

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.013

基于低功率线圈的高压无源电子式电流互感器研制

丁国成¹, 王刘芳¹, 甄超¹, 孙明利², 蔡同甫²

(1. 国网安徽省电力公司电力科学研究院, 合肥 230022; 2. 安徽继远电网有限责任公司, 合肥 230088)

摘要: 针对当前电子式电流互感器工程应用中存在的问题, 研制了一种基于低功率线圈的高压无源电子式电流互感器, 并完成电子式电流互感器用低功率测量线圈、低功率保护线圈及远端模块等各部分设计与制造, 弥补了传统罗氏线圈作为保护电流传感器所存在的固有缺陷。同时, 针对电子式电流互感器制造过程中各个环节存在的主要问题, 介绍了设计思路和解决方案, 并建立试验条件, 对研制的 1 台 110 kV 样机进行了室温条件下的准确度进行了测试, 试验验证了低功率线圈作为电子式电流互感器保护电流传感器的可行性。

关键词: 低功率线圈; 无源; 电子式电流互感器

Development of an Electronic Current Transformer Without Power Supply at Primary Side Based on Low-power Coil

DING Guocheng¹, WANG Liufang¹, ZHEN Chao¹, SUN Mingli², CAI Tongfu²

(1. State Grid Electric Power Research Institute of Anhui Electric Power Corporation, Hefei 230022, China;

2. Anhui Jiyuan Electric Network Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: To repair the inherent defects of the Rogowski coil as it performs in the role of protective current transducer, a kind of electronic current transformer without power supply at primary side was developed based on low-power coil, in which the low-power protection coil, low-power measurement coil, and remote module were designed and produced. The design ideas and solutions to the main problems existing in every phase of production process of the electronic current transformer are described in this paper. Test was conducted to measure the accuracy of a prototype of 110 kV electronic current transformer at room temperature, and the result verifies the feasibility of the low-power coil as protective current transducer for the electronic current transformer.

Key words: low-power coil; without power supply; electronic current transformer

0 引言

电流互感器是电力系统中进行电能计量和获取继电保护信号的重要设备, 也是连接一次设备和二次系统的桥梁, 但传统电流互感器存在磁饱和、暂态特性差、动态范围小等先天不足, 已难以满足当前智能电网建设的需要。与传统电流互感器相比, 电子式电流互感器具有明显的技术优势, 其不含铁心(或含小铁心), 不会饱和, 电流互感器二次开路时不会产生高电压, 也不会产生铁磁谐振, 保证

了人身及设备的安全。另外, 频响范围宽、测量范围大、线性度好, 仅需 2~3 个规格就可以覆盖电流互感器 20~5 000 A 的全部量程^[1-4]。因此, 近年来, 电子式电流互感器在智能电网中得到广泛应用, 但毕竟是新产品, 从电子式电流互感器在国内使用情况来看, 其可靠性、稳定性尚未达到预期目标, 运行的缺陷/故障率远远大于传统的电流互感器^[5-6]。因此, 根据当前实际情况, 针对电子式电流互感器产品相关关键技术进行研究, 研制绝缘安全、密封良好、输出稳定、测量准确的新型电子式电流互感器具有重要的理论和实际价值。

收稿日期: 2016-01-21; 修回日期: 2016-03-06

基金项目: 国网安徽省电力公司科技项(521200130M0G)。

Project Supported by Scientific Foundation of State Grid Anhui Electric Power Corporation(521200130M0G).

1 基于低功率线圈的电子式电流互感器设计

电子式电流互感器的整体结构图见图1,包括测量线圈、保护线圈、导电杆、绝缘支柱以及位于底座的二次转换器等。

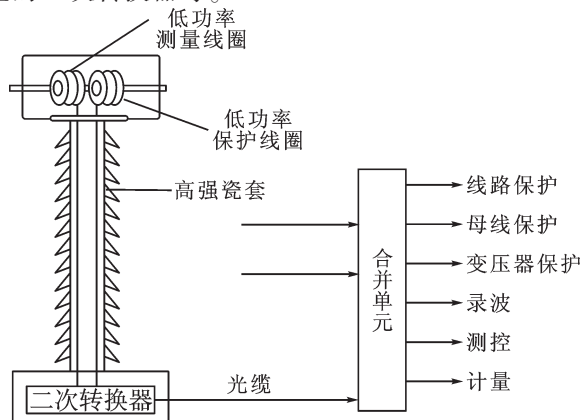


图1 电子式电流互感器整体结构图

Fig. 1 Overall diagram of electronic current transformer

1.1 主绝缘设计

目前,按照主绝缘方式主要分为树脂浇注式、充 SF_6 气体式及油浸式等3种。其中树脂浇注式绝缘采用合成树脂、填料、固化剂等组成,具有绝缘强度高、机械性能好、防火、防潮等特点。但树脂固化时会产生较大收缩,环氧树脂的收缩率可达到0.8%~1.2%,这样,产生的收缩力直接作用在铁心上,会使铁心的导磁率变坏,而且与金属嵌件直接接触时,混合胶会产生较大应力,造成浇注体开裂。再加上混合胶与金属的膨胀系数相差很大,互感器在运行中不可避免的产生热胀冷缩。因此,可能造成浇注体开裂^[7]。

油浸式以绝缘油为散热介质,运行时所产生的热量由绝缘油传导到金属外壳而散发出去,具有散热快、传导均匀和绝缘可恢复等特点,且产品结构简单、制造和运行经验丰富、运行可靠、制造成本较低、电气性能可满足电力系统的要求。但油浸式电流互感器耐热等级低、易燃、易老化且存在着密封性能不良、渗漏油等弊端^[8]。因此,采用 SF_6 气体作为主绝缘。 SF_6 气体是一种无毒性、不可燃的惰性气体,绝缘性能好,化学性能稳定,没有火灾或爆炸危险,设备维护简单^[9]。

对于绝缘支柱材料,目前主要有陶瓷、硅橡胶等,其中使用陶瓷材料时间最长,相关产品性能也比较稳定。因此,文中选择陶瓷作为绝缘支柱材料。

1.2 传感器设计

在当前已投运的智能变电站中,电子式电流互感器通常采用罗氏(Rogowski)线圈作为保护电流传

感器^[10],罗氏线圈具有良好的线性传变性能,对于暂态电流测量具有很大的技术优势,但罗氏线圈的输出信号是与一次电流对应的微分电压信号,要还原一次电流,必须使用积分器,在实际应用过程中,模拟积分器长时间积分会带来累积误差,而数字积分器又有积分初值问题^[11-12]。同时,保护电流测量要考虑足够的动态范围,罗氏线圈在一次额定电流时输出的电压信号很微弱,易受到干扰。因此,笔者提出采用低功率线圈作为保护用传感器,低功率线圈具有输出灵敏度高、技术成熟、性能稳定、易于大批量生产等特点。此外,由于其二次负荷较小,加上高导磁铁心材料的应用,可以实现对动态大范围电流的测量。其工作原理是采用非晶铁心将一次电流转换为二次小电流,并通过取样电阻将二次电流转换为正比于一次电流的小电压信号输出^[13],见图2。

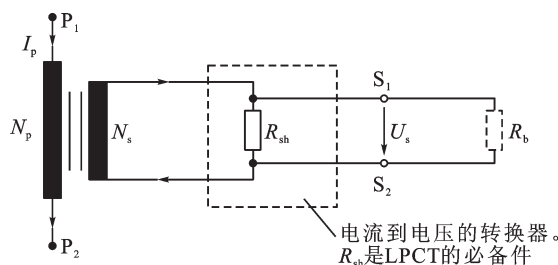


图2 低功率线圈工作原理图

Fig. 2 Schematic diagram of low-power coil

低功率线圈的测量原理如下:

$$U_s = R_{sh} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot I_p; \quad (1)$$

$$I_p = K_R \cdot U_s; \quad (2)$$

$$K_R = \frac{1}{R_{sh}} \cdot \frac{N_s}{N_p} \circ \quad (3)$$

式(1)-(3)中: U_s 为传感器输出电压; I_p 为一次绕组电流; R_{sh} 为取样电阻; N_p 为一次绕组匝数; N_s 为二次绕组匝数; K_R 为传感器变比。

由此可以看出,低功率线圈在运行中主要受取样电阻性能、二次绕组匝数和周围干扰电磁场等因素的影响。其中取样电阻的性能主要包括阻值精度和电阻温度系数。对于阻值精度,主要是由于材料特性和工艺条件的分散性,很难保证电阻的阻值完全一致,从而导致电阻的实际阻值不可能绝对等于标称阻值,但实际上,阻值偏差是固定的,不随环境的变动而变动,很容易修正。因此,在实际设计中,一般不考虑取样电阻的阻值偏差影响因素。对于电阻温度系数,由于电阻的参数与温度有关,环境温度变化会影响取样电阻的阻值,从而影响互感器的变比和输出信号。考虑取样电阻温度系数的影响,电子式电流互感器的变比为

$$K_R = \frac{1}{R_{sh}(1+\alpha \times dT)} \cdot \frac{N_s}{N_p} \quad (4)$$

温度对电流互感器变比的影响可表示为

$$\frac{\Delta K_R}{K_R} \% = \frac{-\alpha \times dT}{1+\alpha \times dT} \times 100 \quad (5)$$

针对温度影响, 笔者选用特殊定制电阻, 该电阻采用金属箔进行设计, 具有极好的温度系数, 在 $-40 \sim 85$ °C 范围内, 温度系数不超过 5×10^{-6} , 这样在环境温度变化取 100 K 情况下, 可保证 $\Delta K_R/K_R$ 不超过 0.05%, 在极端温度条件下, 测量准确度仍然能够满足相关标准的要求。

同时, 提高二次绕组匝数和降低取样电阻阻值可以提高二次电流测量精度, 笔者采用了降低采样电阻阻值的方法, 为了弥补采样电阻小, 转化得到的电压值偏小, 直接测量很难保证精度的问题, 采样电阻后端使用运放电路, 搭架放大电路, 在保证能满足保护电流动态范围的基础上, 尽可能提高放大电路的放大倍数。另外, 设计中利用电流信号抗干扰能力强于电压信号的特点, 将低功率线圈取样电阻放置在远端模块上, 直接将低功率线圈变换得到的电流信号通过屏蔽电缆送到采集器进行采集, 确保信号的准确度。

1.3 远端模块设计

远端模块对一次传感器送入的测量电流和保护电流进行采集, 转化为数字量后输出至合并单元, 包含 4 个部分: 电源模块, 数据采集模块, 主控制模块和数据转发模块, 见图 3。

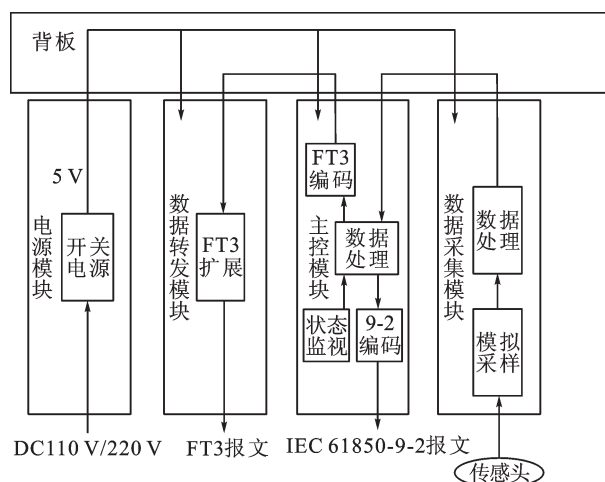


图3 系统信号流程框图

Fig. 3 Flow chart of signal system

电源模块由变电站直流系统提供 110 V 直流或者 220 V 直流输入, 输出 5 V 供采集器内其他板卡使用。

主控模块使用 ADSP+FPGA 的架构, 配置调试

接口, 支持网口调试和串口调试, 网口控制器由 FPGA 控制, 串口调试器由 ADSP 控制。FPGA 通过 SPORTS 口和数据转发模块进行数据交互, 获取采样信息后, 交与 ADSP 进行数据编码和组帧, 然后再通过 FPGA 控制以太网驱动器, 送出 4 路 IEC 61850-9-2 报文。同时, FPGA 输出 FT3 编码报文, 送到数据转发模块进行发送。FPGA 在接收外部同步信号的同时, 向外发送内同步信号, 并送到数据采集模块, 见图 4。

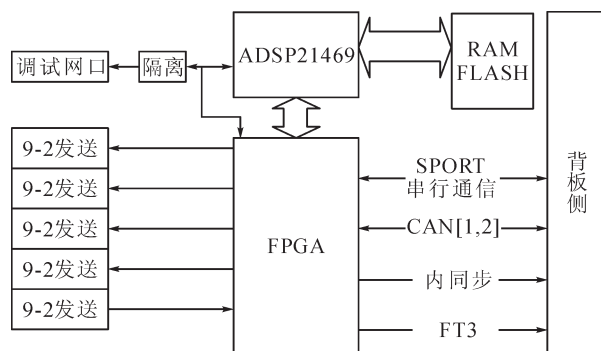


图4 主控模块原理图

Fig. 4 Schematic diagram of main control module

数据采集模块主要进行保护电流和测量电流采集, 该模块使用 FPGA 作为主控制器件, 功能包括 ADC 采样控制、数据校准和使用 MCU 与主控模块进行板卡状态信息的交互等。其中, 保护电流使用双套 ADC 进行采集, 从保护用低功率线圈输出的电流信号通过取样电阻转化为两路电压信号, 每路电压信号通过信号调理电路后送入一套 ADC 进行模数转换。测量电流使用一套 ADC 进行采集, 从测量用低功率线圈输出的电流信号通过取样电阻转化为电压, 通过信号调理电路处理后送入 ADC 进行模数转换, 见图 5。

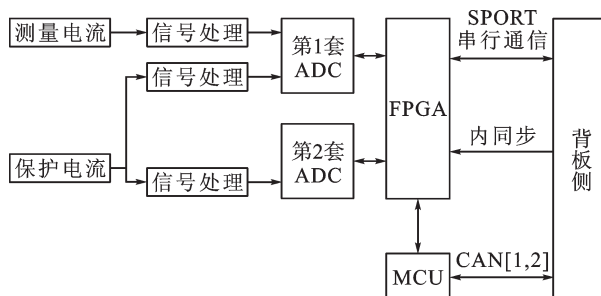


图5 数据采集模块原理图

Fig. 5 Schematic diagram of data acquisition module

模数转换器在中央处理器的控制下, 将模拟量转化为数字量后送入中央处理器。

在远端模块系统软件的设计过程中, 采用了模块化的设计方式, 提高软件的可移植性, 软件流程

图见图6。

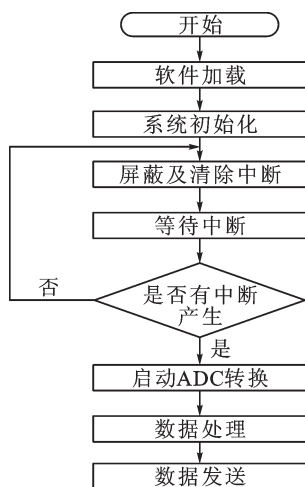


图6 远端模块软件流程图

Fig. 6 Flow chart of software for remote module

在采集过程中,程序进程由FPGA控制,装置上电后,首先对整个系统进行初始化,包括系统时钟初始化、中断初始化等。初始化完成之后,对中断端口进行扫描,如果发现有中断产生,则进行A/D转换,数据A/D转换完成之后,按照IEC 61850-9-2规约的要求,对数据进行组帧编码处理,并把数字信号转换为光信号,再通过光纤发送出去;若没有发生中断,则清除相关中断标志位,等待中断。

1.4 取能方式设计

目前,取能方式包括有源式与无源式,无源式采用先进的光学传感原理,通过光纤将信号传送到低电位侧,但由于传感器输出信号本身就是随着被测量变化的光、电信号。因此,不存在设计高压侧电子电路的问题,相应的也不会有电路的供能问题。而有源式采用传统的传感工作原理,利用光纤传输数据的电子式电流互感器,由于光纤只能传输数字信号,所以必须在高压侧对传感头的输出信号进行模拟量与数字量的转换,这就势必要设计相应的电子电路,因而也就带来了电路的供能问题。因此,文中采取无源式,分别用保护用低功率线圈和测量用低功率线圈采集保护信号和测量信号,并在互感器底座安装转换器,就地采集电流信号,转换为标准接口数据,发送至合并单元。改进的技术路线保留了高压无源型电磁传感原理的优点。同时,转换器中不再需要设计积分器。因此,也就不存在积分器缺陷问题。

2 准确度测试

为验证样机性能,对研制的其中1台110 kV样机进行了室温条件下的稳态准确度测试,一次电流范围为1%~120%额定电流,测试时采用比较法,

试验电路图见图7^[14-15]。

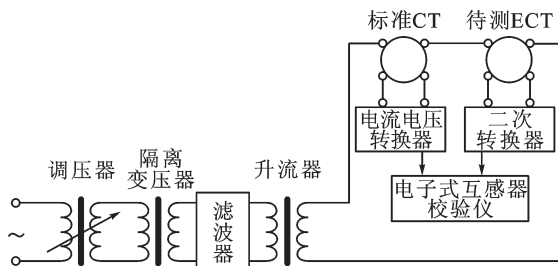


图7 稳态准确度测试电路图

Fig. 7 Experimental circuit of steady state accuracy

相关测试数据见表1。

表1 样机稳态准确度测试结果

Table 1 Test results of steady state accuracy

参数	数值
一次电流与额定 电流比值/%	1 5 20 100 120
测量通道	比差/% 0.392 7 0.079 5 0.078 5 0.073 1 0.021 8 角差/(°) 10.17 8.42 4.95 2.22 0.82
保护通道A	比差/% — 5.035 1 1.286 0 0.217 8 0.170 7 角差/(°) — 53.48 25.40 19.45 15.57 复合误差/% — 5.822 4 1.653 5 0.928 6 0.899 1
保护通道B	比差/% — 3.569 9 1.729 8 0.171 8 0.110 5 角差/(°) — 52.88 44.68 10.03 10.18 复合误差/% — 12.765 5 3.634 8 0.995 9 0.661 4

注:连续记录60组数据,取误差最大模值。

从表1可以看出,样机的测量通道稳态准确度达到0.2S级,保护准确度在额定电流以下满足5P级要求。

对于暂态准确度测试,由于没有足够稳定的交流大电源与精度足够高的检测仪器,笔者采用等安匝测试法进行测试^[16-18],测试原理图见图8。

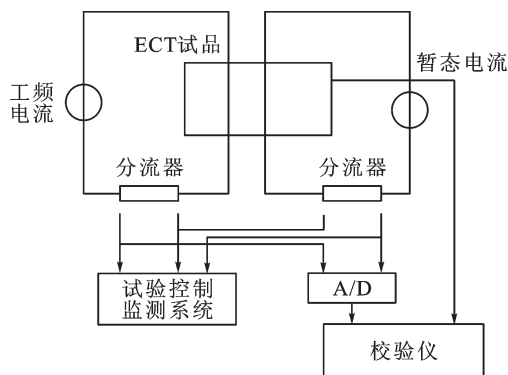


图8 暂态准确度测试电路图

Fig. 8 Experimental circuit of transient state accuracy

测试条件:12 000 A 工频交流对称分量,叠加

100%直流偏移衰减量,测试时,分别按照 C 100 ms-O 500 ms-C 100 ms、C 100 ms-O 300 ms-C 50 ms 等 2 个工作循环进行测试。同时,每个工作循环的时间常数又分别为 100 ms 和 120 ms,不同测试条件下的最大瞬时误差见表 2。

表 2 不同测试条件下的最大瞬时误差

Table 2 Maximum transient error under different state

序号	时间常数/ms	工作循环参数	最大瞬时误差/%
1	100	C 100 ms-O 500 ms-C 100 ms	-7.015
2	100	C 100 ms-O 300 ms-C 100 ms	-6.243
3	120	C 100 ms-O 500 ms-C 100 ms	-6.243
4	120	C 100 ms-O 300 ms-C 50 ms	-6.708

从上述分析可以看出,样机的稳态和暂态准确度满足相关标准要求。

3 结论

文中针对电子式电流互感器制造过程中各个环节存在的主要问题进行了研究,有效提高了电子式电流互感器的可靠性,主要结论如下:

1)采用低功率线圈作为保护和测量电流传感器,能够有效解决罗氏线圈积分环节影响采样长期稳定性的问题。同时,与传统电流互感器相比,改善了传统电流互感器的饱和问题,扩大了电流互感器的测量范围。

2)通过高压无源型电磁线圈传感原理,实现高压侧无源,解决了高压侧电子设备的供能问题。同时,在互感器底座安装转换器,就地采集电流信号,转换为标准接口数据,发送至合并单元,避免了积分器对测量的影响。另外,电子系统处于地电位,易于现场调试和维护。

3)完成了额定电压 110 kV、额定电流 600 A 的样机研制,样机的测量通道稳态准确度达到 0.2S 级,保护准确度在额定电流以下满足 5P 级要求。

参考文献:

- [1] 孙振权,张文元. 电子式电流互感器研发现状与应用前景[J]. 高压电器,2004,40(5):376-378.
SUN Zhenquan,ZHANG Wenyuan. The current situation and the future of developing electronic current transducer[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(5):376-378.
- [2] 张建超,刘晓波,张 飞,等. 电子式高压电力互感器的发展现状及在电力系统中的应用[J]. 高压电器,2009,45(4):106-110.
ZHANG Jianchao,LIU Xiaobo,ZHANG Fei,et al. Development of high-voltage electronic transducers and their application in power system[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(4):106-110.
- [3] 罗承沐,张贵新,王 鹏. 电子式互感器及其技术发展现状[J]. 电力设备,2007,8(1):20-24.
LUO Chengmu,ZHANG Guixin,WANG Peng. Electronic type instrument transformer and its present technical development manner[J]. Electrical Equipment,2007,8(1):20-24.
- [4] 李红斌,张明明,刘延冰,等. 几种不同类型电子式电流互感器的研究与比较[J]. 高电压技术,2004,30(1):4-5.
LI Hongbin,ZHANG Mingming,LIU Yanbing,et al. Study and comparison on several different types of electronic current transformers[J]. High Voltage Engineering,2004,30(1):4-5.
- [5] 刘 明,李金忠,刘 锐,等. 电子式互感器技术和应用评述[J]. 变压器,2013,50(2):24-28.
LIU Ming,LI Jinzhong,LIU Rui,et al. Review on technology and application of electronic instrument transformer[J]. Transformer,2013,50(2):24-28.
- [6] 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.
- [7] 林晓宇,陈荣柱,龚列谦,等. 一起干式高压电流互感器爆炸事故原因分析[J]. 高压电器,2009,45(3):151-153.
LIN Xiaoyu,CHEN Rongzhu,GONG Lieqian,et al. Explosion accident analysis of dry-type high voltage current transformer[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(3):151-153.
- [8] 刘海峰,阎春雨,陈志勇,等. 油浸式电流互感器缺陷分析与状态诊断[J]. 河北电力技术,2006,25(4):1-2.
LIU Haifeng,YAN Chunyu,CHEN Zhiyong,et al. Defect analysis and condition diagnosis of oil-immersed TA[J]. Hebei Electric Power,2006,25(4):1-2.
- [9] 邹建明. SF₆ 气体电流互感器运行情况分析和技术发展现状[J]. 电力设备,2007,8(1):25-28.
ZOU Jianming. Operation analysis and technical development of SF₆ gas filled current transformer[J]. Electrical Equipment,2007,8(1):25-28.
- [10] 张贵新,万 雄,王 鹏. 使用带气隙铁心的电子式电流互感器[J]. 高电压技术,2009,35(9):2144-2149.
ZHANG Guixin,WAN Xiong,WANG Peng. Electronic current transformer with non-magnetic air gap in core[J]. High Voltage Engineering,2009,35(9):2144-2149.
- [11] 张可畏,王 宁,段雄鹰,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.
- [12] 谢 彬,尹项根,张 哲,等. 基于 Rogowski 线圈的电子

- 式电流互感器的积分器技术[J]. 继电器, 2007, 35(3): 45-50.
- XIE Bin, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Technology in designing integrator of electronic current transducer based on Rogowski coil[J]. Relay, 2007, 35(3): 45-50.
- [13] 王 鹏, 罗承沐, 张贵新. 基于低功率电流互感器的电子式电流互感器[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 98-101.
- WANG Peng, LUO Chengmu, ZHANG Guixin. Electronic current transformer based on low-power current transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 98-101.
- [14] GB/T 20840.8—2007 互感器 第8部分: 电子式电流互感器[S]. 2007.
- GB/T 20840.8—2007 Instrument transformers, Part 8: Electronic current transformers[S]. 2007.
- [15] 任稳柱, 袁 渊, 杨忠州, 等. 电子式互感器稳态误差校验技术的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 64-68.
- REN Wenzhu, YUAN Yuan, YANG Zhongzhou, et al. Steady-state error calibration technology for electronic instrument transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 64-68.
- [16] 王 玲, 汪本进, 吴士普, 等. 电子式电流互感器暂态特性检测系统研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 86-91.
- WANG Ling, WANG Benjin, WU Shipu, et al. Study on transient characteristics test method of electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 86-91.
- [17] 康志林. 基于 Rogowski 线圈的电流互感器校验研究[J]. 电气传动自动化, 2008, 30(2): 48-50.
- KANG Zhilin. Research for verifying current transformer based on Rogowski coils[J]. Electrical Drive Automation, 2008, 30(2): 48-50.
- [18] 周永佳, 许灵洁, 李航康, 等. 发电机出口大电流互感器误差的现场测量方法[J]. 浙江电力, 2011, 30(11): 34-37.
- ZHOU Yongjia, XU Lingjie, LI Hangkang, et al. On-site error verification method for high current transformer of generator outlet[J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(11): 34-37.
- 丁国成(1980—), 男, 高级工程师, 现主要从事变电设备、状态检修及带电检测专业技术管理工作。

(上接第 76 页)

- application situation of DC system participating in power system stability control and discussion on position of Its functions in security defense system [J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 116-123.
- [19] 浙江大学直流输电电研组. 直流输电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.
- HVDC Research Group of Zhejiang University. High voltage direct current transmission[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1985.
- [20] 郑 超, 汤 涌, 马世英, 等. 直流整流站动态无功特性解析及优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4886-4896.
- ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Study on the dynamic reactive power characteristic of HVDC rectifier stations and optimization measures[J]. Power System Technology, 2014, 34(28): 4886-4896.
- [21] 徐 政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 31-35.
- XU Zheng. Dynamic behavior analysis of AC/DC power system[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 31-35.
- [22] 袁旭峰, 文劲宇, 程时杰. 与弱交流系统相连接的 HVDC 系统临界换相电压降及逆变站的运行范围[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 24-30.
- YUAN Xufeng, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Research on critical conmutating voltage reduction and operating range of inverter connected a weak AC system[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 24-30.
- [23] 罗隆福, 雷园园, 李 勇, 等. 定熄弧角控制器对直流输电系统的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 97-103.
- LUO Longfu, LEI Yuanyuan, LI Yong, et al. Effects of constant arc extinguishing angle controller on HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2009, 21(5): 97-103.
- 李 妮(1991—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为高压直流输电。
- 李兴源(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制等。