

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.10.033

基于Allan方差理论的光纤电流互感器运行状态诊断

周 刚¹, 张代新², 谢善益¹, 常夏勤², 杨 强¹

(1. 广东省电力公司电力科学研究院, 广州 510600; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211106)

摘要: 光纤电流互感器(FOCT)克服了传统电磁式电流互感器在暂态响应、绝缘等方面的弱点,满足现代电力工业对电流值实时精确测量的需求。为了确保电流互感器在准确测量电流参量的同时,具有低故障、高可靠性的特点,急需开展光纤电流互感器状态诊断技术研究。通过分析光纤电流互感器测量数据的时域及频域特征,建立关键部件物理特性与互感器数据特征之间的对应关系,构建基于Allan方差的光纤电流互感器状态诊断分析模型,根据Allan方差计算结果诊断互感器状态,并实现自身故障定位。仿真结果表明:基于Allan方差的状态诊断方法准确有效,可在无附加硬件设备、互感器不停电的条件下,实现光纤电流互感器的在线监测和状态诊断。

关键词: 光纤电流互感器; 随机噪声; 状态诊断; Allan方差

Operation Status Diagnosis of Fiber Optic Current Transducer Based on Allan Variance Theory

ZHANG Gang¹, ZHANG Daixin², XIE Shanyi¹, CHANG Xiaqin², YANG Qiang¹

(1. Guangdong Electric Power Research Institute, Guangzhou 510600, China;

2. Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Fiber optic current transducer (FOCT) overcomes the weakness of electromagnetic current transducer in transient response, insulation and other performances, and meets the demands of accurate current measurement real-timely in modern power system. To ensure low failure and high reliability of fiber optic current transducers(FOCT), it is urgent to study methods of condition monitoring and fault diagnosis in FOCT. Faults in FOCT have statistical characteristics. With analyzing of time domain and frequency domain features in fiber optic current transformers' measurement data, we establish correspondence between the physical characteristics of key components in transformer and data features, then, build diagnostic analysis model based on Allan variance. According to the Allan variance calculation results, we can diagnose fiber optic current transformer's health state, and realize faults location. Experiment results show that diagnostic methods based on Allan variance are accurate and effective to identify fault features, diagnostic operation status, and online monitor, without additional hardware equipment and power off., transformers no power outages, no off-grid conditions, the realization of electronic transformer online monitoring and condition diagnosis.

Key words: fiber optic current transducer; random noise; status diagnosis; Allan variance

0 引言

光纤电流互感器(Fiber optic current transducer, FOCT)克服了电磁式电流互感器、罗斯线圈和磁光玻璃等电子式电流互感器在准确度、动态范围以及直流测量等方面的局限性,不但基波测量准,而且

直流以及各次谐波都能准确测量,具有动态范围宽、绝缘性能好、测量精度高等优点,可以满足电能计量、电能质量监测、保护控制、故障录波以及电网动态观测等领域不断发展的需求,代表了电流互感器的发展方向^[1-3],已经成智能电网的重要组成部分。

光纤电流互感器在运行中受到电、热、机械、环境等各种因素的作用,其性能逐渐劣化,最终导致故障,急需开展光纤电流互感器状态诊断技术研

究。Allan 方差是一种时域分析方法,能辨识出其随机误差的主要误差源,在 FOCT 随机误差特性分析上具有可行性^[4-6]。Allan 方差假设 FOCT 数据的不定性由特定噪声源产生,由输出电流数据计算各噪声源协方差的大小,反映出噪声中随机过程的特性并识别出存在于电流数据中的噪声源。文中将 Allan 方差用于光纤电流互感器状态监测与状态诊断方面,从时域、频域方面分别分析 FOCT 噪声特征,根据相关参数变化的特征和趋势,建立噪声状态特征与故障源之间的关联模型,对 FOCT 的健康状态进行监测,对故障状态下的故障部位做出判断,必要时提供预报警,为进一步采取措施提供依据。

1 FOCT 结构及状态诊断原理

1.1 光纤电流互感器类别

光纤电流互感器是建立在 Faraday 磁光效应及光学干涉理论基础上的光学传感器,通过闭环反馈系统实时测量光波非互易相位差引起的光波强度变化,经过信号处理及数据处理之后,获取与非互易相位成比例关系的被测电流信息^[7-8]。光纤电流互感器由宽谱光源、保偏光纤、偏振器、电光调制器、信号处理单元等部分组成,涉及到光电转换、电光转换等多个信号传输及处理环节,在互感器输出数据中具有光纤传感器特有的随机噪声特征。

根据光纤传感头的结构,FOCT 分为反射式 FOCT 及 Sagnac 式 FOCT^[9]。Sagnac 式光纤电流互感器结构见图 1^[9]。光源发出的光经过耦合器进入集成光学芯片,经过偏振器起偏为线偏光,通过集成光学芯片中的分束器分成 2 路,分别以正负 45° 夹角进入波片,分别被 $1/4\lambda$ 波片转换成左、右旋圆偏振光沿相反方向进入低双折射保偏光纤传感头,电

流引起的磁场 Faraday 效应使 2 束圆偏振光的偏振面发生旋转,然后再次经过另一个 $1/4\lambda$ 波片,重新转换成线偏振光返回,并发生干涉^[9]。由于干涉的 2 束光偏振面旋转的角度大小相等而方向相反,其相位差为 2 倍的 Faraday 相移,通过采用数字闭环信号调制技术,检测输出光的相位差就能得到待测电力线的电流信息。反射式光纤电流互感器结构见图 2^[11-13]。光源发出的光波经过耦合器后由偏振器起偏,形成线偏振光,线偏振光以 45° 注入保偏光纤,经过 $1/4\lambda$ 波片后,分别转变为左旋和右旋的圆偏振光,进入传感光纤。在传感光纤中,由于传导电流产生磁场法拉第效应,2 束偏振光在起偏器处发生干涉^[9]。由于发生干涉的 2 束光,在光路的传输过程中,分别都通过了保偏光纤的 x 轴和 y 轴与传感光纤的左旋和右旋模式,只在时间上有差别,因此,返回探测器的光波只携带了由法拉第效应引起的非互易性相位差,通过采用数字闭环信号调制技术,检测输出光的相位差就能得到待测电力线的电流信息。

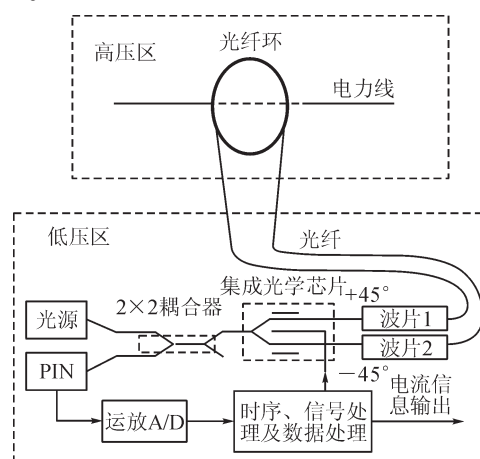


图 1 环形 FOCT 的结构图

Fig. 1 Structure of FOCT with fiber loop

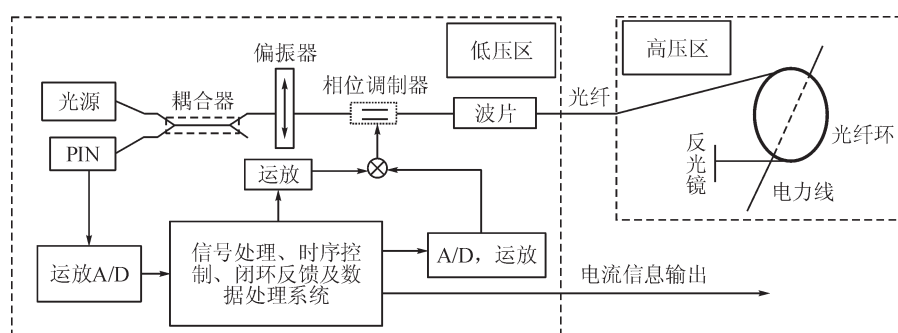


图 2 反射式 FOCT 的结构图

Fig. 2 Structure of FOCT with reflection mirror

1.2 故障特征的提取

结合光纤电流互感器状态参量及可利用信息进行综合,可以建立一个基于某种算法的智能诊断

系统,进行推理来确定设备的状态,实现电子式互感器的故障检测与诊断^[13-14]。此外,基于信号处理模型,得出系统时域和频域中较深层次的特征向量,

利用特征向量与系统故障之间的映射关系来检测出互感器故障源。反射式 FOCT 及环形 FOCT 虽然结构不尽相同,但是光波传感原理及信号处理过程类似,均采用高速信号处理单元及电光相位调制器构建数字闭环反馈系统,实时测量光波环路中由磁场 Faraday 效应导致的非互易性相位信息,进而获取外部电流信息。FOCT 受环境因素及自身因素的影响,所体现出的噪声特征也基本相同^[15-17],FOCT 数据的噪声特征主要体现为如下几类。

1) 角度随机游走噪声(angle random walk, ARW)。角度随机游走噪声体现了 FOCT 的极限精度,是衡量 IFOG 噪声水平的重要指标。FOCT 中光电探测器(PIN)光子散粒噪声导致 FOCT 的 Faraday 相移测量存在不确定性,使电流测量存在一个极限,散粒噪声还引起 PIN 前置放大器电流-电压反馈阻抗上的电流随机涨落,电流随机涨落引起 FOCT 的伪 Faraday 相移,影响 IFOG 最小偏置稳定性,决定了 FOCT 精度。ARW 是积分宽带速率功率谱密度的结果,该噪声主要源于光电探测器散粒噪声、放大器噪声、电子器件热噪声和一些相关时间比采样时间短的高频噪声,ARW 的带宽一般小于 10 Hz。通过系统设计可以消除相关时间比采样时间短的高频噪声,选用优质的光源、光电探测器等光电器件,以及提高环境温度的稳定性也可有效地抑制 ARW^[18]。

2) 偏值不稳定性噪声(bias instability, BI)。偏值不稳定性噪声体现了 FOCT 的偏置低频波动。BI 来源于 FOCT 中放电组件、等离子体放电、电路噪声、环境噪声以及其他可能产生随机闪烁的部件,对 FOCT 进行可靠性设计并采取相应的滤波方法可抑制 BI。

3) 速率随机游走噪声(rate random walk, RRW)。速率随机游走噪声代表了长相关时间的指数相关噪声的极限情况^[19]。RRW 是电流变化引起的相位值功率谱密度积分的结果,该噪声伴随于谐振器的长期效应,由白噪声通过积分器后产生的。降低晶振的老化效应可以抑制 RRW。

4) 速率斜坡噪声(rate ramp, RR)。速率斜坡在本质上是一种确定误差,而不是随机误差。RR 是 FOCT 光源强度呈现极慢的单调变化并持续时间较长而引起的,外界环境温度变化也引起 RR。保证光电器件以及 FOCT 工作环境的长期稳定性,或者通过建立数学模型按确定误差补偿的方法进行补偿,可以降低 RR。

5) 量化噪声(quantization noise, QN)。量化噪声代表了 FOCT 对电流信息的最小分辨率^[20]。FOCT 进行

电流测量时,干涉信号的采样值由 A/D 转换为数字量送入 FPGA(或者 DSP)进行信号处理,在测量间隔时间内,FOCT 测量的电流感应电磁场相位并不是量化步长的整数倍,信号的幅值随时间进行整量化,便出现了量化误差。在采样速度要求很快的应用环境里,会引起较大的 QN,提高采集系统的精度、缩短初始采样时间可以减小 QN。

6) 正弦噪声(sinusoidal noise, SN)。正弦噪声是一种系统性误差,其功率谱密度由几个不同频率表征。高频噪声是由于激光放电过程中等离子振荡而产生的,低频噪声是由于环境的周期性变化而引起的。当正弦噪声具有多峰值的正弦式波形时,功率谱密度图更容易表现出 SN^[10]。

2 Allan 方差法

Allan 方差法采用时频分析技术,在时域上对 FOCT 数据的频域稳定性进行计算,分析 FOCT 随机噪声的特性^[10],并在双对数坐标图上利用曲线的斜率来分离和辨识各项随机误差的模型及其参数。Allan 方差定义为

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle [\bar{E}_{k+m}(\tau) - \bar{E}_k(\tau)]^2 \rangle. \quad (1)$$

式(1)中: $\langle \rangle$ 代表整体平均;平均电流 $\bar{E}_{k+m}(\tau) = \frac{w_{k+2m} - w_{k+m}}{\tau}$;平均电流 $\bar{E}_k(\tau) = \frac{w_{k+m} - w_k}{\tau}$;相关时间 $\tau = m \cdot \tau_0$; τ_0 为最小采样周期; w_k 为 $k\tau_0$ 时刻所累计的电流值。

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle [\bar{E}_{k+m}(\tau) - \bar{E}_k(\tau)]^2 \rangle = \frac{1}{2\tau^2} \langle (w_{k+2m} + w_k - 2w_{k+m})^2 \rangle. \quad (2)$$

Allan 方差可以表示为

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-2m)} \sum_{k=1}^{N-2m} (w_{k+2m} + w_k - 2w_{k+m})^2. \quad (3)$$

FOCT 原始数据中,Allan 方差与噪声的功率谱密度(PSD) $S_E(f)$ 之间存在如下量值关系,

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^\infty S_E(f) \cdot F(f) df = 4 \int_0^\infty S_E(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df. \quad (4)$$

式(4)表明,当随机噪声通过传递函数 $F(f)$ 的滤波器时,Allan 方差与随机噪声的总能量成正比,滤波器的带通取决于相关时间 τ ,通过调节相关时间 τ (即调节滤波器的带通)可以检测不同类型的随机过程,Allan 方差估计的可信度随独立组数的增加而提高^[9]。

FOCT 中不同类型的随机噪声误差项出现在不同的相关时间 τ 域,不同类型的噪声所体现出的功率谱密度及与相关时间 τ 的函数关系均不相同^[17-18]。

假设各噪声误差项具有统计意义上的独立性,可得综合的 Allan 方差 $\sigma_{\text{total}}^2(\tau)$ 为

$$\sigma_{\text{total}}^2(\tau) = \sum_{n=-2}^2 A_n \tau^n. \quad (5)$$

式(5)中, $A_n(n=-2, -1, 0, 1, 2)$ 分别对应于量化噪声、角度随机游走、偏值稳定性、角速率随机游走及速率斜坡各项噪声相关的拟合多项式系数。

$$\sigma_{\text{total}}^2(\tau) = \sum_{n=-2}^2 A_n \tau^n = \frac{3Q^2}{\tau^2} + \frac{N^2}{\tau} + \frac{2\ln 2}{\pi} B^2 + \frac{K^2}{3} \tau + \frac{R^2}{2} \tau^2. \quad (6)$$

式(6)中: Q 为量化噪声系数; N 为角度随机游走系数; B 为偏值不稳定性系数; K 为速率随机游走系数; R 为速率斜坡系数。

每种类型的噪声误差在 Allan 方差-相关时间双对数图上对应不同的斜率,量化噪声、角度随机游走、偏值不稳定性、速率随机游走及速率斜坡对应的双对数函数的斜率分别为 $-1, -0.5, 0, 0.5, 1$ 。

Allan 方差分析法在 FOCT 噪声分析及建模过程中的计算步骤为:

1) 存储采样间隔时间为 t_0 的 n 个样本数据 $I_i(i=1, 2, \dots, n)$ 。

2) 对 n 个初始样本的连续数据进行 2 次采样, 采样时间为 $\tau = kt_0$, 分别取 τ 等于 $t_0, 2t_0, \dots, kt_0, (k < n/2)$, 按式(7)求出每一时间长度为 τ 的数组平均值。

$$\bar{I}(\tau) = \frac{1}{k} \sum_{i=p}^{p+k-1} I_i(t_0). \quad (7)$$

3) 相邻数组平均值之差的随机变量集合 M 为

$$M = \{I_{p+1}(\tau) - I_p(\tau), p=1, \dots, n-k\}. \quad (8)$$

4) 求随机变量集合 M 的方差为

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(n-k-1)} \sum_{p=1}^{n-k-1} [\bar{I}_{p+2}(\tau) - 2\bar{I}_{p+1}(\tau) + \bar{I}_p(\tau)]^2. \quad (13)$$

5) 选取不同的 τ , 得到 $\tau-\sigma(\tau)$ 的对应关系。

Allan 方差分析方法及建模技术能有效地分离并辨识影响 FOCT 精度的几项主要随机噪声的类型,通过分析曲线可以估算出相应的噪声误差量值,可以从整体上对 FOCT 的性能做出全面的评估,另外,通过分析不同类别的噪声量值,又可以完成 FOCT 噪声误差的误差源定位,既有利于提高 FOCT 研发过程中的性能,又有利于 FOCT 工程应用中的故障辨识与定位。

3 实验与仿真分析

分别对几台光纤电流互感器进行了故障特性检测试验,对测试数据按照 Allan 方差模型计算,形成

的曲线见图 3、4。测试数据能够准确地估计光纤电流互感器随机误差,主要包括:量化噪声、角度随机游走、零偏不稳定性、角速率随机游走、速率斜坡和正弦分量。依据分析结果,可以评估互感器的健康状态,结合误差特性与器件的对应关系,可以定位互感器的故障源。图 3 是第 1 个 FOCT 的 Allan 方差曲线,由图 3 可以看出,量化噪声、角度随机游走、偏值不稳定性噪声是主要的误差,其误差来源于光电探测器光子散粒噪声、放大器噪声、电子器件热噪声和低频噪声,可以看出该 FOCT 的最小分辨率性能受到影响。图 4 是第 2 个 FOCT 的 Allan 方差曲线,由图 4 可以看出,角度随机游走、正弦噪声是主要的误差,其误差来源于高频噪声为主的系统噪声,可以看出该 FOCT 的最小分辨率性能受到影响。

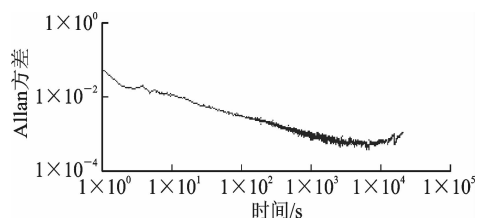


图 3 FOCT 输出数据 Allan 方差曲线

Fig. 3 Allan variance curve of first FOCT

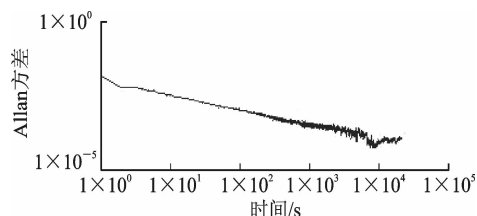


图 4 FOCT 输出数据 Allan 方差曲线

Fig. 4 Allan variance curve of second FOCT

4 结语

Allan 方差分析方法根据噪声的功率频谱特性及相干时间,分析 FOCT 主要类别的噪声特性,并依据功率谱密度函数建立 FOCT 噪声误差分析模型,能有效地分离并辨识影响 FOCT 精度的几项主要随机噪声的类型,通过分析曲线可以估算出相应的噪声误差量值,可以对 FOCT 的性能做出全面的评估,另外,通过分析不同类别的噪声量值,又可以完成 FOCT 噪声误差的误差源定位。通过互感器的故障模拟以及扰动信号的辨识仿真,验证了 Allan 方差方法的有效性。Allan 方差适用于对光纤电流互感器的渐变状态进行评估和诊断,避免潜在性故障发生,例如,由温度、光源不稳定等原因引起的光纤电流互感器渐变异常情况。

参考文献:

- [1] 许扬,陆于平,卜强生,等. 光纤电流互感器对保护精度和可靠性的影响分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(16):119-124.
XU Yang,LU Yuping,BU Qiangsheng,et al. Analysis for effect of fiber-optic current nsformer on protection accuracy and reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(16):119-124.
- [2] WANG Lihui. Methods of fault diagnosis in fiber optic current transducer based on allan variance[J]. Mathematical Problems in Engineering,2014,83(10):1-6.
- [3] RAHMATIAN F. High-voltage current and voltage sensors for a smarter transmission grid and their use in live-line testing and calibration[C]//Power and Energy Society General Meeting of IEEE. Minneapolis: IEEE, 2012:24-29.
- [4] LI J,FANG J. Not fully overlapping allan variance and total variance for inertial sensor stochastic error analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2013,9(11):659-672.
- [5] 王立辉,杨志新,殷明慧,等. 数字闭环光纤电流互感器动态特性仿真与测试[J]. 仪器仪表学报,2010,31(8):1890-1895.
WANG Lihui,YANG Zhixin,YIN Minghui,et al. Simulation and test of dynamic performances of digital closed loop fiber optic current transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2010,31(8):1890-1895.
- [6] KLAUS B,PHILIPPE G. Fiber optic current sensor for electrowinning of metals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007,25(11):3602-3609.
- [7] BOUBED K,AITOUCHE A,BAYART M. Nonlinear parity space applied to an autonomous vehicle[J]. Journal of Energy and Power Engineering,2009,3(12):10-18.
- [8] BOHNERT K,GABUS P,NEHRING J,et al. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology,2002,20(2):267-276.
- [9] IEEE Std 952-1997 IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyross[S]. 1997.
- [10] IEEE Std 647-2006 IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros[S]. 2006.
- [11] 韩军良,葛升民,沈毅. 基于总方差方法的光纤陀螺随机误差特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(5):708-711.
HAN Junliang,GE Shengmin,SHEN Yi. Research on the stochastic error properties of FOG based on total variance [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2007,39(5):708-711.
- [12] KLAUS B,PHILIPPE G. Fiber optic current sensor for electrowinning of metals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007,25(11):3602-3609.
- [13] ALLAN D W,BARNES J A. A modified Allan variance with increased oscillator characterization ability[J]. Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium,1981(5):470-475.
- [14] HOWE D A. The total deviation approach to long-term characterization of frequency stability[J]. IEEE Transactions on Ultrasonic,Ferroelectrics,and Frequency Control,2000,47(5):1102-1110.
- [15] 吕品,刘建业,赖际舟,等. 光纤陀螺的随机误差性能评价方法研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(2):412-418.
LYU Pin,LIU Jianye,LAI Jizhou,et al. Evaluation method of stochastic error on the performance of FOG[J]. Journal of Scientific Instrument,2014,35(2):412-418.
- [16] LI Y,HU B Q,QIN F J,LI K L. Online estimation of ARW coefficient of fiber optic gyro[M]. [S.l.]:Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, 2014: 1-10.
- [17] 张朝阳,张春熹,王夏霄,等. 闭环光纤电流互感器误差分析与实验研究[J]. 高压电器,2008,44(5):417-419.
ZHANG Chaoyang,ZHANG Chunxi,WANG Xiaoxiao,et al. Error analysis and experimental research of closed loop fiber optic current sensor[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(5):417-419.
- [18] WANG L H. Modeling and simulation of polarization errors in Sagnac fiber optic current sensor[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics,2014,125(17): 4770-4775.
- [19] SILVA R M,MARTINS H. Optical current sensors for high power systems:A review [J]. Applied Sciences,2012,5(2): 602-628.
- [20] BRIGIDA A C,NASCIMENTO I M,MENDONCA S. Experimental and theoretical analysis of an optical current sensor for high power systems[J]. Photonic Sensors,2013,3(1):26-34.

周刚(1977—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化。