

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.021

光纤电流互感器与隔离断路器集成技术研究

李付永¹, 陈亚亚¹, 徐知芳², 杨颖²

(1. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 易能乾元(北京)电力科技有限公司, 北京 100093)

摘要:文中基于当前行业现状,分析了电子式电流互感器与隔离断路器集成设计的困难与弊端,介绍了新兴的光纤电流互感器的工作原理及组成,并提出了一种将光纤电流互感器与隔离断路器集成的技术思路。结合产品开发实践,研究并给出了从一次侧的高压结构、绝缘密封、光纤绝缘套管,到二次侧的采集单元7相合1机箱的详细设计方案,实现了光纤电流互感器与隔离断路器设备的高度集成、功能整合,解决了电流互感器与隔离断路器集成的行业难题,为智能变电站中的一次设备集成提供了技术参考。最后还用Ansys 电场仿真结果和样机型式试验数据证实了集成设计方案既不影响隔离断路器的一次高压绝缘性能,也未降低光纤电流互感器的测量精度,充分体现了该技术的正确性和可行性。

关键词: 光纤电流互感器; 隔离断路器; 集成技术; 集成设计方案

Integration Technology of Fiber Optic Current Transformer and Disconnecting Circuit Breaker

LI Fuyong¹, CHEN Yaya¹, XU Zhifang², YANG Ying²

(1. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China; 2. Enerxy QianYuan (Beijing) Electric Power Technology Limited, Beijing 100093, China)

Abstract: The difficulties and disadvantages in integration design of electronic current transformer and disconnecting circuit breaker are analyzed, the working principle and composition of fiber optic current transformer are introduced, and an idea of integration technology of fiber optic current transformer and disconnecting circuit breaker is presented. Combining product development practice, a design scheme, including the high voltage structure, insulation seal, and optic fiber insulation sleeve at the primary side, as well as the sampling unit's seven-in-one box at the secondary side is discussed in detail. This scheme can realize high structure integration and function combination of fiber optic current transformer and disconnecting circuit breaker, give a solution to the above problems in integration design of current transformer and the disconnecting circuit breaker, and provide a technical reference for the integration of devices at primary side in an intelligent power station. In addition, electric field simulation with ANSYS and prototype test demonstrate that this integration design scheme neither weakens the high voltage insulation performance of the disconnecting circuit breaker, nor reduces the measurement accuracy of fiber optic current transformer, indicating the correctness and feasibility of this integration technology.

Key words: fiber optic current transformer; disconnecting circuit breaker; integration technology; integration design scheme

0 引言

近些年来中国智能电网技术发展迅速,国家电网公司不断地推进电网智能化、数字化的规划与建设。智能变电站是智能电网的关键组成部分之一,

智能变电站试点成功将是智能电网建设的标志性节点,而智能变电站的核心技术则是如何实现站内一次设备和二次设备的全面智能化和集成化^[1-2]。

目前,在变电站设备智能化方面已经取得实质性的进展,通过用数字化设计的电子式互感器、光学互感器取代变电站中老旧的传统互感器来提高

智能化程度,成为一种大趋势^[3-6]。工程实践证明,这种解决方案已然取得良好的成果,自 2008 年起,已有近 6 000 台数字化设计的互感器在各级变电站中投入试点应用,可靠运行长达 7 年之久。但是在变电站设备集成化上研究甚少,目前新兴的电子式互感器、光学互感器在智能变电站内的安装方式仍然完全参照传统互感器执行,不仅占地面积大、运输困难,而且操作更加复杂,这显然不符合智能变电站的设备集成化需求,也不利于技术创新。

文中以光纤电流互感器(FOCT)为主要研究对象,探索一种与隔离断路器(DCB)集成化设计的方案,以实现设备的有效集成、功能高度整合,达到安装快捷、运行智能、检修方便的应用需求。最后还用 Ansys 电场仿真、样机型式试验的数据论证该技术方案的正确性和可行性。

1 FOCT 原理及组成

FOCT 利用了 Faraday 磁光效应的原理,当偏振光穿过传感光纤时,受电流磁场影响,光的偏振方向会发生旋转,且其旋转角度与平行于光传播方向的磁场强度成正比^[7-8]。设旋转角度为 θ_F ,维尔德(verdet)常数为 V ,电流产生的磁场强度为 H ,光纤总长度为 l ,则有^[9-11]

$$\theta_F = \int V H d l. \quad (1)$$

若传感光纤首尾闭合,则穿过光纤传感环的电流产生的磁场将遵守安培环路定律,式(1)则可化为

$$\theta_F = \oint V H d l = V N \oint H d l = N V I. \quad (2)$$

式(2)中: N 是光纤传感环的匝数; I 是母线中流过的电流,可见旋转角 θ_F 与被测电流 I 成正比,因此只要检测出旋转角度,即可解算出母线电流的大小。

FOCT 设备的工作机理见图 1,光源发出的光经分束器、起偏器后,成为线偏振光,受到调制器的相位调制。在进入传感环时,1/4 波片使线偏振光变成左旋、右旋的两个圆偏振光,电流磁场使其产生一定角度的相位偏转。经反射镜反射回来,光波被探测器检测到并转换成电信号进入信号处理电路,完成采样、解调^[12-13]。

从产品结构上看,FOCT 主要由一次光纤传感环和二次采集单元两大部分组成,见图 2。FOCT 设备在变电站应用时,光纤传感环通常安装在一次侧的高压绝缘子上,母线的汇流排穿心而过,光纤传感环检测到的光信号经过传输光纤传播到二次侧

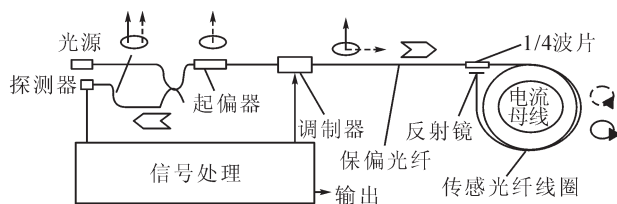


图 1 FOCT 工作机理

Fig. 1 FOCT working principle

的采集单元,由采集单元完成信号采样、数据处理及与变电站内其他设备通信,采集单元通常安装在变电站的开关柜里。

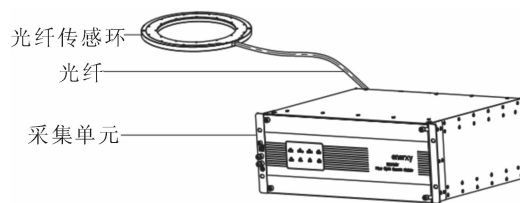


图 2 FOCT 产品组成图

Fig. 2 FOCT product composition diagram

2 FOCT 与 DCB 集成技术

2.1 一次侧的集成设计

2.1.1 结构集成方案

目前国内建设的智能变电站,与 DCB 集成的电流互感器基本上都是有源电子式电流互感器,常见方案有两种,见图 3(a)、(b)。

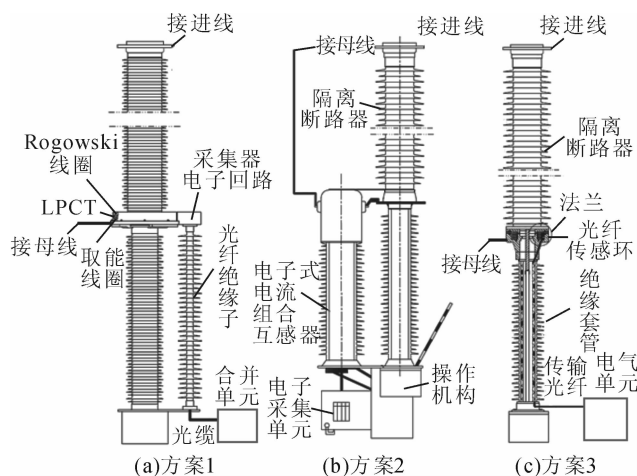


图 3 电流互感器与 DCB 集成方案

Fig. 3 Integration schemes of current transformer and DCB

图 3(a)为 Rogowski 线圈原理的电子式电流互感器与 DCB 集成的一种常用方案。Rogowski 线圈用于检测保护通道电流,LPCT 用于检测测量通道电流。采集器电子回路对模拟信号进行采样、处理,并将其转换为数字信号输出,通过光纤绝缘子中的光

纤传送至低压侧的合并单元^[14-16]。此方案弊端是,采集器安装在一次高压侧,电磁环境恶劣,EMC/EMI开发成本高,需解决取能的难题,当采集器发生故障时,则需高压母线停电才能进行检修。另外传输光纤还需要额外的一根绝缘子来防护和固定。

图 3(b)为另一种电子式电流互感器与 DCB 集成的方案。电流互感器的一次传感器采用 Rogowski 线圈,电子采集单元置于低压侧,高压侧无需供电,电子回路出现故障时可实现快速更换^[17]。但此方案电子式电流互感器必须采用独立气室实现高低压侧的绝缘,绝缘结构与传统互感器大小接近,安装体积大,运输困难,难以实现集成。

图 3(c)为 FOCT 与 DCB 集成的方案,完全避免了以上弊端,还无需额外增加光纤绝缘子,更容易达到缩小体积、提高性能的目的。该方案将 FOCT 的光纤传感环安装在 DCB 的上瓷套底部法兰的环形凹槽内,将传输光纤预埋在绝缘套管绝缘层中,预埋在绝缘套管绝缘层中的传输光纤上端通过法兰的开孔与传感单元的传感光纤熔接,绝缘套管下端传输光纤再与低压侧的电气单元熔接。

与电子式电流互感器相比,FOCT 与 DCB 的集成方案不需要额外设计传感环的保护罩、支架和保护传输光纤的光纤绝缘子或独立气室,结构简单,安装方便;且安装在一次侧的光纤传感环是纯光学元件,无需供电,抗电磁干扰性能好,降低了工程成本,提高了长期运行的可靠性,下文详细阐述该方案的技术创新点。

2.1.2 防环流及密封设计

FOCT 的光纤传感环安装在金属法兰内部的环形凹槽内,如沿用法兰基座与顶盖直接接触的传统组装方式,则当其一次导体电流过大时,将会在金属凹槽的环形侧壁上产生因瞬变电磁场感生的涡旋电流,即涡流或环流现象^[18],从而严重影响 FOCT 的测量精度。

为解决这一难题,新方案中将金属法兰的环形凹槽的外侧壁设计成非闭合结构,留出一条厚度不小于 1 cm 的缺口,并在该位置增加绝缘垫和密封圈用于绝缘和密封,从而阻断了环流现象,并加强了密封效果,见图 4。

2.1.3 绝缘套管设计

由于 FOCT 的传输光纤需要从 DCB 的绝缘套管内部穿过,而又不能破坏绝缘性和安全性,因此原有的绝缘套管设计方案需要加以改进。新方案要求在绝缘套管内侧壁上预先加工出自上而下螺旋状的光纤预埋槽,再选用耐高温保偏光纤作为

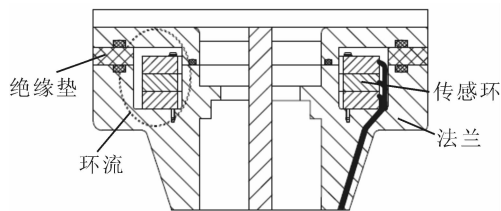


图 4 防环流设计示意图

Fig. 4 The schematic diagram of anti circulation design

FOCT 的传输光纤盘绕、固定在开好的光纤预埋槽内,最后一起整体填充绝缘硅胶并固化,见图 5。工程实践证明,采用这种设计后,既不会损害绝缘套管原有的绝缘性能,还能保护传输光纤,且能节省一根光纤绝缘子。

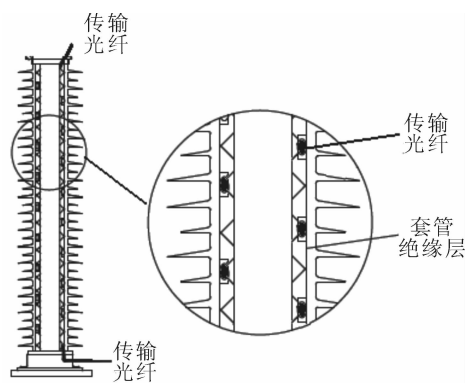


图 5 绝缘套管结构图

Fig. 5 Insulation sleeve structure diagram

2.1.4 电场仿真分析

FOCT 的传感环安装 DCB 的绝缘套管法兰内部,是一种新颖的结构设计,为考察其对电场分布的影响,文中采用有限元分析法,用 Ansys 软件进行电场仿真分析。

文中以 220 kV 电压等级的 DCB 绝缘套管为例,用 Ansys 软件分别对未集成传感环的绝缘套管结构和新设计的集成传感环的绝缘套管结构分别模拟施加 1 050 kV 峰值的雷电冲击电压,仿真计算 DCB 合闸时绝缘套管内部电场的分布。此处介质主要有 SF₆ 气体、环氧树脂、硅橡胶和空气。绝缘隔垫材料为聚四氟乙烯,介电常数为 2.55,套管绝缘层材料为环氧树脂,介电常数为 4.5,套管的伞群材料为硅橡胶,介电常数为 2.5,SF₆ 气体介电常数为 1.002,空气介电常数为 1.000 85^[19]。

仿真结果显示,未集成传感环的绝缘套管结构在雷电冲击电压下电场值最大为 0.455 kV/mm,见图 6(a);新设计的集成传感环的绝缘套管结构电场值最大为 0.478 kV/mm,见图 6(b)。二者差异微小,说明集成传感环的新结构设计对绝缘套管的电场

分布影响不大。

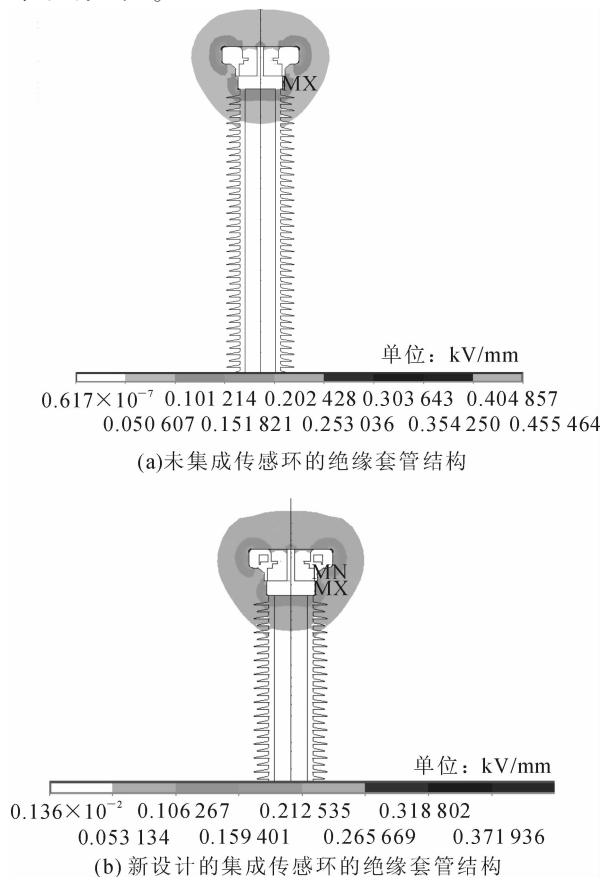


图6 绝缘套管电场仿真图

Fig. 6 Insulation sleeve electric field simulation diagram

为了验证套管光纤包埋技术及实际加工工艺等因素对绝缘及局放性能的影响,对套管绝缘层内部产生微小气泡的情况进行电场分析计算。人为设置套管光纤包埋处产生直径为2 mm的空气泡(此为理论假设非常不利的情况)当施加的雷电冲击电压峰值电压下降到80%和70%时,计算得到绝缘套管上相应电压值的位置,在此处截取一段绝缘套管来进行仿真计算。计算结果见图7,当套管绝缘层内部产生微小气泡时,绝缘层内部场强受气泡影响变大,最大场强值出现在气泡附近为0.801 kV/mm,理论上对绝缘层的绝缘性能影响不大,但其对套管局放性能及长期可靠性的不利影响还需要进一步试验验证。

2.2 二次侧的集成设计

FOCT的二次采集单元采用标准4U尺寸的机箱,通常与其他设备一起安装在变电站的开关柜里,以便统一供电。但当FOCT设备在变电站几百台甚至几千台的大批量应用时,则需要配备大量的开关柜,占用大片的变电站面积^[20]。

为了解决此问题,文中提出一种FOCT二次采集单元的集成技术方案,将采集单元设计成一种可

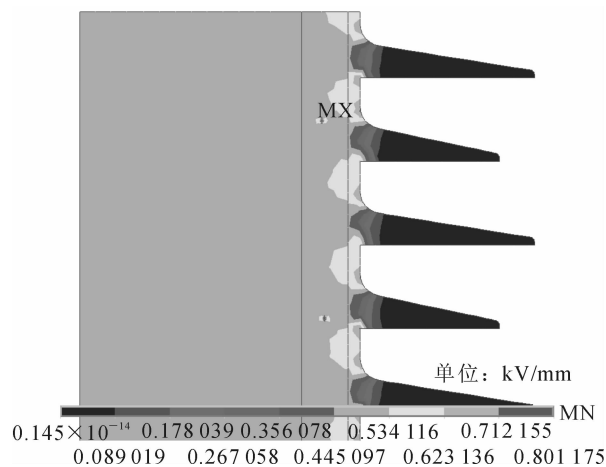


图7 绝缘层电场仿真图

Fig. 7 Insulation electric field simulation diagram

实时插拔的通用模块,电路板、光学器件全部封装在模块内部,用户只需将模块与光纤传感环熔接,以及给其配电即可实现一套FOCT设备的功能。4U机箱内置一套电路母板,可同时给每个模块供电,并将每个模块的测量数据合并、打包发送给上位机,一台4U机箱最多可以同时插入7块采集单元模块,在变电站实际应用时通常同时插3块用于单路三相电检测,插6块用于双路三相电检测,见图8。这种设计使FOCT采集单元体积缩小至原来的1/3、1/6甚至1/7,集成度显著提高,占地面积显著降低。

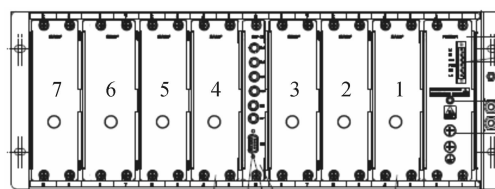


图8 采集单元集成设计示意图

Fig. 8 The schematic diagram of sampling units integration design

3 试验与分析

FOCT与DCB集成设计,样机额定电压/额定电流为220 kV/1 200 A等级,光纤电流互感器单机试验参照GB/T 20840.8—2007《互感器第8部分:电子式电流互感器》执行,隔离断路器整体试验参照GB/T 27747—2011《额定电压72.5 kV及以上交流隔离断路器》执行,分别在中国电力科学研究院、西安高压电器研究院等检测单位进行了型式试验,试验结果见表1。

整个型式试验过程未发生任何异常,样机的各项性能指标均优于相关国家标准中的要求,产品也在工程实践中也取得了良好的应用效果。可见,集

表 1 试验结果
Table 1 Test results

试验类型	试验项目	要求	试验结果	结论
单机试验	测量通道准确度	0.2 级	全温 0.2 级	合格
	保护通道准确度	5 级	0.2 级	合格
	复合误差	5P30	0.4%	合格
	电磁兼容	A 级	A 级	合格
整体试验	短时电流一次部件振动试验	输出变化量 $\leq 3\%$	输出变化量 $\leq 3\%$	合格
	断路器分合闸试验	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	合格
	断路器疲劳试验	1 000 次	无异常	合格
	工频耐压	460 kV	无异常	合格
	雷电冲击	1 050 kV	无异常	合格
	局部放电	≤ 10 pC	≤ 8.5 pC	合格
	短时电流	额定 50 kA, 峰值 125 kA, 持续 3 s	无异常	合格

成化设计不仅没有降低 FOCT 的测量精度,也没有对 DCB 绝缘性能造成劣化影响,因此该技术方案是正确、可行的。

4 结语

笔者基于 FOCT 在 DCB 上的工程应用实践,提出一种 FOCT 与 DCB 的集成技术方案,从高压一次侧的绝缘部件到低压二次侧的采集单元机箱均进行了创新性设计,实现设备的有效集成、功能高度整合,可减少智能变电站内一次设备的数量,减少智能变电站空间与土地占用,降低工程成本。并用电场仿真、型式试验的数据证实了所研制的样机各项试验性能均达到相关试验标准要求,符合在智能变电站中应用的需求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 宋璇冲,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 Xuanchong,LI Jingru,XIAO Zhihong,et al. Overall design scheme for new generation intelligent substation[J]. Electric Power Construction,2012,33(11):1-6.
- [3] 王巍,张志鑫,杨仪松. 全光纤式光学电流互感器技术及工程应用[J]. 供用电,2009,26(1):45-48.
WANG Wei,ZHANG Zhixin,YANG Yisong.The fiber optical current transformer (FOCT) technology and it's engineering application[J]. Distribution & Utilization,2009,26(1):45-48.
- [4] 李绪友,郝金会,杨汉瑞,等. Sagnac 环形电流互感器的原理与发展研究[J]. 光电工程,2011,38(7):1-6.
LI Xuyou,HAO Jinhui,YANG Hanrui,et al.Research and development of Sagnac ringlike optic current sensor[J]. Opto-Electronic Engineering,2011,38(7):1-6.
- [5] 王红星,张国庆,郭志忠,等. 电子式互感器及其在数字化变电站中应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):115-120.
WANG Hongxing,ZHANG Guoqing,GUO Zhizhong,et al. Electronic transformer and its application in digital substations[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):115-120.
- [6] 于文斌,张国庆,路忠峰,等. 光学电流互感器的抗干扰分析[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(12):8-12.
YU Wenbin,ZHANG Guoqing,LU Zhongfeng,et al. Analysis of resistance disturbance capability of optical current transformers[J]. Power System Protection and Control,2012,40(12):8-12.
- [7] 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.
- [8] 王景飞,梁京伟,董前民. 反射式 Sagnac 干涉光纤电流互感器的传感头误差研究[J]. 激光与光电子学进展,2011,9(4):23-26.
WANG Jingfei,LIANG Jingwei,DONG Qianmin.Study of sensing coil errors in in-line Sagnac interferometer current transducer[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2011,9(4):23-26.
- [9] 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.
- [10] 宋曼,张辉. 数字式全光纤电流互感器系统建模与仿真技术研究[J]. 光学仪器,2013,35(1):60-64.
SONG Man,ZHANG Hui.Research on the modeling and simulation techniques of digital all-fiber current transformer[J]. Optical Instruments,2013,35(1):60-64.
- [11] 傅鸣非,耿相铭,袁炎. 基于 DSP 全光纤电流互感器系统研究[J]. 电测与仪表,2007,44(501):17-21.

- FU Mingfei, GENG Xiangming, YUAN Yan. Research on all fiber-optical current transducer system based on DSP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(501): 17-21.
- [12] 裴焕斗, 祖静, 陈鸿. 全光纤电流互感器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(4): 34-38.
- PEI Huandou, ZU Jing, CHEN Hong. Research on all fiber-optical current transducer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(4): 34-38.
- [13] 胡婷婷, 马晓春, 张朝阳. 全光纤电流互感器的准确度校验[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 80-88.
- HU Tingting, MA Xiaochun, ZHANG Chaoyang. Calibration of the accuracy for all fiber-optical current transducer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 80-88.
- [14] 罗苏南, 卢为, 须雷, 等. 集成于隔离断路器的电子式电流互感器[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 75-79.
- LUO Sunan, LU Wei, XU Lei, et al. Electronic current transformer integrated to disconnecting circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 75-79.
- [15] 张明明, 陈庆, 汪本进, 等. 应用于断路器中的光供电式空心电流互感器[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 217-219.
- ZHANG Mingming, CHEN Qing, WANG Benjin, et al. Optically powered air core current transformer for application in circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3): 217-219.
- [16] 李劲彬, 阮羚, 陈隼. 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 Juan. Application of disconnecting circuit breaker in new generation smart substation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(1): 30-34.
- [17] 刘伟, 田志国, 袁亮. 电子式互感器和隔离式断路器一体化关键技术研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 116-120.
- LIU Wei, TIAN Zhiguo, YUAN Liang. Research on the key technology of the integration of electronic instrument transformer and isolated circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 116-120.
- [18] 王飞鸣, 林莘, 徐建源. 特高压气体绝缘开关设备接地系统环流计算与分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 33-37.
- WANG Feiming, LIN Xin, XU Jianyuan. Calculation and analysis on circulating current in grounding system of UHV hybrid gas insulated switchgears[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 33-37.
- [19] 黎斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- LI Bin. SF₆ high-voltage electrical design[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [20] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.
- CAO Nan, LI Gang, WANG Dongqing. Key technologies and construction methods of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 63-68.
- 李付永(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事高压电器设计研究。
- 陈亚亚(1983—), 女, 学士, 中级工程师, 主要从事高压电器设计研究。
- 徐知芳(1983—), 男, 工学硕士, 工程师, 从事全光纤电流互感器技术研究。
- 杨颖(1984—), 女, 工学硕士, 工程师, 从事高压结构设计的研究。

(上接第 123 页)

- railcar's body[J]. QR of RTRI, 2009, 50(2): 70-75.
- [10] HATSUKADE S, MAEDA T. Experiment and basic analysis of the surge on a rolling stock's body[J]. IEEJ Trans. PE, 2005, 125(8): 754-758.
- [11] 刘莹, 陈维金, 李枫, 等. 高速动车组齿轮箱接地装置用碳刷性能对比试验[J]. 机车车辆工艺, 2011, 12(6): 37-38.
- LIU Ying, CHEN Weijin, LI Feng, et al. High-speed emu gear box grounding device with carbon brush performance contrast test[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2011, 12(6): 37-38.
- [12] 张维国. 客车转向架接地技术[J]. 铁道车辆, 2004, 42(3): 9-14.
- ZHANG Weiguo. Grounding technique of passenger car bogies[J]. Rolling Stock, 2004, 42(3): 9-14.
- [13] 张维国. 客车车体转向架电气接地问题探讨[J]. 铁道车辆, 2000, 8(11): 21-23.
- ZHANG Weiguo. Discussion of electrical grounding of carbody and bogie of passenger car[J]. Rolling Stock, 2000, 8(11): 21-23.
- [14] 袁德强, 张宇. CRH380B 型动车组保护接地改进方案[J]. 铁道车辆, 2014, 52(3): 19-20.
- YUAN Deqiang, ZHANG Yu. Improvement scheme of protection grounding for CHR380B multiple units[J]. Rolling Stock, 2014, 52(3): 19-20.
- 陈盼(1990—), 男, 硕士, 主要从事动车组过电压与绝缘配合的研究。