

ZCW9-252 智能隔离断路器中光学电流互感器的应用

曾林翠¹, 白世军¹, 李 毅¹, 王志敏², 马洪义¹

(1. 西安西电高压开关有限责任公司, 西安 710016; 2. 西安西电电力电容有限责任公司, 西安 710082)

摘要: 文中介绍了 ZCW9-252 智能隔离断路器中光学电流互感器的具体应用, 对产品的结构、原理和试验情况作了详细分析。产品集成了磁光玻璃式和全光纤式两种光学电流互感器, 由对应的采集单元统一上送给合并单元, 在合并单元中进行数据对齐和组帧等处理, 以 IEC 61850 9-2 标准数据格式输出。ZCW9-252 智能隔离断路器中光学电流互感器的成功应用, 体现了智能电网小型化、集成化、智能化的战略发展方向, 可以在新一代智能变电站中推广应用。

关键词: 光学电流互感器; 隔离断路器; 采集单元; 合并单元; 智能电网

Application of OCT in ZCW9-252 Intelligent Disconnecter Circuit-breaker

ZENG Lincui¹, BAI Shijun¹, LI Yi¹, WANG Zhimin², MA Hongyi¹

(1. Xi'an XD High Voltage Apparatus Co., Ltd., Xi'an 710016, China;

2. Xi'an XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: Application of OCT in ZCW9-252 intelligent disconnecter circuit-breaker is introduced, and the structure, principle and test of the circuit-breaker are analyzed. Magneto-optic glass current sensor and all-fiber current sensor are integrated into the circuit-breaker, and their data are transmitted to the merging unit by the collecting unit, where the data are processed in terms of alignment and frame organization and then outputted in the data format following IEC61850 9-2 standard. The successful application of OCT in ZCW9-252 intelligent disconnecter circuit-breaker embodies the strategic development trend of smart grid in miniaturization, integration, and intelligence. This intelligent disconnecter circuit-breaker may be applicable to new generation intelligent substations.

Key words: OCT; disconnecter circuit-breaker; data collecting unit; merging unit; smart grid

0 引言

隔离断路器实现了隔离开关、断路器、互感器的集成, 不但占地面积小、投资少, 而且具有可靠性高、维护量少等特点, 逐渐在新一代的智能化变电站中得到使用^[1-2]。

光学电流互感器没有传统电磁式电流互感器的磁饱和、铁磁谐振等缺点, 并且绝缘性能优良、暂态响应范围大、抗干扰能力强……被业界公认为最具发展前途的新型电流互感器, 是电磁式电流互感器最终替代品^[3]。

将光学电流互感器应用于隔离断路器, 结合两者特点, 将得以广泛使用。

1 系统构成

ZCW9-252 智能隔离断路器产品结构包括断路器、光学电流互感器、接地开关和智能组件。其中, 该产品同时采用了两种不同原理的光学电流互感器, 分别为磁光玻璃光学电流互感器和全光纤光学电流互感器。其整个系统构成见图 1。图 1 包括光学传感部分、光缆传输、采集单元和合并单元。

1.1 光学电流互感器采集单元

光学电流互感器采集单元置于智能组件柜中, 通过光缆与光学传感部分连接, 所有通信都是通过光信号来进行, 大大增加了互感器的抗干扰能力。

从物理结构来看, 磁光玻璃光学电流互感器和

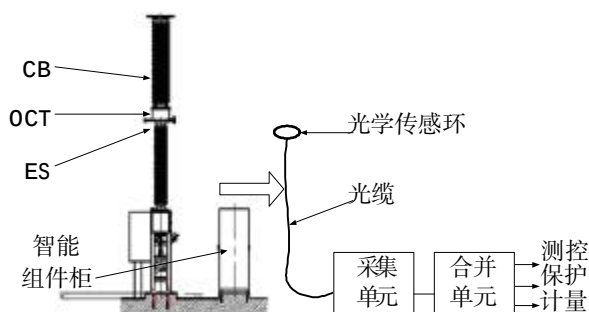


图1 智能隔离断路器及光互感器主结构图

Fig. 1 Structure diagram of intelligent disconnector breaker and OCT

全光纤光学电流互感器两种类型的光学互感器采集单元结构有很大的不同。从实现原理来看,两种光学电流互感器都是根据法拉第磁光效应得到的一次电流值,即通过一次导体的电流 I ,导体周围所产生的磁场强度为 H ,偏振光偏转的角度 θ ,计算公式为

$$\theta = V/LHdl. \quad (1)$$

式(1)中: V 为磁旋光材料的 Verdet 常数; L 为磁旋光材料中的通光路径长度。

如果敏感路径为闭合环路^[9],将遵守安培环路定律 $I = \oint Hdl$,则得到

$$\theta = N_1 VI. \quad (2)$$

1.1.1 磁光玻璃式采集单元结构

磁光玻璃光学电流互感器的传感部分采用普通磁光玻璃,材料成熟,光学元件少、系统结构简单、无需进行温度控制。磁光玻璃光学电流互感器的难点之一是光学元件与磁光玻璃的封装,封装工艺决定了互感器长期运行可靠性;难点之二是光程短造成的传感灵敏度低,实际应用时采取信号处理的方法来加以改善^[4-6]。

磁光玻璃式采集单元结构见图2。图2中光源发出的光经过偏振器,转化为线偏振光进入磁光玻璃;如果一次导体中有电流流过,则会产生磁场,磁光玻璃中的线偏振光在磁场下会发生方位角偏转,经过检偏器的光强也随之改变;利用二次电路的检测及数据处理可以得到对应的电流值^[7]。

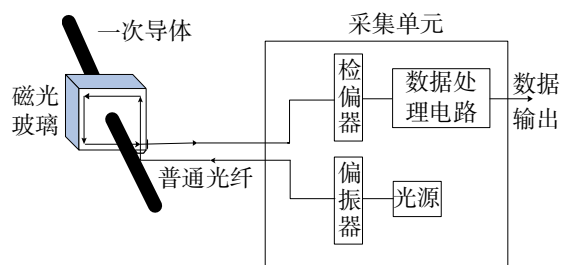


图2 磁光玻璃式采集单元结构图

Fig. 2 Structure diagram of MOGCT sampling collecting unit

1.1.2 全光纤式采集单元结构

全光纤光学电流互感器的难点在于系统结构复杂,环节多,所用光学元件多,需要专门的温度控制等,多种光学元件的环境适应性是决定性因素。优点在于光纤元件间连接较为简单,容易实现^[8]。

全光纤式采集单元结构见图3。光源发出的光经过耦合器后由光纤偏振器起偏,形成线偏振光,线偏振光以 45° 注入保偏光纤的 x 轴和 y 轴传输,并输出到相位调制器进行初始相位调整。当这两束正交模式的线偏振光通过 $\lambda/4$ 波片后,分别转变为左旋和右旋两束圆偏振光,进入传感光纤。如果一次导体有电流流过,产生的磁场会使两束圆偏振光以不同的速度传输,产生正比于电流的相位差,经过反射镜后,偏振模式互换,再次进入传感光纤,在电流产生的磁场下,产生的相位差加倍,然后通过 $\lambda/4$ 波片后恢复为线偏振光,在光纤偏振器发生干涉,由于干涉的两束光都两次经过传感光纤,因此其相位差为四倍的法拉第相位差。通过数据处理电路为相位调制器施加一个大小相等、方向相反的等效相位差,以抵消法拉第磁光效应引起的相位差,从而实现系统的闭环控制,得出一次电流值^[9-14]。

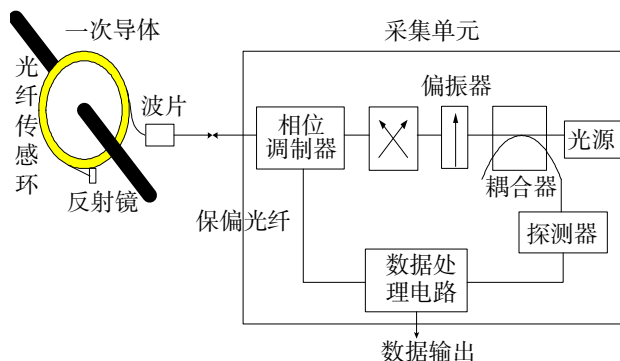


图3 全光纤式采集单元结构图

Fig. 3 Structure diagram of FOCT sampling collecting unit

1.2 光学电流互感器合并单元

光学采集单元将电流数据输出给合并单元,经过对各个通道的数据处理,按照 IEC 61850 9-2 或 IEC 60044-8 等标准帧格式,输出到过程层网络或间隔层智能设备。

该设计的合并单元连接了3个光学采集单元,每个采集单元以一定的数据格式上送一路测量电流数据、两路保护电流数据;然后通过插值算法将各个通道数据进行重采样,根据额定延时的不同,将数据对齐并以 IEC 61850 9-2 的数据格式输出,见图4。

合并单元中对数据的同步处理很重要,包括各个采集数据通道的同步、合并单元与主时钟的同步。

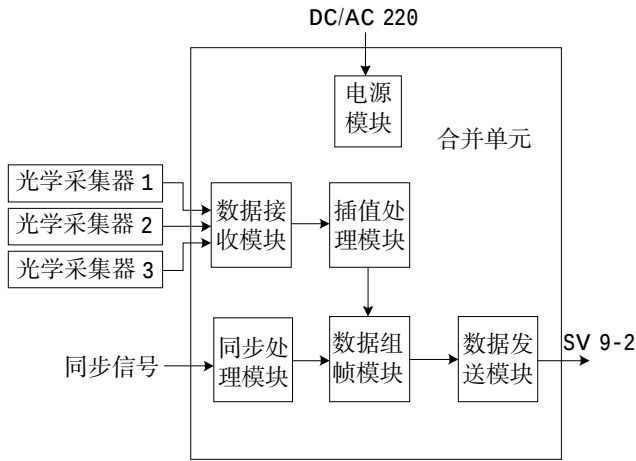


图4 合并单元框图

Fig. 4 Block diagram of merging unit

1.2.1 采集数据通道的同步

由于光学原理的不同,3个光学采集单元的绝对延时时间都不一样,即使是同一个光学采集单元,硬件延时的不同,也会导致采样数据通道不同步。为了消除这种偏差,通常有两种做法:一种是合并单元给采集单元提供同步采样脉冲;另外一种是采用插值算法来进行数据重采样,从而达到同步^[15]。

插值示意图见图5。为减少硬件资源及现场施工的复杂度,该次设计的光学采集单元和合并单元之间未连接同步光纤,采用拉格朗日抛物线插值算法对各个通道数据进行重采样。具体实现为合并单元在收到每个采集单元数据的时刻打上时标,在收到连续的3个点后,利用插值基函数可以得出拉格朗日多项式^[16-19]。

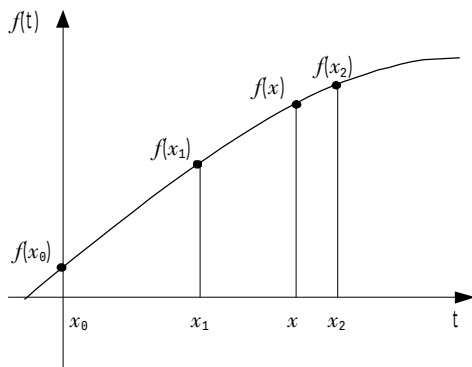


图5 插值示意图

Fig. 5 Diagram of interpolation

$$f(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)}f(x_0) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)}f(x_1) + \frac{(x-x_1)(x-x_0)}{(x_2-x_1)(x_2-x_0)}f(x_2) \quad (3)$$

误差计算公式为

$$R(x) = \frac{1}{6} (x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)f'''(\xi) \quad (4)$$

x时刻点为重采样点,也正是合并单元发送数

据的时刻,并与合并单元接收到的同步信号对应。

1.2.2 主时钟的同步

合并单元站级同步的主时钟主要有IRIG-B码、IEEE 1588、秒脉冲,在合并单元中都转换为秒脉冲的形式来处理,将秒脉冲的上升沿时刻设定为第一次采样时刻,对应的SV9-2数据报文中的采样序号为0,在之后的每次采样点都均匀的分布在每秒内。此次采样率为4 kHz,所以采样间隔为250 μs,采样序号为0~3 999,见图6。

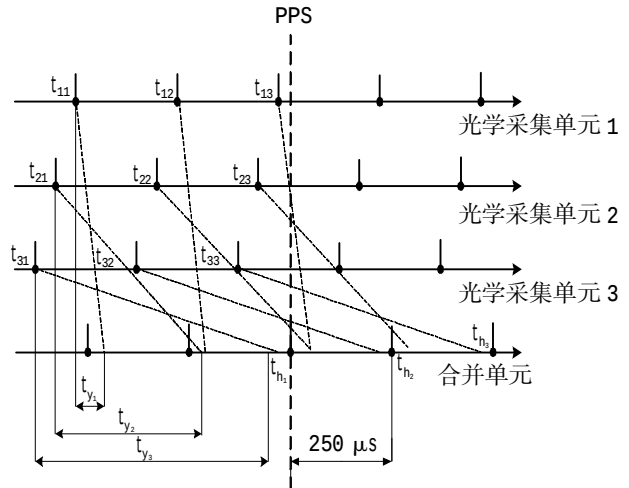


图6 重采样示意图

Fig. 6 Diagram of resampling

图6中: t_{11} 、 t_{12} 、 t_{13} 分别为光学采集单元1的采样时刻; t_{21} 、 t_{22} 、 t_{23} 分别为光学采集单元2的采样时刻; t_{31} 、 t_{32} 、 t_{33} 分别为光学采集单元3的采样时刻; t_{y1} 、 t_{y2} 、 t_{y3} 分别为光学采集单元1、2、3的固有延时时间; t_{h1} 、 t_{h2} 、 t_{h3} 分别为合并单元发送时刻。

由于各个光学采集单元的固有延时时间不一样,要保证在合并单元发送时各个通道数据同步,这就要求合并单元合理安排数据出口时刻。如图6所示,选取 t_{h3} 时刻作为出口。

2 系统试验与分析

ZCW9-252智能隔离断路器产品运行时集成了3套光学电流互感器,额定电流为2 000 A,每套按测量电流、保护电流1、2的数据格式给合并单元上送数据,合并单元处理后按照IEC 61850 9-2标准帧格式打包发送,见图7。

2.1 准确度试验

电流互感器的测量精度是其最基本的要求。该产品中测量电流准确级为0.2级,保护电流准确级为5TPE。在振动疲劳、短时电流和整个试验前后均测量其准确度,要求满足精度要求,且前后误差差异不超过其准确级相应误差限级的1/2,见图8。



图7 试验中的 ZCW9-252

Fig.7 Testing of ZCW9-252

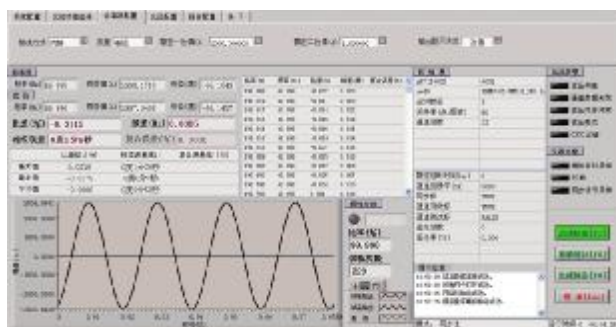


图8 电流精度试验

Fig. 8 Waveforms of current precision tests

试验结果表明光学电流互感器虽然满足精度要求,但是与低功耗线圈和罗式线圈的电流互感器相比,光学电流互感器噪声会比较大,信号越小,误差越大。

2.2 短时电流试验

整个短时电流试验的波形和放大后的短时电流试验波形分别见图 9、10。图 9、10 中额定电压为 252 kV 时,短时电流试验的热稳定电流为 50 kA,持续时间为 3 s,动稳定电流为 125 kA。

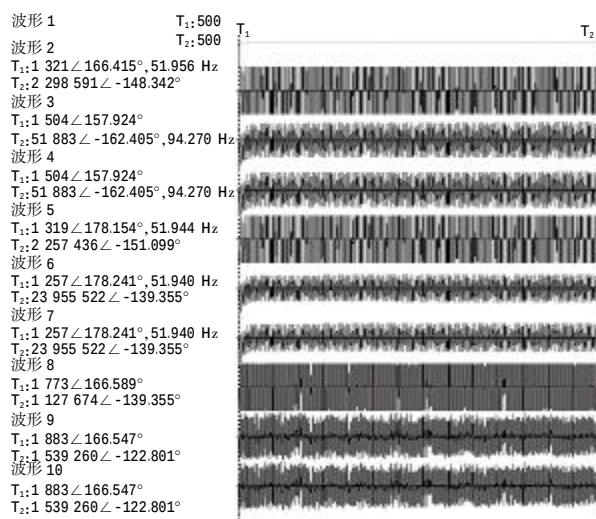


图9 整个短时电流试验的波形

Fig. 9 Waveforms of whole short-time current tests

从图 9 试验波形可以看出,3 s 的热稳定电流波形中,对应的测量电流已经超出测量范围,出现了数据饱和(削顶现象),保护电流可以正常的上送电流大小。另外电流互感器的二次采集部分也要考虑大

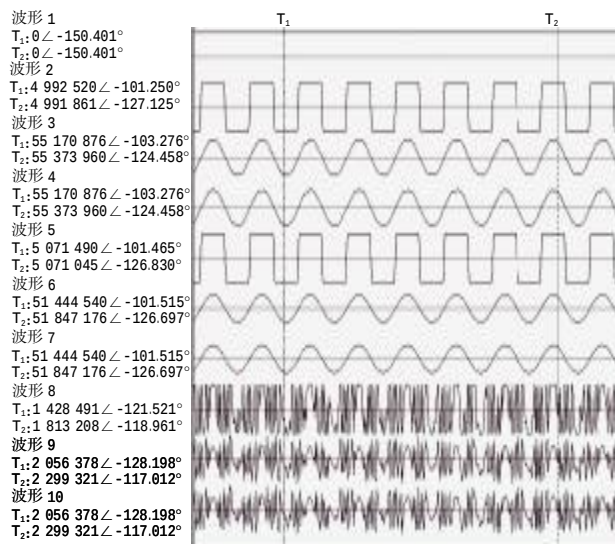


图10 放大后的短时电流试验波形

Fig. 10 Amplificatory waveforms of short-time current tests

电流情况下的裕量设计,如采用 FPGA,应充分的预留数据位数,否则会导致数据溢出,高位数据被舍弃,引起上送电流数据错误,出现如图 9 中第 8、9、10 通道的波形。

2.3 一次部件的振动试验

断路器在动作(分闸、合闸)时,要求电流互感器输出均方根值不超过额定的 3%。

短时电流试验后分闸的电流波形见图 11。由图 11 可以看出断路器的动作确实会产生毛刺状的电流波形,3 套光学电流互感器的最大均方根值分别为 2.60、1.79、1.67 A,都小于电流限值 60 A。

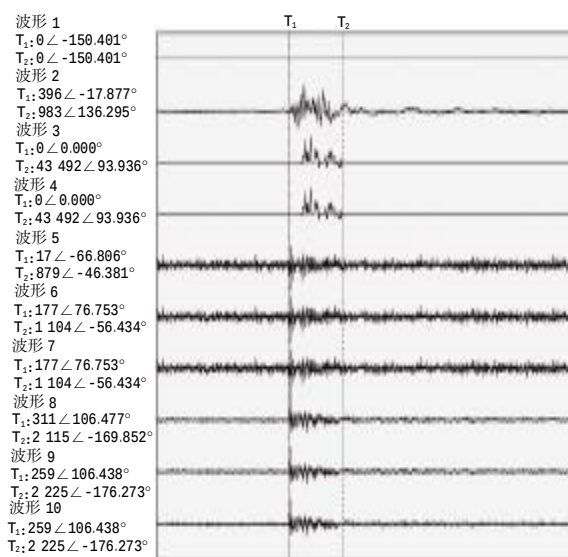


图11 一次部件振动试验波形

Fig. 11 Waveforms of circuit-breaker vibration tests

2.4 断路器基本短路试验 T100s(b)

ZCW9-252 的 T100s(b)试验波形见图 12。其额定电压为 252 kV,额定短路开断电流 50 kA,进行

T100s(b)试验,试验方式为 0-0.3 s-CO。

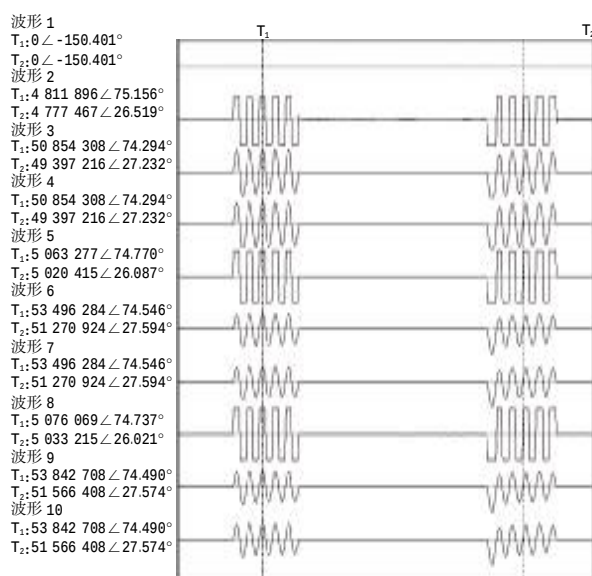


图 12 ZCW9-252 的 T100s(b)试验波形

Fig. 12 Waveforms of ZCW9-252 T100s(b) tests

从图 12 可以看出,50 kA 的试验电流下,3 套光学电流互感器的测量电流通道都已经超出测量范围,但保护电流依然工作正常,准确无误地上送了电流值。

3 结语

ZCW9-252 智能隔离断路器中光学电流互感器的成功应用,体现出了智能电网小型化、集成化、智能化的战略发展方向^[20-22],可以在新一代智能变电站中推广应用。

参考文献:

- [1] 李劲彬,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.
- [2] 刘祖永,严启明,王小波,等.隔离式断路器在智能变电站中的应用[J]. 湖北电力,2013,37(3):1-3.
LIU Zuyong, YAN Qiming, WANG Xiaobo, et al. Application of disconnecting circuit breaker in smart substation [J]. Hubei Electric Power, 2013, 37(3):1-3.
- [3] 徐金涛,王英利,王 嘉,等.全光纤电流传感器在智能电网中的应用[J]. 电器工业,2011(1):53-57.
XU Jingtiao, WANG Yingli, WANG Jia, et al. All-fiber current sensor application in the smart grid [J]. China Electrical Equipment Industry, 2011(1):53-57.
- [4] 万 洵,王美蓉,赵建林.基于虚拟仪器的方形磁光玻璃电流传感器[J]. 西北工业大学学报,2009,27(4):571-576.
WAN Xun, WANG Meirong, ZHAO Jianlin. Square magneto-optic glass current sensor based on virtual instrument [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2009, 27(4):571-576.
- [5] 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.
- [6] 郑伟光.光学互感器研究现状[J]. 电气开关,2012,50(3):10-12.
ZHENG Weiguang. Study on optical current transformer [J]. Electric Switcher, 2012, 50(3):10-12.
- [7] 温伟峰,李建中,张登洪.全光纤电流互感器控制电路设计[J]. 电子技术应用,2014,40(2):81-84.
WEN Weifeng, LI Jianzhong, ZHANG Denghong. The control circuit design for fiber optic current transducer [J]. Application of Electronic Technique, 2014, 40(2):81-84.
- [8] 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.
- [9] 周华良,郑玉平,姜 雷,等.适用于合并单元的等间隔采样控制与同步方法[J]. 电力系统自动化,2014(23):96-100.
ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, JIANG Lei, et al. An equal-interval sampling control and synchronization method for merging unit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(23):96-100.
- [10] 绍 霞,周有庆,彭红海.一种改进的直测电容电流型电子式电压互感器[J]. 电工技术学报,2013,28(4):241-247.
SHAO Xia, ZHOU Youqing, PENG Honghai. An improved electronic voltage transformer based on direct detecting capacitor current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4):241-247.
- [11] 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):9-18.
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):9-18.
- [12] 钱国超,邹德旭,马 仪,等.倒立电流互感器典型缺陷及制造关键工艺分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(2):73-77.
QIAN Guochao, ZOU Dexu, MA Yi, et al. Typical defects and key manufacture technology of the inverted minimum oil current transformer [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2):73-77.
- [13] 赵建洲,姚恒智,袁奥琪,等.电流互感器末屏损耗测试稳定性分析与研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2013,34(4):46-50.

- ZHAO Jianzhou, YAO Hengzhi, YUAN Aoqi, et al. Stability analysis and study on bottom shielding loss test of current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(4):46-50.
- [14] 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.
- [15] 李英明, 郑拓夫, 周水斌, 等. 一种智能变电站合并单元关键环节的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 93-98.
- LI Yingming, ZHENG Tuofu, ZHOU Shuibin, et al. A realization solution of key links for merging unit in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11):93-98.
- [16] 张晓华, 牛元立, 何刚, 等. 电子式互感器采样系统固有延时测试研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(7):42-45.
- ZHANG Xiaohua, NIU Yuanli, HE Gang, et al. Study on inherent delay test of electronic transformers sampling system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(7):42-45.
- [17] 周斌, 鲁国刚, 黄国方, 等. 基于线性 Lagrange 插值法的变电站 IED 采样值接口方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3):86-90.
- ZHOU Bin, LU Guogang, HUANG Guofang, et al. A sampled values interface method for substation IED based on the linear Lagrange interpolation algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3):86-90.
- [18] 闫志辉, 胡彦民, 周丽娟, 等. 重采样移相技术在过程层 IED 中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6):64-66.
- YAN Zhihui, HU Yanmin, ZHOU Lijuan, et al. The application of resample phase shifter technique in process layer IED[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 64-66.
- [19] 徐广辉, 李友军, 王文龙, 等. 数字化变电站 IED 采样数据同步插值的设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4):49-52.
- XU Guanghui, LI Youjun, WANG Wenlong, et al. Design of a synchronization and interpolation algorithm of sampled values for digital substation IED[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4):49-52.
- [20] 赵丽华, 高进强, 郭相国. 浅谈电力设备智能化[J]. 高压电器, 2010, 46(12):1-4.
- ZHAO Lihua, GAO Jinqiang, GUO Xiangguo. Discussion on intelligent electric power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12):1-4.
- [21] 鄢志平, 聂一雄, 邓忠华. 基于 IEC61850 的合并单元与二次设备通信研究[J]. 高压电器, 2009, 45(2):27-30.
- YAN Zhiping, NIE Yixiong, DENG Zhonghua. Research on communication between merging unit and secondary devices based on standard IEC 61850[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2):27-30.
- [22] 臧春艳, 胡李栋. 智能型开关电器的研发现状与分析[J]. 高压电器, 2011, 47(3):1-5.
- ZANG Chunyan, HU Lidong. Development and analysis of intelligent switch devices[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3):1-5.

曾林翠(1975—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电子式互感器及智能电网。

白世军(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能变电站电磁兼容及电力设备故障诊断与状态评估。

李毅(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置。

(上接第 183 页)

- QIAN Guanjun, WANG Xiaoyu, XU Xianzhi, et al. Study of scatter of shielding failure on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(3): 17-20.
- [16] 郑家松, 李广福, 季征南, 等. 山区 500 kV 输电线路雷电屏蔽性能模型试验研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5):119-122.
- ZHENG Jiasong, LI Guangfu, JI Zhengnan, et al. Small-scale model experimental study on lightning shielding performance of 500 kV transmission lines in mountain area[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 119-122.
- [17] 王羽, 文习山, 胡京, 等. 特高压交流输电线路中相绕击模拟试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 1-5.
- WANG Yu, WEN Xishan, HU Jing, et al. Simulation test of shielding failure of UHVAC transmission line's intermediate phase[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 1-5.
- [18] 钱冠军, 王晓瑜, 汪雁. 雷电屏蔽模拟理论与试验技术的研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 26-28.
- QIAN Guanjun, WANG Xiaoyu, WANG Yan. The lightning shielding simulation theory and test technology[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(2):26-28.
- [19] CRAWFORD D E, RAKOV V A, UMAN M A, et al. The close lightning electromagnetic environment: Dart-leader electric field change versus distance[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D14): 14909-14917.
- [20] 张瑞. 输电线路雷击闪络风险评估研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- ZHANG Rui. Research on lightning flashover risk assessment of the transmission lines[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.
- 路永玲(1988—), 女, 工程师, 从事输电线路防雷与接地、大气外绝缘等专业技术及管理工作。