

直流光纤电流互感器谐波测量误差机理及改善

李传生, 赵伟, 王家福, 邵海明

中国计量科学研究院电磁计量科学技术研究所, 北京 100029

摘要 研究了直流光纤电流互感器(DC FOCT)谐波测量误差的产生机理及性能改善方法,建立了互感器闭环信号检测系统和滑动平均输出滤波器的离散域数学模型,对互感器的频率响应特性进行了仿真分析。研究表明,闭环信号检测系统的前向增益和输出滤波器的阶数是影响谐波电流测量准确度的主要因素;在闭环稳定的前提下增大前向增益,同时降低输出滤波器的阶数,可有效减小谐波电流的测量误差。搭建了DC FOCT谐波电流测量误差测试平台,实验结果表明,在50~1200 Hz范围内,样机测量误差不超过0.5%,带宽大于10 kHz。

关键词 传感器; 光纤光学; 光纤电流互感器; 谐波电流测量; 频率响应; 前向增益

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0910002

Harmonic Measurement Error Mechanism and Performance Improvement of Direct-Current Fiber-Optic Current Transformer

Li Chuansheng, Zhao Wei, Wang Jiafu, Shao Haiming

Division of Electricity and Magnetism Metrology Science and Technology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract The harmonic measurement error mechanism and performance improvement method of the direct-current fiber-optic current transformer (DC FOCT) are investigated. The mathematical models in the discrete domain of the closed-loop signal-detecting system and the moving average output filter are established. The simulation analysis is carried out on the frequency response characteristic of the transformer. The study results show that the forward gain of the closed-loop detection system and the order of the output filter are both crucial factors affecting the harmonic current measurement accuracy. The harmonic current measurement error can be effectively decreased by increasing the forward gain under the condition of the stabilization of the closed-loop system and simultaneously by reducing the order of the output filter. The test platform for the harmonic current measurement error of the DC FOCT is built. The experimental results show that, in the range of 50-1200 Hz, the measurement error of the model machine is less than 0.5% and the bandwidth is more than 10 kHz.

Key words sensors; fiber optics; fiber-optic current transformer; harmonic current measurement; frequency response; forward gain

OCIS codes 280.3420; 060.2310; 060.2370; 120.1880; 230.2240

1 引言

高压直流输电系统的换流器是非线性装置,运行过程中会在线路上形成大量的谐波^[1]。因此,直流电流互感器对谐波电流的测量应满足一定的准确度要求。国家标准[2]规定,对于50~1200 Hz的基波及谐波电流的测量,电子式直流电流测量装置的幅值误差不应超过0.75%,相角误差不应超过500 μ s,带宽不应小于3 kHz。

收稿日期: 2017-02-20; 收到修改稿日期: 2017-05-12

基金项目: 国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0102401)

作者简介: 李传生(1984—),男,博士后,主要从事光纤电流传感技术、宽频大电流计量技术方面的研究。

E-mail: lichsh@nim.ac.cn

导师简介: 邵海明(1965—),男,博士,研究员,主要从事高压及大电流计量标准方面的研究。

E-mail: shaohm@nim.ac.cn(通信联系人)

基于法拉第效应的光纤电流互感器具有测量准确度高、动态范围大、绝缘简单、安装灵活等优势,可同时测量交、直流电流,在高压直流输电领域具有广阔的应用前景^[3-6]。在目前已有的工作中,针对光纤电流互感器测量误差的研究主要集中在光路系统偏振误差方面,传感光纤的线性双折射、1/4波片的相位延迟、保偏光纤延迟环的偏振耦合,以及直波导相位调制器的输出尾纤偏振串音等特征参数及其温度相关性是影响光纤电流互感器变比误差的主要因素^[7-10]。对于谐波电流,除上述因素外,互感器系统的频率响应特性也是影响测量准确度的主要因素。

本文介绍了光纤电流互感器的工作原理,建立了互感器的动态数学模型,根据互感器的频率响应特性确定了影响谐波电流测量准确度的关键因素,并结合国家标准进行了优化设计,最后对样机的谐波测量性能进行了实验测试。

2 工作原理

如图1所示,超辐射发光二极管发出的光经环行器、起偏器后变为线偏振光,经45°光纤熔接点被均分到保偏光纤的快、慢轴上。两束正交的线偏振光沿保偏延迟光纤传输,经1/4波片后,分别变为左旋、右旋圆偏振光。在被测电流的作用下,两束正交的圆偏振光之间产生相位差,经传感光纤末端反射镜反射后沿原路返回,相位差加倍。两束正交圆偏振光经1/4波片后再次变为线偏振光,但偏振方向发生了互换(原来沿保偏延迟光纤快/慢轴传输的光此时沿慢/快轴传输),两束线偏振光最终经偏振器检偏,并发生干涉。沿光路系统传输的两束信号光均经历了正交的偏振模式,只是先后顺序不同,传感器的光路结构完全互易,两束信号光之间的相位差 Φ_s 仅由被测电流产生的法拉第相移决定,表达式为

$$\Phi_s = 4F = 4VNI, \tag{1}$$

式中 F 为法拉第相移, V 为传感光纤的Verdet常数, N 为光纤圈数, I 为被测电流。干涉光强经光电探测器变为电信号后,系统进行闭环信号处理。

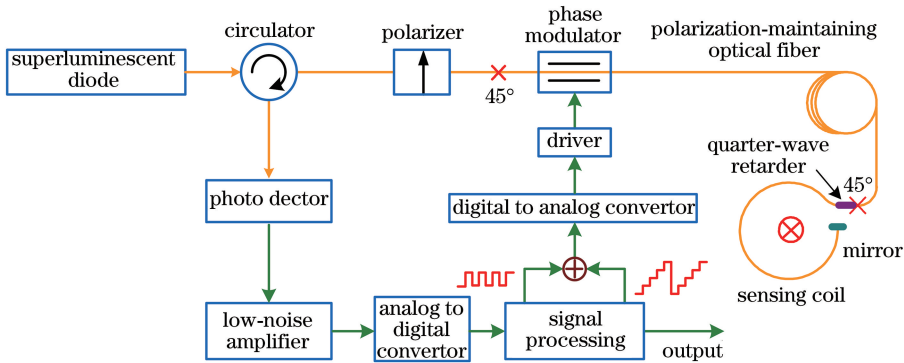


图1 直流光纤电流互感器(DC FOCT)结构

Fig. 1 Configuration of direct-current fiber-optic current transformer (DC FOCT)

光纤电流互感器采用相位调制、解调和闭环反馈技术实现高准确度、大动态范围的电流测量^[11]。为了保证高灵敏度并区分电流方向,通过相位调制器在两束信号光之间引入 $\pm\pi/2$ 的方波调制相位,干涉光强变为与之同频同相的方波信号,其幅值反映了被测电流。将该方波信号正半周期采样值之和减去负半周期采样值之和,可实现被测电流的解调。对解调结果进行积分处理,处理后的结果作为反馈相位形成阶梯波,驱动相位调制器抵消被测电流产生的法拉第相移,此时干涉光强 P 可表示为

$$P = \frac{1}{2} \alpha P_0 [1 \pm \sin(4F - \Phi_F)], \tag{2}$$

式中 P_0 为光源输出功率, α 为光路损耗, Φ_F 为反馈相移。当系统闭环稳定时, $\Phi_F = 4F$,反馈相移 Φ_F 即为互感器的输出。

3 理论分析

3.1 系统建模

如图 2 所示,根据光纤电流互感器的工作原理,将各环节离散化,可得到整个系统的动态模型。

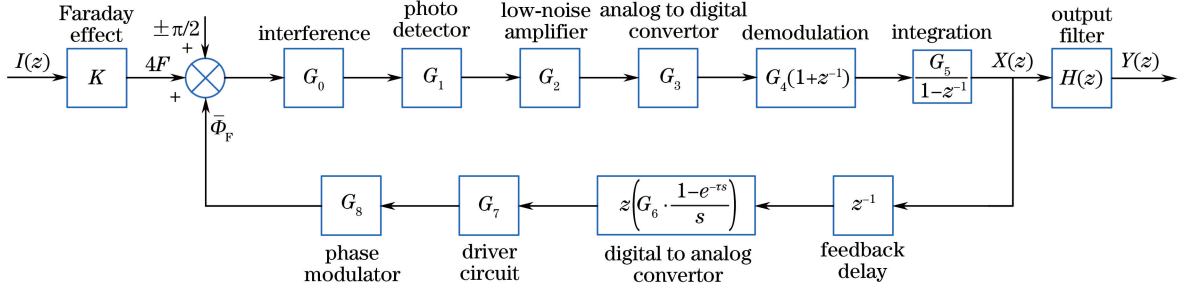


图 2 DC FOCT 动态模型

Fig. 2 Dynamic model of DC FOCT

根据(1)式,法拉第效应可等效为比例环节,比例系数 K 由 Verdet 常数及传感光纤圈数决定。根据(2)式,不考虑光路传输延时,在引入方波调制和闭环反馈后,依据小偏差线性化原则,忽略直流分量,干涉环节可近似为比例环节,比例系数 G_0 由光源功率和光路损耗决定。光电探测器、前置放大、模拟/数字转换等环节均简化为比例环节,光电探测器的电压响应度 G_1 由探测器的响应度和跨阻抗决定, G_2 为前置放大器增益, G_3 为模拟/数字转换增益。被测电流的解调模型可表示为 $G_4(1+z^{-1})$,其中解调增益 G_4 为干涉信号半周期内的采样点数, z 为 z 变换算子。积分环节的模型为 $G_5/(1-z^{-1})$,其中 G_5 为前向增益调整系数。

数字/模拟转换器可视为比例环节和零阶保持器的级联,其模型为

$$Z\left(G_6 \cdot \frac{1-e^{-\tau s}}{s}\right) = G_6(1-z^{-1}) \cdot \frac{1}{1-z^{-1}} = G_6, \quad (3)$$

式中 $Z[\cdot]$ 表示 z 变换运算; s 为拉氏变换算子; G_6 为数字/模拟转换增益; τ 为互感器的渡越时间(信号光往返两次经过相位调制器的时间间隔),也是闭环检测系统的控制周期。相位调制器及其驱动电路均为比例环节,令 G_7 为驱动电路的增益, G_8 为调制器的调制系数。为避免阶梯波复位对互感器的测量准确度产生影响^[12],数字/模拟转换器数字信号的溢出应产生 2π 的相位复位,对于 n 位数字/模拟转换器,系统的反馈增益为 $G_6 \cdot G_7 \cdot G_8 = 2\pi/2^n$ 。另外,根据闭环检测系统的工作时序,由于模拟/数字转换输出存在延时,实际解调完成时刻将错过当前数字/模拟转换反馈时刻,导致闭环反馈滞后一个控制周期。

设 $G_F = G_0 G_1 G_2 G_3 G_4 G_5$ 为前向增益, $G_B = G_6 G_7 G_8$ 为反馈增益,根据上述各环节的模型,可得到闭环信号检测系统的离散传递函数,即

$$G(z) = \frac{KG_F(z^2 + z)}{z^2 + (G_F G_B - 1)z + G_F G_B}. \quad (4)$$

光纤电流互感器的闭环输出含有大量的高频噪声,可采用 M 阶滑动平均滤波器对闭环检测系统的输出 $x(k)$ 进行滤波处理,输出序列 $y(k)$ 可表示为

$$y(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x(k-i), \quad (5)$$

式中 k 为输出序列的编号, i 为整数。因此,输出滤波器的离散传递函数为

$$H(z) = \frac{1}{M} \frac{1-z^{-M}}{1-z^{-1}}. \quad (6)$$

根据闭环信号检测系统和数字输出滤波器的模型,可得到互感器的离散传递函数,即

$$\Phi(z) = G(z)H(z) = \frac{K}{M} \cdot \frac{G_F(z^2 + z)}{z^2 + (G_F G_B - 1)z + G_F G_B} \cdot \frac{z^M - 1}{z^M - z^{M-1}}. \quad (7)$$

3.2 误差机理分析

根据系统动态模型,对光纤电流互感器的频率响应特性进行仿真分析,从而揭示谐波电流测量误差的产生机理。模型中各参数取值如下:到达光电探测器的光功率为 $10 \mu\text{W}$;光电探测器的电流响应度为 $0.9 \mu\text{A} \cdot \mu\text{W}^{-1}$,

跨阻抗为 100 kΩ,故电压响应度为 $0.09 \text{ V} \cdot \mu\text{W}^{-1}$;互感器采用 12 位模拟/数字转换器,参考电压为 2 V,模拟/数字转换增益为 2^{11} V^{-1} ;采用 16 位数字/模拟转换器,反馈增益为 $2\pi/2^{16}$;解调增益为 16;反馈延时等于互感器的渡越时间,实测结果为 $1.019 \mu\text{s}$;法拉第效应比例系数 K 在仿真计算中作归一化处理。

根据(4)式,将模型参数代入,在不同的前向增益调整系数下,对闭环信号检测系统的频率响应特性进行仿真计算,结果如图 3 所示。可以看出,在反馈增益恒定的条件下,前向增益的大小直接影响闭环检测系统的频率响应特性。前向增益越小,闭环检测系统的带宽越窄,谐波信号的衰减越大,故导致了较大的谐波测量误差。当 $G_F < 305.53$ 时,1.2 kHz 电流信号的幅值衰减大于 0.75%,相位延迟为 7.04° ;当 $G_F < 98.22$ 时,闭环检测系统的带宽小于 3 kHz。

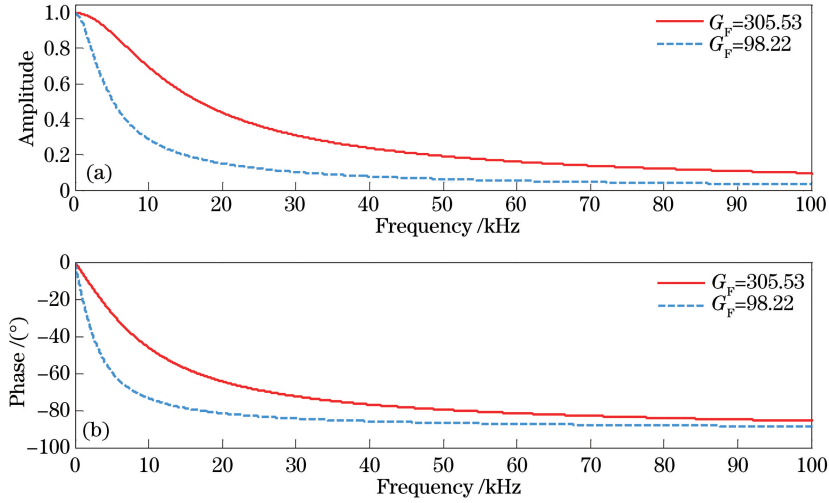


图 3 闭环检测系统频率响应特性。(a)幅频特性;(b)相频特性

Fig. 3 Frequency response characteristics of closed-loop signal-processing system.

(a) Amplitude-frequency characteristic; (b) phase-frequency characteristic

根据(6)式,在不同的阶数下,对数字输出滤波器的频率响应特性进行仿真计算,结果如图 4 所示。当 $M \geq 56$ 时,1.2 kHz 信号的幅值衰减将大于 0.75%,相位延迟超过 12.1° ;当 $M \geq 146$ 时,滤波器的带宽低于 3 kHz。

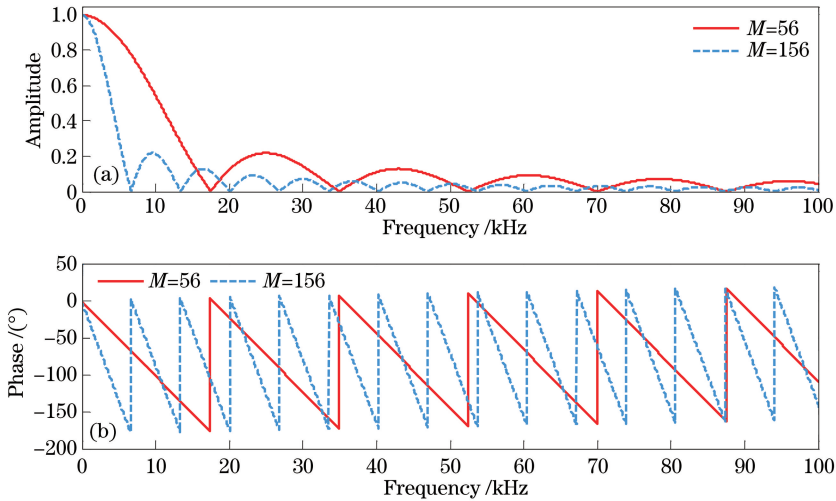


图 4 数字输出滤波器频率响应特性。(a)幅频特性;(b)相频特性

Fig. 4 Frequency response characteristics of digital output filter. (a) Amplitude-frequency characteristic;

(b) phase-frequency characteristic

3.3 谐波测量误差改善方法

光纤电流互感器可看作闭环信号检测系统和数字输出滤波器的级联,因此,频响特性可以表示为

$$A(f) = |G[\exp(j2\pi f\tau)]| \cdot |H[\exp(j2\pi f\tau)]|, \quad (8)$$

$$\theta(f) = \angle G[\exp(j2\pi f\tau)] + \angle H[\exp(j2\pi f\tau)], \quad (9)$$

式中 $A(f)$ 和 $\theta(f)$ 分别为幅频特性和相频特性, f 为频率, \angle 表示求幅角运算。根据上述分析, 闭环信号检测系统的前向增益及数字输出滤波器的阶数是影响 DC FOCT 谐波测量准确度的主要因素。在不同的前向增益及滤波器阶数下, 对互感器系统的频率响应进行仿真计算, 结果如图 5 所示。当前向增益较小时, 虽然信号检测系统可以稳定闭环, 但带宽较低, 加之受输出滤波器的影响, 互感器将产生较大的谐波测量误差。当 $G_F=305.53$ 、 $M=40$ 时, 1.2 kHz 电流信号的幅值衰减达 1.14%, 互感器的带宽为 7.009 kHz。数字输出滤波器的阶数越高, 噪声抑制能力就越强, 但同时互感器的带宽会被降低, 从而影响谐波测量的准确度。当 $G_F=1843.2$ 、 $M=56$ 时, 1.2 kHz 电流信号的幅值衰减为 0.78%, 互感器的带宽为 7.736 kHz。在满足闭环稳定的前提下增大前向增益, 在满足噪声抑制的前提下减小输出滤波器的阶数, 可提高光纤电流互感器的带宽, 减小谐波测量误差。当 $G_F=1843.2$ 、 $M=40$ 时, 1.2 kHz 电流信号的幅值衰减为 0.4%, 相位延迟为 9.39°, 互感器的带宽为 10.79 kHz, 可满足国家标准对直流光纤电路互感器谐波测量性能的要求。

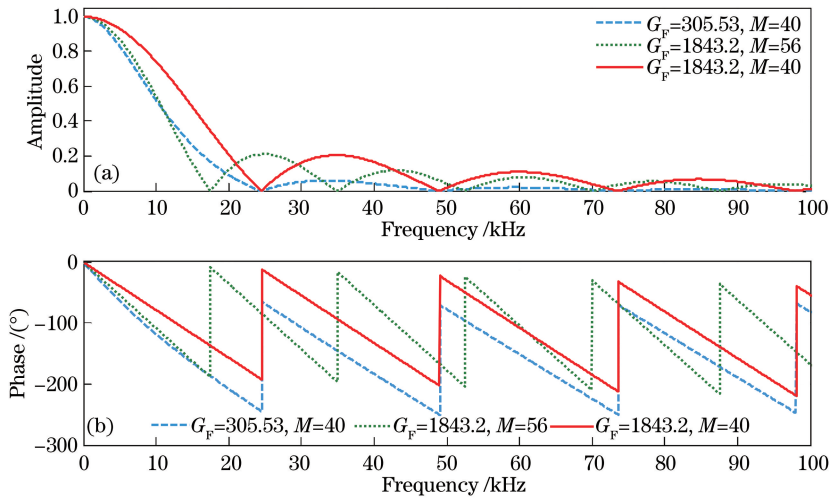


图 5 DC FOCT 频率响应特性。(a)幅频特性;(b)相频特性

Fig. 5 Frequency response characteristics of DC FOCT. (a) Amplitude-frequency characteristic; (b) phase-frequency characteristic

值得注意的是, 滑动平均输出滤波器的数据更新时间为互感器的控制周期 τ , 通常仅为 1~2 μs 。在实际应用中, 为减少二次设备处理的数据量, 通常需要对滤波器的输出进行抽取, 最简单的方式是按滤波器的阶数进行抽取, 此时只需将每 M 个滤波数据的平均值作为输出, 互感器的采样率下降至原来的 $1/M$ 。非整周期采样条件下采样点数的降低将引入测量误差^[13], 可以通过进一步降低滤波器的阶数来弥补。

4 实验研究

DC FOCT 谐波测量性能测试平台如图 6 所示。音频功率源作为测试信号源, 输出电流的频率范围为 50~10000 Hz, 最小可调频率为 1 Hz。当电流频率为 50 Hz 时, 最大输出电流的有效值为 100 A; 当电流频率为 10 kHz 时, 最大输出电流的有效值为 50 A。采用分流器作为标准电流传感器, 其交、直流差在 10 kHz 下的精度优于 60×10^{-6} 。被测光纤电流互感器与分流器串接在同一回路, 同时采用美国 Keysight 公司生产的 3458A 型 8 位半数字电压表测量分流器两端电压, 监测回路中的电流, 并与被测互感器的输出进行比较, 从而计算测量误差。调节光源驱动电流, 同时监测调制方波跳变时光电探测器输出尖峰的幅值。当幅值达到 0.9 V 时, 光源输出功率与仿真参数一致。渡越时间的测试方法为: 在相位调制器上施加峰-峰值为半波电压的阶梯波调制信号, 同时测量信号复位期间探测器输出两下尖峰之间的时间间隔。

在音频功率源输出不同频率的有效值为 50 A 的测试电流条件下, 对 DC FOCT 样机的谐波测量准确度进行测试, 结果如图 7 所示。受限于测试平台的数据通信速率, 每隔 10 个控制周期对滑动平均滤波器的输

出结果抽取 1 次,互感器的等效采样率约为 98 kHz。当 $G_F \approx 305.53, M=40$ 时,1.2 kHz 电流信号的测量误差约为 -1.234% ;当功率源输出 7.009 kHz 的被测电流时,互感器的测量误差约为 -29.77% 。当 $G_F \approx 1843.2, M=56$ 时,1.2 kHz 电流信号的测量误差为 -0.824% ;对于 7.736 kHz 的被测电流,互感器的测量误差约为 -28.9% 。当 $G_F \approx 1843.2, M=40$ 时,1.2 kHz 电流信号的测量误差约为 -0.46% ;当功率源输出 10 kHz 的被测电流时,互感器的测量误差约为 -24.94% 。因此,互感器的带宽大于 10 kHz。实验测试结果与理论计算基本一致,通过优化前向增益和输出滤波器的阶数,样机谐波测量性可满足国家标准的要求。



图 6 DC FOCT 谐波测量准确度测试平台

Fig. 6 Test platform for harmonic current measurement accuracy of DC FOCT

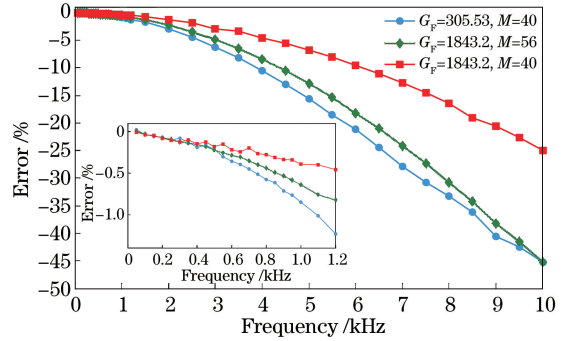


图 7 DC FOCT 谐波测量误差测试结果

(插图 为 误 差 曲 线 的 局 部 放 大)

Fig. 7 Measurement results of harmonic current measurement error of DC FOCT

(insert: local amplification of error curves)

5 结 论

建立了 DC FOCT 的动态数学模型,分析了互感器的频率响应特性,揭示了数字闭环信号检测系统的前向增益和输出滤波器的阶数对互感器谐波测量误差的影响机理,通过对这两个关键参数的优化设计,提高了互感器的谐波测量性能。测试结果表明,在 50~1200 Hz 范围内,样机的测量误差不超过 0.5%,带宽大于 10 kHz,满足国家标准的要求。

参 考 文 献

- [1] Ma Junmin, Huang Yongrui, He Qinglian. Research on harmonics of ± 800 kV ultra high voltage direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 33-37.
马俊民, 黄永瑞, 何青连. ± 800 kV 特高压直流输电系统谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 33-37.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 高压直流输电系统直流电流测量装置——第 1 部分: 电子式直流电流测量装置: GB/T 26216.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [3] Luo Sunan, Cao Dongming, Wang Yao, *et al.* Development and application research of ± 800 kV UHVDC fiber optical current transducer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 1-7.
罗苏南, 曹东明, 王 耀, 等. ± 800 kV 特高压直流全光纤电流互感器研制及应用研究[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 1-7.
- [4] Fei Ye, Wang Xiaoqi, Wang Benjin, *et al.* Development on ± 1000 kV UHVDC instrument transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2380-2387.
费 焯, 王晓琪, 汪本进, 等. ± 1000 kV 特高压直流互感器的选型与研制[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2380-2387.
- [5] Zhang Yan, Ma Yi. Application status and research progress of DC current measuring device for HVDC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(11): 32-39.
张 艳, 马 毅. 高压直流电流测量装置的应用现状与研究进展[J]. 电测与仪表, 2014, 51(11): 32-39.
- [6] Liu Shunxin, Pan Liangsheng, Wen Zhenhua. Research on the configuration of current transformers in HVDC converter station[J]. Process Automation Instrumentation, 2014, 35(10): 26-33.
刘顺新, 潘良胜, 文振华. 直流输电换流站中的电流互感器配置研究[J]. 自动化仪表, 2014, 35(10): 26-33.

- [7] Li Zhuoyan, Meng Yichao, Hao Xiangyu. Spun high birefringence all-fiber current transformers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 020601.
李卓岩, 孟义朝, 郝祥雨. 旋转高双折射全光纤型电流互感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 020601.
- [8] Wang Xiaoxiao, Wang Ye, Li Chuansheng, *et al.* Measurement method and experimental research of the temperature dependence of the phase delay of quarter-wave plates[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1205004.
王夏霄, 王 野, 李传生, 等. 光纤 1/4 波片相位延迟温度特性测量方法及实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1205004.
- [9] Yu J, Zhang C X, Li C S, *et al.* Influence of polarization-dependent crosstalk on scale factor in the in-line Sagnac interferometer current sensor[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(11): 117101.
- [10] Li Chuansheng, Zhang Chaoyang, Sun Haijiang, *et al.* Effect of polarization crosstalk of polarization-maintaining delay optical fiber coil on the fiber-optic current sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105008.
李传生, 张朝阳, 孙海江, 等. 保偏延迟光纤环偏振串音对光纤电流互感器的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105008.
- [11] Zhang Guicai. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 225-238.
张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 225-238.
- [12] 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.
王 巍, 吴维宁, 王学峰. 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.
- [13] Xie Deying, Xie Pinfang, Fu Zhihong, *et al.* Error analysis of non-integer-period sampling for electric sinusoidal signal [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(2): 113-118.
解德英, 谢品芳, 付志红, 等. 电网工频信号非整周期采样误差分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(2): 113-118.