

一种大功率电力电子设备的数据采集系统

张新刚, 杨波, 王韧秋, 赵彩萍, 冯静波

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

A Data Acquisition System for High-Power Power Electronic Equipments

ZHANG Xingang, YANG Bo, WANG Renqiu, ZHAO Caiping, FENG Jingbo

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: A data acquisition system for high-power power electronic devices, which consists of measuring element, synchronization unit, sampling unit and post-processing unit, is designed. In the designed system the measuring element is a kind of high-voltage device directly connected to primary circuit, it transforms high voltage and large current signals in primary circuit into low-voltage small-current analogue signals in proportion. The measuring element can be respectively designed and installed according to different application conditions, i.e., for voltage measurement of grounding branch and non-grounding branch as well as for current measurement of grounding branch and non-grounding branch. Synchronization unit, sampling unit and post-processing unit are microelectronic circuits to implement A/D conversion, data transmission, filtering and depolarisation. The designed system is already successfully applied to operation test device of power system and power electronic laboratory in China Electric Power Research Institute, and the measuring accuracy and reliability of the designed system are verified by testing results.

KEY WORDS: data acquisition; power electronics; signal processing; A/D conversion

摘要: 设计了一种应用于大功率电力电子设备的数据采集系统, 该系统由测量元件、同步单元、采集单元和后处理单元 4 部分组成。其中, 测量元件是与一次回路直接连接的高电压设备, 用于将一次回路的高电压、大电流按比例变送为小模拟信号, 根据不同需求, 测量元件的设计和安装可按照接地支路的、不接地支路的电压测量和接地支路、不接地支路的电流测量 4 种情况分别加以解决。同步、采集和后处理单元是位于地电位的微电子电路, 用于实现模数转换、数据传输、滤波、消偏置等功能。本系统已经应用于中国电力科学研究院电力系统电力电子实验室的高压直流换流阀运行试验装置中, 运行结果验证了系统的测量精度和可靠性。

关键词: 数据采集; 电力电子; 信号处理; 模数转换

0 引言

大功率电力电子设备如高压直流换流器、静态无功补偿装置、可控串补等已经在电力系统的输电、配电、实验研究等各个环节得到了成功应用^[1-13]。为了控制设备的运行状态, 并在异常情况下有效保护设备的安全, 需要实时采集一次回路的电压、电流等信号。但大功率电力电子设备通常具有数十甚至数百 kV 的电压, 这就对数据采集系统的绝缘提出了很高的要求; 同时, 由于一次回路的大电流被反复导通、阻断, 电磁干扰也非常严重; 另外, 由于电力电子设备一次回路的电压、电流通常不是规则的正弦波形, 使用常规的铁磁式电压、电流互感器进行测量将会发生波形畸变。

目前, 各种光电式互感器被应用在大功率电力电子设备的测量领域^[14-19]。这种互感器基于法拉利磁光效应等多种光电原理来测量高电压和大电流, 解决了抗干扰和绝缘等问题。但其可靠性仍需更多的工程中予以验证, 而且价格昂贵, 如果需要测量的信号较多, 互感器的成本甚至可能超过其它部件成本的总和。

本文将设计一种大功率电力电子设备的数据采集系统。该系统采用分压器来测量一次回路的电压, 采用霍尔传感器来测量一次回路的电流, 通过自主研发的现场采集单元将模拟信号转化为数字信号, 经光纤发送至主控室, 有效解决绝缘、电磁干扰和波形畸变等问题。

1 数据采集系统的总体架构

数据采集系统原理如图 1 所示, 数据采集系统包括测量元件、同步单元、采集单元和后处理单元。其中, 测量元件是与一次回路直接连接的高电压设备, 而同步、采集和后处理单元则是位于地电位的

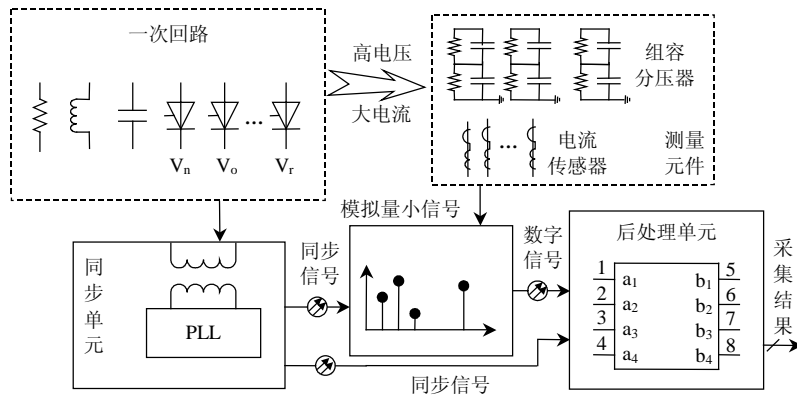


图 1 数据采集系统原理图

Fig. 1 Diagram of sampling system

微电子电路。图中， V_n 、 V_o 、 V_r 表示一次回路中的晶闸管。

测量元件包括测量电压的分压器和测量电流的霍尔电流传感器。这些器件将一次回路的高电压、大电流信号变送为等比例的小模拟信号，并输送至采集单元。同步单元基于交流电网的正弦电压生成同步信号。采集单元和后处理单元使用该信号来维持同步。该信号能够准确跟随电网频率的波动，始终保持电网频率的整数倍。根据需要，同步信号的倍率可选择 32、64、128、256 和 512。采集单元对各个测量元件输出的模拟小信号进行调理、模数转换，最后，通过光纤以串行编码的形式发送至后处理单元。同时，该单元还用于向霍尔电流传感器等有源测量元件提供工作电源。后处理单元在接收到采集单元的各路数字信号后，进行数字滤波、偏置微调、数据汇总等后处理，最后，采用通用的高速并行或串行总线发送至其它自动化控制、保护及监测环节。

2 一次回路电气量的变送

由于一次回路具有很高的电压，在测量时需要合理选择测量元件并确定安装方式。大功率电力电子设备的电压、电流测量工作可分为 4 种情况，分析如下：

1) 情况 1，接地支路的电压测量。

接地支路拥有地电位点，因此，只要使用分压器将高电压降低为等比例的低电压即可送入地电位的采集单元，但是需重点解决分压器的设计问题。接地支路的电压测量方法如图 2 所示，分压器自身具有分布电容，用于传输低压信号的电缆也具有分布电容，而作为分压器的负载，采集单元具有特定的输入阻抗，这就使得电阻分压器的测量结果

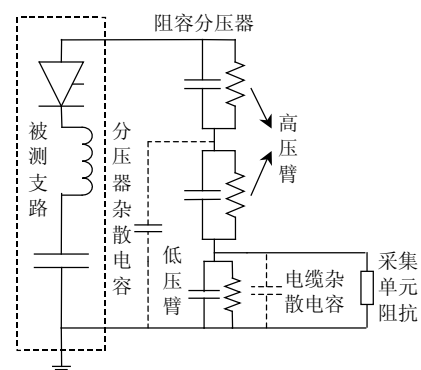


图 2 接地支路的电压测量方法

Fig. 2 Voltage measurement method of grounding branch

受分布电容的影响很大，而电容分压器对低频分量的测量精度很低，因此，只能采用阻容分压器进行测量。

阻容分压器高压臂和低压臂的参数需要结合被测电压波形的频率范围进行设计：首先，分压器的阻抗不应影响被测支路的电气性能；其次，阻容分压器及相关分布参数应作为一个高阶线性系统来仿真分析，充分保证在规定的频率范围内，输入信号和输出信号都保证良好的幅值关系和相位关系。

2) 情况 2，不接地支路的电压测量。

对于不接地支路，可以通过测量两端对地电压然后在采集单元内进行模拟量差分的方法来实现。原理如图 3 所示。为保证测量结果的准确性，2 套分压器的参数、结构、工艺等必须保证完全一致。同时，向采集单元传输低电压信号的电缆在型号和敷设路径上也必须完全一致。

3) 情况 3，接地支路的电流测量。

在接地支路上，可以在低压侧直接安装霍尔电流传感器来测量电流。由于霍尔电流传感器是有源元件，因此，需要采集单元提供工作电源。原理如图 4 所示。

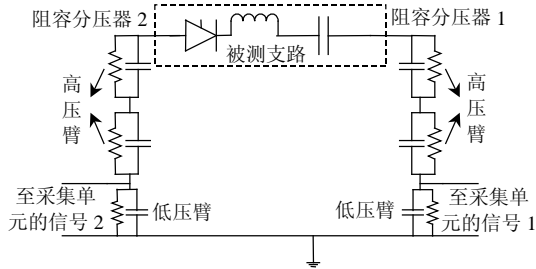


图3 不接地支路的电压测量方法
Fig. 3 Voltage measurement method of non-grounding branch

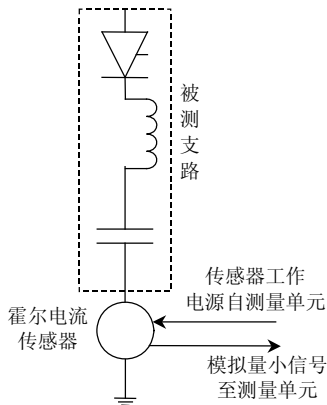


图4 接地支路的电流测量方法

Fig. 4 Current measurement method of grounding branch

霍尔电流传感器可以输出与电流成比例的小电压或电流信号。在小信号要传输较远距离的情况下，为了降低一次回路空间电磁场对信号的干扰，小信号应优先选择电流形式。

4) 情况4，不接地支路的电流测量。

在不接地支路上，所有位置均具有高电位。因此，只能将霍尔电流传感器安装在高电位侧，并通过光纤来实现绝缘，原理如图5所示。每个高电位的霍尔电流传感器配置一个采集单元的高电位通道，采集单元地电位侧通过光纤向高电位通道发送光功率信号，高电位通道将光功率信号转化为电能，供自身和霍尔电流传感器使用，霍尔电流传感器输出的模拟量小信号经高电位通道调理、模数转换最终经光纤发送至后处理单元。

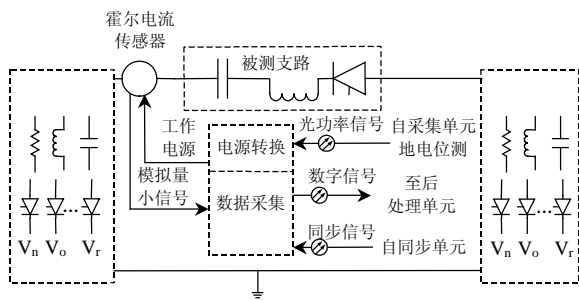


图5 不接地支路的电流测量方法
Fig. 5 Current measurement method of non-grounding branch

3 模拟量的采集与转换

同步单元、采集单元和后处理单元协同工作，完成模拟量小信号的采集。同步单元使用电压互感器引入交流电网的 AB、BC、CA 这 3 路线电压信号；进而，对 3 路线电压信号分别进行低通滤波、整形和锁相倍频，生成 3 路独立的倍频信号；最后，通过路由逻辑选择一路同步倍频信号输出至采集单元和后处理单元，作为数据采集系统的同步信号。低通滤波器用于消除电网的高次谐波和噪声；整形电路用于将正弦交流信号转化为同相位的方波信号；锁相倍频电路用于跟踪电网频率的变化，并产生电网频率整数倍的方波信号，而且，占空比可调。路由逻辑默认选择 AB 线电压产生的倍频信号作为同步信号；如果该信号丢失时间超过限度，则依次切换至 BC、CA 线电压产生的倍频信号。为了保证同步信号的稳定性，路由逻辑只依次向下选择通道，不会返回原来使用的通道。同步单元的原理如图6所示。

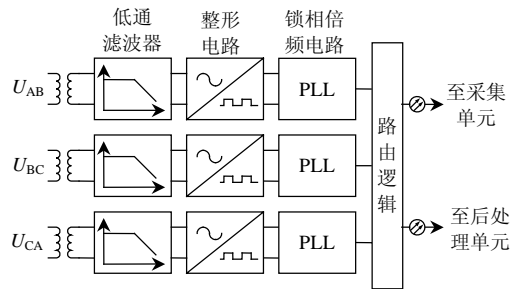


图6 同步单元原理图

Fig. 6 Diagram of the synchronous unit

采集单元配置有多个数据采集通道，分别对应于各个被测电气量，根据具体情况，各个数据采集通道的主要转换形式如图7所示。

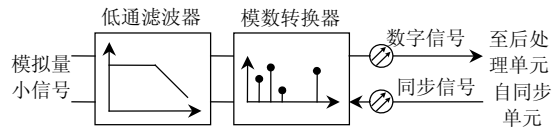


图7 采集单元原理图

Fig. 7 Diagram of the sampling unit

后处理单元用于收集各采集通道的数字信号，并进行数字滤波、消偏置等后处理，最终，将所有通道的数据打包汇总，并通过通用的高速并行或串行总线发送至其它自动化控制、保护及监测环节。原理如图8所示。

采集单元和后处理单元利用同步信号来维持同步。在同步信号方波的每个上升沿处，采集单元开始一次数据采集和发送。考虑到不同数据采集通

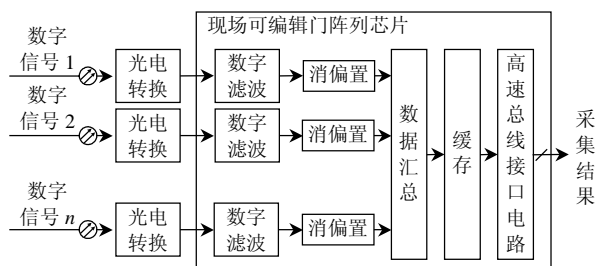


图 8 后处理单元原理图

Fig. 8 Diagram of the processing unit

道可能有不同的延时，后处理单元接到数据后并不是立即开始处理，而是等待同步信号方波的下降沿来临时启动滤波、消偏置、数据汇总及发送等工作。数据采集系统的工作时序如图 9 所示。

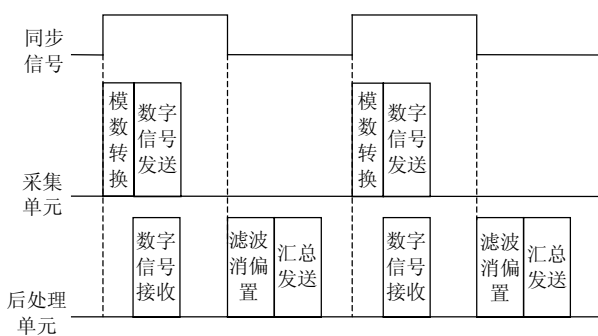


图 9 数据采集系统的工作时序

Fig. 9 Timing of the data sampling system

4 采集装置的电磁兼容性处理

4.1 电缆的电磁兼容处理

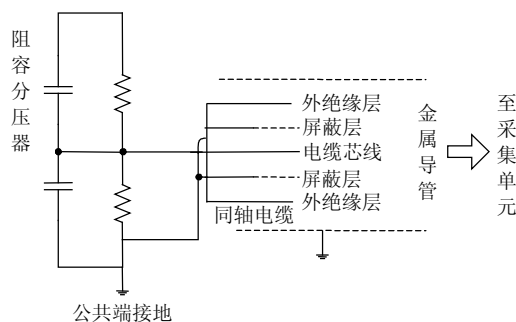
测量元件和采集单元位于一次回路附近，一次回路的高电压、大电流会产生强大的电磁干扰。为确保数据采集的精度和可靠性，需要对传输模拟小信号的电缆和采集单元采取有效的电磁兼容处理。

在情况 1、2、3 中，测量元件输出的信号需经电缆送至采集单元，这些电缆应使用同轴电缆或屏蔽多芯双绞电缆，在电缆外部还应加装高导磁率的金属导管，电缆屏蔽层和金属导管应保证单点接地。电缆的接地及屏蔽方式如图 10 所示。

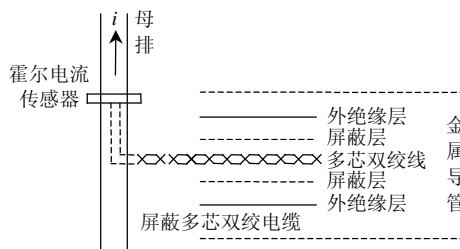
4.2 采集单元的电磁兼容处理

采集单元由各种印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 构成，包括高电位通道和地电位屏柜 2 部分。通过有效的屏蔽和 PCB 电磁兼容设计，可保证采集单元在强电磁干扰下仍达到良好的性能。

高电位通道和地电位屏柜的均采用高磁导率的软铁板作为屏蔽壳，用以吸收低频磁场干扰。屏蔽壳的内壁安装有镀银的薄铜板，用以屏蔽电场干扰和高频磁场干扰。



(a) 阻容分压器输出信号电缆的连接方式



(b) 霍尔电流传感器输出信号电缆的连接方式

图 10 电缆的电磁兼容性处理

Fig. 10 EMC process of electrical cable

每块 PCB 应严格遵守电磁兼容设计准则：

- 1) 模拟电路的电源、地和数字电路的电源、地应截然分开，经磁珠连接于一点。
- 2) 模拟电路和数字电路、高频元件和低频元件、高电位元件和地电位元件应在布局上明确分开。
- 3) PCB 中的高频信号应拥有最短的回流路径。
- 4) 强电和弱电电路应采取有效的隔离措施。
- 5) 在模拟信号的输入端应采取过电压抑制措施和滤波措施。
- 6) PCB 内部电路距离电路板的物理边界应保持适当距离。
- 7) 并行走线之间应保持合理距离。
- 8) 集成芯片附近应安装去耦电容。

5 试验结果

本采集系统已经成功应用于中国电科院电力系统电力电子试验室的一套超大规模的电力电子设备中。该设备的最高输出电压为 80 kV，最大稳态输出电流 6200 A，最大输出涌流电流峰值 55 kA。该设备的一次回路如图 11 所示。图中， V_n 、 V_o 、 V_r 、 V_s 、 V_t 、 V_z 、 V_i 、 V_j 、 V_m 分别为各个回路中的晶闸管。

为进行验证，使用其它测量元件连接 DL750 型示波器，与采集系统共同测量同样的信号。测量结果如图 12 所示。

不同情况下，DL750 示波器前端所连接的测量

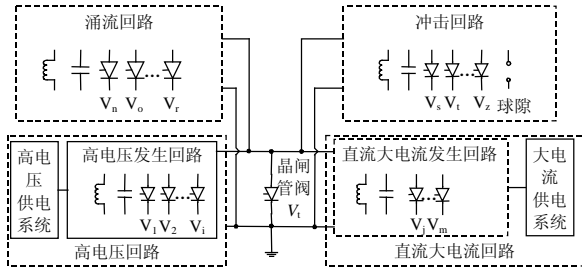


图 11 换流阀运行试验装置一次回路示意图
Fig. 11 Operational test equipment diagram

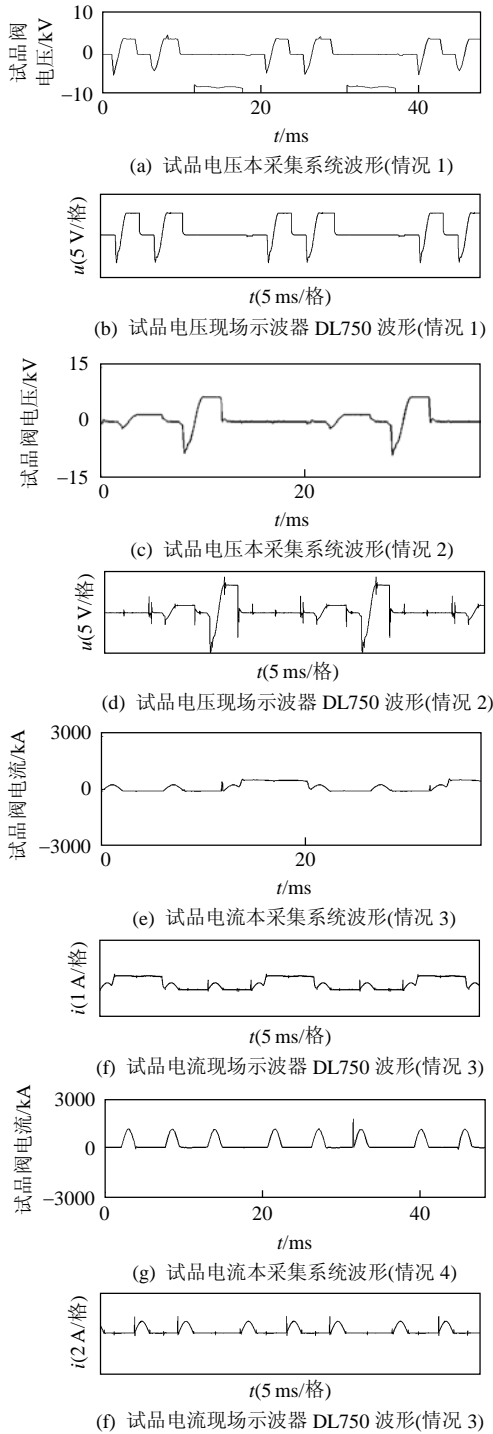


图 12 采集系统和示波器测得的电压、电流波形
Fig. 12 Voltage and current wave measured by sampling system and oscillograph

元件说明如下：

1) 对于情况 1、2，示波器 DL750 前端接光电式电压互感器，经调整，变比设定为 1001:1。

2) 对于情况 3，示波器 DL750 前端接霍尔电流传感器，通过调整传感器后端的转换电阻，实际电流与示波器显示结果之间变比为 1000:1。

3) 对于情况 4，示波器 DL750 前端接光电式电流互感器，变比与情况 3 相同。

采集系统和校验设备之间的误差如表 1 所示。

表 1 本采集系统与示波器 DL750 测量结果的比较
Tab. 1 Comparison of the measurement results of sampling system and oscillograph DL750

项目	有效值误差/%	峰值误差/%
情况 1	1.32	1.77
情况 2	3.78	4.06
情况 3	2.66	2.33
情况 4	2.16	2.66

表中，有效值误差^[20]可表示为

$$E_{Rms} = \frac{R_{ms}(s_i) - R_{ms}(s'_i)}{R_{ms}(s_i)} \quad (1)$$

式中： E_{Rms} 为有效值误差； $R_{ms}(s_i)$ 为本采集系统测量结果有效值； $R_{ms}(s'_i)$ 为示波器 DL750 测量结果有效值； s_i 为本采集系统测量结果，对应图 12(a)、(c)、(e)、(g) 波形； s'_i 为示波器 DL750 测量结果，对应图 12(b)、(d)、(f)、(h) 波形($i=1,2,3,4$)。

峰值误差可表示为

$$E_{Peak} = \frac{P_{eak}(s_i) - P_{eak}(s'_i)}{P_{eak}(s_i)} \quad (2)$$

式中： E_{Peak} 为峰误差； $P_{eak}(s_i)$ 为本采集系统测量结果峰值； $P_{eak}(s'_i)$ 为示波器 DL750 测量结果峰值。

由表 1 可见，情况 2 的误差较其它情况略大，这是因为，本系统采用的 2 套分压器不可避免地存在差异，但是，由于 2 套分压器的制造工艺比较接近，误差被控制在 5% 的范围内，能够满足设备正常运行的要求。

6 结论

1) 通过合理配置分压器和霍尔电流传感器，解决了大功率电力电子设备中 4 种不同情况下的信号变送问题，包括：接地支路的电压测量、不接地支路的电压测量、接地支路的电流测量和不接地支路的电流测量。

2) 同步单元、采集单元和后处理单元按照特定的时序协调工作，能够完成一次回路电压、电流

信号的实时采集、传输。

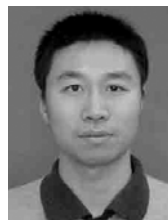
3) 一次回路的高电压、大电流会产生较强的电磁干扰, 需要合理设计模拟信号电缆的屏蔽和接地, 同时, 还应对 PCB 采取屏蔽、优化布局布线、去耦等电磁兼容措施。

参考文献

- [1] IEC 60700-1 Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission – part 1: electrical testing[S].
- [2] GB/T 20990.1 高压直流输电晶闸管阀第1部分: 电气试验[S].
- [3] 温家良, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 高压晶闸管运行试验方法与试验装置的研究与开发[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 26-31.
Wen Jialiang, Tang Guangfu, Zha Kunpeng, et al. Operational test method of high voltage thyristor valves and development of its synthetic test equipment[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 26-31(in Chinese).
- [4] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 40-44.
Tang Guangfu, He Zhiyuan, Teng Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 40-44(in Chinese).
- [5] 石岩, 常浩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 1-6.
Shi Yan, Chang Hao, Yin Weiyang, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 1-6(in Chinese).
- [6] 张晋华, 刘云, 曾南超, 等. 我国采用高压直流集中控制的可行性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 15-19.
Zhang Jinhua, Liu Yun, Zeng Nanchao, et al. Feasibility research on adopting HVDC centralized control in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 15-19(in Chinese).
- [7] 马玉龙, 徐玲玲, 石岩, 等. 三广直流工程融冰运行方式仿真试验[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 22-26.
Ma Yulong, Xu Lingling, Shi Yan, et al. Simulation test of ice-melting operation mode for HVDC power transmission project from the three gorges hydropower station to guangdong[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 22-26(in Chinese).
- [8] 李民族, 王民慧, 王武, 等. 变耦电抗式可控串补动模试验研究[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 59-64.
Li Minzu, Wang Minhui, Wang Wu, et al. Dynamic simulation of thyristor controlled reactance series compensator by adjustable coupling[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 59-64(in Chinese).
- [9] 盘宏斌, 罗安, 涂春鸣, 等. 并联型高电能质量调节装置的研制[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 11-16.
Pan Hongbin, Luo An, Tu Chunming, et al. Development of a shunt type of high power quality regulating device[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 11-16(in Chinese).
- [10] 鄂志军, 房大中, 陈家荣, 等. 基于晶闸管控制电抗器的 FACTS 动态相量模型[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 26-30.
E Zhijun, Fang Dazhong, Chen Jiarong, et al. Dynamic phasor models of TCR based FACTS[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 26-30(in Chinese).
- [11] 谢彬, 洪文国, 熊志荣, 等. 500kV 复兴变电站固定式直流融冰兼 SVC 试点工程的设计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 182-185.
Xie Bin, Hong Wenguo, Xiong Zhirong, et al. Pilot project design of concurrent fixed DC ice-melting and SVC for 500 kV fuxing substation[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 182-185(in Chinese).
- [12] 刘隽, 李兴源, 姚大伟, 等. 静止同步串联补偿器与静止无功补偿器的相互作用分析与协调控制[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 20-25.

Liu Jun, Li Xingyuan, Yao Dawei, et al. Analysis on interaction between static synchronous series compensator and static var compensator and their coordination control[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 20-25(in Chinese).

- [13] 张少康, 李兴源, 张振, 等. TCSC 及其主动阻尼控制对次同步谐振的抑制[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 22-26.
Zhang Shaokang, Li Xingyuan, Zhang Zhen, et al. Research on suppressing sub-synchronous resonance by TCSC and its active damping control[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 22-26(in Chinese).
- [14] 吴涛, 周有庆, 曹志辉, 等. 新型电子式电压互感器及其误差分析[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 209-213.
Wu Tao, Zhou Youqing, Cao Zhihui, et al. A new type of electronic voltage transformer and its error analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 209-213(in Chinese).
- [15] 曹志辉, 周有庆, 吴涛, 等. 检测电流型电子式电压互感器的开发及精度分析[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 179-184.
Cao Zhihui, Zhou Youqing, Wu Tao, et al. Development and precision analysis on electronic voltage transformer based on measuring current[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 179-184(in Chinese).
- [16] 习超群, 程炯, 杨世贵. 光电流互感器在换流站直流滤波器中的应用及故障原因分析[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊1): 17-19.
Xi Chaoqun, Cheng Jiong, Yang Shigui, et al. The application of optical current transformer in converter station DC filter and its fault reason analysis[J]. Power System Technology, 2008, 32(S1): 17-19(in Chinese).
- [17] 于文斌, 杨以涵, 郭志忠, 等. 光路结构参数对光学电流互感器运行稳定性的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 68-72.
Yu Wenbin, Yang Yihan, Guo Zhizhong, et al. Influence of optical path structure and parameter on operating stability of optical current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 68-72(in Chinese).
- [18] 任晓东, 陈树勇, 姜涛. 电子式电流互感器高压侧取能装置的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 67-71.
Ren Xiaodong, Chen Shuyong, Jiang Tao, et al. Design of a high side energy extracting device for active electronic current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 67-71(in Chinese).
- [19] 刘丰, 毕卫红, 丁建云. 基于逆压电效应和模间干涉的电压互感器设计[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 90-94.
Liu Feng, Bi Weihong, Ding Jianyun, et al. Design of a high voltage transducer based on modular interference and converse piezoelectric effect[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 90-94(in Chinese).
- [20] 李忻乘. 采样计算方法测量交流电压有效值误差分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(z1): 62-65.
Li Xincheng. Error analysis of sampling computation method for RMS measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(z1): 62-65(in Chinese).



张新刚

收稿日期: 2011-01-17。

作者简介:

张新刚(1979), 男, 博士, 工程师, 主要从事 FACTS 及 HVDC 设备的控制保护研究工作;

杨波(1981), 男, 硕士, 工程师, 主要从事 FACTS 及 HVDC 设备的控制保护研究工作;

王韧秋(1982), 男, 硕士, 工程师, 主要从事 FACTS 及 HVDC 设备的控制保护研究工作;

赵彩萍(1982), 女, 硕士, 工程师, 主要从事 FACTS 及 HVDC 设备的控制保护研究工作;

冯静波(1984), 男, 本科, 工程师, 主要从事 FACTS 及 HVDC 设备的控制保护研究工作。

(责任编辑 褚晓杰)