

# 南方电网直流输电工程的光测量系统典型异常及处理方法

朱韬析<sup>1</sup>, 刘东<sup>2</sup>, 郭卫明<sup>1</sup>, 何杰<sup>1</sup>

(1. 南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405; 2. 河南永城市供电有限责任公司, 河南 永城 476600)

**摘要:** 以南方电网内各直流输电工程为例, 介绍了其直流电压和直流电流光测量系统的基本原理。探讨了光测量信号的传输回路, 结合实际案例分析了运行中光测量系统暴露出来的一些典型异常及相应处理, 如光电传感器故障引起的直流电压异常波动、光 CT 同轴电缆紧固方式的缺陷、光测量及相关总线系统的切换问题等。这些运行经验为未来直流输电工程的设计和实施、换流站乃至数字化变电站内光测量系统的运行维护都提供了有益的参考。

**关键词:** 光测量系统; 直流输电系统; 典型异常

## Typical abnormalities and their treatments of optic-electric measurements used in HVDC transmission projects in CSG

ZHU Tao-xi<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>2</sup>, GUO Wei-ming<sup>1</sup>, HE Jie<sup>1</sup>

(1. GZ Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China;

2. Yongcheng Power Supply Co., Ltd, Yongcheng 476600, China)

**Abstract:** Taking the HVDC transmission projects of CSG as an example, the basic principles of DC voltage divider and DC current divider are introduced first; then the circuits of optic-electric measurements are discussed; at last, combined with the operational examples, the typical abnormalities of optic-electric measurements, such as the abnormal fluctuation of DC voltage caused by optic fiber sensor fault, the defective fixture of the coaxial cable of DC current divider, and the switch of the optic-electric and bus system are discussed. All of those operational experiences are not only valuable to the design and implement of HVDC projects in the future, but also benefit to the operation and maintenance of optic-electric measurements used in converter station and even in digital substation.

**Key words:** optic-electric measurement; HVDC system; typical abnormality

中图分类号: TM721.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0147-06

## 0 引言

随着电力系统容量的不断增大和电网运行电压等级的提高, 对电力系统继电保护的動作速度要求越来越高, 这就要求互感器具有良好的暂态响应特性, 能真实、快速地反映一次故障信号, 使继电保护装置能在暂态过程尚未结束前就正确动作。存在磁饱和、剩磁等情况的电磁式互感器, 同时又存在尺寸大、质量大、抗干扰差、信息传输容量小等缺陷, 已逐渐无法满足电力系统日益发展的需要。而光电互感器则可以有效克服上述缺陷, 同时又能以数字信号输出, 取消了大量的二次电缆, 为电力系统的安全运行、节约成本、高压设备无油化、优化二次设备提供了坚实的基础<sup>[1-2]</sup>。

光电互感器在南方电网直流输电系统中得到了大量的应用。本文首先介绍了南方电网直流输电系统中光电互感器及其二次回路的主要结构, 然后结合实例探讨了运行中暴露出的主要问题及改进措施, 这对光测量系统在电力系统中的应用及相应运行维护工作, 有较高的参考价值。

## 1 南方电网直流输电系统中光电互感器基本测量原理

南方电网中, 目前已有天广、高肇和兴安直流输电系统投入运行,  $\pm 800$  kV 云广直流输电系统已单极投产; “十二五”期间, 还将新建溪洛渡右岸直流  $\pm 500$  kV/2 $\times$ 3 200 MW、糯扎渡直流  $\pm 800$  kV/5 000 MW 工程。

南方电网直流输电系统中，大量应用了光电互感器。天广、高肇、兴安直流系统中，采用光电互感器的采样点基本类似，以天广直流输电系统逆变侧极 1 为例，采用了光电互感器的采样点如图 1 所示。

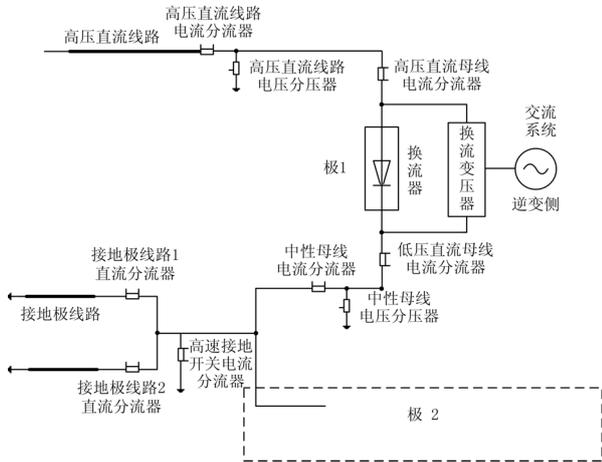


图 1 直流输电系统中采用光电互感器的测量点

Fig.1 The measurement position with optic-electric transducer in HVDC system

极 2 及整流侧采用光电互感器的采样点和图 1 基本相同。

±800 kV 云广直流输电系统每一极采用了两个阀组，采用光测量回路的采样点在图 1 的基础上，为每个阀组各增加了一个直流电流测量点，在两个阀组的中间增加了一个直流电压测量点。

### 1.1 直流电压的光测量原理

以天广直流输电系统为例，高压直流电压分压器（光 PT）的布置结构如图 2 所示：通过电阻分压器在低压端输出测量电压；直流线路电压分压器二次侧的测量值分为若干路，所有的光电传感器通过并联的方式共用测量电压；光电传感器将测量电压进行“电—光”转换后，传送至直流保护系统、极控系统以及直流滤波器控制保护系统，用以执行相应的控制保护功能。

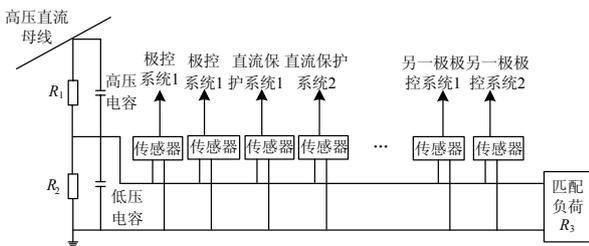


图 2 直流电压测量原理图

Fig.2 Principle of DC voltage divider

图 2 中各光电传感器型号相同，不妨假设其等值阻抗为  $R_m$ ，共  $n$  只；则各传感器的输入电压  $V_m$  为：

$$V_m = V_H \times \frac{R_2 R_m R_3}{R_1 R_m R_3 + R_1 R_m R_3 + n R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_m} \quad (1)$$

其中， $V_H$  为实际的直流线路电压。

高肇和兴安直流输电系统中直流电压的测量原理在天广直流输电系统的基础上做了一些改进：高肇直流输电系统中，光电传感器二次端子由原来较为原始的焊接改为采用端子接入，消除了由于焊接技术不良或虚焊造成直流电压不稳定的情况；在兴安直流输电系统中，则将所有光电传感器分为八个小组，各小组相互独立，实现了极控系统和直流保护系统的真正冗余。

### 1.2 直流电流的光测量原理

南方电网直流输电系统中，直流电压分压器（光 CT）的原理图如图 3 所示。

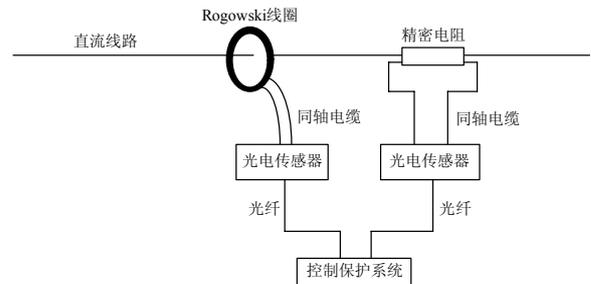


图 3 直流电流测量原理图

Fig.3 Principle of DC current divider

图 3 中，精密电阻用于测量电流中的直流分量，Rogowski 线圈用于测量直流电流中的谐波分量；测量值经同轴电缆送至光电传感器转为光信号后，经光纤分别送至各控制保护系统。

## 2 南方电网直流输电系统中光测量回路

### 2.1 天广、高肇及兴安直流中的光测量回路

天广、高肇及兴安直流控制保护功能均通过 SIMADYND 高速数字式控制系统实现，以天广 SIMADYND 系统为例，如图 4 所示，现场的采样数据经光纤送至 SIMADYND 装置的 IO3 插件，经处理后再送至信号处理模块——EP3 插件；而 LM3 插件为光电转换提供所需的能量。

高肇及兴安直流输电系统中，光信号传输原理与天广直流输电系统基本相同，只是对相应板卡进行了升级。

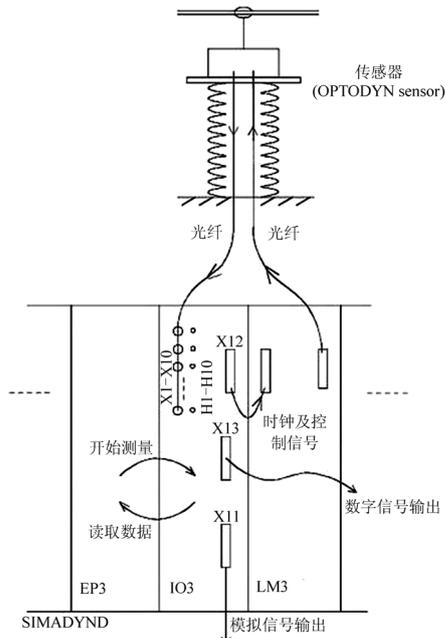


图 4 EP3、LM3 及 IO3 模块间的测量数据传输

Fig.4 The connections between the module EP3, LM3 and IO3 within the optic-electric measurement

2.2 ±800 kV 云广直流输电系统的光测量回路

±800 kV 云广直流输电系统的控制保护供能采用 SIMATIC TDC 模块化的多功能处理器系统实现。如图 5 所示, 现场的采样数据送至测量屏内并转换为数字量后, 经 SIMATIC TDC 中直流采样数据处理模块 LO5 处理后, 传输至 TDM 总线, 然后再分别送至控制保护设备。

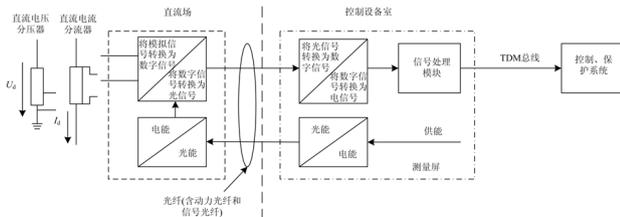


图 5 云广直流输电系统的光测量回路

Fig.5 The optic-electric measurement used in Yun-Guang HVDC system

2.3 改造后的天广光测量回路

于 2009 年 11 月开展的天广直流输电工程控制保护系统的综合整治工作中, 对天广直流输电系统的光测量回路也进行了改造, 改造后的回路如图 6 所示。

在合并单元中, 不仅将采样数据合并打包并通过总线将数据送给直流控制保护系统, 同时采取了

多种对光电传感器及合并单元硬件、软件的监视供能, 以监视光测量回路的状态, 从而保证控制保护系统能始终获得正确的数据。

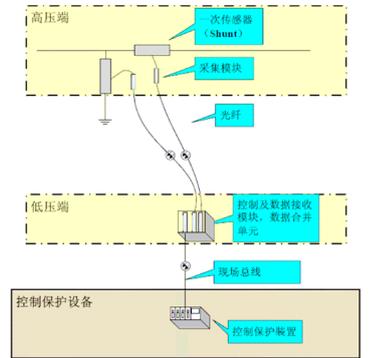


图 6 天广直流输电系统的光测量回路

Fig.6 The optic-electric measurement used in Tian-Guang HVDC system

3 光电互感器及其测量回路在运行中出现的常见问题及改进

南方电网直流输电系统已运行多年, 积累了丰富的运行经验, 光电互感器及其测量回路在运行中, 主要有以下问题值得借鉴。

3.1 光电传感器故障造成的直流电压测量异常

光 PT 二次回路中的光电传感器故障是近年来困惑南方电网直流输电系统运行的主要疑难问题之一[3-5]。

2005 年以来, 天广、高肇、兴安直流输电系统均多次出现高压直流电压测量值异常现象, 包括电压值波动和电压值突变, 且陆续引起了换流变压器分接开关频繁调节、极控软件监视功能动作、直流零电流保护动作、换流器开路保护误动、直流滤波器过负荷保护误动等问题, 多次造成直流输电系统强迫停运。经过深入研究及多次检修实践处理, 结合如图 7 所示的高压直流电压分压原理图, 最终确定故障原因为直流电压测量回路中某光电传感器故障, 轻微故障时影响其输入阻抗变化, 从而对低压端整体分压电阻产生影响, 造成分压偏移和测量错误, 最后引起直流电压波动异常; 光电传感器严重故障时, 则造成该传感器对应测量通道获取的测量值发生突变。

图 7 为与图 2 对应的光 PT 原理图, 由于所有传感器与分压器低压端并联, 在计算分压比时必须将传感器的等值阻抗考虑在内。其中, F1 为过压保护器件, 击穿电压为 350 V。

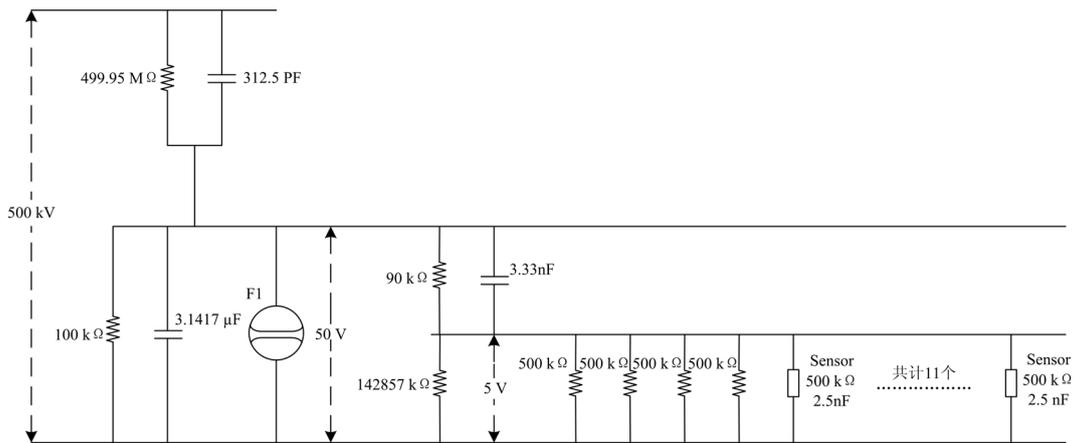


图 7 高压直流电压分压原理图

Fig.7 Equivalent circuit of HVDC voltage dividers

确定故障原因后，运行维护部门结合仿真研究，展开了针对的处理及改进：

(1) 发生直流电压波动时，在线更换故障的光电传感器。

结合图 2 和图 7，如果在系统运行且持续存在电压波动的情况下，依次断开单个传感器的输入端，将该传感器与系统隔离，当隔离的传感器是故障传感器时，则直流测量回路故障源切除，电压波动现象立即消失。如果隔离的是正常传感器，则电压波动现象不会消失。根据这一处理便可以确定故障传感器并进行更换。

图 8 即为某次在线处理直流电压异常波动过程中的故障录波，可以清晰看到隔离该传感器前电压的波动以及之后电压波动消失的过程<sup>[6]</sup>。

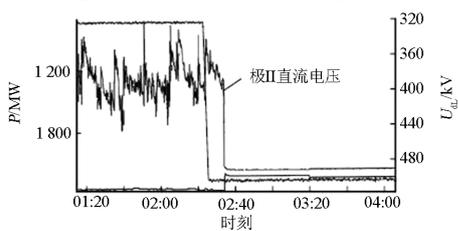


图 8 电压波动在线处理过程中的直流电压

Fig.8 DC voltages before and after the on-line handling

(2) 改进高压直流电压测量回路。

运行维护单位还改造了天广、高肇直流输电系统逆变侧的高压直流电压测量回路，如图 9 所示，改造后的直流电压测量回路实现光 PT 二次回路的独立和极控系统、直流保护系统高压直流电压测量回路的真正冗余，避免了单个传感器故障造成整个二次母线电压值异常，从根本上防止了电压波动的再次发生。

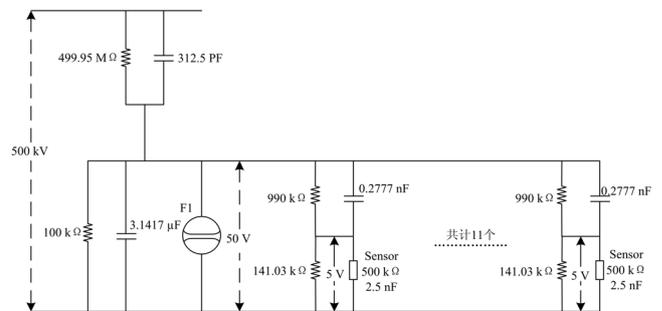


图 9 改造后的广州换流站直流电压测量回路

Fig.9 Configuration of reconstructed HVDC voltage dividers

### 3.2 光 CT 同轴电缆的紧固方式

天广直流输电系统是南方电网内第一条投入运行的直流输电工程，早期运行期间，其光 CT 内部同轴电缆两端接头连接方式存在缺陷，曾多次造成中性母线电流、换流器低压母线侧电流直流测量值异常，进而引起直流差动后备保护、中性母线差动保护、极差动保护等误动。

经过多次检修及深入研究，最终判断故障的根本原因为传感器到分流器的连接存在缺陷，随后在 2003 年 1 月对所有光 CT 中从传感器到分流器的连接进行了改造：

(1) 首先用更高质量的同轴电缆对所有光 CT 的同轴电缆进行更换，新的同轴电缆包括一个用于维护、测试的耦合连接器，同时还套装了耐高温的热缩管加以保护。

(2) 改造前的同轴电缆通过插拔方式配以螺栓紧固，改造后则采用螺栓直接固定并用固体胶封盖——一侧用螺栓直接紧固在分流器中电阻器两侧的接触表面来测量电压降；在光电转换侧，则直接焊接在传感头的连接线上。

改造前后的电路图及现场设备图片如图 10 和图 11 所示。

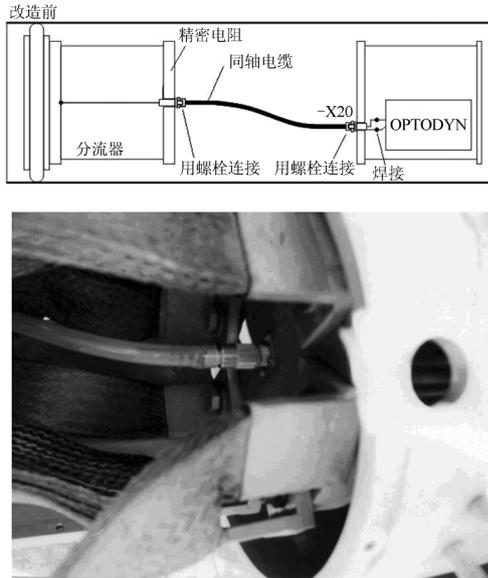


图 10 改进前的光 CT 结构

Fig.10 The structure of optic-electric CT before alteration

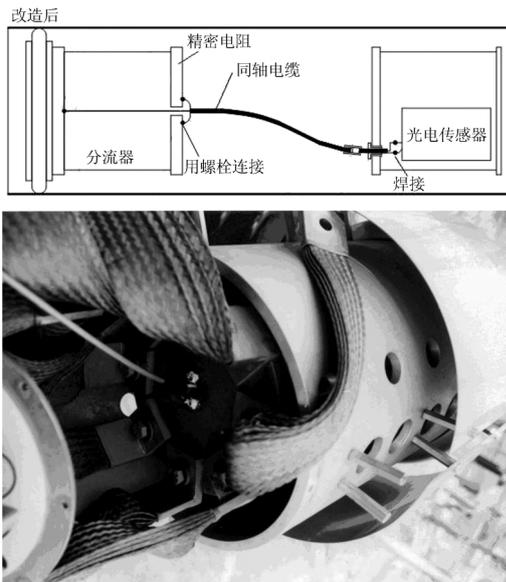


图 11 改进后的光 CT 结构

Fig.11 The structure of optic-electric CT after alteration

经上述改造后, 天广直流输电系统、以及之后的高肇、兴安直流输电系统均未出现类似问题

### 3.3 ±800 kV 云广直流输电系统光测量及相关总线系统的技术有待完善

如上文所述, 在 ±800 kV 云广直流输电系统中, 现场采样数据经测量系统处理后, 由 TDM 总线送至控制保护系统; 为了保证可靠性, 测量系统与

TDM 总线均为冗余配置。然而, 调试运行发现, 云广直流输电系统中, 一套测量系统的断电停运或者上电启动, 却存在一定的几率影响到另一套测量系统。

如 2009 年 08 月 21 日, 在 ±800 kV 云广直流输电系统逆变侧, 对极 2 直流测量系统 2 断电重启时, 送极 2 直流测量系统 1 的高压直流母线电流  $I_{dCH}$  测量通道受到干扰,  $I_{dCH}$  测量值发生突变, 造成直流母线差动保护误动, 停运了极 2。故障录波如图 12 所示。

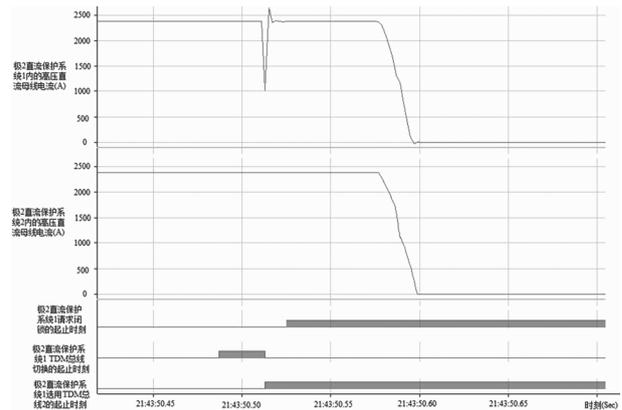


图 12 故障录波图

Fig.12 The transient fault recorder curve

目前, 造成上述问题的原因及处理措施仍在研究中。

±800 kV 云广直流输电系统的结构与数字化变电站自动化系统结构<sup>[7-9]</sup>类似, 但根据目前的运行经验, 光测量及相关总线系统的技术仍有待完善。

### 3.4 其他

(1) 为光电转换供能的 LM3 板卡故障率非常高。

南方电网各直流输电工程的光测量回路中, 为光电转换提供能量的 LM3 插件故障率非常高。在实现控制保护供能的 SIMADYN D 系统中, 故障的 LM3 插件数量甚至超过了所有故障插件数量的 90%。

LM3 插件故障后, 该套控制(保护)系统将认为发生测量故障, 并退出运行, 这无疑将威胁到对系统的可靠性。

(2) 光 CT 的结构有待完善, 多次发现光 CT 内有鸟巢, 并曾经直接造成测量回路故障。

## 4 结语

光 CT 和光 PT 在南方电网直流输电系统中得到了大量的应用, 其良好的暂态响应特性有助于提高保护动作速度; 测量数据通过光纤传输, 从而取消

了大量的二次电缆,优化了二次设备。

经过多年运行,南方电网内各直流输电工程的光测量系统也暴露出了一些问题,本文介绍了部分典型的异常及处理方法,如光 PT 测量回路中光电传感器故障及其引起的直流电压测量值异常、光 CT 同轴电缆的紧固方式不当所造成的直流电流测量值异常、±800 kV 云广直流输电系统光测量及相关总线系统切换时对冗余系统的影响等,这不仅有助于今后直流输电系统的运行维护,同时也为未来直流输电工程的设计、实施提供了有益的参考。

参考文献

[1] 曾庆禹. 电力系统数字光电量测系统的原理及技术[J]. 电网技术, 2001, 25 (4): 1-5.  
ZENG Qing-yu. Principle and technology of digital electrooptic measurement for power system[J]. Power System Technology, 2001, 25 (4): 1-5.

[2] 高阳, 张海燕, 张旭鹏. 光电传感器在继电保护中的应用研究[J]. 沈阳工程学院学报: 自然科学版, 2006, 2 (3): 233-236.  
GAO Yang, ZHANG Hai-yan, ZHANG Xu-peng. Research on application of photoelectric transformer on relay protection[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science, 2006, 2 (3): 233-236.

[3] 段卫国, 陆岩, 阳少军. 高肇直流极 II 直流电压异常波动分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2 (3): 23-24.  
DUAN Wei-guo, LU Yan, YANG Shao-jun. Analysis of the abnormal DC voltage fluctuation of the pole II in the Gui-Guang HVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2 (3): 23-24.

[4] 张海凤, 朱韬析. 天广直流输电系统极 I 电压异常波动原因及其影响分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (24): 102-104.  
ZHANG Hai-feng, ZHU Tao-xi. Analysis of the abnormal DC voltage fluctuation of the pole I in the Tian-Guang HVDC transmission system and its negative

influence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (24): 102-104.

[5] 吴泽辉, 张鹏, 左干清. 高肇高压直流系统电压波动的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (5): 104-107.

[6] 郝志杰, 张建设. 基于 RTDS 的 HVDC 电压波动机理研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2 (6): 52-55.  
HAO Zhi-jie, ZHANG Jian-she. RTDS-based research on the principle of HVDC voltage fluctuation [J]. Southern Power System Technology, 2008, 2 (6): 52-55.

[7] 任雁铭, 秦立军, 杨奇逊. IEC 61850 通信协议体系介绍和分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (8): 62-64.  
REN Yan-ming, QIN Li-jun, YANG Qi-xun. Study on IEC 61850 communication protocol architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (8): 62-64.

[8] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30 (23): 67-71, 87.  
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. Main feature and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30 (23): 67-71, 87.

[9] 罗毅, 涂光瑜, 张锦辉, 等. 变电站信息数字化综合传输方案[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (8): 42-45.  
LUO Yi, TU Guang-yu, ZHANG Jin-hui, et al. Digitized comprehensive transmission plan of substation information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (8): 42-45.

收稿日期: 2009-11-18; 修回日期: 2010-01-12

作者简介:

朱韬析 (1980-), 男, 工程师, 目前从事直流输电维护工作; E-mail: taoxi\_zhu@hotmail.com

刘东 (1969-), 男, 本科, 工程师, 从事变电运行、电力调度管理工作;

郭卫明 (1980-), 男, 工程师, 目前从事直流输电维护工作。

(上接第 124 页 continued from page 124)

PENG Wen-ji, LUO Xin-qi. Research on vibrant fault diagnosis of hydro-turbine generating unit based on wavelet packet analysis and support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (4): 164-168.

[8] 桂峻峰, 高文胜, 谈克雄. 用结构参数法研究变压器绕组变形判据[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44 (1): 93-96.  
GUI Jun-feng, GAO Wen-sheng, TAN Ke-xiong. Criterion for transformer winding deformation calculated by the structural parameter method[J]. J Tsinghua Univ:

Sci &Tech, 2004, 44 (1): 39-36.

收稿日期: 2009-09-23; 修回日期: 2010-01-21

作者简介:

贾嵘 (1971-) 男, 博士, 教授, 从事电力系统自动化装置研究; E-mail: ja.rong@163.com

张云 (1973-) 女, 高级工程师, 从事水电设计工作;

洪刚 (1982-) 男, 硕士研究生, 从事电力设备在线监测与故障诊断研究。