

天广直流输电系统 2007 年运行情况总结分析

朱韬析, 汲广, 毛海鹏

(南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405)

摘要: 总结了 2007 年天广直流输电系统的运行情况, 统计了主要运行指标, 分析了运行中发生的原因较为复杂且具有代表性的多项事件, 并提出相应的对策和建议。这些宝贵的经验不但为直流输电系统的设计、调试提供了有益的参考, 还有助于提高直流输电系统的运行维护水平, 确保系统的稳定运行。

关键词: 天广直流; 运行指标; 故障及异常

Summary on operation of Tian-Guang HVDC transmission system in 2007

ZHU Tao-xi, JI Guang, MAO Hai-peng

(GZ Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510405, China)

Abstract: In this paper, the statistics of main operational indices of ± 500 kV Tian-Guang HVDC transmission system in the year of 2007 are presented. The representative accidents triggered off by complex causes during its operation are analyzed, and corresponding countermeasures and suggestions are proposed. These operation experiences are not only valuable to further improve the design, commissioning and operation level of HVDC power transmission projects in China, but also benefit to improve the ability of operation and maintenance.

Key words: Tian-Guang HVDC transmission system; operational indices; accidents and anomalies

中图分类号: TM721.1 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2009)22-0129-05

0 引言

± 500 kV 天生桥—广州直流输电系统是中国南方电网第一条长距离、大容量的高压直流输电线路, 自 2001 年 6 月双极投运以来, 累计转运电量超过 350 亿 kWh, 不仅在实施西电东送、促进东西部地区资源优化配置和社会经济发展方面发挥了重要作用, 而且为推进我国直流输电技术的发展积累了宝贵的经验。

通过总结一年来系统运行状况, 及时分析、处理运行中发生的异常情况并实施相应的反事故措施, 不但可以减少影响系统长期稳定运行的隐患, 还有助于提高直流输电系统的运行维护水平, 确保系统的稳定运行。

1 天广直流输电系统 2007 年运行概况及主要异常

1.1 天广直流输电系统 2007 年运行概况

2007 年, 天广直流系统主要运行指标如表 1 所示。

2007 年, 天广直流发生双极闭锁 1 次, 双极相

表1 天广直流输电系统2007年主要运行指标
Tab. 1 The main operation indexes of Tian-Guang HVDC system in 2007

主要指标	
能量可用率 EA/(%)	95.82
能量不可用率 EU/(%)	4.18
强迫能量不可用率 FEU/(%)	0.171 6
计划能量不可用率 SEU/(%)	4.01
能量利用率 U/(%)	49.67
单极计划停运次数 MSOT/(次)	20
单极计划停运时间/(小时)	571.3
单极强迫停运次数 MFOT/(次)	12
单极强迫停运时间/(小时)	14.17
降额运行次数 MDOT/(次)	0
降额等效停运时间/(小时)	0
双极计划停运次数 BSOT/(次)	2
双极计划停运时间/(小时)	35.78
双极强迫停运次数 BFOT/(次)	3
双极强迫停运时间/(小时)	6.675
系统双极停运时间/(小时)	314.9
系统双极运行时间/(小时)	7 552
系统运行时间/(小时)	7 701
系统运行率 SR/(%)	96.07
系统双极运行率/(%)	94.22
传输电量/(亿 kWh)	71.67

继闭锁2次, 单极闭锁10次。其中, 控制保护系统故障导致闭锁6次, 直流线路(含接地极线路)故障导致闭锁5次, 站用电系统故障导致闭锁2次。

1.2 天广直流输电系统2007年主要异常

2007年, 影响天广直流输电系统运行的主要异常有:

(1) 逆变侧极I高压直流线路电压测量异常

从2007年4月开始, 天广直流输电系统极I出现类似高肇直流输电系统的直流电压异常波动^[1,2]现象, 经分析和处理确定异常原因为逆变侧广州换流站极I直流线路电压分压器对应的光电传感器故障^[3], 不得不多次停运极I更换相应光电传感器模块, 而且还因直流线路电压测量异常引起了多次直流系统强迫停运: 04月27日, 逆变侧极I直

流零电流保护动作^[4], 闭锁极I; 06月20日, 逆变侧极I直流滤波器过负荷保护误动, 停运极I; 09月11日, 逆变侧极I换流器开路保护误动, 停运极I^[5]。

(2) 线路故障

直流输电系统线路长, 经过的区域环境复杂, 运行经验证明属于容易发生故障的设备^[6]。2007年, 天广直流输电系统共发生线路故障15次, 其中6次导致相应极停运, 9次通过重启恢复正常运行。15次线路故障中, 10次为高压直流线路金属性接地故障, 仅在08月11日极II有1次重启不成功, 导致极II闭锁; 而另外三次高阻接地故障及两次单极大地回线方式下的接地极线路故障, 均直接停运相应极。

表2 天广直流系统2007年强迫停运概况

Tab.2 Forced outage list of Tian-Guang HVDC system in 2007

时间	站别	闭锁极	故障系统	主要原因描述
2007.01.30	马窝	双极	控制保护	图实不符, 运行人员关断通信网桥电源后, 导致双极闭锁。
2007.02.03	线路	双极相继	直流线路	线路山火导致双极相继闭锁。
2007.04.27	广州	极I	控制保护	由于当时直流负荷较低, 且极II直流电压处于波动状态, 造成极II闭锁。
2007.05.09	线路	极I	直流线路	故障点未找到。
2007.05.27	马窝	极I	接地极线路	接地极故障, 电流不平衡保护动作, 导致极I闭锁。
2007.06.08	马窝	极I	接地极线路	同上。
2007.06.20	广州	极I	控制保护(直流滤波器)	直流电压测量回路传感器故障, 直流滤波器保护误动, 导致极I闭锁。
2007.06.20	广州	极I	控制保护(直流滤波器)	同上。
2007.06.20	广州	极I	控制保护(直流滤波器)	直流电压测量回路传感器故障, 直流滤波器保护误动, 导致极I闭锁。
2007.06.20	广州	极I	控制保护(直流滤波器)	同上。
2007.08.11	线路	极II	直流线路	线路遭雷击, 导致极II闭锁。
2007.09.11	广州	极I	控制保护(直流滤波器)	直流电压测量回路传感器故障, 直流滤波器保护误动, 导致极I闭锁。
2007.11.03	广州	双极相继	站用电系统	220V交流串入低压110V直流回路, 直流场刀闸误动, 导致双极相继闭锁。
2007.11.06	广州	极I	站用电系统	220V交流串入低压110V直流回路。
2007.12.12	广州	极II	控制保护(直流滤波器)	直流滤波器保护Simadyn D装置电源故障, 导致系统自动重启, 重启过程中保护误动。

(3) 低压直流系统故障

11月03日, 广州换流站直流场刀闸、地刀出现

自动误分合作, 原分闸位置设备出现合闸操作, 合闸位置设备出现分闸操作, 导致双极状态紊乱并

相继闭锁。后检查发现由于设备绝缘故障导致220 V 交流电压串入110 V 低压直流系统所导致。

1.3 其他

(1) 换流变

由于天广直流输电系统换流变压器设计上存在缺陷, 运行以来, 已有多台换流变压器发生严重过热性异常故障, 送至厂家解剖发现部分绕组出现断股、断线故障。2007年02月, 广州换流站将2006年11月发现乙炔和总烃超标并增长明显的#408327换流变压器送至沈阳变压器厂以更换故障绕组; 但在5月, 又发现#408329换流变压器乙炔和总烃含量异常并有缓慢增长的趋势, 但由于此时广州站暂时无备用换流变, 于是在8月中旬#408327换流变完成修复并运回至现场之前的三个月时间内, 为防止#408329换流变的运行情况恶化, 不得不对#408329换流变所在的极I所带的最高负荷进行了一定的限制。

08月20日, 用修复的#408327换流变更换#408329换流变后, 天广直流输电系统双极恢复了正常运行, 并随即将#408329换流变运至厂家进行检修。

(2) 水冷系统

天广直流水冷系统自2006年年度检修期间彻底处理后, 运行一直相对较平稳。2007年, 未发生因水冷系统故障导致的强迫停运, 只是在05月18日、05月26日、06月03日、07月01日、12月29日和30日, 马窝站发现水冷系统发生漏水, 于是申请停运相应极后进行了相应处理。

2 2007年天广直流输电系统主要异常情况分析

2.1 直流电压测量异常情况分析

2.1.1 直流电压波动异常情况分析

从2007年4月开始, 天广直流输电系统极I出现类似高肇直流输电系统的直流电压异常波动现象, 电压波动并无明显规律。逆变侧广州换流站极I直流线路电压波动范围20 kV左右, 较正常值偏低, 且极控系统控制方式在定电压控制方式和定熄弧角角控制方式间频繁切换; 天生桥换流站波动范围15 kV左右, 较正常值偏高。两站触发角均有变化。

广州站极 I 和极 II 的直流电压录波图对比如图 1 所示。

04月27日22:32, 天广直流双极负荷200 MW 运行期间, 因电压波动异常使整流侧极 I 触发角降至 5°, 直流电压无法继续升高, 而逆变侧因直流线路电压测量偏低, 仍在定电压控制作用不断升高

直流电压, 最终导致直流线路电流无法维持、直流零电流保护动作, 闭锁了极 I^[4]。

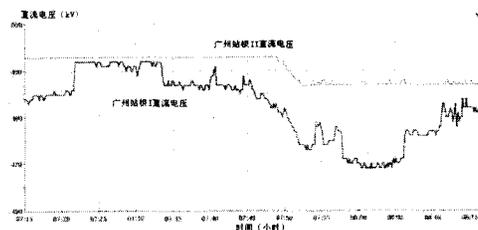


图1 广州换流站极I和极II的直流电压录波图

Fig.1 HVDC voltage of bipolar of Guangzhou converter station

经分析, 确定异常原因为逆变侧广州换流站极 I 直流线路电压分压器对应的光电传感器故障^[3], 于是在 05 月 02 日, 停电更换了广州换流站极 I 直流线路电压测量回路中的 9 只光电传感器, 之后, 电压波动异常现象基本消失。

2.1.2 直流电压测量异常情况分析

但是, 这批由德国 Siemens 公司提供的光电传感器存在较严重的质量问题, 短短 4 个月内, 陆续有 4 只出现故障, 导致对应回路的直流电压测量偏高, 测量值往往突然增大数百千伏, 电压波形如图 2 所示。

这一异常也接连导致了 06 月 20 日 11:06、14:52, 广州换流站极 I 直流滤波器保护系统 2 过负荷保护两次误动, 以及 09 月 11 日 13:50, 极 I 换流器开路保护 I 段误动, 均停运了极 I^[5]。09 月 13 日, 更换这一批光电传感器后, 再未发生类似异常。

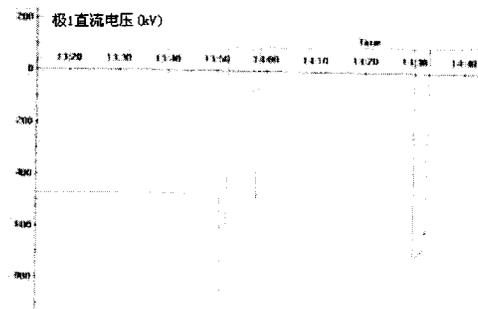


图2 广州换流站极I的直流电压录波图

Fig.2 HVDC voltage of pole I of Guangzhou converter station

2.1.3 极II直流有源滤波器保护系统2 SIMADYN D 装置重启导致电容器过负荷保护误动

12月12日, 广州换流站极II直流有源滤波器保护系统 2 SIMADYN D 装置电源故障, 造成 SIMADYN D 装置频繁重启, 10:35, 在其自动掉电重启过程中, 极II直流有源滤波器保护系统2过负荷保护误动, 停运了极 II。随即更换相应的

SIMADYN D装置电源，恢复了正常运行。

2003年06月22日18:16，天生桥换流站发生过同样的故障，并在22日~25日的在线监测和试验中发现，在SIMADYN D装置的重启过程中，对应的直流线路电压测量值可能偶然出现测量误差，从而造成保护误动。

2.2 线路故障情况分析

由于直流线路故障大多是瞬时的，所以绝大部分直流线路故障可以通过由线路主保护触发的故障重启动功能^[7,8]消除，恢复正常运行。天广直流输电工程线路故障重启动功能设定为两次，第一次为全压启动，第二次为0.8倍电压启动，这极大提高了线路故障重启动的成功几率，2007年，仅在08月11日18:40，极II直流线路故障后两次重启动不成功，导致闭锁。

但是，天广直流输电系统针对高阻接地故障的主保护线路差动保护的動作延时和后备保护動作延时配合不合理^[9]，造成02月03日15:36双极相继发生高阻接地故障、05月09日15:42极I高阻接地故障时，后备保护直流低电压或触发角过大保护先于线路差动保护動作，直接停运了相应极，失去了通过线路差动保护启动故障重启动、恢复正常运行的机会。

此外，天广直流输电系统单极大地运行方式下接地极线路故障的動作后果也是直接闭锁相应极，05月27日01:14、06月08日22:04，天广直流输电系统极I单极大地运行方式下，接地极线路故障导致接地极线路不平衡保护動作，直接闭锁了极I^[10]。

2.3 低压直流系统故障情况分析

天广直流输电系统直流场刀闸和地刀操作控制回路如图3所示，其消弧回路采用控制触点上并接压敏电阻，不符合《电力系统继电保护及自动装置反事故措施要点》有关规定；同时天广直流刀闸、地刀操作控制回路提供了双接点，但现场仅采用正极串入接点的方式，这容易发生误动。

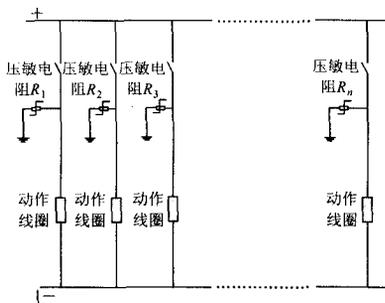


图3 天广直流刀闸、地刀操作控制回路图

Fig.3 Operation control loop of DC switch and ground switch in Tian-Guang HVDC system

此外，事后试验证明，在直流场刀闸和地刀操作控制回路中采用的型号为3225-K175-0638压敏电阻，不能承受220 V交流电压；在220 V电压下，其电阻特性不能返回，呈现低阻状态，并存在着火燃烧可能。

所以，11月03日04:17，广州换流站二次设备出现绝缘故障导致220 V交流电压串入110 V低压直流系统后，站内直流场几乎所有刀闸、地刀控制回路中的压敏电阻被击穿，造成大量设备误动；并导致极II直流保护跳闸继电器励磁，误停运了极II；而极II闭锁后，极I在单极大地回线运行方式下，随着接地极线路地刀0050017和接地极母线地刀005007的误合，引起接地极母线差动保护動作，闭锁了极I。

对此，运行单位首先组织更换了发生绝缘故障的设备和所有损坏的压敏电阻，然后在12月的停电检修期间，改进了直流场刀闸和地刀操作控制回路，将负极接点接入了操作控制回路。

3 改进建议

天广直流输电系统控制保护系统由德国SiemensE公司设计，从实际运行情况来看，基本有效保证了功率传输的准确稳定和换流站一次主设备安全运行，但是，也暴露出一些问题。

3.1 部分保护仅采用单一测量值，容易误动

天广直流输电系统中，许多保护功能的实现仅依靠监测单一的电压或电流测量值。虽然直流保护系统采用了“三取二”的出口方式^[11]，在一定程度上保证了保护动作的可靠性，但是，设置在极控系统里的后备保护如换流器开路保护I段、低电压保护等，或直流滤波器保护系统中的电容器过负荷保护等，一旦对应的测量值发生异常，将直接停运相应极。这不仅接连引起2007年06月20日、09月11日天广直流输电系统相应极的强迫停运，还造成了高肇直流输电系统2007年01月15日等一系列强迫停运故障。

针对这一问题，高肇直流输电系统对直流滤波器电容器过负荷保护进行了改进，增加了电压测量值不合理偏高时闭锁保护的功能。运行经验证明，这一改进措施可以有效避免电压测量异常引起的电容器过负荷保护误动，因此，建议在天广直流输电系统中，采取类似的改进措施。

3.2 线路差动保护与后备保护動作延时配合不合理

天广直流输电系统针对高阻接地故障的主保护线路差动保护的動作延时和后备保护動作延时配合不合理，在多次线路高阻接地故障过程中，均直接由后备保护動作停运了相应极，失去了通过线路

差动保护启动故障重启动、恢复正常运行的机会。尤其在2007年02月03日, 双极因线路高阻接地故障相继直接停运, 给系统造成了较严重的影响。

文献[9]深入分析了直流线路故障的过程及特点, 指出天广线路差动保护与后备保护配合上存在的问题, 并提出了一些改进建议, 这对天广、高肇、兴安直流线路保护的设置, 都有一定的参考价值。

3.3 接地极线路不平衡保护动作后果的改进建议

直流线路故障, 一般是以遭受雷击、污秽或树枝等环境因素所造成线路绝缘水平降低而产生的对地闪络为主, 此时如果不采取措施切除直流电流源, 则熄弧是非常困难的^[12], 将对一次设备和系统稳定运行带来极大的危害。而对于此类暂时性故障, 一旦故障清除直流输电系统可以立即恢复运行^[10]。为了既能迅速切除直流电流源、帮助熄弧, 又尽可能地避免直流输电系统不必要的停运, 对此, 极控系统中设置了由线路主保护触发的重启动功能^[8]。

但是, 在天广、高肇和兴安等由德国Siemens公司设计的直流输电系统中, 单极大地运行方式下, 接地极线路相关保护的后果均为直接闭锁运行极, 如上文所述, 2007年, 天广直流输电系统中两次在单极大地运行方式下因接地极线路遭雷击导致直接闭锁。因此, 建议接地极电流不平衡保护动作后采用自动重启逻辑, 以尽可能的避免接地极线路瞬时故障造成直流输电系统停运。这可以在一定程度上降低直流输电系统停运的概率, 对于系统的功率输送以及系统稳定有很大益处^[10]。

4 结语

天生桥—广州直流输电系统于2001年投运, 南方电网以它为系统联络线, 形成了我国第一个高压大容量交直流并联运行电力系统, 这也标志着我国高压直流输电技术上上了一个新台阶, 为之后我国直流输电的建设和发展积累了丰富的经验。

本文总结了 2007 年天广直流输电系统的运行状况, 介绍了运行中发生的典型异常情况及相应的处理情况和实施的反事故措施, 并针对部分保护功能目前仍存在的一些问题提出了针对性的改进建议, 这不仅有助于减少影响系统长期稳定运行的隐患, 还为进一步确保天广直流输电系统的安全稳定运行奠定了基础。

参考文献

[1] 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.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 朱韬析, 欧开健. 天广直流输电系统直流零电流保护动作原因分析[J]. 南方电网技术录用.
ZHU Tao-xi, OU Kai-jian. Analysis of Action of DC Zero Current Protection in Tian-Guang HVDC Transmission Project[J]. Southern Power System Technology, processing.
- [5] 朱韬析, 欧开健. 逆变侧送极控主系统直流电压测量结果影响分析(一)[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 54-57.
ZHU Tao-xi, OU Kai-jian. Analysis of the Influence on HVDC Transmission System of DC Voltage Measurements of Master Pole Control System at the Inverter Side: I [J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 54-57.
- [6] 高锡明, 张鹏, 贺智. 直流输电线路保护行为分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 96-99.
- [7] 浙江大学发电教研组直流输电电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [8] 王海军, 吕鹏飞, 曾南超, 等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启动功能研究[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 32-35.
WANG Hai-jun, Lü Peng-fei, ZENG Nan-chao, et al. Research on DC Line Fault Recovery Sequence of Guizhou-Guangdong HVDC Project[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 32-35.
- [9] 朱韬析, 欧开健. 高压直流输电线路高阻接地故障研究[J]. 南方电网技术录用.
ZHU Tao-xi, OU Kai-jian. Research on the High-impedance Ground Faults of HVDC Transmission System[J]. Southern Power System Technology, Processing.

(下转第 145 页 continued on page 145)

的仿真结果分别如图 9 和图 10 所示。

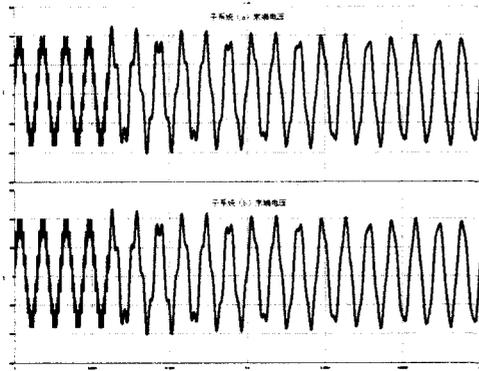


图 9 两个子系统末端电压暂态波形的比较

Fig.9 Transient voltage responses of UDC component and RTDS library component

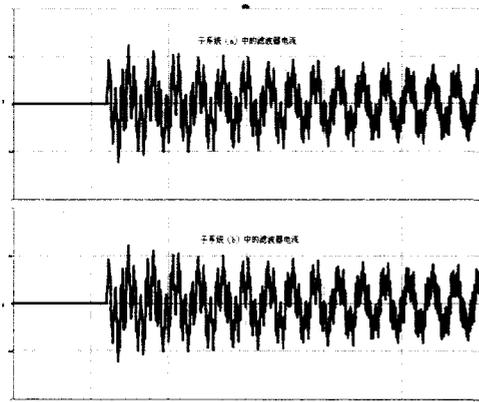


图 10 两个子系统中滤波器电流暂态波形的比较

Fig.10 Transient current responses of UDC component and RTDS library component

以上结果显示, 两个子系统中相应的变量暂态变化过程完全相同, 这证明了由 UDC 方法创建的双调谐滤波器元件模型是十分精确的。

4 结论

本文所提出的 RTDS 自定义元件 (UDC) 技术方法具有可操作性强高、所建元件模型精度高的优点。应用 UDC 技术开发元件模型不仅能够解决 RTDS 元件库中现有元件不足的问题, 还能够有效节省 RTDS 整个模型的节点数量、从而在相同硬件资源的条件下扩大仿真规模, 提高 RTDS 设备的利用效率。

参考文献

- [1] Dommel H W, Meyer W S. Computation of Electromagnetic Transients[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62: 983-993.
- [2] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄, 林集明, 曾昭华, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991.

收稿日期: 2008-11-27; 修回日期: 2009-01-15

作者简介:

徐志恒 (1971-), 男, 硕士, 高工, 从事电力系统实时数字仿真及继电保护试验研究; E-mail: xuzhiheng@sohu.com

钱路江 (1961-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统仿真技术的研究工作。

(上接第 133 页 continued from page 133)

- [10] 余江, 周红阳, 黄佳胤, 等. 接地极线路不平衡保护的相关问题研究[A]. 2007 第十一届全国保护和控制学术研讨会[C]. 2007.
- [11] 翟永昌. 高压直流输电系统直流保护配置的可靠性分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2 (2): 13-16. ZHAI Yong-chang. Analysis of the Protection Credibility in HVDC Transmission System[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2 (2): 13-16.
- [12] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

出版社, 2004.

收稿日期: 2008-11-10

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

汲 广 (1976-), 男, 工程师, 目前从事直流输电管理工作;

毛海鹏 (1978-), 男, 工程师, 目前从事直流输电技术管理工作。