

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.011

基于方波调制原理的全光纤电流互感器定频调制研究

邓劲东, 赵森林, 刘东超, 阎嫦玲, 邵通广, 赵玉灿

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要: 电力系统的电力电子化趋势使得宽频率测量需求愈发凸显, 具有优良频率响应的全光纤电流互感器 (fiber optical current transducer, FOCT) 得到了越来越多的应用和关注。文中在介绍 FOCT 的基本原理和分析方波闭环调制方式信号处理过程的基础上, 揭示了 FOCT 频率特性的主要影响因素, 并提出区别于传统方波闭环调制的定频调制方法。通过固定调制解调频率, 与光路长度解耦, 保证了 FOCT 产品频率特性的一致性。试验结果表明, 该方法可以消除光学电流互感器频率特性的差异性, 为电力系统谐波电流测量与分析提供稳定可靠的数据来源。

关键词: 全光纤电流互感器; 方波调制; 信号处理; 定频调制; 频率特性

Research on Fixed Frequency Modulation of Fiber Optic Current Transducer Based on Square Wave Modulation Principle

DENG Jindong, ZHAO Senlin, LIU Dongchao, YAN Changling, SHAO Tongguang, ZHAO Yucan

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The trend toward electronization in power system has made wide-frequency measurement demands increasingly prominent, and all fiber optical current transducer (FOCT) with excellent frequency response has therefore gained growing applications and attention. On the basis of introducing the basic principle of FOCT and analyzing the signal processing process of square wave closed-loop modulation, in this paper, the main influencing factors of FOCT frequency characteristics are revealed, and a fixed frequency modulation method, which is different from traditional square wave closed-loop modulation, is proposed. By fixing the modulation and demodulation frequency and decoupling it from the optical path length, the consistency of the frequency characteristics of FOCT products is ensured. The test result shows that the method can eliminate the difference of frequency characteristics of the optical current transducer and provide stable and reliable data sources for harmonic current measurement and analysis of power systems.

Key words: fiber optical current transducer; square wave modulation; signal process; fixed frequency modulation; frequency characteristics

0 引言

随着新能源大规模并网以及高压直流输电工程的建设, 电力电子设备在电网中得到大规模应用, 向电网注入了大量宽频率信号。传统电磁式电流互感器采用铁心材料作为磁性元件, 实现一次、二次绕组的电磁耦合, 完成电流信号的传变, 这种互感器存在体积笨重、绝缘结构复杂、磁饱和、铁磁

谐振、动态测量范围小、响应频带窄等问题。由于其原理性的缺陷限制了保护系统的功能发展, 并越来越不能满足新型电力系统发展的需要^[1-9]。

全光纤电流互感器 (fiber optical current transducer, FOCT) 利用光纤线圈感应被测电流信息, 具有绝缘简单可靠、体积小、重量轻、无磁饱和、动态范围大、频率响应优良等特点^[10-11], 且安装方式灵活多样, 可满足交流、直流电网及电厂等各类应用

收稿日期: 2026-05-02; 修回日期: 2026-07-22

基金项目: 南瑞集团有限公司科技项目(JS2101856)。

Project Supported by the NARI Group Co., Ltd., Technology Projects(JS2101856).

需求^[12-13]。

针对 FOCT 的工作原理和特点已有大量研究。为了分析温度对电流测量精度的影响规律,建立了 FOCT 的温度模型^[14-15]。基于 FOCT 故障率偏高的现状,通过建立状态监测模型来提升 FOCT 的运维效率^[16-17]。在测量方面,分析调制器的调制系数对电流测量精度的影响^[18]。在 FOCT 的调制解调原理方面,目前主流的 FOCT 采用的是闭环方波调制解调方法^[19-23]。

当前研究主要着重于 FOCT 的测量精度,未涉及 FOCT 的频率特性。文中介绍了方波调制解调的基本实现方法,分析 FOCT 中电流信号解调处理过程,在此基础上对 FOCT 的频率特性影响因素进行分析。针对同一产品由于按照位置不同导致高频响应特性差异较大的现状,提出了一种频率特性稳定的定频调制解调方法。

1 FOCT 结构及原理

FOCT 的系统结构见图 1,采用反射式 Sagnac 型干涉仪结构,宽带光源 SLD 发出的光经起偏器变为线偏光,然后经偏振分光器,变成两束振幅相等、分别沿传输光纤两个光轴传输的正交线偏振光,经保偏光纤到达 1/4 波片,分别转换为左、右旋圆偏振光并进入传感光纤。根据法拉第旋光效应和安培环路定理,两束圆偏光之间产生正比于一次电流的相位差,圆偏振光正入射到反光镜以后,被反射回传感光纤圈,此时两束圆偏振光交换旋向,并且再一次引入非互易相移。返回的两束圆偏振光经 1/4 波片变为线偏振光,原路返回后产生干涉,干涉光经耦合器后进入光探测器,转换为电信号后送至信号处理单元^[24-25]。

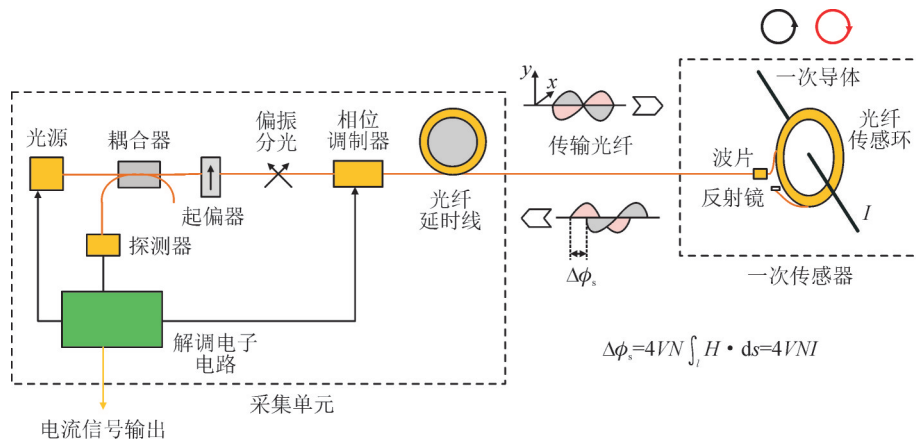


图 1 FOCT 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram of FOCT

最终,干涉光经探测器实现光电转换后的信号可表达为

$$P = \frac{P_0}{2} [1 + \cos(4VNI + \phi_m)] \quad (1)$$

式(1)中: P 为光探测器的采样值; P_0 为输入光强; ϕ_m 为相位调制器施加的调制相移; $4VNI$ 为因传感光纤的 Faraday 磁光效应引入的与电流相关的相位差; V 为传感光纤的伏尔德常数,表征光纤中光信号相位对一次电流的感应系数; N 为传感光纤缠绕匝数。

若没有调制器附加的相移,即 $\phi_m = 0$, 式(1)所示的采样值为一次电流的余弦函数,在零相位差附近响应灵敏度低、测量范围狭小、干涉结果不能反映输入电流的方向性等缺陷。

为了解决余弦敏感性和方向性等问题,信号处

理单元采用方波调制方式,为光路系统引入非互易的 90° 相位偏置 ϕ_m , 将系统响应从余弦函数转换为正弦函数,在电流不大时可准确反映电流方向及大小。

2 电流信号处理

FOCT 除了进行光路信号调制外,为了获取电流信号,还需要将光强信号进行解调以及滤波等信号处理,最终得到电流信号。

2.1 方波调制解调

方波调制的调制周期 $T = 2\tau$, 其中 τ 为光路的本征周期,即光从出发到返回的耗时,与光路长度正相关。

方波调制及干涉波形见图 2。施加在调制器上的调制相位波形 $\phi(t)$, 占空比为 50%, 幅值为 $\pi/2$,

即调制信号在正半周产生的相移为 $\pi/2$, 在负半周上不产生调制相移见图 2(a)。光束进入探测器前, 整个过程引入的总相位差 $\Delta\phi(t) = \phi(t) - \phi(t - \tau)$ 。即图 2(a)中的调制相位在整个光路系统感受到的相位差为 $\pm(\pi/2)$, 见图 2(b)。光路系统的干涉光强与相位差的关系为式(1), 此时光路系统的干涉光强见图 2(c)。

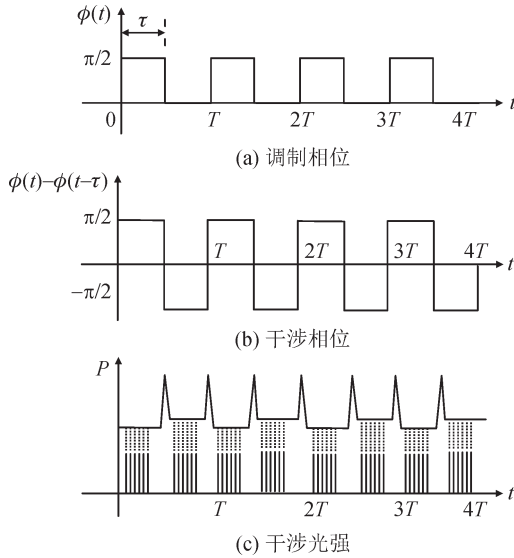


图2 方波调制原理

Fig. 2 Square-wave modulation principle

将式(1)的余弦函数转换为

$$P = \frac{P_0}{2} \left[1 + \cos(4\pi VNI \pm \frac{\pi}{2}) \right] = \frac{P_0}{2} [1 \pm \sin(4\pi VNI)] \quad (2)$$

方波调制后的干涉光强信号中包含幅值为 $P_0 \sin(4\pi VNI)/2$ 的方波信号, 方波信号幅值大小反应了法拉第相移大小^[26]。为了抑制噪声对解调提取信号的影响, 对于式(2)的方波输出信号, 在正负半周上各取 m 点, 分别求和后相减, 得到解调结果

$$\Delta P = \frac{mP_0}{2} [1 + \sin(4\pi VNI)] - \frac{mP_0}{2} [1 - \sin(4\pi VNI)] = mP_0 \sin(4\pi VNI) \approx mP_0 \cdot 4\pi VNI \quad (3)$$

当电流不大时, 解调结果 ΔP 与电流值 I 呈近似线性关系。

解调电流的周期与方波调制周期相同, 使用上述方波调制解调原理的 FOCT 等效为以采样周期 $T = 2\tau$ 进行电流采样。

2.2 数字信号处理

以光路长度 200 m 为例, 解调电流采样频率在 250 kHz, 如果将数据直接发送, 对后端应用的接收能力要求较高, 实际应用中会通过重采样将 FOCT 的输出采样率降低, 为了避免重采样造成频率混叠, 通常会增加数字低通滤波器。

FOCT 的数字信号处理电路基本组成见图 3, 主要包括 A/D 采样、数字逻辑电路和 D/A 输出。干涉

后的光信号经过光电探测器转换为电信号, 电信号经过前置放大器后通过 A/D 采样转化为离散信号。数字逻辑电路包含 2.1 节所述解调逻辑以及重采样前的数字低通滤波器。D/A 输出频率与解调频率相同, 为光路系统引入非互易的相位偏置。

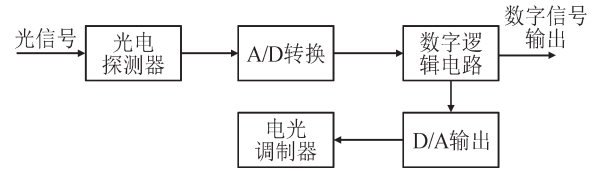


图3 数字信号处理电路

Fig. 3 Digital signal processing circuit

基本的数字信号处理流程图见图 4, 光电转换器输出的连续域电信号 $x(t)$ 经过 A/D 转换为采样率为 f_1 的离散信号 $X_1[f_1]$, 然后经过解调处理得到采样率为 $f_2 = 1/2\tau$ 的离散信号 $X_2[f_2]$, 在该采样率下进行低通滤波后进行重采样得到采样率为 f_3 的输出电流数字信号 $X_3[f_3]$ 。

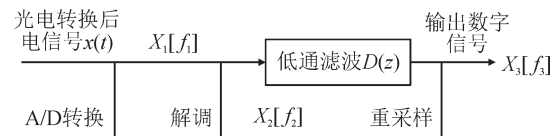


图4 数字信号流程

Fig. 4 Digital signal process

图 4 中: A/D 转换的采样率 f_1 通常为 10 MHz 以上; 解调电流的采样率 f_2 随光路长度变化。以光路长度 200 m 为例, 解调电流采样频率在 250 kHz; 输出电流数字信号的采样率 f_3 由具体应用场景确定, 常见的采样率为 10、50、100 kHz。

2.3 闭环跟踪

为了减小系统输出非线性误差和增大动态测量范围, FOCT 通常采用闭环跟踪算法, 在光路系统中引入一个与法拉第相移大小相等、方向相反的反相移 ϕ_R , 用来抵消电流产生的法拉第相移。保证测量系统始终工作在线性度最好的零相位附近区域, 此时系统的解调结果由式(3)变为

$$\Delta P = mP_0 \sin(4\pi VNI + \phi_R) \approx mP_0(4\pi VNI + \phi_R) \quad (4)$$

闭环跟踪系统本质上是反馈相移跟踪一次电流法拉第相移的闭环跟踪系统, 此时解调结果是跟踪系统的反馈量。根据自动控制理论, 引入控制器根据反馈量对输出反馈相移进行控制, 保证反馈量稳定在 0 附近^[27-28]。反馈控制系统的系统模型假设为 $G(z)$, 该系统的采样率与解调采样率相同, 因此采用闭环跟踪的 FOCT 数字信号处理流程图见图 5。

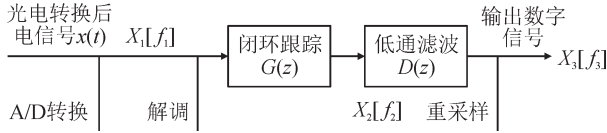


图5 闭环数字信号流程

Fig. 5 Closed loop digital signal process

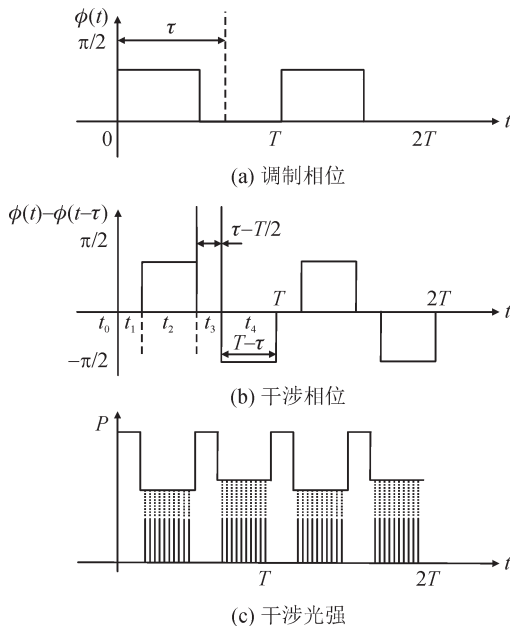
影响闭环FOCT测量带宽的主要因素是闭环跟踪系统函数和低通滤波函数,这两个函数均为离散域函数,反映到连续域的测量信号还与采样率 $f_s = \tau/\pi$ 有关。因此影响闭环FOCT测量带宽的主要因素有:①闭环跟踪算法;②低通滤波特性;③光路长度。对于某一确定的闭环FOCT产品,其闭环跟踪算法以及低通滤波器均固定,而光路长度会随着安装位置而变化。

3 定频调制方法

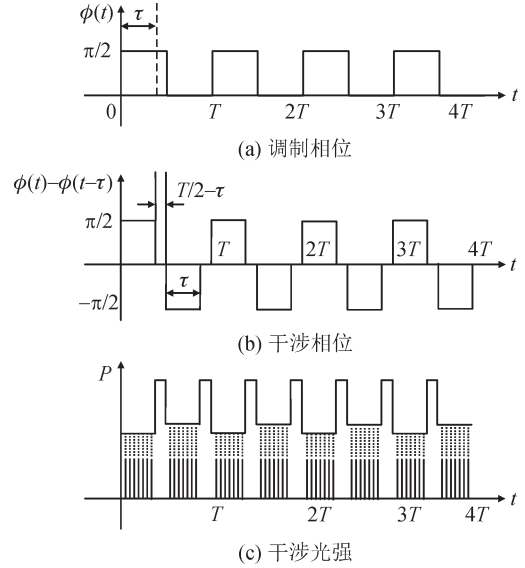
为了避免由于实际现场安装环境不同,光路长度的差异导致同一FOCT产品的测量带宽变化。文中在现有方波调制解调方法的基础上,提出了一种定频调制解调方法来消除光路长度对测量带宽的影响。定频调制解调的主要特征是调制解调周期固定,与光路长度无关。

当方波调制信号 $\phi(t)$ 的周期 T 与光学电流互感器的本征周期 2τ 不相等时,此时系统感受到的干涉相位除了图2(b)所示 $\pm\pi/2$ 外,每个周期还存在两段由于调制周期与本征周期不相等导致的无调制区域。

当调制周期 T 小于本征周期 2τ 时,调制及干涉波形见图6,此时干涉相位为 $\pm\pi/2$ 的有调制区为 t_2 和 t_4 ,时长均为 $(T-\tau)$,对应匹配调制下的正负半周,干涉相位为0的无调制区为 t_1 和 t_3 ,时长为 $(\tau-T/2)$ 。

图6 $T < 2\tau$ 定频调制波形Fig. 6 $T < 2\tau$ fixed frequency modulation waveform

当调制周期 T 大于本征周期 2τ 时,调制及干涉波形见图7,此时干涉相位为 $\pm(\pi/2)$ 的有调制区时长为两段 τ ,对应匹配调制下的正负半周,干涉相位为0的无调制区时长为两段 $(T/2 - \tau)$ 。

图7 $T > 2\tau$ 定频调制波形Fig. 7 $T > 2\tau$ fixed frequency modulation waveform

以调制周期 T 小于本征周期 2τ 情况下的闭环调制为例,分析定频调制原理。闭环调节时,除了用来将余弦工作点转换为正弦工作点的方波调制信号外,还叠加了用来抵消稳态电流的阶梯波调制信号,此时施加在相位调制器上的调制波形函数为

$$\phi(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} + N \cdot \phi_R & (N-1) \cdot \frac{T}{2} \leq t < N \cdot \frac{T}{2}, \\ N \cdot \phi_R & N = 2k+1, k \text{ 为整数} \\ N \cdot \phi_R & (N-1) \cdot \frac{T}{2} \leq t < N \cdot \frac{T}{2}, \\ N \cdot \phi_R & N = 2k+2, k \text{ 为整数} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, ϕ_R 为2.3节中所述与法拉第相移大小相等、方向相反的反馈相移。由第1节光路结构和测量原理可知,光信号从宽带光源SLD发出到形成干涉,会经过两次相位调制器的调制,两次的时间差为光在光路中传播的本征周期 τ 。因此系统感受到的干涉相位为

$$\Delta\phi(t) = \phi(t) - \phi(t-\tau) \quad (6)$$

将图6(b)中 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 代入式(5),将 t_3 和 t_4 代入式(6),实例化后,调制相位和干涉相位见式(7)。

$$\begin{cases} \phi(t_0) = 2k \cdot \phi_R \\ \phi(t_1, t_2) = \frac{\pi}{2} + (2k+1) \cdot \phi_R \\ \phi(t_3) = (2k+2) \cdot \phi_R \\ \phi(t_4) = (2k+2) \cdot \phi_R \\ \Delta\phi(t_3) = \phi(t_3) - \phi(t_3 - \tau) = \phi(t_3) - \phi(t_0) \\ \Delta\phi(t_4) = \phi(t_4) - \phi(t_4 - \tau) = \phi(t_4) - \phi(t_1, t_2) \end{cases} \quad (7)$$

整理后的无调制区 t_3 和调制区 t_4 的干涉相位分别为:

$$\Delta\phi(t_3) = \phi(t_3) - \phi(t_0) = (2k+2)\phi_R - 2k\phi_R = 2\phi_R \quad (8)$$

$$\Delta\phi(t_4) = \phi(t_4) - \phi(t_1, t_2) = (2k+2)\phi_R - [\frac{\pi}{2} + (2k+1)\phi_R] = -\frac{\pi}{2} + \phi_R \quad (9)$$

将式(8)、(9)分别代入式(1)可知,无调制区 t_1 、 t_3 的干涉光强见式(10),调制区 t_2 、 t_4 干涉光强见式(11)。调制区光强经过2.3节所述闭环跟踪处理后,可以解调出电流值。无调制区由于仍然是电流的余弦函数,对小电流不敏感,不参与解调电流计算。

$$P = \frac{P_0}{2} [1 + \cos(4VNI + 2\phi_R)] \quad (10)$$

$$P = \frac{P_0}{2} [1 \pm \sin(4VNI + \phi_R)] \quad (11)$$

当本征周期小于调制周期的一半时,对调制周期没有限制,但当本征周期大于调制周期的一半时,半周期有效点数为 $(T-\tau)$,即本征周期 τ 不能大于调制周期。

此时第2节所述低通滤波和闭环跟踪的数字处理模块都变为定频率,与实际光路长度无关,对于采用相同闭环跟踪策略以及滤波参数的FOCT,频率特性基本一致。

4 试验验证

在我司现有FOCT产品硬件基础上进行试验验证,通过使用常规匹配调制和文中定频调制两种调制方法进行频率特性试验。通过改变熔接光缆长度,模拟现场光路长度不同的应用场景,分别在光路长度为483、636 m条件下进行试验。

对一次导体通以幅值一定、频率在50~2 500 Hz之间变化的交流电流,通过高精度校验仪测量FOCT在不同频率下的比差和角差。两种光路长度按照匹配调制方式进行调制解调的频率响应试验结果见图8。

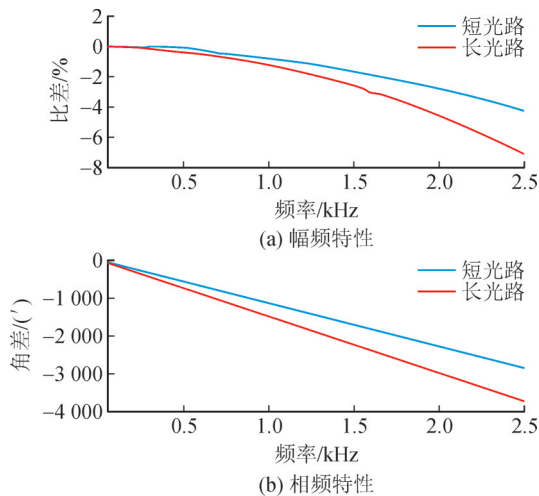


图8 匹配调制下频率响应特性

Fig. 8 Frequency response characteristics under matched modulation

由图8可以看到,不同光路长度下,FOCT在常规匹配调制时频率特性会有差异,频率越大差异也越大。

修改调制模式,在两种光路长度下按100 kHz调制频率进行定频调制,其他试验条件不变,测试定频调制下的频率响应特性试验结果见图9,定频调制下不同光路长度的FOCT频率特性基本一致,与前面理论分析结果吻合。

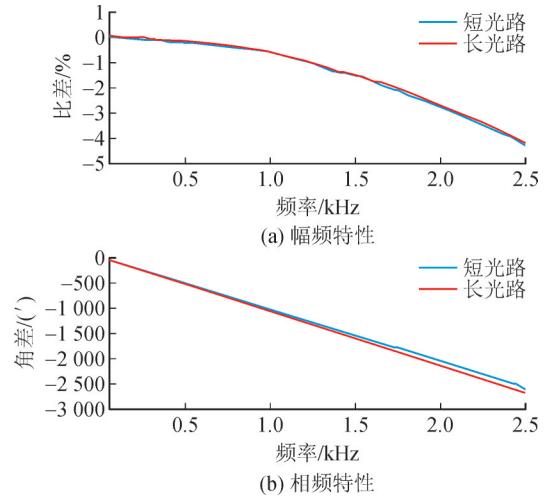


图9 定频调制下频率响应特性

Fig. 9 Frequency response characteristics under fixed frequency modulation

5 结语

文中对目前主流的方波闭环调制的电流信号处理过程进行了分析,发现同一系列FOCT产品影响频率特性的主要因素为现场光路长度。首次提出了与光路长度解耦的定频调制解调方案,通过理论分析论证了定频调制可以消除光路长度对频率特性的影响,保证同一系列FOCT产品频率特性的一致性。试验结果表明定频调制比匹配调制的FOCT产品频率特性一致性好,消除了光学电流互感器频率特性的差异性,为电力电子化的电力系统谐波电流测量与分析提供稳定可靠的数据来源。

参考文献:

- [1] 樊陈,姚建国,常乃超,等. 电力系统宽频测量装置技术规范解读及应用展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 190-199.
Fan Chen, Yao Jianguo, Chang Naichao, et al. Interpretation of technical specification for wide-frequency measurement device of power system and prospect of its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 190-199.
- [2] 宋璇坤,李敬如,肖智宏,等. 新一代智能变电站整体设计方案[J]. 电力建设, 2012, 33(11): 1-6.
Song Xuankun, Li Jingru, Xiao Zhihong, et al. Overall design scheme for new generation intelligent substation[J]. Electric Power

- Construction, 2012, 33(11): 1-6.
- [3] 李振华, 王尧, 孙婉桢, 等. 光学电流互感器的研究现状分析[J]. 变压器, 2018, 55(5): 33-38.
- Li Zhenhua, Wang Yao, Sun Wanzhen, et al. Analysis of research status of optical current transformer[J]. Transformer, 2018, 55(5): 33-38.
- [4] 王政平, 康崇, 张雪原, 等. 全光纤光学电流互感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(3): 36-40.
- Wang Zhengping, Kang Chong, Zhang Xueyuan, et al. Progress in all - fiber optical current transformer technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(3): 36-40.
- [5] 张可畏, 王宁, 段雄英, 等. 用于电子式电流互感器的数字积分器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 104-107.
- Zhang Kewei, Wang Ning, Duan Xiongying, et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 104-107.
- [6] 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.
- [7] 陈金玲, 李红斌, 刘延冰, 等. 比较式光学电流互感器的信号解调[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 82-85.
- Chen Jinling, Li Hongbin, Liu Yanbing, et al. Signal demodulation of comparative measurement based optical current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 82-85.
- [8] 黄志光, 陈浩, 丁浩寅, 等. 计及数字控制延时影响的含PMSG电力系统的宽频振荡 z 域阻抗判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 138-146.
- Huang Zhiguang, Chen Hao, Ding Haoyin, et al. The z domain impedance criterion for wide-band oscillation stability analysis of a power system with PMSG considering the impact of digital control delay[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 138-146.
- [9] 晁武杰, 唐志军, 梁懿. 基于智能变电站二次设备联调小样本的系统可靠性分析方法研究[J]. 电测与仪表, 2026, 63(4): 112-119.
- Chao Wujie, Tang Zhijun, Liang Yi. Research on reliability analysis method based on small-size samples of joint-operation of substation secondary equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2026, 63(4): 112-119.
- [10] 宋璇坤, 闫培丽, 肖智宏, 等. 全光纤电流互感器技术应用评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 149-154.
- Song Xuankun, Yan Peili, Xiao Zhihong, et al. Comment on the technology and application of fiber optic current transformer(FOCT)[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 149-154.
- [11] Silva R M, Martins H, Nascimento I, et al. Optical current sensors for high power systems: a review[J]. Applied Sciences, 2012, 2(4): 602-628.
- [12] 樊占峰, 白申义, 杨智德, 等. 光学电流互感器关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 67-74.
- Fan Zhanfeng, Bai Shenyi, Yang Zhide, et al. Research on key technology of optical current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 67-74.
- [13] 阎嫦玲, 王耀, 罗苏南, 等. 用于发电机保护的柔性全光纤电流互感器[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 191-196.
- Yan Changling, Wang Yao, Luo Sunan, et al. FFOCT for generator protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 191-196.
- [14] 李岩松, 王兵, 刘君. 全光纤电流互感器温度特性建模分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2772-2782.
- Li Yansong, Wang Bing, Liu Jun. Modeling analysis and experiment study on temperature characteristic of all-fiber optical current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2772-2782.
- [15] 胡浩亮, 黄俊昌, 夏历, 等. 全光纤电流互感器长期温度稳定性研究[J]. 电工电气, 2019(1): 5-9.
- Hu Haoliang, Huang Junchang, Xia Li, et al. Study on long-term temperature stability characteristics of fiber optical current transformer[J]. Electrotechnics Electric, 2019(1): 5-9.
- [16] 庞福滨, 李鹏, 魏旭, 等. 正弦波调制的全光纤电流互感器故障机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 153-160.
- Pang Fubin, Li Peng, Wei Xu, et al. Analysis on fault mechanism of fiber - optical current transformers with sine wave modulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 153-160.
- [17] 肖燕, 李军, 庞福滨, 等. 基于合成概率法的光学电流互感器运行可靠性[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 336-342.
- Xiao Yan, Li Jun, Pang Fubin, et al. Operation reliability of optical current transformer based on synthetic probability[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 336-342.
- [18] 王巍, 吴维宁, 王学锋. 调制器调制系数对光纤电流互感器测量精度的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 64-68.
- Wang Wei, Wu Weining, Wang Xuefeng. Effect of modulator modulation coefficient on measuring accuracy of fiber optic current sensor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 64-68.
- [19] 李建中, 李泽仁, 张登洪, 等. 基于开环检测系统的全光纤电流互感器研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1648-1653.
- Li Jianzhong, Li Zeren, Zhang Denghong, et al. Open-loop detection of fiber optic current transducer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1648-1653.
- [20] 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.
- Li Chuansheng, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al. Key techniques of reflective Sagnac interferometer - type fiber optic current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 104-108.
- [21] 文涛, 崔新友, 袁成, 等. 数字闭环全光纤电流互感器的信号处理[J]. 电子设计工程, 2018, 26(4): 130-135.
- Wen Tao, Cui Xinyou, Yuan Cheng, et al. Signal processing of digital closed - loop fiber optic current transducer[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(4): 130-135.
- [22] 罗苏南, 王耀, 丁晔, 等. 柔性直流输电用 ± 500 kV 直流全光纤电流互感器研制及测试[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 48-55.
- Luo Sunan, Wang Yao, Ding Ye, et al. Development and test of ± 500 kV DC fiber optical current transducer for flexible HVDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 48-55.
- [23] 王耀, 赵玉灿, 阎嫦玲, 等. 基于闭环算法的光学电流互感器的暂态电流误差特性研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 148-154.
- Wang Yao, Zhao Yucan, Yan Changling, et al. Study on transient current error characteristics of optical current transformer based on

- closed-loop algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 148-154.
- [24] 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.
Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Chaoyang, et al. A new all digital closed-loop fiber optic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 77-80.
- [25] 张朝阳,张春熹,王夏霄,等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(30):42-46.
Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 42-46.
- [26] 王夏霄,王 野,王熙辰,等. 全光纤电流互感器动态特性实验研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(3):9-14.
Wang Xiaoxiao, Wang Ye, Wang Xichen, et al. Experimental research on dynamic characteristics of fiber optical current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 9-14.
- [27] 张 猛,李 军,王新刚,等. 全光纤电流互感器PID控制算法研究[J]. 电子测量技术,2017,40(12):156-159.
Zhang Meng, Li Jun, Wang Xingang, et al. Theory on PID controller of fiber optic current transformer[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(12): 156-159.
- [28] 王夏霄,张 猛,邬战军,等. 光纤陀螺中PID控制理论与试验研究[J]. 电子测量技术,2012,35(11):32-35.
Wang Xiaoxiao, Zhang Meng, Wu Zhanjun, et al. Theory and experiment on PID controller of fiber optic gyros[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(11): 32-35.
- 邓劲东(1991—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统中光纤传感技术及过程层设备开发(通信作者)(E-mail:dengjd@nrec.com)。

《高压电器》2026年10期广告单位

封一:厦门海普锐科技股份有限公司

封二:江苏镇安电力设备有限公司

封三:巨邦集团有限公司

封四:亚洲电力设备(深圳)有限公司

封面拉页:大连第一互感器有限责任公司

前彩1:北京京东方真空电器有限责任公司

前彩2:广州创研智能科技有限公司

前彩3:国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司

前彩4:西安华伟电力电子技术有限责任公司

前彩5:扬州金源机器人自动化设备有限公司

前彩6:温州昌泰电气有限公司

前彩7:广东金晖隆电气股份有限公司

前彩8:上海乐研电气有限公司

中彩1:山东电工电气日立高压开关有限公司

中彩2:正泰电器股份有限公司

中彩3:西安高压电器研究院股份有限公司(业务)

中彩4:中国振华电子集团宇光电工有限公司

后彩1:中山市永淇自动化设备有限公司

后彩2:西安西电电工材料有限责任公司

后彩3:西安向阳航天材料股份有限公司

后彩4:西安西电高压开关操动机构有限责任公司