

# ±500 kV 天广直流系统 2002 年运行分析

王先开<sup>1</sup>, 韩伟强<sup>1</sup>, 林志波<sup>1</sup>, 聂书群<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司, 广东 广州 510620; 2. 广东南电物资有限公司, 广东 广州 510630)

摘要: 总结了 ±500 kV 天广直流系统 2002 年全年的运行情况, 对直流双极在其第一个完整自然年中的运行可靠性指标进行了全面的分析, 还特别指出了目前天广直流存在的不足和薄弱环节, 并提出了相应的改进措施。

关键词: 天广直流; 运行; 计划停运; 强迫停运

中图分类号: TM721.1 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2004)24-0058-05

## 0 概况

±500 kV 天广直流系统西起广西天生桥马窝换流站, 东至广东广州换流站, 双极额定容量为 1 800 MW, 额定工作电压为 ±500 kV, 额定工作电流为 1800 A, 线路长度为 960 km。±500 kV 天广直流工程极 1 于 2000 年 12 月 26 日投入运行, 极 2 于 2001 年 6 月 26 日投入运行。该工程的投产与先期建成的 500 kV 天广交流输电系统并联运行, 形成中国第一个超高压、大容量、远距离的交直流输电并联运行的电力系统<sup>[1, 2]</sup>。

2002 年是天广直流系统双极运行的第一个完整的自然年, 这一年天广直流运行总体安全可靠, 圆满完成了迎峰度夏、十六大保电等重大任务。作为西电东送的重要通道之一, 为南方电网带来了很大的安全效益和经济效益, 有力的支援了广东省的经济建设。

天广直流 2002 年全年基本上都在大负荷方式下运行, 总体运行情况良好, 主设备性能稳定, 控制与保护及辅助系统比较可靠, 全年送电 83.179 亿 kWh(送端)。在此期间遇到了不少新问题, 同时也积累了相当多的经验。

## 1 天广直流运行指标及简要分析

### 1.1 直流输送电量情况

2002 年天广直流输送电量见表 1。

表 1 2002 年天广直流输送电量

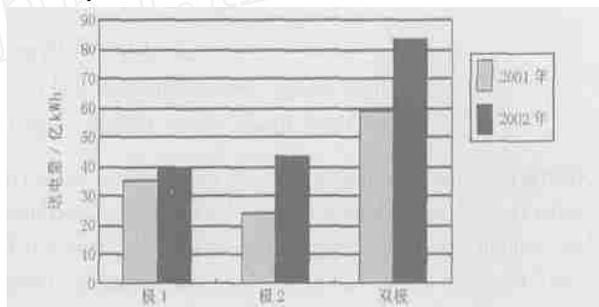
Tab. 1 Total transmission energy of Tian Guang HVDC transmission system in 2002

	电量情况/亿 kWh		电量损耗率 / (%)
	马窝站	广州站	
极一	40.03	37.53	6.26
极二	43.15	40.36	6.45
合计	83.18	77.90	6.36

电量分析: 与 2001 年全年输送电量 59.18 亿 kWh 相比, 增加了 40.55%, 占 2002 年全年西电送广东的 159.7 亿 kWh 的 48.77%, 带来了良好的经济效益。2001 年、2002 年电量比较如表 2。

表 2 2001 年、2002 年天广直流输送电量比较

Tab. 2 Comparison of transmission energy of Tian Guang system between 2001 and 2002 (Units:100 MWh)



### 1.2 直流系统主要可靠性指标

根据中国电力可靠性管理中心现行的《直流输电系统可靠性统计评价办法》(暂行), 对 2001 年全年和 2002 年天广直流系统的运行可靠性指标情况(如表 3)进行统计和分析如下。

2002 年一季度, 天广直流利用电网年初低负荷期对设备进行了全面的定检、预试、清扫和消缺处理工作, 包括直流线路全线调爬、控制与保护系统升级、阀组水冷系统及辅助系统改进等, 同时, 在预试过程中, 广州侧极 1 换流变 A 相因发现设备缺陷进行处理, 极 1 计划停运长达 43 天, 对能量可用率指标影响较大。

天广直流 2002 年的单极闭锁次数与 2001 年相比大大减少, 非计划能量不可用率也从 0.43% 降低至 0.16%, 能量可用率虽较 2001 年同期低, 但因 2001 年直流系统刚刚投运, 未进行年度检修, 此方面影响的可用率应在 4% 以上。与国内外 500 kV 以上直流输电系统运行初期的可靠性指标<sup>[4, 5]</sup>相比, 这些指标都

不低。这些运行可靠性指标说明,2002 年天广直流输电系统总体运行情况良好,而且从设备制造、系统调试到运行维护等各方面工作均较好。

## 2 天广直流停运情况

### 2.1 强迫停运情况分析

2002 年天广直流系统共发生单极强迫停运 10 次,其中极 1 停运 2 次,极 2 停运 8 次,双极强迫停运 1 次,分析详见表 4。2001 年运行期间共发生单极强迫停运 21 次,其中极 1 停运 13 次,极 2 停运 8 次,双极闭锁 1 次。2002 年直流故障停运的原因主要有以下几个方面,详见表 5。

1) 直流线路故障,共计 3 次,其中极 1 为 1 次,极 2 为 2 次。

2) 直流光电流互感器的缺陷,也达 3 次,直流

分流器存在较严重的缺陷,内部传输电缆在参数和接头设计上都有待进一步改进。

3) 辅助系统、消防系统和阀冷系统各引起强迫停运 1 次。

4) 因极控系统存在设计缺陷和换流变保护 KBCH130 误动各 1 次,其中换流变保护 KBCH130 误动引起双极停运。

5) 人为责任还引起 1 次单极停运。

### 2.2 计划停运情况

2002 年是天广直流双极全面接受运行考验的一年。一方面,在经受运行考验后陆续暴露出来的问题需进行改进处理,另一方面在调试启动过程中遗留的问题也需要处理,加之运行经验不足以及技术掌握方面的差距,造成直流系统多次计划停运和临时应急停运(目前统称为计划停运)。

表 3 天广直流主要可靠性指标<sup>[3]</sup>

Tab. 3 Reliability of Tiannan Guang HVDC transmission system

时间	能量可用率/ %	双极运行率/ %	计划能量不可用率/ %	非计划能量不可用率/ %	能量利用率/ %	单极闭锁次数	双极闭锁次数
2001 年	93.06	91.99	6.51	0.43	44.74	21	1
2002 年	89.98	84.46	9.86	0.16	52.89	10	1

表 4 2002 年天广直流典型闭锁事件分析

Tab. 4 Analysis of the typical block of Tiannan Guang HVDC system in 2002

序号	发生极、发生时间	闭锁前功率/ MW	停运时间/ min	闭锁情况简析
1	极 1 月 15 日 06:28	双极 400	210	线路污闪造成闭锁,广州侧测距为 19 km,经登杆检查未发现闪络点。
2	极 4 月 4 日 08:46	双极 1 400	65	天生桥侧现场施工人员的车辆将户外消防栓底部撞裂,消防水外泄,母管水压下降,换流变 A 相消防喷水压力逆止阀失灵,消防水压力释放继电器动作,导致直流闭锁,安自装置动作切天一 # 4 机组。
3	双极 4 月 4 日 21:25	双极 1 400	92	220 kV 罗马线马侧出口 C 相接地故障,导致马侧两极的换流变 KBCH140 差动保护误动,直流双极闭锁,安自装置动作切天一 # 2、# 3、# 4 机组和天二 # 6 机组,同时解列 220 kV 罗马线、鲁马线。
4	极 14 月 17 日 22:22	双极 1 300	100	雷击极 1 直流线路,造成直流极一停电。
5	极 6 月 13 日 14:29	双极 1 700	73	广州站极 2 出现换相失败时,引起马窝站交流电压偏低,天侧阀冷却水循环水泵电源掉电,备用未能切换,造成阀冷水温过高保护动作而闭锁,安自装置动作切天一 # 1 机组。
6	极 7 月 5 日 09:37	双极 1 800	55	广州站在将备用直流滤波器 022LB 投入极 2 过程中,在合高压侧刀闸时,因光电流互感器内测量用同轴电缆与一次导电排有接触现象,IdE2 电流瞬间跃变增大到 100 A 左右,极 2 直流 3 套中性母线差动保护 87LV、直流后备差动保护 87DCB 动作。
7	极 8 月 17 日 13:37	极 900	68	在极 2 由 MR 转为 GR 的过程中,由于两站配合操作顺序错误,造成极 2 电流由广站金属接地开关 0040 分流,电流约 1 600 A,超过保护定值 90 A,造成金属回路故障保护动作。
8	极 9 月 14 日 03:44	双极 600	239	马窝侧二次回路电缆(光电流互感器引出电缆)接头松动。
9	极 10 月 20 日 18:42	双极 1 200	74	雷击极 2 直流线路,故障测距为距广州站 238.34 km 处。
10	极 10 月 31 日 07:54	双极 1 300	246	马窝侧中性母线电流互感器测量电流偏移引起(初步判断为二次端子松动)。
11	极 11 月 26 日 23:30	双极 210	294	西门子极控软件中阀冷控制部分误将运行的阀冷主泵切除,导致阀冷保护出口跳闸。

表5 2002年天广直流强迫停运事件原因分类

Tab.5 Causes classification of forced outage of Tiarr Guang HVDC system in 2002

	线路故障	控制、保护	阀冷系统、辅助系统	直流光电流互感器	人员责任
极	1	0	1	0	0
极	2	1	1	3	1
双极	0	1	0	0	0

2002年单极计划停运31次,双极计划停运6次,总共37次,2001年单极计划停运为35次。全年中双极停运进行线路调爬工作和广州换流站极停电更换A相换流变这两项工作造成的停电时间较长,停电时间分别为374.52h和652.6h,大大影响了天广直流系统今年的可靠性指标。造成计划停运

表6 天广直流停运部件原因分类

Tab.6 Causes classification of outage equipment of Tiarr Guang HVDC system in 2002

部件原因	单极		双极		能量不可用率 / %
	停运次数	停运时间/h	停运次数	停运时间/h	
交流及其辅助设备	9	81.43	0	0	0.46
换流站					
阀	2	12.7	0	0	0.07
控制及保护设备	4	25.19	0	0	0.14
直流一次设备	14	740.93	2	10.63	4.35
其它	4	75.28	3	8.68	0.53
小计	33	935.53	5	19.31	5.56
直流线路	5	15.66	1	374.52	4.36
外部交流系统	3	15.51	1	1.53	0.11
合计/ %	41	966.7	7	395.36	10.02

### 3 天广直流运行分析

天广直流双极经调试、试运行结束到2002年底正式投产运行一年半来,总体运行情况良好,特别是2002年的运行更趋于稳定,主要设备经受住了考验,特别是可控硅换流阀、平波电抗器、直流断路器、直流滤波器 etc 主设备基本运行可靠,但国产电容器、直流光电流互感器、阀冷水系统等辅助系统都有不同程度的缺陷,给天广直流系统的运行造成了一定的影响。2002年还出现了一次直流双极闭锁,对电网造成了较大的冲击。

#### 1) 2002年“4.4”双极闭锁

2002年4月4日21时25分,直流双极在运行功率1400MW下发生双极闭锁,安全自动装置可靠动作,切除天生桥一级电厂全部运行机组(3台)、天生桥二级电厂1台机组并解列220kV罗马线,系统频率最低降至49.33Hz。经分析,直流双极闭锁原因为:220kV罗马线马侧出口C相发生永久接地故障时,天生桥换流站的#1、#2换流变的KBCH130差动保护(阿尔斯通公司)误动所致。该

事件的主要原因如下:

- 1) 天广直流进行年度大修,包括两端站内设备预试、定检、清扫等和直流线路全线调爬等工作;
- 2) 换流变压器设备的更换、检查等相关工作;
- 3) 广州站极一交流侧馈线电流互感器故障处理;
- 4) 阀厅阀冷系统冷却水管漏水处理;
- 5) 直流光电流互感器的处理;
- 6) 控制保护系统消缺,特别是控制保护软件的更新升级。

#### 2.3 2002年天广直流停运情况统计和分析

根据停运的部件,天广直流停运可分类如下,见表6。

保护误动的原因是西门子公司在KBCH130差动保护的参数上设置有误,设置时未能将换流变三侧零序电流设置为同时过滤,当交流侧发生不平衡故障时,保护会误动出口。经试验验证后,两侧修改了相关参数。

#### 2) 主设备运行基本可靠

换流阀、平波电抗器、直流断路器、直流滤波器等主设备基本运行可靠。但广州换流站极1A相换流变有如下异常:2002年年度计划停电检修期间,发现原极1A相换流变(出厂编号408327)2.1套管升高座处漏油(SIEMENS技术人员拆卸检查发现该套管根部油气隔离法兰损坏),随后用备用换流变(出厂编号408325)将其更换;在对更换后的换流变做试验时发现高压侧1.1套管介损为0.78%,更换该套管后试验正常,3月11日1时20分此换流变投入运行。投入运行后第四天取油样做色谱分析,发现该换流变乙炔的含量为27.2 $\mu\text{L/L}$ ,超过了导则规定的注意值5.0 $\mu\text{L/L}$ 。综合判断认为:有载分接开关箱体渗漏引起换流变本体绝缘油色谱分析结果异常。检修后继续追踪分析,根据几次试验结

果发现乙炔含量不存在明显增长趋势,并且慢慢由 12.2  $\mu\text{l/L}$  降至 2.85  $\mu\text{l/L}$  左右。

另外,天生桥站极 2 换流变压器有载调压开关从 7 月 20 日开始,动作次数异常增加(如极 1 为 62 次,极 2 则高达 216 次)。通过分析,将极 2 换流变抽头控制方式由角度模式改为电压 ( $U_{di0}$ ) 控制方式。经分接头控制模式试验表明,采取电压 ( $U_{di0}$ ) 控制方式后,抽头调节次数明显降低。采用何种控制模式运行,仍有待分析观察。

### 3) 国产并联电容器

马窝、广州换流站中有 8 组并联电容器,其高压电容器由西安电容器厂生产。自天广直流投运至 2002 年年底,广州换流站国产电容器共损坏 29 台,其中 2001 年损坏 22 台;马窝换流站国产电容器共损坏 23 台,主要现象为电容器壁身破裂、电容器鼓肚、接头过热、套管头断裂以及套管锡封熔化漏油。对国产滤波电容器损坏机理进行了分析、研究,初步得出了国产电容器损坏原因: 电容器热稳定容量不足; 电容器额定电压选取偏低,电压裕度较小; 电容器内熔丝分散性导致内熔丝群爆; 电容器制造工艺不高。根据国内专家研究意见,对广州站内国产滤波电容器组进行了以下改造: 将 2 组 ACF 电容器组由 24 个串联段增加到 25 个串联段,以增加电场裕度; 在 2 组 ACF 的电抗器两端并联电容器阻尼装置以限制投切时的涌流; 剩余 1 组 ACF 不作改动。

自 2002 年 9 月 16 日改造工程完工后,在近半年时间内国产电容器仅损坏 1 只,较改造前损坏率大大降低。改造效果仍有待长期观察。

### 4) 混合光学测量系统

天广直流输电系统中使用的混合光学测量系统总体上运行比较稳定可靠,未出现测量精度差或抗干扰能力差等原因影响直流系统的运行,但存在光纤通道故障及检测不到电流等情况,其中 9 月 14 日,马窝站直流 IdE2 光电流互感器异常引起极 2 紧急停运,经检查发现是分线箱至电子箱段光纤损坏,应为电阻箱内温度较高引起光纤老化损坏;直流分压器内部传输电缆和接头设计存在缺陷,容易松动。2003 年初停电检修时进行了相应消缺。

### 5) 阀内冷水系统

阀内冷水系统第一层内冷水管多次出现漏水缺陷。2002 年仅广州换流站就有 4 根内冷水管漏水造成非计划停运。漏水原因主要是: 西门子设计的 S 型阀内冷塑料水管的均压电极由一固定的不锈

钢金属杆连接,在长期运行过程中,由于水管晃动,导致金属杆上的接头拉裂,导致水管漏水。

经过 2002、2003 年直流系统计划检修中的两次改造,将双极阀内冷第一层共 24 根水管全部更换为重新设计的水管,主要是在水管上加装了一个固定环,将不锈钢金属杆固定在水管上改为紧固在固定环上,同时将固定连接改为柔性连接,进一步减轻了运行过程中水管接头部位承受的拉力。具体改造的效果有待进一步观察。

6) 其它辅助系统也存在一定问题,如全站的空调系统,包括阀厅空调系统和控制楼空调系统运行都极不稳定,经常出现故障;消防系统运行也不稳定,MINIMAX 火灾报警系统启动直流系统跳闸的出口两站都已解开;阀冷却系统部分问题也较多,特别是广州站发生换相失败时引起马窝站交流电压偏低,导致阀外冷循环水泵电源掉电,但其备用泵却不能自动切换,阀内冷水温度高导致直流闭锁。目前西门子并未解决其根本问题。

7) 广州站极 2 极控系统 1 和系统 2 在 2002 年出现触发脉冲丢失或触发脉冲不等间距造成极 2 直流系统换相失败 9 次。经与西门子专家多次的讨论分析后,初步认为是极控系统存在软件故障,需进一步的分析和试验。

8) 天广直流线路进行了全线调爬。直流输电设备具有易积污的特点,从实际运行情况看,天广直流线路绝缘子的积污速度和严重程度比预想严重,运行短短一年内,就发生了数起线路绝缘故障。因此设计、施工、基建等几方面经共同协商,在 2002 年 2 月上旬对天广直流线路绝缘子进行全线调爬,在原来 30 多片绝缘子水平上增加 2~3 片,部分污秽严重区段改用合成绝缘子。调爬后,2002 年直流线路未再发生绝缘停运事件,确实提高了直流线路的防污闪能力。

## 4 结论

2002 年天广直流输电系统总体运行情况良好,主设备性能稳定,控制与保护及辅助系统比较可靠,全年基本上都在大负荷方式下运行,极大的保障了广东地区的用电需求,为南方电网带来了很大的安全效益和经济效益。随着运行经验的不断积累和对直流运行机理的不断认识,天广直流系统的运行可靠性将会进一步提高。

### 参考文献:

- [1] PENG Bao-shu, RAO Hong, et al. Design and Realization of

- Tianr Guang HVDC Project [A]. Proceedings of International Conference on Power System (CIGRE ICPS2001). 2001. 25-329.
- [2] 荆勇,任震,谌军,等(JING Yong, REN Zhen, CHEN Jun, et al). 天广交直流并联系统运行稳定性的研究(Study on Operation Stability for Tianr Guang AC/DC Hybrid System) [J]. 中国电力(Electric Power), 2002, 35(1):46-49.
- [3] Working Group 04 of CIGRÉ Study Committee 14. Protocol for Reporting the Operational Performance of HVDC Transmission Systems[R]. 1997.
- [4] Christofersen DJ, Vancers I, et al. A Survey of the Reliability of HVDC Systems throughout the World during 1997-1998 [A]. CIGRE. 2000. 14-102.
- [5] Erisson K, Graham J, et al. Itaipu HVDC Transmission Operation Experiences [A]. Proceedings of 1994 International Conference on Power System Technology. Beijing: 1994. 731-741.

收稿日期: 2004-05-17; 修回日期: 2004-07-26

作者简介:

王先开(1978-), 工程硕士, 从事直流输电、交直流系统混合运行等方面的研究; E-mail: wangxk@spsc.com.cn

韩伟强(1962-), 高级工程师, 从事交直流系统混合运行管理、继电保护等方面的研究;

林志波(1973-), 工程硕士, 从事直流输电、继电保护等方面的研究。

### Operation analysis of $\pm 500$ kV Tianr Guang HVDC system in 2002

WANG Xian-kai<sup>1</sup>, HAN Wei-qiang<sup>1</sup>, LIN Zhi-bo<sup>1</sup>, NIE Shu-qun<sup>2</sup>

(1. EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510620, China;

2. Guangdong Nandian Power Equipment Company, Co., Ltd, Guangzhou 510630, China)

**Abstract:** This paper introduces the operation performance of Tianr Guang HVDC transmission system in 2002, and analyses its bipolar operation according to the operation reliability. It also points out the shortcomings of Tianr Guang HVDC system, and proposes some relevant suggestions.

**Key words:** Tianr Guang; HVDC; operation; planned outage; forced outage

## 辽宁许继 66 kV 变电站自动化系统通过辽宁省电力有限公司评审

10月31日,辽宁许继66kV变电站自动化系统评审会在辽宁许继电气有限公司召开。辽宁省电力公司副总经理赵自力等领导和辽宁省电力公司所属13家供电公司变电运行工作负责人、专责工程师,省公司调度通信部、农电部、供应部有关负责同志共计30多人参加了评审会,评审会由生产部副主任李春和主持。

会议对许继电气股份有限公司和辽宁许继电气有限公司研制开发的CBZ-8000变电站自动化系统进行了评审。CBZ-8000变电站自动化系统66kV产品系列是在分析、借鉴了许继集团公司CBZ-8000变电站自动化系统在国内33座220kV变电站成功运行经验的基础上,针对66kV变电站的需求而开发的集保护、测控、通信和管理功能于一体的66kV变电站自动化系统。

该系统可完成66kV变电站系统的实时信息监视、保护信息管理、历史信息管理、故障录波、电能管理、备用电源自投、GPS标准对时等功能,为变电站系统的运行管理和故障分析提供了充分的资源。该系统采用分层分布的系统结构,并可与第三方设备进行通信,从而实现了智能化的管理,该系统具有很好的通用性和可扩展性,可通过通信接口与调度中心实现数据共享。

这套系统首先在辽阳供电公司兴隆台66kV变电所投入运行,经运行测试,当地监控系统运行稳定、可靠,能够正确反映变电站系统的各种运行参数、数据,实时监视变电站内的各个开关的运行状态及其变化情况,及时准确的记录变电站系统的各种事故、故障及继电保护的動作情况,并经受住了雷雨、大风等恶劣天气的影响。在试运行期间,继电保护设备及自动化系统在系统冲击、空投过程中运行稳定,各项功能正常。

与会的评审组成员和变电运行专工到辽阳供电公司兴隆台变电所对CBZ-8000变电站自动化系统进行了产品运行情况的实地检查与测试,返沈后又认真听取了辽宁许继研发人员对产品的型式试验情况介绍,辽阳兴隆台变电所所做的关于产品试运行及测试情况的报告,经过设计阐述、委员提问、释疑答辩等多个环节,评审组对CBZ-8000系统进行了认真而审慎的论证和讨论,一致同意通过评审。

省电力公司赵自力副总经理在评审会上对该系统的研制开发提出了建设性意见,他要求生产厂家能够从辽宁电网运行管理的实际需要出发,加强该产品的可操作性和实用性研究,使该产品更加适合辽宁电网66kV变电站的运行要求。他希望许继集团和辽宁许继能够继续扩大合作,增强研发和生产能力,为辽宁电网的建设与发展提供必要的技术支持。辽宁许继电气有限公司总经理鄢德凯对评审组的工作表示感谢,并做了表态发言。