基于加速老化试验的磁光玻璃型 光学电流传感器的寿命评估

肖智宏 1.2, 于文斌 1, 张国庆 1, 郭志忠 1, 申 岩 1, 张祥龙 2 (1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

摘要:光学电流传感器(OCS)的使用寿命无法从现场运行数据中获得,因此提出了基于加速老化试验的磁光玻璃型 OCS 寿命评估方法。对基于 Faraday 磁光效应原理的 OCS 的失效机理和失效模式进行了分析,提出了将插入损耗变化量作为其失效判据,并基于 A/D 转换器带来的 OCS 测量误差对失效判据进行了定量计算。以85°C 作为加速热应力,设计了 OCS 的加速老化试验方案,并对试验数据进行了分析。分析结果表明:在95%的置信度水平下,被测的 OCS 在常态温度下的预计使用寿命为 22a。

关键词:光学电流传感器:加速试验:寿命评估:损耗:测量误差:无源光器件

中图分类号: TM 930

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.023

0 引言

基于 Faraday 磁光效应原理的光学电流传感器 OCS(Optical Current Sensor)以其无磁饱和、绝缘性能好和抗干扰能力强等优点在电力系统测量和保护中得到了广泛的关注[1-7]。阻碍 OCS 实用化进程的 2 个主要问题是测量精度的温度稳定性和长期运行可靠性。目前,OCS 产品已经在智能变电站中得到了应用,而且随着技术的发展,其测量精度的温度稳定性基本能满足现场要求[8-11]。但是,其长期运行可靠性,特别是其使用寿命还无法通过现场仅有的几年运行时间获得。为了促进 OCS 在智能变电站中的推广应用,保证 OCS 的长期运行可靠性,有必要对设计的 OCS 的预计使用寿命进行评估。

国内外关于 OCS 的可靠性研究和文献还比较少。文献[12]介绍了一些有关 OCS 可靠性的标准和程序,但并未针对 OCS 的可靠性进行具体分析研究;文献[13]从 OCS 的光路结构的角度分析了影响其长期运行稳定性和可靠性的因素;文献[14]设计了 OCS 的可靠性试验内容和程序,并对其可靠性评估和寿命计算方法进行了初步探讨,但是并未给出具体定量的寿命评估方法。

本文将针对基于 Faraday 磁光效应原理的 OCS, 在分析 OCS 的失效模式和失效机理的基础上,提

收稿日期:2014-01-14;修回日期:2014-10-12 基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(E201237);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(HIT.NSRIF.2013018); 国家电网公司科技项目(52440013004L)

Project supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province(E201237),the Fundamental Research Funds for the Central Universities (HIT.NSRIF.2013018) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52440013004L)

出 OCS 插入损耗变化量的概念,并以此作为 OCS 的 失效判据;从模数(A/D)转换器带来的量化误差引 起 OCS 测量误差的角度出发,对 OCS 的失效判据进 行分析和计算;以 85℃高温作为加速热应力,设计 OCS 的加速老化试验方案,并对样本试验数据进行 分析,以获得 OCS 的中位寿命,并对 OCS 在常态温 度下的预计使用寿命的置信度水平进行分析。

1 OCS 的基本结构和测量原理

图 1 为基于 Faraday 磁光效应原理的 OCS 的基本结构示意图,它包括磁光玻璃、光纤、准直器、起偏器和检偏器等光学器件,这些构成器件都属于无源光器件,它们通过光学粘合剂粘结在一起[14]。

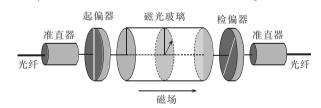


图 1 OCS 的结构示意图 Fig.1 Structure of OCS

图 2 为 OCS 的测量系统示意图。输出光功率为 P_0 的光源通过多模光纤射入 OCS,OCS 基于 Faraday 磁光效应原理感应被测电流 i(t) 后输出的光信号 P_x 可以用下式表示:

图 2 OCS 的测量系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of measuring system for OCS

其中, α_0 为光路固有损耗系数; θ 为对应于被测电流 i(t)的 Faraday 旋转角。

令 $P_s = \alpha_0 P_0$, 称为 OCS 的静态工作光强, 它与磁光玻璃的长度、两准直器之间的轴线倾角、起/检偏器的分光比和横向偏移以及各端面的加工精度及匹配程度等很多因素有关 $^{[13]}$ 。

根据 Faraday 磁光效应原理,旋转角 θ 可以用下式表示.

$$\theta = VKi(t) \tag{2}$$

其中,V为磁光玻璃的菲尔德常数;K为与 OCS 结构和安装位置有关的结构参数。

一般旋转角 θ 比较小,有下式成立,

$$\sin(2\theta) \approx 2\theta \tag{3}$$

光信号 P_x 输入响应度为 R 的光电管转换成的电信号 u_x 可以用下式表示:

$$u_{x} = RP_{s} [1 + \sin(2\theta)] \tag{4}$$

令 $U_s=RP_s$,称为 OCS 的静态工作电压。

信号 u_x 输入2个不同的处理通道。

a. 测量通道。为了提高信号的分辨率,信号 u_x 经过隔直放大之后经由抗混叠低通滤波器(LPF)输入 A/D 转换器,测量通道输出信号 u_x^m 可以表示为:

$$u_x^{\rm m} = A U_{\rm s} \sin(2\theta) \tag{5}$$

其中,A 为测量通道的放大倍数,其值选取与 OCS 的响应度和被测额定电流大小有关,但必须保证在 2 倍额定电流下,放大之后的信号输出幅值不超出 A/D 转换器的满刻度量程。

b. 保护通道。信号 u_x 经由抗混叠低通滤波器直接输入 A/D 转换器,保护通道输出信号 u_x^p 可以表示为.

$$u_x^{\mathrm{p}} = U_{\mathrm{s}} \left[1 + \sin(2\theta) \right] \tag{6}$$

由式(2)、(3)、(5)和(6),可以得到 OCS 测得的 i(t)的测量通道输出值和保护通道输出值分别为:

$$i_{\rm m}(t) \approx \frac{u_{\rm x}^{\rm m}}{2VKA\,U_{\rm s}}\tag{7}$$

$$i_{\rm p}(t) \approx \frac{u_{\rm x}^{\rm p}}{2VKU_{\rm s}} \tag{8}$$

当然,在稳态时,两通道输出的结果是一致的。

2 OCS 的失效模式和失效判据

2.1 失效模式和失效判据的分析

失效是指产品因为一些原因,其性能不再满足设计和应用要求。失效模式是产品失效的一种表现形式,失效机理是指引起失效的物理、化学变化等内在原因,失效影响是指每种失效对产品的使用、功能或状态所带来的后果。

影响 OCS 性能并阻碍其实用化进程的 2 个主要问题是测量精度的温度稳定性和长期运行可靠性。

a. 测量精度的温度稳定性。环境温度的改变引

起磁光玻璃菲尔德常数和线性双折射等的变化,从而使得 OCS 的测量精度存在温度漂移问题,不能满足测量要求。这一问题可以通过自愈等补偿措施得到解决^[8]。

b. 长期运行可靠性。这一问题集中体现在静态工作光强的稳定性方面,而静态工作光强的变化又体现在光路损耗的变化。随着运行时间的推移,其损耗变化逐步增大,最终导致 OCS 的失效,如分辨率的下降导致测量误差不再满足测量要求等。

OCS 的结构和加工工艺水平决定了静态工作光强的稳定性,因此本文选择光路损耗的变化作为进行OCS 可靠性寿命评估的依据。OCS 属于无源光器件,参照无源器件的相关标准[15-19],其与损耗相关的失效模式和失效机理可归纳如表1所示。

表 1 OCS 的失效模式和失效机理

Table 1 Failure modes and failure mechanisms of OCS

失效模式	失效机理	失效影响
插入损耗增加	光学粘结定位部分退化、 材料热膨胀系数不匹配	光学元件之间 产生物理位移
	光学元件表面结凝露、 光学元件表面聚集尘埃	光路折射率发生 改变,破坏全反射
回波损耗降低	应力引起的折射率改变	晶体消光比改变
偏振相关损耗增加	应力引起的折射率改变	双折射改变

回波损耗和偏振相关损耗对 OCS 的影响较小,为简化分析,本文仅考虑插入损耗 IL(Insertion Loss)。类似于磁光隔离器,将 OCS 的插入损耗定义为:引入 OCS 所导致的传感光路的功率损耗,即 OCS 的输出光功率(对应于静态工作光强 P_s)与输入光功率 P_0 比值的分贝数,表示为[14]:

$$A_{\rm IL} = -10 \lg \frac{P_{\rm s}}{P_{\rm o}} \tag{9}$$

根据上式,定义插入损耗变化量 ΔA_{Π} 为:

$$\Delta A_{\rm IL} = \left(-10 \lg \frac{P_{\rm sl}}{P_0}\right) - \left(-10 \lg \frac{P_{\rm s0}}{P_0}\right) = -10 \lg \frac{P_{\rm sl}}{P_{\rm s0}} \quad (10$$

其中, P_{s0} 为初始静态工作光强; P_{s1} 为变化后的静态工作光强。

对于选定的光电转换器,其响应度 R 也确定,则式(10)也可以用静态工作电压来描述:

$$\Delta A_{\rm IL} = -10 \lg \frac{RU_{\rm sl}}{RU_{\rm s0}} = -10 \lg \frac{U_{\rm sl}}{U_{\rm s0}}$$
 (11)

其中, U_{s0} 为初始静态工作电压; U_{s1} 为变化后的静态工作电压。

插入损耗变化量 ΔA_{IL} 存在一个允许范围,本文将此允许范围作为 OCS 的失效判据。当由于外界环境等因素引起的 OCS 的插入损耗变化量在此范围内时,则认为OCS 工作正常;否则认为 OCS 的性能已遭到破坏,即认为 OCS 失效。

2.2 失效判据的计算

如图 2 所示, OCS 的输出在进入数字信号处理



器(DSP)之前,首先要通过 A/D 转换器进行 A/D 转换。为了保证 OCS 的测量误差满足测量要求,必须要求 A/D 转换器产生的量化误差不能超过 OCS 的误差限值。

A/D 转换器的最大量化误差表示为[20]:

$$\sigma_{\text{max}} = \pm \frac{q}{2} \tag{12}$$

其中,q为A/D转换器的量化等级,其计算式为:

$$q = \frac{V_{\rm fs}}{2^N - 1} \approx \frac{V_{\rm fs}}{2^N} \tag{13}$$

其中, $V_{\rm s}$ 为 A/D 转换器的满刻度量程;N 为 A/D 转换器的位数。

对每个采样样本的量化误差,一般是假设随机和 均匀分布于区间(0,q/2)和(-q/2,0)内,所以量化误 差的标准偏差(也等于测量宽带量化噪声的均方根 值或测量不确定度)可以表示为:

$$\sigma_e = q/(2\sqrt{3}) \tag{14}$$

设被测电流 i(t) 的有效值为 I_{rms} ,则 OCS 的测量通道输出信号 u_{rm}^{m} 的有效值可表示为:

$$U_{\rm rms}^{\rm m} = A U_{\rm s} (2VKI_{\rm rms}) \tag{15}$$

则对于测量通道输出,A/D 转换器的量化误差带来的测量误差可以表示为[20].

$$\sigma_{\rm m} = \frac{\sigma_{\rm e}}{U_{\rm rms}^{\rm m}} \times 100\% = \frac{V_{\rm fs}}{2\sqrt{3} \times 2^{N}} \frac{1}{U_{\rm rms}^{\rm m}} \times 100\% \quad (16)$$

本文设计的 OCS 选取的 A/D 转换器的参数 为: $V_{\rm fs}$ = 20 V(对应±10 V),N= 16。由式(16),根据 0.2S 级的 OCS 的比值误差限值要求,可以求得归算 至额定电流下的测量通道输出信号 $u_{\rm m}^{\rm m}$ 的有效值 $U_{\rm rms}^{\rm m}$ 的允许下限值见表 2。

表 2 U_{ms}^{m} 的允许下限值 Table 2 Allowable low limits of U_{ms}^{m}

额定电流百分比/%	比值误差限值/%	U _{rms} 下限值/V
1	±0.75	1.175
5	± 0.35	0.503
20	±0.20	0.220
100	±0.20	0.044
120	±0.20	0.036

另外,考虑到测量通道能准确测量 2 倍额定电流,测量通道输出信号 u_x^m 的有效值 U_{rms}^m 的允许上限值为 3.536 V。所以,测量通道输出信号 u_x^m 的有效值 U_{rms}^m 的允许范围为[1.175,3.536]V。

对于设计的 OCS,选定磁光玻璃材料、固定设计结构和布置位置,则菲尔德常数 V 和结构参数 K 基本确定,对于不同的额定电流,可以通过设计不同的放大倍数 A,使得下式成立:

$$U_{\rm rms}^{\rm m} \approx U_{\rm s}$$
 (17)

即 $U_{\text{rms}}^{\text{m}}$ 的允许范围[1.175,3.536]V 就是静态工作电压 U_s 的允许范围。对于保护通道输出,由式(6)可

以看出,此上限值显然是满足要求的。下面讨论在此下限值时,其量化误差能否在额定电流下满足±1%的误差要求。

对于保护通道输出,A/D转换器的量化误差带来的测量误差可以表示为:

$$\sigma_{\rm p} = \frac{V_{\rm fs}}{2\sqrt{3} \times 2^N} \frac{1}{U_{\rm s} \times 2\theta_{\rm rms}} \times 100\% \tag{18}$$

由上式可以求得满足误差要求的 Faraday 旋转角 θ 的有效值 θ_{rms} 下限为 3.75×10^{-3} rad,对于本文设计的 OCS,对应额定电流有效值约为 300 A。即对于测量额定电流 300 A 以上的应用,在 U_s 为 1.175 V 时,其量化误差能满足 OCS 保护通道的误差要求。额定电流 300 A 对于一般应用已满足。

综上所述,本文确定 OCS 的静态工作电压 U_s 的允许范围即为[1.175,3.536]V。通过调节驱动电流来调节光源的输出光功率 P_0 实现 OCS 初始静态工作电压 U_{s0} 的设置,一般使 U_{s0} 等于允许范围的中间值,即 U_{s0} =2.2 V。则由式(11)可得到对应于初始静态工作电压 U_{s0} =2.2 V,插入损耗变化量 ΔA_{IL} 的允许范围为[-2.06,2.72]dB。

3 OCS 的加速老化试验

3.1 加速失效模型分析

3.1.1 失效分布

经验表明,无源光器件的损耗失效分布服从对数正态分布[6]。OCS属于无源光组件,其主要失效模式是插入损耗失效,因此,它的损耗失效时间 t_{sx} 服从对数正态分布,其概率分布函数为:

$$f(t_{sx}) = \frac{1}{t_{sx}\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t_{sx} - \ln t_{50}}{\sigma}\right)^{2}\right] \quad (19)$$

其中, t_{50} 为中位寿命,表示 50%的样本失效时的时间; σ 为 $\ln t_{5x}$ 的标准偏差; t_{5x} 为失效时间。

3.1.2 加速失效模型

加速试验是证明 OCS 长期可靠性所必需的试验。 高温、高湿环境寿命试验是在合理的试验时间中提 供可靠性数据最常用的方法。本文选择温度作为加 速应力。

对于温度热应力,寿命和温度之间的关联是从阿伦尼斯关系衍生出来的[19]:

$$t_{50} = R_0 \exp\left[-E_A/(kT)\right] \tag{20}$$

其中, R_0 为系数;k为波尔兹曼常数($8.6 \times 10^{-5} \,\mathrm{eV/K}$); T为绝对温度(K); E_A 为激活能(eV)。无源光器件的激活能大约是 $0.4 \sim 1.2 \,\mathrm{eV}$,高温无湿度的试验环境下,OCS的激活能保守地选择为 $0.4 \,\mathrm{eV}$ 。

3.1.3 加速系数

以温度热应力为例,根据式(20),定义 OCS 寿命试验的相对加速系数为:

$$\tau = \frac{t_1}{t_2} = \exp\left[\frac{E_{\Lambda}}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \tag{21}$$

其中 $,t_1$ 和 t_2 分别为温度 T_1 和 T_2 下的中位寿命。

3.2 加速试验方案设计

参照无源光器件的可靠性相关标准的抽样程序和抽样表[17],选定参加加速试验的 OCS 样本数为 20,则产品质量的不合格率极限水平不超过 15%;选择温度 T=85 °C 作为加速热应力;选择插入损耗变化量 ΔA_{II} 的允许范围[-2.0,2.7]dB 作为 OCS 的失效判据。

图 3 所示 OCS 加速试验系统主要包括 LED 光源、传输光纤、OCS 样本、采集器、温控箱和监测软件平台。OCS 样本放置在试验平台的温控箱内部,接受高温加速老化试验。对每个 OCS 样本,LED 光源发出光功率为 P_0 的光信号通过传输光纤进人 OCS 的输入端,OCS 输出的光功率为 P_s 的光信号再通过传输光纤输入采集器的光电转换器,得到其静态工作光强 U_s ,采集器的 A/D 转换器对 U_s 采样后输入 PC 机,PC 机的监测软件平台对数据进行实时监测和存储。

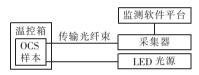


图 3 OCS 的加速试验系统 Fig.3 Accelerated test system for OCS

通过调整 LED 光源发出的光功率,使得每个 OCS 样本的初始静态工作电压均在 2.2 V 附近;设置温控 箱的温度稳定工作在 85℃;监测软件平台对静态工 作电压进行连续实时监测,设置每隔 15 min 进行一 次数据记录,并以 Excel 表格的形式进行数据存储。

4 OCS 的寿命评估

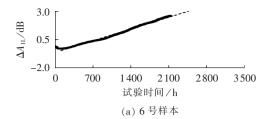
4.1 中位寿命计算

在加速老化试验过程中,不可能所有样本都达到 失效水平,通常需要推断失效水平的趋势。对于无源 光器件,一般可以采用线性推断的方法^[19]。

图 4(a)为由监测数据得到的 6 号样本的插入损耗随时间的变化曲线图,根据变化趋势,可以通过线性外推(图中虚线所示)得到 6 号样本的失效时间为 2 350 h。图 4(b)为由监测数据得到的 2 号样本的插入损耗随时间的变化曲线图,可以看出该样本没有失效的趋势,此时将其失效时间先标记为"不明显",但是可以肯定它的失效时间也是服从统计规律的。

依照上述方法,对其他样本监测获得的静态工作 电压监测数据进行分析,得到表 3 所示的 20 个 OCS 样本的失效时间。为了方便中位寿命的计算,表中 所列样本序号按照失效时间重新进行了升序排列。

绘制试验样本监测数据的对数正态图,其具体



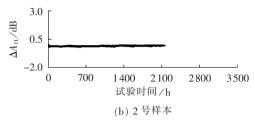


图 4 样本插入损耗变化量曲线 Fig.4 Insertion loss variation of samples

表 3 样本的失效时间 Table 3 Time to failure of samples

序号	失效时间/h	序号	失效时间/h
01	2350	11	14500
02	3 100	12	18300
03	3750	13	25 000
04	4500	14	27 500
05	4700	15	32 500
06	5 5 0 0	16	33 500
07	7500	17	不明显
08	10000	18	不明显
09	10500	19	不明显
10	12500	20	不明显

方法如下[19]。

a. 取表 3 中根据升序排列的失效时间的自然对数 $\ln t_{sx}$ 作为 γ 轴的值。

b. 将试验样本总数 M 和表 3 中样本序号 m 代 Λ NORMSINV[m/(M+1)]作为 x 轴的值, NORMSINV 为标准正态累积分布函数的反函数。

c. 在坐标图中描出 16 个点(因为有 4 个样本失效时间不明显),根据最少拐弯原则拟合出最匹配的直线,其方程表达为:

$$y = \sigma x + \ln t_{50}$$
 (22)
其中, t_{50} 和 σ 与式(19)中含义相同。

图 5 为按照上述过程得到的样本在 85 ℃ 试验 条件下的对数正态图。从图中可以看出,有确定失 效时间的样本点近似线性。由于 OCS 失效时间服 从对数正态分布,说明失效时间不明显的样本点也 会在该拟合直线的延长线上。由确定的样本点拟合

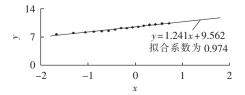


图 5 失效时间的标准正态分布

Fig.5 Standard normal distribution of time to failure



后的直线方程为 y=1.241x+9.562, 拟合系数为 0.974。可以算得, 在 85°C 试验条件下, OCS 的中位寿命 t_{50} 为 14 217 h. $\ln t_{cr}$ 的标准偏差为 1.241。

由式(21)可以得到,OCS 在试验温度为 85 $^{\circ}$ 时对应于常态温度 25 $^{\circ}$ 时的加速系数 $^{\tau}$ 为 13.6,则可以得到常态温度 25 $^{\circ}$ 条件下,OCS 的中位寿命为 193358 h,约合 22 a。此 22 a 即为基于本文设计的加速老化试验得到的 OCS 在常态温度下的预计使用寿命。

4.2 置信度分析

预计使用寿命的置信度与样本的试验条件、试 验时间和样本数量息息相关。

要求 OCS 在常态温度下使用寿命为 22 a 的置信度 p 为 0.95 时,推算在加速温度为 85 $^{\circ}$ 的试验条件下对 20 个 OCS 样本的试验时间。推算过程如下。

(1)考察寿命:

$$L = 24 \times 365 \times 22 = 192720$$
 (h)

(2)置信度系数:

$$A_c = 0.5 \times \text{CHIINV} (1-p, 2 \times (r+1)) =$$

 $0.5 \times \text{CHIINV}(1-0.95, 2 \times (0+1)) = 2.9957$ 其中, CHIINV 为卡方分布符号; r 为允许失效数, 本文取为 0。

(3)常态测试时间:

$$T_1 = A_c L = 2.9957 \times 192720 = 577331(h)$$

(4)加速试验时间:

$$T_2 = T_1 / \tau = 577331/13.6 = 42450(h)$$

(5)单台试验时间:

$$T_3 = T_2/M = 42450/20 = 2122(h)$$

由上述过程可知,在加速温度 85% 的试验条件下,如果对 20 个样品进行 1 次实验,需持续 2122 h,大约为 88 d。

本文对 20 个 OCS 样本从 2013 年 4 月 22 日至 7 月 21 日进行了连续 90 d 的 $85 \, ^{\circ}$ 试验条件下的加速老化试验,所以本文推算出的 OCS 在常态温度下的 22 a 的预计使用寿命的置信度为 $95 \, ^{\circ}$ 。

5 结论

- a. 分析了基于 Faraday 磁光效应原理的 OCS 的 失效模式和失效机理,提出了 OCS 插入损耗变化量 的概念,并以此作为 OCS 失效判断的依据。
- **b.** 从 A / D 转换器带来的量化误差引起 OCS 测量误差的角度出发,分析和计算了 0.2S 级 OCS 的插入损耗变化量的允许范围,并以此作为 OCS 的失效判据对试验数据进行了分析。
- c. 将 OCS 看作一种无源光器件,以温度作为加速应力,设计了 OCS 的加速老化试验方案,对随机抽取的 20 个 OCS 样本在 85℃的高温下进行了 90 d

的热老化试验。

d. 对样本试验数据进行了分析,计算了 OCS 的中位寿命,得到了 OCS 在常态温度下的预计使用寿命,并对此预计使用寿命的置信度水平进行了分析。分析结果表明:在 95% 的置信度水平下,本文设计的 OCS 在常态温度下具有 22a 的预计使用寿命。

参考文献:

- [1] 滕林,刘万顺,李贵存,等. 光学电流传感器及其在继电保护中的 应用[J], 电网技术,2002,26(1):31-33.
 - TENG Lin,LIU Wanshun,LI Guicun,et al. Optical current transducer and its application in protective relaying [J]. Power System Technology, 2002, 26(1):31-33.
- [2] 刘青,王增平,徐岩,等. 光学电流互感器对继电保护系统的影响研究[J]. 电网技术,2005,29(1):11-14.
 - LIU Qing, WANG Zengping, XU Yan, et al. Research on the influence of optical current transducer on protective relaying system[J]. Power System Technology, 2005, 29(1):11-14.
- [3] 顾黄晶,张沛超. 光学电流互感器对线路差动保护的影响[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):61-64.
 - GU Huangjing, ZHANG Peichao. Influence of optical current transducer on line differential protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5):61-64.
- [4] 及洪泉,杨以涵,李岩松,等. 基于光学电流互感器的非周期分量 线路纵差保护[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):45-49.
 - JI Hongquan, YANG Yihan, LI Yansong, et al. Study on line aperiodic component current comparison pilot protection based on optical current transducers [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (19):45-49.
- [5] 李岩松,刘君,杨以涵,等. 自适应光学电流互感器与保护一体化运行研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(22);57-62.
 - LI Yansong, LIU Jun, YANG Yihan, et al. Research on whole operating of adaptive current transducer and protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22):57-62.
- [6] 黄建华,王佳. 光学电流互感器的关键技术[J]. 电力自动化设备, 2009,29(12):94-97.
 - HUANG Jianhua, WANG Jia. Key technology of optical current transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (12):94-97.
- [7] 易本顺,刘延冰,阮芳. 光学电流传感器现场运行性能分析[J]. 中国电机工程学报,1997,17(2);138-140.
 - YI Benshun, LIU Yanbing, RUAN Fang. Field performance analysis of optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17 (2):138-140.
- [8] 李岩松,张国庆,于文斌,等. 自适应光学电流互感器[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):100-105.
 - LI Yansong, ZHANG Guoqing, YU Wenbin, et al. Adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 100-105.
- [9] 李岩松,张国庆,于文斌,等. 基于自适应滤波的光学电流互感器的信噪分离[J]. 电网技术,2004,27(11):64-67.
 - LI Yansong, ZHANG Guoqing, YU Wenbin, et al. Signal noise decomposed in optical current transducer based on adaptive filter[J]. Power System Technology, 2004, 27(11):64-67.
- [10] 路忠峰,郭志忠. 磁光式光学电流互感器运行稳定性评价[J]. 电



- 力自动化设备,2007,27(10):38-43.
- LU Zhongfeng, GUO Zhizhong. Evaluation of operating stability of magneto-optical current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(10); 38-43.
- [11] 于文斌, 江波, 张国庆, 等. 自愈光学电流互感器现场运行稳定性试验[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 44-48.
 - YU Wenbin, JIANG Bo, ZHANG Guoqing, et al. Experiment on site operational stability of optical current transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4):44-48.
- [12] NICHOLSON G. Reliability considerations:optical sensors for the control and measurement of power[C]//IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta, USA:IEEE, 2001:122-126.
- [13] 于文斌,杨以涵,郭志忠,等. 光路结构参数对光学电流互感器运行稳定性的影响[J]. 电网技术,2008,32(20):68-72.
 - YU Wenbin, YANG Yihan, GUO Zhizhong, et al. Influence of optical path structure and parameter on operating stability of optical current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(20):68-72.
- [14] 于文斌,高桦,郭志忠. 光学电流传感头的可靠性试验和寿命评估问题探讨[J]. 电网技术,2005,29(4):55-59.
 - YU Wenbin, GAO Hua, GUO Zhizhong. A discuss on reliability test and life period assessment for optical current sensing head [J]. Power System Technology, 2005, 29(4):55-59.
- [15] Telcordia Technologies. GR-326-CORE-1999, issue 3. Generic requirements for single-mode optical connectors and jumper assemblies [S]. Piscataway, New Jersey, USA; Telcordia, 1999.
- [16] Telcordia Technologies. GR-1209-CORE-2001, issue 3. Generic requirements for passive optical components[S]. Piscataway, New Jersey, USA; Telcordia, 2001.

- [17] Telcordia Technologies. GR-1221-CORE-1999, issue 2. Generic reliability assurance requirements for passive optical components [S]. Piscataway, New Jersey, USA: Telcordia, 1999.
- [18] IEC. IEC62005-3-2001 Reliability of fiber optic interconnecting devices and passive components-part 3:relevant tests for evaluating modes and failure mechanisms for passive components [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2001.
- [19] IEC. IEC62005-2-2001 Reliability of fiber optic interconnecting devices and passive components-part 2; quantitative assessment of reliability based on accelerated aging tests-temperature and humidity; steady state[S]. Geneva, Switzerland; IEC, 2001.
- [20] NIEWCZAS P, CRUDEN A, MICHIE W C, et al. Error analysis of an optical current transducer operating with a digital signal processing system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(6):1254-1259.

作者简介:



肖智宏(1977—),男,辽宁阜新人,高级 工程师,博士,研究方向为光电传感、电力系 统分析与控制、电网规划与评价等;

于文斌(1976—), 男, 江苏金坛人, 讲师, 博士, 通讯作者, 研究方向为光电测量技术及其在智能电网中的应用(E-mail: ywb_hit@126.com);

肖智宏

张国庆(1969—),男,河北保定人,副教授,博士,研究方向为光学传感技术及其在智能电网中的应用; 郭志忠(1961—),男,河北张家口人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统分析、光电传感技术和智能电网。

Life assessment based on accelerated aging test for magneto-optic glass-type OCS

XIAO Zhihong^{1,2}, YU Wenbin¹, ZHANG Guoqing¹, GUO Zhizhong¹, SHEN Yan¹, ZHANG Xianglong²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Since the service life of OCS (Optical Current Sensor) can't be assessed according to field data, life assessment method based on the accelerated aging test is proposed for the magneto-optic glass-type OCS. The failure mechanisms and failure modes of OCS based on the principle of Faraday magneto-optic effect are analyzed and the variation of its insertion loss is taken as the criterion of its failure. The failure criterion is calculated quantificationally based on the measuring error of ADC. A scheme of accelerated aging test with 85 ℃ as its accelerated thermal stress is designed for OCS and the test data are analyzed, which shows that, with 95% confidence level, the estimated service life of the OCS investigated is 22 years at normal temperature.

Key words: optical current sensor; accelerated test; life assessment; losses; measurement errors; passive optical component