漂移过大, 输出品质位被置位, MU报警灯亮。

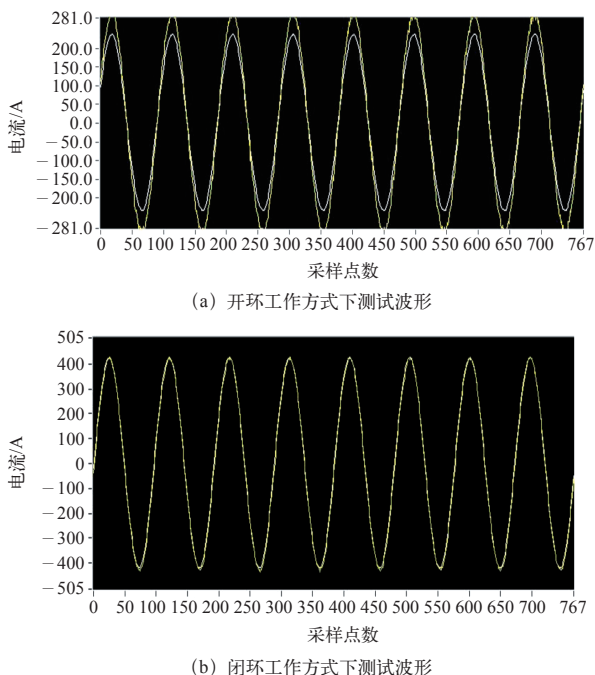


图5 全光纤电流互感器在开环和闭环工作方式下的电子漂移试验波形图

表2 电子漂移误差试验结果

| 模拟放大倍数 | 开环方式误差(%) | 闭环方式误差(%) |
|--------|-----------|-----------|
| 1      | -0.14     | 0.14      |
| 1.25   | 23.96     | 0.50      |
| 0.75   | -24.28    | -0.02     |

## 4 结束语

基于电磁感应的空心线圈电子式电流互感器的工作原理与特点, 采取的双AD采样配置一定程度上减小了误输出概率, 但同时也增加了继电保护拒动的概率, 无法实现完善的故障自诊断功能。

基于磁光效应的全光纤电流互感器是一种无源式互感器, 抗干扰能力强。采用闭环控制系统, 能够对互感器的光路、电路故障进行可靠自诊断, 并大大减小电路电子误差漂移的影响, 是符合智能电网“三化”特征的理想互感器设备。

### 参考文献

- [1] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.
- [2] 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]. 供用电, 2009, 26(1): 45-48.
- [3] 字美荣, 熊小伏. 数字化变电站保护自动化设备自诊断系统的研究与开发 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(增刊): 196-199.
- [4] 曹建. 全光纤电流互感器在GIS中的应用 [J]. 电工电气, 2012(2): 45-47.
- [5] 熊小伏, 何宁, 于军. 等. 于小波变换的数字化变电站电子式互感器突发性故障诊断方法 [J]. 电网技术, 2010, 34(7): 181-185.
- [6] 刘延冰. 电子式互感器原理、技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] 王夏霄, 张春熹, 张朝阳, 等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 77-80.
- [8] 裴焕斗, 祖静, 陈鸿. 全光纤电流互感器研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(4): 34-38.
- [9] 李传生, 张春熹, 王夏霄, 等. 反射式Sagnac型光纤电流互感器的关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 104-108.
- [10] Q/GDW 441—2010 智能变电站继电保护技术规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

(收稿日期: 2016-02-05) EA