[互感器]

高压开关设备用光纤电流互感器抗干扰技术研究

文/平高集团有限公司　张一茗　宋亚凯　李少华　张文涛　高群伟

光纤电流互感器与传统电流互感器相比有着诸多优点，是业内公认的未来电流互感器的重要发展方向，然而，光纤电流互感器在与高压开关设备配套使用过程中，受其自身工作原理及工作环境因素的限制，面临许多干扰因素，对其正常工作造成一定的影响。从光纤电流互感器自身工作原理入手，结合高压开关设备特殊的工作环境，从影响光纤电流互感器正常工作因素进行深入分析，提出抗干扰措施。有效解决光纤电流互感器与高压开关设备集成过程中的干扰问题。

随着电力系统电压等级的升高以及系统容量的提升，对电流互感器的性能提出了更高的要求。首先，系统电压的升高，使电磁式电流互感器绝缘结构更复杂、体积更大且造价更高；其次，随着系统容量的增大，电磁式电流互感器磁饱和、铁磁谐振等问题也更加突出。

与电磁式电流互感器相比光纤电流互感的具有结构紧凑、体积小、无磁饱和及频带响应宽等优点，符合电流互感器的发展趋势和要求。

工程中，电流互感器常与高压开关设备配合使用。智能高压开关设备将光纤电流互感器作为一种组件集成于开关设备本体，实现一体化设计、一体化安装及调试已成为一种新型应用模式，该模式可有效降低工程设计难度，提高工程安装调试效率和提高开关设备的集成度。然而，由于光纤电流互感器属于精密设备，将其应用于工作环境相对恶劣的高电压领域，亟需解决工作可靠性问题。根据光纤电流互感器自身的结构和工作原理并结合高压开关设备特点和应用环境对影响光纤电流互感器正常工作的因素进行分析，可针对不同干扰采取相应的措施，提高光纤电流互感器的工作可靠性。

光纤电流互感器的基本原理

目前，国内的光纤电流互感器产品普遍采用萨格纳克干涉原理，即两束相干光间光程差的任何变化会非常灵敏地导致干涉条纹的移动。通过干涉条纹的移动变化可测量光程微小改变量，从而测得与此有关的其他物理量（如电流）。

光纤电流互感器主要由光路和电子电路构成，如图1所示，下面分别介绍其工作过程。

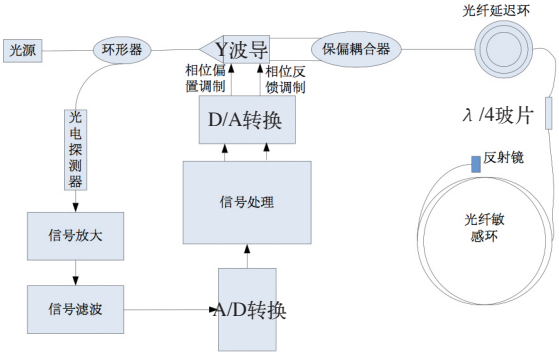

图1　光纤电流互感器原理图

1．光路的工作过程

激光光源发出非偏振光光束，该光束经过集成于Y波导（光电调制器）的起偏器后变为线偏振光，线偏振光经过Y波导变为两束正交的线偏振光

分别沿保偏光纤的X轴和Y轴传输，通过保偏耦合器两束光在同一光纤内传输。这两束正交模式的线偏振光经过λ/4波片后，变为两束圆偏振光，分别为左偏振和右偏振，然后两束圆偏振光进入传感光纤中传播。待测导线中传输的电流产生的磁场，在传感光纤中产生法拉第磁光效应，使这两束圆偏振光的相位差发生了变化并且以不同的速度传输，在镜面处反射后，两束圆偏振光的偏振模式互换（即左旋光变为右旋光，右旋光变为左旋光）再次通过传感光纤，并再次经历法拉第效应使两束光产生的相位差加倍。这两束光再次通过λ/4波片后，恢复为线偏振光，两束光在环形器（包含起偏器）处发生干涉，携带相位差信号的光进入光电探测器转换为电信号。

2．电子电路的工作过程

信号放大电路对光电探测器的输出信号进行检测放大，经过滤波电路滤波后进行模拟/数字（A/D）转换，变为数字信号，提供给信号处理单元进行运算。根据法拉第磁光效应与安培环路定律可知，载流导线中传输的电流大小与相位差成正比，因此通过检测光相位差信号可计算出待测电流值。电子电路的另一个作用是实现光路的调制，信号处理模块输出的控制信号经过数字/模拟（D/A）转换，变为模拟电压信号施加到Y波导（光电调制器）对光路中偏振光的相位进行调节，实现闭环控制，提高电流测量精度。

光纤电流互感器所受干扰因素分析

高压开关设备主要应用于高电压、大电流的变电站，其工作环境复杂，经常面临温度急剧变化、强振动、雨雪、沙尘以及各种强电磁干扰等问题，光纤电流互感器包含多种光学器件和电子器件，属于精密设备，如果不采取一定的保护措施极易受到周围环境的干扰。根据光纤电流互感器的工作原理及高压开关设备的工作环境分析，对光纤电流互感器造成干扰的主要有应力、温度和外部电磁场等。

1．应力对光纤电流互感器的影响

应力对光纤电流互感器的正常工作产生较大的影响，其作用机理是应力使光纤电流互感器的光路折射率或者是偏振特性发生比较大的改变，引起非互易性误差，主要表现为噪声增大和零偏的漂移。这可能导致测量值短时间内出现较大幅度波动或测量波形失真等现象，如果在工程应用中发生此类故障，可能导致变电站保护装置误动作等较严重的运行事故。

光纤电流互感器应用于高压开关设备，最主要的应力影响来自于2个方面。

1）高压开关设备分合闸操作产生的剧烈振动对光路产生的机械冲击。

2）周围环境温度的变化引起高压开关设备外壳部分产生形变，使固定于开关壳体的光纤传感环发生一定的弹性形变，从而导致光器件应力发生改变。

3．温度变化对光纤电流互感器的影响

在光纤电流互感器中，所应用的主要光学和电子器件的性能都会随温度的变化而变化。光学器件的影响主要包括以下方面。

1）光纤耦合器的热胀冷缩会引起其自身的分光比和消光比的变化，此变化会增大光纤电流互感器的输出噪声，从而影响测量精度。由于Shupe效应的存在，在光纤电流互感器所有组成部分中，传感光纤环作为最敏感部分，其温度特性对整机测量精确度影响最大。Shupe效应指的是光纤线圈每一点的折射率都随温度变化而变化，而相向传播的两束光波经过该点的时间不同（除光纤线圈中点外），因此，两束光波经过光纤圈后由于温度引起的相位变化不同，导致测量结果不准确。

2）Y波导的电光系数随温度变化引起标度因数的变化，而且其芯片与光纤之间的耦合情况也会受温度影响使其消光比和分光比发生变化，导致零偏漂移和噪声的出现，对测量精度有重大影响。

3）光纤电流互感器应用于高压开关设备时，其光纤传感环部分安装于开关设备本体，其他光路和电路部分安装于二次采集箱内。一般情况下，二次采集箱的安装位置与光纤传感环有一定的距离，其所处环境温度差异较大，使整机测量性能受到一定的影响。

4．外部电磁场对光纤互感器的影响

光纤电流互感器属于精密设备，应用多种光学、电子器件，其工作性能极易受到外部电磁场干扰。高压开关设备运行场所的电磁场环境恶劣，其对光纤电流互感器的影响主要有2个方面。

1）电磁干扰对信号采集电路的影响，这些干扰信号主要来源于机械式高压开关的操作、雷电冲击产生的暂态过电压和涌流以及电网中故障或

负荷突变引起的电压变化、暂降等。干扰信号可能通过导线耦合、电磁感应等方式进入到电流互感器采集箱内部，对内部电路造成一定的干扰甚至是破坏。

2）由于光纤属于抗磁材料，根据法拉第效应可知，如果沿着光纤的轴向存在磁场，通过光纤的线偏振光会产生一定的角度偏转，这将对光纤电流互感器的测量精确度产生一定的影响。

抗干扰措施

针对上述干扰因素，将光纤电流互感器应用于高压开关设备过程中，可从以下几个方面采取措施，降低环境因素对其影响，提高工作可靠性。

1．安装结构设计

光纤电流互感器与高压开关设备集成的安装结构主要依据开关设备的结构进行设计，其设计原则是保证高压开关设备原有的绝缘、密封性能不受到影响，同时，尽量减少开关设备分合闸操作产生的振动对光纤电流互感器自身工作性能影响。

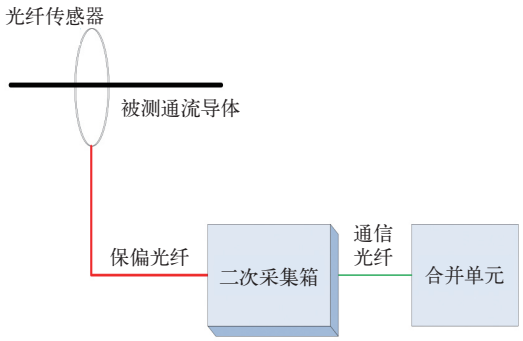

图2　光纤电流互感器产品结构图

在安装结构方面，如图2所示，一般将二次采集箱安装于开关设备的汇控柜内，使其处于相对温和的环境中，而光纤传感环必须要安装于开关设备本体，这样在安装结构设计中光纤传感环到二次采集箱部分光纤的安装与固定就成为设计的关键。

国内光纤电流互感器主要与敞开式开关设备配套使用，与GIS配套使用的数量目前仍较少，因此，以敞开式为例，介绍安装结构。光纤电流互感器与敞开式高压开关集成时，需充分考虑振动和电场问题。虽然光纤自身具有良好的绝缘性能，但是，由于高压爬电问题的存在，需要对保偏光纤的安装方式进行谨慎的设计。

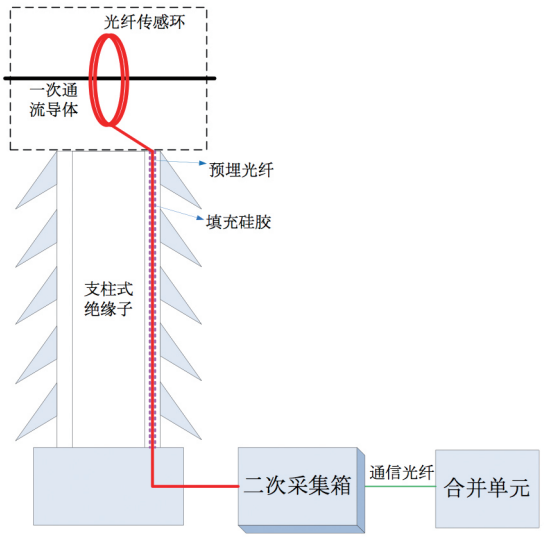

图3　敞开式安装结构

随着技术的进步，在敞开式高压开关设备中，支柱绝缘子由原来的陶瓷材料逐渐转变为硅橡胶材料。为了提高光纤电流互感器的整体抗干扰性能，在工程设计过程中将其光纤传感环固定于开关的通流导体部分，支柱绝缘子在生产过程中预埋多条保偏光纤且填充硅胶以保证抗振性能，同时也很好地解决了高压爬电问题。该结构的技术难点是光纤的预埋技术，如果填充硅胶内有气泡或其他杂质，会对支柱的绝缘性能产生影响，可能导致绝缘故障的发生。

2．生产工艺

针对高压开关设备的应用环境可能存在的干扰因素，在光纤电流互感器的生产工艺方面采取一定的措施，可有效提高其抗干扰水平。通过光路固封可提高其抗振性能，通过光器件的温度筛选可提高温度校准精确度。

1）光路固封。光路中，除光纤传感环及 $\lambda/4$ 波片外，其他部分均固定安装在二次采集箱内。各光学器件通过光纤熔接连结在一起，光纤熔接阶段各器件用胶简单固定于光路板的指定位置，熔接点部分套上热缩管，对熔接点进行保护，完后熔接后，用胶固定熔接点。光纤的排布也需注意，光纤在盘绕过程中应尽量使其应力低、低扭曲盘绕且半径不能太小，待所有光纤熔接点完成熔接操作后，对整体光路进行检测，确认熔接无误，开始对光路进行固封操作。固封采用硅橡胶，因硅橡胶在－65℃～＋200℃范围内仍保持良好的柔软性和弹性，这可以有效地保持抗振效果，对器件起到很好的保护作用。另外，硅橡胶

在较宽的温度范围内膨胀系数小，化学性能稳定，能够保持较强的粘结强度，可有效固定器件和光纤，减小振动对光路的影响。

2）器件温度筛选及整机温度校准；按照相关标准要求，光纤电流互感器需能够在－40℃～＋70℃范围内能够正常工作，因此，各器件也需要在此温度范围内保持较好的温度特性。但是，在光纤电流互感器的工作过程中，由于各光电器件的温度特性不一致，导致其电流值测量的精确度受温度的影响非常大，因此，在整机装配前需对主要光器件进行温度筛选，使其温度特性保持一致，便于后续的温度校准。由于目前的生产工艺尚有一定的缺陷，光纤传感环（包含λ/4波片）的温度特性不一致的问题相对突出。因此，主要进行的是光纤传感器环的温度筛选，选出温度特性一致或接近的器件。

在整机装配完成后，对整机进行高低温试验校准。采用插值法对不同的温度区间进行分段曲线拟合，提高温度校准精度。

试验测试

1．试验目的

为验证上述措施的可行性，在1台额定电压为363 kV的隔离断路器上安装5台厂家的光纤电流互感器进行试验，5个厂家编号分别为A、B、C、D、E。主要进行振动疲劳试验，以检验光纤电流互感器集成于开关设备后的整体抗振动性能。

2．试验方法

试验样机（隔离断路器）在无一次电流的情况下操作5 000次，光纤电流互感器在试验前、试验3 000次及试验5 000次后测量额定电流下的准确度，主要对比同一厂家同一光纤电流互感器试验前和试验后的测量误差。

3．试验结果

各厂家电流互感器在试验过程中的测量数据如下。

表1　A厂家光纤电流互感器测量结果

误差类型 \ 额定电流百分比		100	准确级
试验前	比差（%）	0.015	0.2
	角差（’）	0.2	
3 000次后	比差（%）	－0.033	0.2
	角差（’）	－0.2	
5 000次后	比差（%）	0.011	0.2
	角差（’）	0.5	

表2　B厂家光纤电流互感器测量结果

误差类型 \ 额定电流百分比		100	准确级
试验前	比差（%）	0.013	0.2
	角差（’）	0.9	
3 000次后	比差（%）	－0.034	0.2
	角差（’）	－0.1	
5 000次后	比差（%）	0.042	0.2
	角差（’）	2.2	

表3　C厂家光纤电流互感器测量结果

误差类型 \ 额定电流百分比		100	准确级
试验前	比差（%）	0.018	0.2
	角差（’）	1.1	
3 000次后	比差（%）	－0.008	0.2
	角差（’）	－1.2	
5 000次后	比差（%）	0.009	0.2
	角差（’）	0.2	

表4　D厂家光纤电流互感器测量结果

误差类型 \ 额定电流百分比		100	准确级
试验前	比差（%）	0.004	0.2
	角差（’）	0.2	
3 000次后	比差（%）	－0.058	0.2
	角差（’）	－0.9	
5 000次后	比差（%）	0.014	0.2
	角差（’）	0.4	

表5　E厂家光纤电流互感器测量结果

误差类型 \ 额定电流百分比		100	准确级
试验前	比差（%）	0.022	0.2
	角差（’）	0.2	
3 000次后	比差（%）	－0.021	0.2
	角差（’）	－0.391	
5 000次后	比差（%）	0.03	0.2
	角差（’）	0.39	

从上述数据可以看出，各厂家的电流互感器在开关设备完成3 000次操作和5 000次操作后，测量值均没有超过其准确级响应误差限值的一半，充分验证了试品的整体抗振动性能。

结束语

通过振动疲劳试验，对光纤电流互感器集成于开关设备的整体抗振动性能进行了验证。在工程应用中，隔离断路器、GIS等开关设备应用了上述措施集成了光纤电流互感器，在变电站现场运行良好。**EA**

（收稿日期：2016.10.10）
（编辑：刘群点）