

磁光式光学电流互感器 运行稳定性评价

路忠峰, 郭志忠

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 运行稳定性是评价光学电流互感器性能的重要指标之一。推导了线性双折射影响下磁光式光学电流互感器输出光强的数学模型, 定义了静态工作光强。对现场运行数据进行了挖掘, 得到静态工作光强的时间序列。引入相关性分析的理论, 通过对静态工作光强与环境温度的互相关系数的计算, 分析了环境温度对光学电流互感器运行稳定性的影响程度, 分析结果表明: 静态工作光强与环境温度的大小及变化率强相关; 环境温度对静态工作光强的作用具有延时性。提出了光强长期温度特性的概念, 并在此基础上, 提出了光学电流互感器运行稳定性的评判原则。

关键词: 光学电流互感器; 光强; 运行稳定性; 线性双折射

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)10-0038-05

0 引言

高压电流互感器是电网中的重要设备, 它的运行性能直接关系电力系统的安全性、稳定性和可靠性。与传统电流互感器相比, 光学电流互感器具有相当的优势, 对它的研究已经进行了近半个世纪, 现在正逐步走向实用化, 不断有基于不同原理的各种样机和产品问世, 并投入现场试运行^[1-7], 相应的应用研究也逐步展开^[8-10]。

光学电流互感器的长期运行稳定性是阻碍光学电流互感器实用化的主要原因之一。目前, 对光学电流互感器运行稳定性问题的研究仅限于提高运行稳定性的手段和措施等方面^[11-12], 而如何评价这些手段和措施的有效性, 即如何评价运行稳定性却很少提到。

基于 Faraday 磁光效应的光学电流互感器运行稳定性的降低表现为: 互感器经过较长时间的运行之后, 直流工作光强明显减弱, 最终导致光学电流互感器失去了测量电流的功能^[13]。但实际上, 实测的直流工作光强还包含线性双折射的影响, 将其作为评价磁光式光学电流互感器运行稳定性的指标参数显然不是很准确。这里定义的静态工作光强, 剔除了线性双折射的影响, 并以此作为指标参数来评价光学电流互感器运行稳定性。

普遍认为环境温度是影响光学电流互感器运行稳定性的主要因素之一^[14-16], 并将温度试验作为光学传感头可靠性试验的主要内容^[17]。但是, 环境温度对光学电流互感器运行稳定性影响程度的具体分析却鲜有报道。这里结合现场样机的运行数据, 引入相关性分析理论, 通过对静态工作光强与环境温度的互相关系数的计算, 来分析环境温度对光学电流

互感器运行稳定的影响程度。并以此为基础, 提出磁光式光学电流互感器运行稳定性的评判方法和原则, 以期为进一步研究光学电流互感器的可靠性奠定基础。

1 光学电流互感器光强的数学模型

图 1 为磁光式光学电流互感器的光强示意图, 图中起偏器输出的线偏振光 E_i 的光强为 J_i ; 在磁场 H 的作用下, 通过磁光玻璃后的线偏振光 E_o 的偏振面偏转了法拉第旋转角 φ ; 检偏器将偏振光 E_o 分解为振动方向相互垂直的 2 个电矢量 E_{o1} 和 E_{o2} , 它们的光强分别表示为 J_{o1} 和 J_{o2} 。

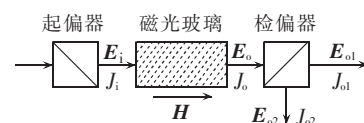


图 1 光学电流互感器的光强示意图

Fig.1 Light intensity of optical current transducer

光学电流互感器的光学传感头的物理结构是自然光依次通过起偏器、法拉第磁光玻璃和检偏器, 表现为偏振器件的级联形式, 在数学上表现为琼斯矩阵的连乘:

$$E_{out \pm 45^\circ} = P(\theta \pm 45^\circ) \cdot F \cdot E_i \quad (1)$$

假定起偏器透光轴与系统坐标 X 轴之间的预偏角为 θ , 即以任意起偏角入射, 则进入传感头的线偏振光的琼斯表示为

$$E_i(\theta) = E_o \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

法拉第磁光玻璃的琼斯矩阵为

$$F(\delta, \varphi) = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A &= \cos(\psi/2) + j \sin(\psi/2) \cos x \\ B &= \sin(\psi/2) \sin x \\ \psi &= \sqrt{\delta^2 + (2\varphi)^2}, \quad \sin x = 2\varphi/\psi \end{aligned} \quad (4)$$

式中 δ 为法拉第磁光玻璃的线性双折射; φ 为法拉第旋转角。

与入射光偏振方向成 $\pm 45^\circ$ 夹角的检偏器的琼斯矩阵为

$$P_{(\theta \pm 45^\circ)}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \cos \beta \cdot \sin \beta \\ \cos \beta \cdot \sin \beta & \sin^2 \beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\beta = \theta \pm 45^\circ$$

将式(2)(3)及(5)代入式(1),可得输出电矢量与入射光偏振方向成 $\pm 45^\circ$ 夹角的 2 个分量 E_{o1} 和 E_{o2} ,通过厄米运算可得光学电流互感器平行输出和垂直输出的输出总光强:

$$J_{o1} = \frac{J_i}{2} \cdot \left[1 - \frac{\sin \psi}{\psi} \cdot 2\varphi + \left(\frac{\delta}{\psi} \right)^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\psi}{2} \right) \cdot \sin(4\theta) \right] \quad (6)$$

$$J_{o2} = \frac{J_i}{2} \cdot \left[1 + \frac{\sin \psi}{\psi} \cdot 2\varphi - \left(\frac{\delta}{\psi} \right)^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\psi}{2} \right) \cdot \sin(4\theta) \right] \quad (7)$$

光学电流互感器的光路损耗是不可避免的,而且不同光路结构的损耗是不一样的,设光路衰减系数为 α 。定义静态工作光强:

$$J_{os} = \alpha J_i / 2 \quad (8)$$

在实际应用中,光强信息是通过电压的形式输出的。这里以光强为分析对象,为了论述清晰,在此不考虑电子电路部分的影响。设电子处理电路中,A/D 转换器满偏正输入电压对应的输出光强为 J_M ,定义静态工作光强的相对值 $\hat{J}_{os}$,有

$$\hat{J}_{os} = J_{os} / J_M \quad (9)$$

定义双折射影响系数 $\hat{J}_B$ 和法拉第效应影响系数 $\hat{J}_F$:

$$\hat{J}_B = \frac{J_B}{J_{os}} = \left(\frac{\delta}{\psi} \right)^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\psi}{2} \right) \cdot \sin(4\theta) \quad (10)$$

$$\hat{J}_F = \frac{J_F}{J_{os}} = \frac{\sin \psi}{\psi} \cdot 2\varphi \quad (11)$$

光学电流互感器输出总光强的公式(6)和(7)改写为

$$\hat{J}_{o1} = \hat{J}_{os} \cdot (1 - \hat{J}_F + \hat{J}_B) \quad (12)$$

$$\hat{J}_{o2} = \hat{J}_{os} \cdot (1 + \hat{J}_F - \hat{J}_B) \quad (13)$$

根据式(12)和(13),可以得到图 2 所示的光学电流互感器的光调制示意图。很明显,静态工作光强 $\hat{J}_{os}$ 反映了直流光载波信息,线性双折射和法拉第效应属于调制信息。

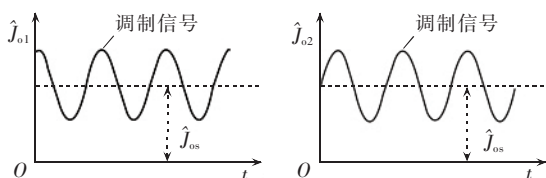


图 2 光学电流互感器的光调制示意图

Fig.2 Light modulation of optical current transducer

对于这样一种光电信息系统,由于光载波是系统正常工作的基础,所以静态工作光强是光学电流互感器的工作基础。

2 静态工作光强的温度特性分析

2.1 光强的温度相关性分析理论

如果引起光强变化的主要因素是温度,分析光强的温度特性就很有必要。对光强与温度关系的描述,这里称之为光强的温度相关性。

为了分析光强的温度相关性,引入相关性的分析方法^[18]。相关性分析是研究 2 个变量之间是否存在一定的关系,它能从噪声和其它无关信号中判别信号序列不同时段或 2 个信号序列之间的相似性。它是一种时域信息的检测方法,通过分析信号波形之间的相似性,进行信号特征的检测。相关函数是研究这类问题的有力工具。

2.1.1 相关性分析理论基础

工程实际中,一个变量通常表示为一个随机时间序列,这个时间序列的有关数学特征一般用某种近似估计值表示。

对于不同的 2 个随机时间序列 $X(n)$ 和 $Y(n)$,它们之间相隔 k 个时间间隔的互相关函数的估计值可以描述为

$$r(k) = \frac{\sum_{n=1}^{N-k} \{ [X(n) - \bar{X}] \cdot [Y(n+k) - \bar{Y}] \}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [X(n) - \bar{X}]^2 \cdot \sum_{n=1}^N [Y(n) - \bar{Y}]^2}} \quad (14)$$

式中 N 为序列的观测次数; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为序列 $X(n)$ 和 $Y(n)$ 的均值。

其中, k 的范围为 $[-(N-1), (N-1)]$ 。显然, k 值越大,式(14)使用的信号时间序列的有效长度越短,计算出的 $r(k)$ 的性能越差,因此,一般取 $k \ll N$ 。

对于确定的 k 值, $r(k)$ 表示时间序列 $X(n)$ 与 $Y(n)$ 延时 k 个观测点之后的序列 $Y(n+k)$ 之间的互相关系数。

在 k 的观测范围内,当观测点 $k = k_e$ 时,互相关函数 $r(k)$ 取得极值 $r(k_e)$ 。当 $r(k_e)$ 为正时,表示时间序列 $X(n)$ 与 $Y(n)$ 延时 k_e 个观测点之后的序列 $Y(n+k_e)$ 之间最为相似,称为正相关;而当 $r(k_e)$ 为负时,表示时间序列 $X(n)$ 与 $Y(n)$ 延时 k_e 个观测点之后的序列 $-Y(n+k_e)$ 之间最为相似,称为负相关。

所以,互相关函数 $r(k)$ 的极值 $r(k_e)$ 的大小反映了两时间序列之间的相关程度。

2.1.2 光强的相关性描述

互相关函数 $r(k)$ 的极值 $r(k_e)$ 的大小表示时间序列 $X(n)$ 与 $Y(n)$ 延时 k_e 个观测点之后的序列 $Y(n+k_e)$ 最为相似,所以一般可以通过计算极值 $r(k_e)$ 来表征光强 $J(n)$ 与环境温度 $t(n)$ 之间的互相关程度。

a. 光强的热反应时间常数。如果 $r(k)$ 在观测点 k_e 取得极值,即温度序列 $t(n)$ 与光强序列 $J(n+k_e)$ 的互相关系数最大,则表明光强对环境温度的热反

应时间常数为 k_e 个时间单位。如果观测时间间隔取为 1 min, 则光强的热反应时间常数为 $k_e \text{ min}$ 。

b. 光强的温度相关性判据。 光强与环境温度相关性的判据: 如果互相关系数 $|r(k_e)| \geq 0.8$, 则光强受环境温度的影响很大, 称为密切相关; 如果互相关系数 $|r(k_e)| < 0.5$, 则光强基本不受环境温度的影响, 称为弱相关; 如果互相关系数 $0.5 \leq |r(k_e)| < 0.8$, 则光强受环境温度的影响, 称为强相关。

光学电流互感器光强受环境温度的影响应该包含 2 个方面, 即光强与温度大小的相关性和光强与温度变化率的相关性。所以在进行相关性分析时, 需要分别计算光强与温度大小和温度变化率的互相关函数。

2.2 静态工作光强的温度相关性分析

2.2.1 静态工作光强的挖掘

在实际工程中, 检偏器透射光束和反射光束的消光比和传感头两光路的粘合工艺水平等的性能差异, 使得光学电流互感器 2 路输出的光强损耗存在差异。因此, 光学电流互感器 2 路输出的光强衰减系数不能用同一个系数 α 表示, 设平行输出和垂直输出的衰减系数分别为 α_1 和 α_2 。

稳态运行情况下, 在进行数据记录时, 通过交直流分离, 一般可观测到以下几组数据: 直流工作光强 $\hat{J}_{o1dc}$ 、 $\hat{J}_{o2dc}$, 包含被测电流信息的交流分量 $\hat{J}_{o1ac}$ 、 $\hat{J}_{o2ac}$, 令平行输出和垂直输出的静态工作光强分别为 $\hat{J}_{o1s}$ 和 $\hat{J}_{o2s}$, 有

$$\hat{J}_{o1dc} = \hat{J}_{o1s} \cdot (1 + \hat{J}_B) \quad (15)$$

$$\hat{J}_{o2dc} = \hat{J}_{o2s} \cdot (1 - \hat{J}_B) \quad (16)$$

$$\hat{J}_{o1ac} = \hat{J}_{o1s} \cdot \hat{J}_F \quad (17)$$

$$\hat{J}_{o2ac} = \hat{J}_{o2s} \cdot \hat{J}_F \quad (18)$$

由于系数 α_1 和 α_2 之间的差异, $\hat{J}_{o1s}$ 和 $\hat{J}_{o2s}$ 之间会存在一个配平系数:

$$k_s = \hat{J}_{o2s} / \hat{J}_{o1s} \quad (19)$$

常规的处理方法是采用直流配平, 即利用 $\hat{J}_{o1dc}$ 和 $\hat{J}_{o2dc}$ 求取配平系数:

$$k_{dc} = \hat{J}_{o2dc} / \hat{J}_{o1dc} \quad (20)$$

但是, $\hat{J}_{o1dc}$ 和 $\hat{J}_{o2dc}$ 不仅包含 $\hat{J}_{o1s}$ 和 $\hat{J}_{o2s}$, 而且还与双折射系数 $\hat{J}_B$ 有关。显然, k_{dc} 和 k_s 之间是存在误差的。采用交流配平应该更合理, 即利用 $\hat{J}_{o1ac}$ 和 $\hat{J}_{o2ac}$ 求取配平系数:

$$k_{ac} = \hat{J}_{o2ac} / \hat{J}_{o1ac} \quad (21)$$

由式(19)和(21)可以看出, k_{ac} 与 k_s 是一致的, 即有 $k_{ac} = k_s$ 。由式(15)和(16)以及配平系数 k_s , 可以求得光学电流互感器的 2 路静态工作光强 $\hat{J}_{o1s}$ 和 $\hat{J}_{o2s}$:

$$\hat{J}_{o1s} = \frac{k_s \cdot \hat{J}_{o1dc} + \hat{J}_{o2dc}}{2k} \quad (22)$$

$$\hat{J}_{o2s} = \frac{k_s \cdot \hat{J}_{o1dc} + \hat{J}_{o2dc}}{2} \quad (23)$$

2 路静态工作光强 $\hat{J}_{o1s}$ 和 $\hat{J}_{o2s}$ 之间仅存在数值大小上的差异, 它们的特性是一致的。

以 $\hat{J}_{o2s}$ 为例进行分析, 取现场样机在 2003 年 12 月至 2004 年 11 月的运行时间内平行输出和垂直输出的直流工作光强实测数据, 用式(23)得到图 3 所示的静态工作光强 (横坐标 n_d 为每天观测点数)。

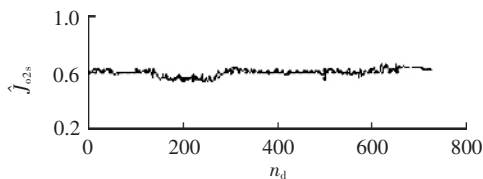


图 3 静态工作光强的变化曲线

Fig.3 Static state operating light intensity curve

2.2.2 静态工作光强的温度相关性分析

通过静态工作光强和环境温度的互相关函数计算, 来了解环境温度对静态工作光强的影响过程和影响程度。考察静态工作光强和环境温度 (包括温度大小和温度变化率) 的日互相关性, 即计算每天的静态工作光强和环境温度数据的互相关性。

计算每天的日互相关系数、日平均温度和热反应时间常数, 然后按月求取平均值, 表 1 为 2003 年 12 月至 2004 年 11 月的计算结果。

表 1 显示环境温度对静态工作光强的影响存在一个相关性发生转折的温度点 t_c 。在温度大于 t_c 时, 静态工作光强 $\hat{J}_{o2s}$ 随环境温度的增大而减小; 而在温度小于 t_c 时, 静态工作光强 $\hat{J}_{o2s}$ 则随环境温度的减小而减小。对于研究的样机, 这个温度点 t_c 约为 10°C , 它与传感头封装时的温度有关。

从表 1 的结果可以看出, 静态工作光强与环境温度大小和变化率均强相关, 温度影响静态工作光强的时间常数大约为 2 h。

表 1 日运行数据的互相关函数计算结果的平均值

Tab.1 Monthly mean values calculated by cross correlation functions of daily operating data

日期	$\hat{J}_{o2s}$ 与 t 互相关函数	$\hat{J}_{o2s}$ 与 dt/dt 互相关函数	月平均温 度 $\bar{t}/^\circ\text{C}$	$\hat{J}_{o2s}$ 的热反应 时间常数/min
2003-12	0.738 6	-0.635 8	-4.88	113
2004-01	0.889 3	-0.749 2	-6.84	149
2004-02	0.944 6	-0.748 6	-0.81	145
2004-03	0.773 9	-0.736 5	3.15	141
2004-04	-0.429 4	-0.294 4	13.28	153
2004-05	-0.825 6	0.680 2	17.79	115
2004-06	-0.924 0	0.731 1	21.73	114
2004-07	-0.837 2	0.703 8	22.94	126
2004-08	-0.819 3	0.734 2	21.32	121
2004-09	-0.806 0	0.713 3	17.35	124
2004-10	-0.224 9	0.019 9	9.85	104
2004-11	0.781 5	-0.692 3	2.15	154

结论:静态工作光强与环境温度强相关;环境温度对静态工作光强的作用具有延时性。

2.3 静态工作光强的长期温度特性分析

2.3.1 长期温度特性的定义

静态工作光强的变化与光路的结构和参数有关,而温度是引起结构参数变化的主要原因,环境温度对光路结构和参数的影响是一个长期的过程。为了考察光学电流互感器的长期运行稳定性,一般仅考虑静态工作光强与环境温度大小的关系。但实际运行中,环境温度是在不断变化,它本身就是一个动态过程,不可能得到静态工作光强与环境温度大小的静特性关系。所以在此不讨论光强的静特性,而定义光强的长期温度特性,用以描述光学电流互感器的长期运行稳定性。

光强的长期温度特性:将温度对静态工作光强的长期影响称为光强的长期温度特性,反映了温度影响的平均效应。在实际运行中,一般分析静态工作光强和环境温度大小的周或月平均值之间的关系。

2.3.2 长期温度特性的分析

温度相关性分析已经表明,静态工作光强的变化与环境温度强相关,下面考察静态工作光强的长期温度特性。通过分析静态工作光强 J_{os} 和环境温度 t 的月平均值之间的关系,来了解静态工作光强的长期温度特性。

图 4 为环境温度和静态工作光强的月平均值曲线(横坐标 n_m 为每月观测点数)。由于静态工作光强与环境温度大小和温度变化率均具有较强的相关性,取环境温度相似的 2 段数据进行分析,见图 4(a)中第 I 段和第 II 段,2 段环境温度的平均值分别为 9.62 °C 和 9.80 °C,它们之间的自相关系数 r_a 为 0.9933。图 5 为相应的静态工作光强的长期温度特性曲线。

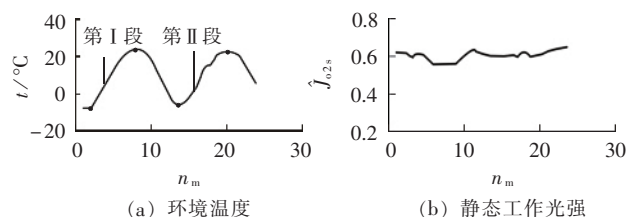


图 4 环境温度和静态工作光强的曲线

Fig.4 Temperature curve and static state operating light intensity curve

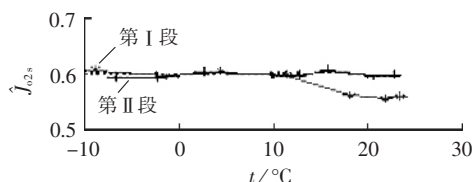


图 5 静态工作光强的长期温度特性曲线

Fig.5 Long-term temperature characteristic curves of static state operating light intensity

可见,在一定的温度变化范围内,静态工作光强相对值 $\hat{J}_{os}$ 在 $[0.5, 0.7]$ 内波动,并且第 II 段的波动比第 I 段明显减小,说明静态工作光强的温度特性趋于稳定,光学电流互感器样机具有长期运行稳定性。

结论:样机具有长期运行稳定性,通过分析静态工作光强的长期温度特性,可以考察光学电流互感器的长期运行稳定性。

3 光学电流互感器运行稳定性的评价原则

由于光学元件加工精度、材料热膨胀系数的不一致性以及元件之间粘结面的不均匀性等,使得光学电流传感头具有温度特性,即静态工作光强受环境温度影响程度的大小决定了光学电流互感器的运行稳定性。

根据实验室温度试验和现场运行数据分析,静态工作光强的变化一般会经历 3 个阶段,如图 6 所示。

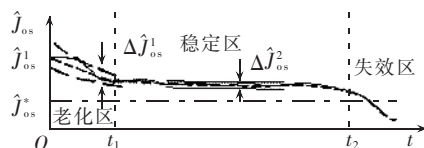


图 6 静态工作光强的变化曲线

Fig.6 Variation curves of static state operating light intensity

3.1 正常老化区

正常老化区时间段为 $[0, t_1]$,此阶段静态工作光强 $\hat{J}_{os}$ 受环境温度的影响较大,随环境温度的变化会呈现较大的波动幅度。如果加工工艺良好,静态工作光强会很快进入稳定区。时间 t_1 可以通过一般性的温度试验确定。

3.2 稳定区

稳定区时间段为 $[t_1, t_2]$,进入稳定区后,静态工作光强 $\hat{J}_{os}$ 受环境温度的影响减弱,波动幅度减小,即 $\Delta \hat{J}_{os}^2 < \Delta \hat{J}_{os}^1$,并且没有逐步下降的趋势,趋于稳定。时间 t_2 需要通过加速温度试验确定。

3.3 失效区

为了保证光学电流互感器的测量精度,静态工作光强存在下限 $\hat{J}_{os}^*$,如果静态工作光强 $\hat{J}_{os} < \hat{J}_{os}^*$,则认为光学电流互感器失效。

据上面的规律,要对光学电流互感器的稳定性作出准确的判断,首先要对光学传感头进行正常的温度老化试验,待静态工作光强进入稳定区后再进行稳定性判断。因为环境温度的变化可能会引起光路结构和参数的恶化改变,使得静态工作光强很快衰竭,光学电流互感器已经不能正常工作,此时也就没有必要进行下一步稳定性分析了。

设定光学电流互感器运行稳定性的基本条件为:

a. 静态工作光强 $\hat{J}_{os}$ 与环境温度 t 存在较强的相关性,即判定温度是否为引起静态工作光强变化的主要原因;

b. 在相似的环境温度变化过程中,静态工作光强 $\hat{J}_{os}$ 的波动幅度基本不变或减小,总体不呈现明显的下降趋势,并且静态工作光强 $\hat{J}_{os}$ 稳定后的工作点在允许下限之上。

在经过正常的温度老化试验后,如果静态工作光强 $\hat{J}_{os}$ 能同时满足上面 2 个基本条件,如图 7 所示,则可以初步断定此光学电流互感器具有较好的温度稳定性,能满足电力系统对电流互感器的长期运行稳定性的要求。

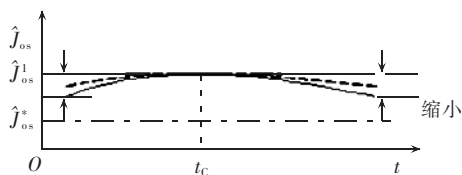


图 7 光学电流互感器运行稳定性的判断

Fig.7 Operating stability evaluation of optical current transducer

4 结论

a. 推导了线性双折射影响下的光学电流互感器输出光强的数学模型,定义了静态工作光强,它剔除了线性双折射的影响,能准确反映磁光式光学电流互感器的运行性能。

b. 引入相关性分析的理论,详细分析了样机的静态工作光强与环境温度的关系,分析结果表明:静态工作光强与环境温度强相关。

c. 提出了光强长期温度特性的概念,分析了样机静态工作光强的长期温度特性,论证了样机的长期运行稳定性。以此为基础,提出了磁光式光学电流互感器运行稳定性的评判原则。

参考文献:

- [1] Emerging Technologies Working Group & Fiber Optic Sensors Working Group. Optical current transducers for power systems: a review[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(4): 1778-1787.
- [2] NING Y N, WANG Z P, PALMER A W, et al. Recent progress in optical current sensing techniques[J]. Rev Sci Instrum, 1995, 66(5): 3097-3111.
- [3] 申烛, 罗承沐. 电子式电流互感器的新进展[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(22): 1-5.
SHEN Zhu, LUO Cheng-mu. Recent progress in electronic current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(22): 1-5.
- [4] BYOUNGHO L. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- [5] 郭志忠. 电子式电流互感器研究评述[J]. 继电器, 2005, 33(14): 11-14.
GUO Zhi-zhong. Comment on the research of electronic current transformers[J]. Relay, 2005, 33(14): 11-14.
- [6] 李岩松, 郭志忠, 杨以涵, 等. 自适应光学电流互感器的基础理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 21-26.
LI Yan-song, GUO Zhi-zhong, YANG Yi-han, et al. Research on the basic theory of adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 21-26.
- [7] 邸荣光, 刘仕兵. 光电式电流互感器技术的研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 98-100.
DI Rong-guang, LIU Shi-bing. Research status quo and development of optical current transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 98-100.

tion Equipment, 2006, 26(8): 98-100.

- [8] 唐治国, 许国斌, 张发金. 基于光电互感器的数字式母线保护[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 118-121.
TANG Zhi-guo, XU Guo-bin, ZHANG Fa-jin. Digital bus protection based on optical transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 118-121.
- [9] 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 Huang-jing, ZHANG Pei-chao. Influence of optical current transducer on line differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 61-64.
- [10] 及洪泉, 张健, 杨以涵, 等. 计及电子式电流互感器的差动保护性能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 61-66.
JI Hong-quan, ZHANG Jian, YANG Yi-han, et al. Comment on performance of differential protection taking into account electronic current transducers[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 61-66.
- [11] 李岩松. 高精度自适应光学电流互感器及其稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
LI Yan-song. High-precision self-adaptive optical CT and its stability research[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [12] 张国庆. 光学电流互感器的理论与实用化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
ZHANG Guo-qing. Theory and practicability research on optical current transformer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [13] 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 Ben-shun, LIU Yan-bing, RUAN Fang. Field performance analysis of optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(2): 138-140.
- [14] MENKE P, BOSSELMANN T. Temperature compensation in magneto-optic AC current sensors using an intelligent AC-DC signal evaluation[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1362-1370.
- [15] MADDEN W I, MICHIE W C, CRUDEN A, et al. Temperature compensation for optical current sensors[J]. Optical Engineering, 1999, 38(10): 1699-1707.
- [16] 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.
- [17] 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 Wen-bin, GAO Hua, GUO Zhi-zhong. Discuss of reliability test and life assessment for optical current sensing head[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 55-59.
- [18] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

路忠峰(1976-), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 研究方向为光电测量技术及其在电力系统中的应用(E-mail: Lunix@hit.edu.cn);

郭志忠(1961-), 男, 河北宣化人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统的信息化、自动化和最优化, 电力系统稳定分析和控制及电力系统光学测量技术方面的研究工作。

Evaluation of operating stability of magneto-optical current transformer

LU Zhong-feng, GUO Zhi-zhong

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The operating stability is one of the important indices for evaluating the performance of optical current transformer. The mathematical light intensity models of magneto-optical current transformer are deducted based on the effects of linear birefringence and the static state operating light intensity is defined as well. The time series of static state operating light intensity is obtained by field data mining. The correlation analysis theory is introduced and the effect of ambient temperature on the operating stability of optical current transformer is analyzed by calculating the cross correlation coefficient between them. The analytical results show that, the static state operating light intensity is greatly related to the ambient temperature and the effect of ambient temperature has time-lag on the static state operating light intensity. The long-term temperature characteristic of light intensity is proposed, based on which the evaluation criterion for the operating stability of optical current transformer is proposed.

Key words: optical current transformer; light intensity; operating stability; linear birefringence