DOI: 10.7667/PSPC151049

全光纤电流互感器技术应用评述

宋璇坤[1]，闫培丽[1]，肖智宏[1]，刘东伟[2]，李永兵[2]

(1.国网北京经济技术研究院，北京 100052；2.易能乾元(北京)电力科技有限公司，北京 100093)

摘要：介绍了全光纤电流互感器(FOCT)的基础技术原理。阐述了FOCT的抗振动干扰技术、高低温环境适应性、长期稳定性等实用化关键技术，并给出其主要解决途径。总结了FOCT性能检测情况及在国内的应用现状，提出FOCT与GIS、DCB等一次设备的集成安装方式，集成设备将用于新一代智能变电站的建设。分析了FOCT在电能计量、继电保护等应用中的问题，提出一种满足继电保护要求的双采样技术方案。最后，对FOCT的未来技术发展及应用前景进行展望。

关键词：全光纤电流互感器；振动；温度；长期稳定性；性能检测；双采样；应用现状

Comment on the technology and application of fiber optic current transformer (FOCT)

SONG Xuankun[1], YAN Peili[1], XIAO Zhihong[1], LIU Dongwei[2], LI Yongbing[2]

(1. State Power Economic Research Institute, Beijing 100052, China;
2. Enerxy QianYuan (Beijing) Electric Power Technology Limited, Beijing 100093, China)

Abstract: The basic principles of FOCT are introduced. The technology of anti-vibration, temperature adaptability and long-term stability are described, and the main solutions are given. Performance testing and application in China are summarized. The integrated installation method of FOCT and high voltage equipment, such as GIS, DCB, is put forward. Integrated equipment will be used for the construction of a new generation intelligent substation. The problems in the application of FOCT in electric energy measurement and relay protection are analyzed. A double sampling technique is proposed to meet the requirements of relay protection. At last, the development and application in the future are prospected.

Key words: FOCT; vibration; temperature; long-term stability; performance testing; double sampling; application status

0 引言

智能变电站是坚强智能电网的重要组成部分，新一代智能变电站建设对电流互感器等一次设备在集成化、智能化等方面提出了新的更高的要求。传统电流互感器存在绝缘结构复杂、安全性低、动态性能差等问题，已难以满足新一代电力系统建设需求[1-2]。

Faraday 磁旋光效应为高压电流信号的光学传感技术提供了理论基础。20 世纪 80 年代以来，光学电流互感器作为一种新型的高压电流测量技术受到国内外研究机构的重视，并伴随着光通信、微电子行业的进步获得快速发展。全光纤电流互感器(Fiber Optic Current Transformer, FOCT)是一种基于Sagnac 精密光纤干涉仪的电流传感装置，采用光学相位反馈闭环控制系统，具有绝缘结构简单、暂态性能好、智能化、易于集成等特点，契合新一代智能变电站的建设需求。同时 FOCT 在技术稳定度、工程应用数量与经验等方面均优于其他类型的光学电流互感器，已逐渐成为主流技术和产品方向[3]。

Sagnac 光纤干涉仪最早用于光纤陀螺仪技术。1988 年，Nicati 等人首次提出基于 Sagnac 光纤干涉仪的电流互感器光路，使 FOCT 系统动态范围提升至三个量级[4]。在此后的十余年间，国际研究学者针对 FOCT 的温度、振动等实用化关键技术做了大量的研究，从互易性光路设计、新型光纤材料及光纤结构、光学器件等多个方面均取得进展，文献[5]对此做了综述。2000 年以后，随着光电子技术进步和产业发展，光纤陀螺仪技术取得重大突破并已广泛应用于航天、航空及船舶领域[6]。在光纤陀螺仪

基金项目：国家电网公司科技项目(B3441515K003)

的基础技术产业平台上，结合国内智能电网建设的需求牵引，国内 FOCT 技术取得显著进展，并在智能变电站中获得批量化的应用。相同时期，国际上瑞士学者 Bohnert 等(ABB 公司)研制出准确度达 0.1 级的 FOCT 样机，并用于冶金直流大电流的测量[7]和 420 kV 隔离式断路器[8]。日本学者 Takahashi 等突破了振动、温度等技术难题，研制出 0.1 级 FOCT 样机，在换流站中的金属回线转换开关中挂网应用[9]。

本文基于 FOCT 技术原理，分析了其温度、振动和长期稳定性等实用化关键技术及解决措施，总结了总体应用现状、在智能变电站中的主要应用方式及推广中面临的难题，并对 FOCT 未来技术发展趋势及应用前景进行分析和展望。

1 技术现状

1.1 关键技术分析

(1) 抗振动干扰技术

为了降低 FOCT 振动等非互易性误差，G. Frosio 等提出一种反射式干涉仪光路用于提高 FOCT 测量性能及环境适应性[10]。如图 1 所示，偏振器与相位调制器之间的光纤 45° 熔接，其输出的线偏振光被分成两束正交传输的线偏振光，经反射镜反射后交换传输路径，返回至偏振器发生干涉。J. Blake 等人则进一步研究了机械振动、环境温度等对反射式 Sagnac 干涉仪系统的影响及克服办法，实验结果显示反射式光路结构的敏感单元(图 1 中的一次侧)对振动不具有敏感性，能够显著提高 FOCT 的抗振性能[11]。并且该方案电流引起的法拉第相移是 Sagnac 干涉式的两倍，灵敏度更高，成为主要光路方案。

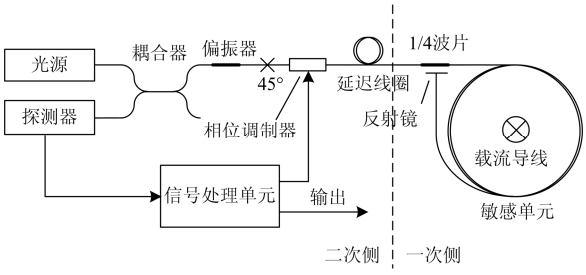


图 1 反射式 FOCT 光路结构

Fig. 1 Optical structure of reflective FOCT

Short 等人研究结果表明，虽然反射式 FOCT 的敏感单元具有较好的抗振性能，其余光路对振动仍具有敏感性[12]。在实际应用中，一次侧敏感单元更易受到来自于断路器及母线传来的振动，而二次侧光路则可置于隔振效果较好的控制柜中。因此该方案具有较好的工程适应性。

(2) 高低温环境适应性技术

圆保偏光纤线圈是敏感电流磁场的关键元件，其双折射特性直接影响 FOCT 的性能[13]。传感光纤主要有低双折射光纤和高双折射光纤两种，其中低双折射光纤是在单模光纤的生产过程中，为消除结构上的非理想性而进行旋转。这种光纤更接近于理想的单模光纤，能保持各种偏振态光波的传输，但易受弯曲及温度应力的影响而产生附加双折射，从而影响 FOCT 性能，主要应用于早期的互感器样机。通过对高线性双折射光纤拉丝中进行扭转制成的椭圆双折射光纤，如图 2 所示，能够有效抑制微观的扰动(如弯曲)、宏观的扰动(振动应力或缠绕)等引起的双折射误差，具有很好的高低温性能、抗干扰性能和长期稳定性，成为高性能 FOCT 的核心元件[14-15]。

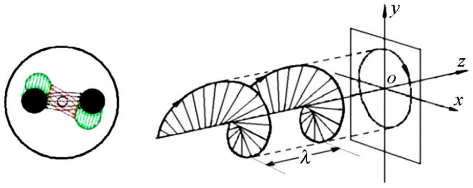


图 2 高双折射光纤扭转示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high birefringence fiber torsion

采用高双折射光纤能够降低温度双折射的影响，但光纤的维尔德常数具有正温度系统，在 −40~80℃温度范围内引起约 1%的标度因素误差。通过选择 1/4 波片相位延迟的工作区间，制作具有负温度系数的 1/4 波片，实现对光纤维尔德常数温度误差的硬件补偿[16]，如图 3 所示，从而使全温度范围内的变比误差控制在 0.1%以内[8]。

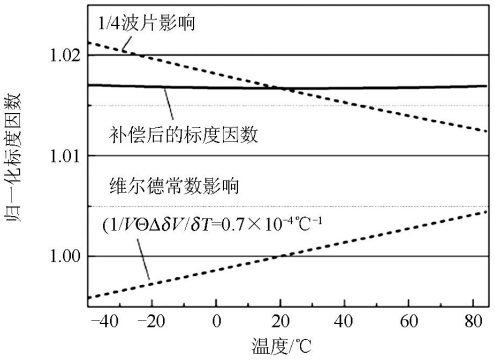


图 3 1/4 波片温度补偿示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 1/4 wavelength temperature compensation

Takahashi 等人提出控制保偏光纤消光比的方法对维尔德常数带来的温度误差进行补偿[9]。如图 4 所示，保偏光纤穿过专用金属套管，在高低温环境下受到金属套管形变压力的作用而产生消光比的变化，所引起传感器标度因数的变化能够补偿维尔

德常数带来的温度误差。试验结果表明，采用该技术的互感器系统在-40~80℃内比差小于±0.1%。

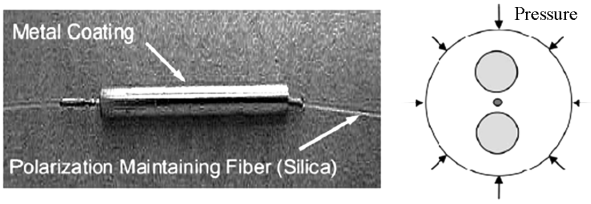


图 4 保偏光纤金属套管封装图
Fig. 4 Package of metal coating for PM fiber

(3) 长期稳定性技术

闭环反馈控制技术通常被应用于传感器系统，能够有效提高系统测量精度和长期稳定性。在 FOCT 技术方案中，相位反馈、调制系数反馈、光源温控、光源驱动反馈等是提高长期稳定性的关键技术。

干涉光强是法拉第相移的余弦函数，在小电流情况下的灵敏度较低，在大电流输入的情况下，输出信号的非线性误差将增大，会严重影响到继电保护判断的正确性和可靠性。为解决灵敏度低和输出非线性的问题，FOCT 系统利用相位调制器实现对光相位的调制和反馈补偿。如图 5 所示，利用高速 AD 转换器将干涉光强的模拟信号变为数字信号进入数字处理单元，完成数字采样、解调、数字积分等控制算法，形成的数字斜波与调制方波相加后，利用 DA 转换器将合成的数字信号转换为模拟信号，并施加到调制器。从而将开环的余弦输出曲线转变为线性响应，使互感器的测量范围和精度均大幅提高。同时，为了降低调制器在高低温环境下及长期缓慢漂移的影响，可采用调制系数反馈控制技术，通过“四态”方波调制得到调制系数的变化量，并进行自动跟踪与反馈校正，大幅提高系统长期稳定性[17]。

光源为互感器提供产生法拉第效应所需要的光学信号，其光功率、谱宽、偏振度、平均波长稳定性等参数，直接影响 FOCT 的性能稳定性。目前 FOCT 系统通常采用 SLD 光源，这种光源具有较高的输出功率、较宽的光谱，并且通过增加光源温度控制回路，可获得 100 ppm 的波长稳定性。谱宽在一定范围内的宽谱光源具有短的相干长度，有利于抑制 Sagnac 干涉仪光路中瑞利散射、克尔效应等引起的寄生干涉[18]。此外，采用光源驱动闭环控制技术可使光源长期输出稳定功率。如图 5 所示，从探测器输出信号中提取直流信号作为反馈控制信号，直接反映了互感器全部光路的总光功率变化，用于对于光源的高精度闭环控制[19]。

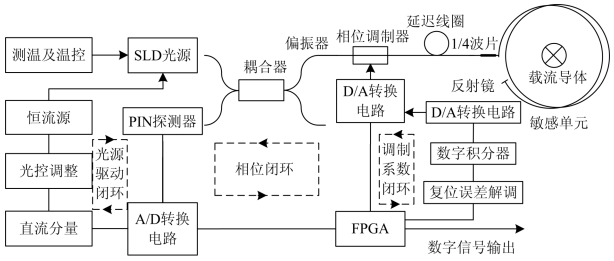


图 5 多路闭环控制示意图
Fig. 5 Schematic diagram of multi-channel closed-loop control

1.2 性能检测情况

电子式互感器在早期应用中存在可靠性和稳定性差、故障率较高。为加强电子式互感器质量管控，提升产品质量和性能，国家电网公司于 2011 年底组织开展了电子式互感器性能检测工作，由中国电力科学研究院电力工业电气设备质量检验测试中心承担检测工作。性能检测试验项目基于国家标准 GB/T 20840-7，GB/T20840-8，对电磁兼容、温度循环准确度等多项试验项目的标准要求做了提高和修改，同时增加了断路器振动干扰、隔离开关分合容性小电流抗干扰等特殊试验项目。国内 15 个研究机构或设备厂家提供的 FOCT 设备参加了首批性能检测试验，但均未能通过检测，故障原因集中在高低温准确度及电磁兼容等试验项目[20]。随着高双折射扭转光纤等关键技术的突破，自 2012 年底，陆续有 FOCT 样机通过性能检测试验。截止 2014 年底，中国电科院官网公告数据显示，已有十余家 15 台 FOCT 样机通过性能检测试验，标识着国内 FOCT 整体技术水平已取得重大提升。

2 应用现状

2.1 总体应用现状

我国开展智能电网建设以来，在改造与新建的智能化变电站中，已成功投运了 2000 多台 110~750 kV 电压等级的电子式电流互感器，其中 FOCT 应用占比约为 40%[21]，在智能变电站试点工程中应用占比约为 52%[22]。FOCT 在工程应用中出现的主要故障如安装过程中的光纤损坏、元器件个例失效等。工程应用为 FOCT 的设计检测、安装调试及运行维护等多个环节均积累了宝贵的经验。

2.2 典型应用方式

早期 FOCT 的安装方式是与传统电磁式互感器兼容的独立支柱式。随着我国智能电网建设的推进，FOCT 在新一代智能变电站建设中的主要应用方式为 GIS 集成安装式和隔离式断路器集成安装式。

GIS 集成安装式如图 6 所示，FOCT 敏感单元通过连接法兰与 GIS 对接安装。敏感单元安装在气室外侧，无气密及动热稳定问题，相比传统互感器能够大幅度减小 GIS 的体积[23]。这种集成安装方式能够适用于各类电压等级的 GIS 设备。

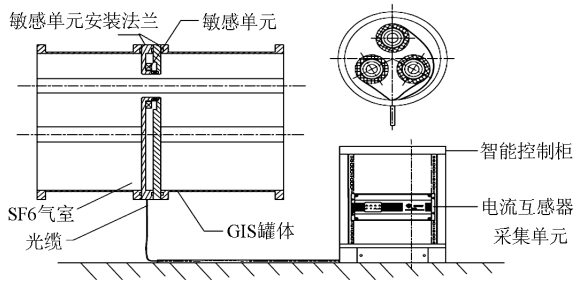


图 6 FOCT 与 GIS 集成安装示意图

Fig. 6 Integrated schematic diagram of FOCT and GIS

隔离式断路器(Disconnecting Circuit Breaker, DCB)是集成断路器、隔离开关、电子式电流互感器的新型智能高压一次设备，在新一代智能变电站建设中具有广阔的应用前景[24]。集成安装方式如图 7 所示，FOCT 敏感单元安装在绝缘套管的端面法兰内，传输光纤则预埋在套管侧壁与二次侧光路相连。FOCT 与 DCB 集成具有一些突出的优势，如集成程度高、抗干扰能力强、高压检修周期与 DCB 相同等。

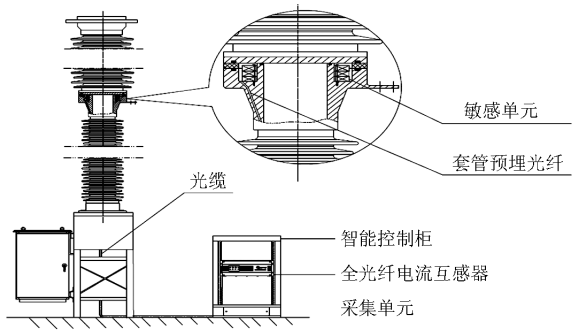


图 7 FOCT 与 DCB 集成安装示意图

Fig. 7 Integrated schematic diagram of FOCT and DCB

2.3 应用推广面临的问题

(1) 继电保护双 A/D 采样问题

智能变电站继电保护对电子式电流互感器提出了双 A/D 采样的可靠性要求，即每路电子式互感器采用双 A/D 采样系统接入合并单元。有源电子式电流互感器为单向数据采集的方式，很容易实现对一路传感信号的双 A/D 采样[25]，如图 8(a)所示。而 FOCT 采用了闭环反馈的信号处理技术，包含 A/D、D/A 转换电路，较难实现电路的整体双重化。规范规定采用两只独立 FOCT 提供双采样数据[26]，如图 8(b)所示，该配置方式使 FOCT 用量及工程造价加倍，不利于推广。结合继电保护要求及 FOCT 的特点，图 8(c)提出一种优化配置的集成传感光路方案，配合双 A/D、双 D/A 控制电路，实现两路采样回路的独立工作，完全满足继电保护配置的可靠性要求，同时能够有效降低使用成本，具有重要的研究价值。

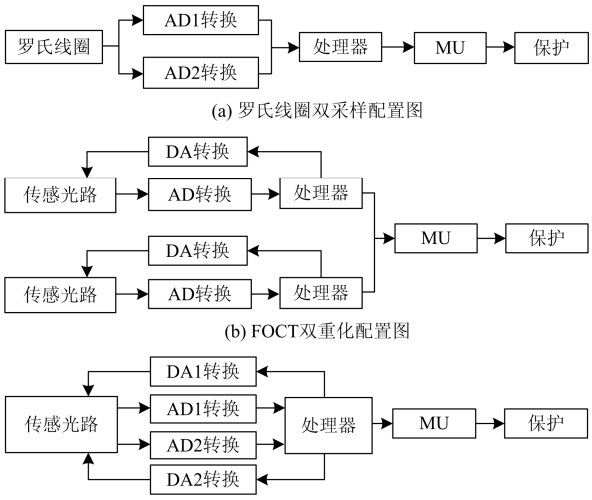


图 8 电子式互感器双采样配置方式

Fig. 8 Double sampling configuration for ECT

(2) 用于电能计量的精度与稳定性问题

近年 FOCT 的高低温准确度及稳定性等均得到较大提高，但在用于电能计量时，需长时间稳定满足 0.2S 测量准确级。目前尚无充分的试验数据验证 FOCT 的长期稳定性。

此外，与传统互感器相比，FOCT 具有光纤陀螺仪等光学传感器所共同面临的随机噪声问题，这是由光学元件的特性所决定的。目前已有大量文献研究了光纤陀螺仪随机噪声的机理、识别与评价方法、抑制措施及对导航和姿态控制应用的影响[27]，部分研究成果可以应用于 FOCT 设备，但仍需开展 FOCT 随机噪声对电能计量影响及其试验验证技术的研究[28]。

(3) 技术规范不完善的问题

智能变电站的建设过程中，在电子式互感器技术规范的制定方面取得较为丰硕的成果。但由于 FOCT 与有源电子式电流互感器之间的特性差异，通用技术规范难以较好地指导 FOCT 的工程实施，有必要开展针对性技术规范的研究与制定工作，如 FOCT 与一次设备的集成与检测、现场施工、运维与检修技术规范等。

3 结语

FOCT 在安全性、准确性及集成度等方面具有

突出的优势，是电子式电流互感器未来技术发展方向。近年来，国内 FOCT 设备的抗振性能、高低温性能、长期稳定性等关键技术取得突破性进展，并被推广应用于智能变电站的建设，积累了较为丰富的工程应用经验。但在其后续的推广应用中，仍面临继电保护双采样等急需突破的关键技术难题。

随着智能电网建设的不断推进，对智能变电站提出新的更高的需求，如基于“一体化设备、一体化网络、一体化系统”的新一代智能变电站建设方案，及基于“新型设备、新式材料、新兴技术”的远期智能变电站技术方案等[29]。结合以上重大需求，分析 FOCT 技术发展趋势如下。

(1) 高度集成化。未来 FOCT 将与 GIS、DCB 等智能一次设备进行高度的集成，二次采集单元与合并单元、智能终端等进行集成，并同时满足计量、保护、行波测量等需求的设备功能复用化。

(2) 设备智能化。未来 FOCT 具有准确、及时的故障自我诊断与定位功能，支撑智能变电站的状态监测信息一体化与运维简易化。

(3) 利用 FOCT 的良好传变特性，全面支撑“轻型直流输电”和电力电子变电站的建设。

参考文献

[1] 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.

[2] 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 Xiaxiao, 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.

[3] 肖智宏. 电力系统中光学互感器的研究与评述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 148-154.
XIAO Zhihong. Study and comment of the optical transformers in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 148-154.

[4] NICATI P A, ROBERT P. Stabilized current sensor using Sagnac interferometer[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1988, 21: 791-796.

[5] 王政平, 王和平. 光纤电流传感器研究新进展[J]. 激光与光电子学进展, 1999(7): 1-6.
WANG Zhengping, WANG Heping. Progress in optic-fiber current sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1999(7): 1-6.

[6] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.

[7] BOHNERT K, GABUS P. Fiber-optic current sensor for electrowinning of metals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3602-3609.

[8] BOHNERT K, GEORG M. Intrinsic temperature compensation of interferometric and polarimetric fiber-optic current sensors[J]. Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2014 Conference on. San Jose, CA, 8-13 June, 2014: 1-2.

[9] SASAKI K, TAKAHASHI M. Temperature-insensitive Sagnac-type optical current transformer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2463-2467.

[10] FROSIO G, DANDLIKER R. Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor[J]. Appl Opt, 1994, 33(25): 6111-6122.

[11] BLAKE J, TANTASWADIAND P, DE CARVALHO R T. In-line sagnac inter-ferometer current sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 116-121.

[12] SHORT S X, TANTASWADI P. An experimental study of acoustic vibration effects in optical fiber current sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4): 1702-1706.

[13] 姜中英, 张春熹, 徐宏杰, 等. 线性双折射对光纤电流互感器影响的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(增刊): 218-223.
JIANG Zhongying, ZHANG Chunxi, XU Hongjie, et al. Study of fiber optic current transducer error due to linear birefringence[J]. Optical Technique, 2006, 32(S): 218-223.

[14] 钱景仁, 李陆燊. 用于电流传感器的高线性双折射高扭转光纤[J]. 中国科学, 1989(6): 637-643.

[15] 王英利, 康梦华, 任立勇, 等. 用于全光纤电流传感器的扭转高双折射光纤设计[J]. 激光与红外工程, 2015, 44(1): 170-175.
WANG Yingli, KANG Menghua, REN Liyong, et al. Design of spun high-birefringent fiber for fiber optic current sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 170-175.

[16] BOHNERT K, GABUS P. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. Lightwave Technology, 2002, 20(2): 267-276.

[17] 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.

[18] 张昕. 光源对光纤陀螺性能影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[19] 张晞, 王妍, 张春熹, 等. 光纤陀螺光源驱动技术[J]. 北京航天航天大学学报, 2002, 28(3): 298-300.
ZHANG Xi, WANG Yan, ZHANG Chunxi, et al. Driving technology of the light source of FOG[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(3): 298-300.

[20] 刘彬, 叶国雄, 郭克勤, 等. 电子式互感器性能检测及问题分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2972-2980.
LIU Bin, YE Guoxiong, GUO Keqin, et al. Quality test and problem analysis of electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2972-2980.

[21] 宋璇坤, 刘开俊, 沈江. 新一代智能变电站研究与设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[22] 宋璇坤, 闫培丽, 吴蕾, 等. 智能变电站试点工程关键技术综述[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 10-16.
SONG Xuankun, YAN Peili, WU Lei, et al. Review of key technology for smart substation pilot projects[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 10-16.

[23] 徐晓蕾, 赵睿文. 光学电流互感器在 110 kV 蒙自变电站中的应用[J]. 华东电力, 2010, 38(4): 516-519.
XU Xiaolei, ZHAO Ruiwen. Application of optical current transformer in 110 kV Mengzi substation[J]. East China Electric Power, 2010, 38(4): 516-519.

[24] 李劲斌, 阮羚, 陈隽. 应用于新一代智能变电站的隔离断路器[J]. 电力建设, 2014, 35(1): 30-34.
LI Jinbin, RUAN Ling, CHEN Jun. Application of disconnecting circuit breaker in new generation smart substation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(1): 30-34.

[25] 李秀丽, 李文正, 鲍都都, 等. 基于电子式互感器双 A/D 采样的差动保护可靠性方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 106-110.
LI Xiuli, LI Wenzheng, BAO Dudu, et al. Research of the differential protection reliability scheme based on the electronic transformer double A/D sampling[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 106-110.

[26] 国网企业标准《Q/GDW_441-2010 智能变电站继电保护技术规范》[S].

[27] 孙国飞, 吴衍记, 那永林. 光纤陀螺中随机游走的分析研究[J]. 战术导弹技术, 2009, 35(1): 75-78.
SUN Guofei, WU Yanji, NA Yonglin. Investigation into random walk in optical fiber gyroscope[J]. Tactical Missile Technology, 2009, 35(1): 75-78.

[28] 王立辉, 伍雪峰, 孙健, 等. 光纤电流互感器噪声特征及建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 62-66.
WANG Lihui, WU Xuefeng, SUN Jian, et al. Research on character and modeling method of noise in fiber optic current transducer (FOCT)[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 62-66.

[29] 宋璇坤, 沈江, 李敬如, 等. 新一代智能变电站概念设计[J]. 电力建设, 2013, 34(6): 11-15.
SONG Xuankun, SHEN Jiang, LI Jingru, et al. Design of new generation smart substation[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(6): 11-15.

收稿日期：2015-06-24； 修回日期：2015-09-25

作者简介：

宋璇坤(1960-)，女，总工程师，教授级高工，研究方向为电力系统分析与控制；

闫培丽(1975-)，女，高级工程师，研究方向为电力系统分析与控制；

肖智宏(1977-)，男，高级工程师，研究方向为电力系统分析与控制。

(编辑 姜新丽)