

# 发展中的中国高压直流输电事业

何智江

(中国长江三峡工程开发总公司, 湖北 宜昌 443000)

Developing of HVDC Transmission Projects in China

HE Zhi-jiang

(China Three Gorges Project Corporation, Yichang 443000, China)

摘要: 回顾了国内外高压直流输电的发展概况;介绍了中国高压直流输电系统运行简况;简要叙述了 $\pm 500$  kV高压直流工程的国产化工作和特高压直流工程的进展和前景,并提出了一些个人意见。

关键词: 高压直流输电; 发展

中图分类号: TM723

文献标识码: A

Abstract: In this paper, a review of HVDC transmission developments in domestic and abroad is given. The operation status of HVDC transmissions system in China is introduced, and a brief discussion about local manufacture for the  $\pm 500$  kV transmission equipment and about the progress and prospect of UHVDC projects is presented.

Key words: HVDC transmission; development

## 0 引言

伴随着国民经济的稳步快速发展,我国的电力工业和高压直流(HVDC)输电走上了快车道。回顾我国高压直流输电事业的发展历程,它的起步和发展与我国大型水电和大型火电的开发、大区联网工程特别是三峡工程的建设有着不可分割的联系。党中央、国务院关于重点发展水电、加强电网建设、扩大西电东送范围、实现电力资源优化配置的方针政策,直接促进和推动着中国特高压直流输电(UHVDC)的研究和建设。

## 1 高压直流输电的发展概况

1954年,世界上第1个基于汞弧阀的高压直流输电系统在瑞典投入商业运行。随着电力系统的需要和电力电子技术的发展,高压直流输电技术取得了快速发展;1969年,基于可控硅阀的新一代HVDC

输电系统在加拿大伊尔河(Eel River)流域的背靠背直流工程中使用;1979年,第1个基于微处理器控制技术的高压直流输电系统投入运行;1984年,巴西Itaipu建造了电压等级最高( $\pm 600$  kV)的高压直流输电工程。高压直流输电技术日臻完善,使得高压直流输电工程在世界范围内获得日益广泛的应用,目前主要用于远距离大功率输电、大区联网和系统间非同步联络以及海底和地下电缆送电等。

根据初步统计,截至2003年,国外已经投产的高压直流输电系统有70个,输电容量达到53281 MW,直流输电线路/电缆19399 km,其中背靠背工程有28个。代表性的工程有:巴西依泰普直流工程,额定电压 $\pm 600$  kV,额定容量 $2 \times 150$  MW,输电线路796 km(一回1986年,一回1987年);扎伊尔INGA-SHABA工程,输电线路1700 km, $\pm 500$  kV,560 MW(1982年);印度CHANDRAPUR-RAMAGUNDUM等3个背靠背直流工程,额定电压 $2 \times 205$  kV,额定容量1000 MW(分别为1997年,1998年和2002年);魁北克-新英格兰多端(五端)直流工程,额定电压 $\pm 450$  kV,额定容量2250 MW,输电线路1507 km(分别为1986年/1990年/1992年);英法海峡工程,两回海底电缆72 km,输送容量2000 MW/ $\pm 70$  kV(1986年)<sup>[1]</sup>。

我国高压直流输电工程起步较晚,但发展迅速。舟山直流输电工程是1980年国家确定全部靠自己力量建设的中国第一项直流输电工程,它具有向自主建设大型直流输电工程过渡的工业性试验性质。工程第一期为单极金属回线方式, $-100$  kV,500 A,50 MW,线路全长54 km。舟山直流项目于1984年开始施工,1987年投入试运行,1989年正式投运。工程最终规模为 $\pm 100$  kV,500 A,100 MW;岷泗直流输电工程(上海-岷泗岛)是我国自行设计、制造、建设的

收稿日期: 2006-09-18

作者简介: 何智江(1943-),男,广州市人,教授级高级工程师,长期从事大型水利枢纽和水电站机电设计、工程技术管理工作。

双极海底电缆直流工程, 工程为双极  $\pm 50$  kV, 600 A, 60 MW; 可双向供电, 线路长度 66.2 km, 其中海底电缆 59.7 km。工程的主要特点是受端为弱交流系统, 并含有相当大的宝钢马迹山码头的动态冲击负荷, 从而使工程的控制保护系统和受端无功补偿方式在技术上需要特殊的考虑。嵊泗直流于 1996 年完成研究工作, 2002 年全部建成。葛南(葛洲坝-上海南桥)高压直流输电系统是我国引进的第一个高压直流输电工程, 1989 年单极、1990 年双极投运。进入 21 世纪, 中国的高压直流输电发展迅速, 相继建成投产了天广(天生桥-广州)、三常(三峡-常州)、三广(三峡-广东)和贵广(贵州-广东)等多项高压直流输电项目。作为引进技术的验证, 自主研发设计制造的华中-西北联网灵宝背靠背直流工程 2005 年 7 月投入商业运行。国内已投运的高压直流输电项目见表 1。

表 1 国内高压直流输电工程基本情况

直流输电工程	送电容量/MW	单/双极	额定电压/kV	额定电流/A	输电线路/电缆长/km	投运时间(单极/双极)
舟山	50	单	-100	500	54(海缆)	1987
葛南	1200	双	$\pm 500$	1200	1045	1989/1990
嵊泗	60	双	$\pm 50$	600	66(海缆)	2002
天广	1800	双	$\pm 500$	1800	960	2001
三常	3000	双	$\pm 500$	3000	860	2003
三广	3000	双	$\pm 500$	3000	975	2004
贵广	3000	双	$\pm 500$	3000	980	2004
灵宝	360	-	120	1500	0	2005
合计	12470	-	-	-	4940	

至 2004 年末, 我国高压直流输电工程累计输送容量达 12 470 MW, 输电线路长度累计达 4 840 km, 已经超过美国位列世界第一。正在建设的高压直流输电项目有三沪(2006 年末投运)、贵广二回及高岭背靠背工程等。国内外拥有高压直流输电工程较多的国家有中国、美国、巴西、加拿大、印度、日本和瑞典等国, 见表 2。

表 2 高压直流输电系统较多的国家直流工程概况(至 2004 年末)

国家	HVDC 工程数量	最高直流电压/kV	累计输电容量/MW	累计线路/电缆长度/km
中国	8	$\pm 500$	12470	4940
美国	14	$\pm 500$	9240	3636
巴西	5	$\pm 600$	8554	1592
加拿大	8	$\pm 500$	8494	3404
印度	8	$\pm 500$	7900	2949
日本	7	$\pm 250$	3560	269
瑞典	8	-285/+450	2692	1342

## 2 中国高压直流输电系统运行简况

### 2.1 葛南高压直流输电工程

葛南直流是我国第一项远距离高压直流输电工

程, 1990 年双极投运后长期处于低负荷运行状态。2000 年后能量利用率逐年上升, 2004 年送电量达到 63.45 亿 kWh, 运行可靠性指标逐年提高, 但单极和双极停运次数较多, 仍未达到令人满意的水平。2004 年南瑞公司对葛南直流换流站的控制保护系统进行了全面改造, 2005 年葛南直流运行情况显著改善, 输送电量 67.5 亿 kWh(送电侧), 强迫能量不可用率从 2004 年的 0.481%降低到 0.07%。

### 2.2 天广高压直流输电工程

天广直流 2001 ~ 2004 年运行可靠性指标见表 3<sup>[2]</sup>。天广直流总体上看, 主要电气设备运行基本稳定, 近两年未发生过双极强迫停运事故, 但控制及保护系统、换流器等设备的检查、消缺等造成系统停运次数较多(单极计划停运次数近年来都超过 30 次, 年平均计划停运时间超过 600 h), 加上近两年南方电网西电东送通道增多, 使天广直流输送电量有所下降。

表 3 天广直流 2001 ~ 2004 年运行可靠性指标

指标名称	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年
能量可用率/%	94.64	89.97	93.66	89.23
能量利用率/%	48.73	52.87	46.99	31.8
强迫能量不可用率/%	0.38	0.16	0.17	4.68
系统总输送电量(亿 kWh)	58.18	83.37	74.1	50.28

### 2.3 三常、三广高压直流输电工程

三常直流是三峡工程左岸电站首批机组投产电力外送的关键项目, 是我国第 1 条输送容量达到 3 000 MW 的高压直流输电工程, 引进 ABB 和 SIEMENS 技术。自 2003 年 6 月 16 日三常直流双极投运以来, 运行情况良好, 没有发生过重大设备事故和重大生产安全事故, 每逢三峡丰水季节, 三常直流长期满载运行。截至 2006 年 8 月 31 日, 已送电 618 亿 kWh(送电侧)。

三广直流 2004 年 6 月 1 日正式投运, 引进 ABB 技术。三广直流吸收了三常直流的经验, 对控制保护系统进行了软件和硬件升级, 运行可靠性有所提高。截至 2006 年 8 月 31 日, 已送电 425 亿 kWh(送电侧)。

三常和三广直流工程中的个别运行可靠性指标达到了世界先进水平。2005 年三常和三广直流的强迫能量不可用率分别达到 0.18%和 0.07%, 在国际上已投运的近 80 项直流工程中排名第 6 位和第 4 位; 三常和三广直流的能量利用率分别达到 77.41%和 69.7%, 该项指标已进入世界领先行列。

三常和三广直流工程遗留的主要问题是: 换流站控制保护系统死机、可听噪声超标等。2004 年两系统共发生死机 180 次, 2005 年有所改善, 但仍发生死机共 34 起, 其中 2004 年 11 月 20 日由于站用电控制保护系统主机死机, 导致常州政平站双极闭

锁,三常直流系统中断送电3 000 MW,造成严重后果。此外,板卡故障时有发生,应从控制保护系统总体设计、硬件配置、极控制保护系统等方面查清原因,采取综合措施加以改进。三常、三广直流工程投运后,宜昌龙泉站、常州政平站和荆州江陵站均发现可听噪声超标,干扰站外居民生活。政平站对主要噪声源换流变、平波电抗器、交流滤波器等采取了加隔声屏,滤波电抗器加隔声罩等措施;龙泉、江陵站采取了搬迁居民的方式。线路走廊附近居民电磁干扰和可听噪声的情况也有发生。噪声超标问题事后处置有一定的难度,因此,后来建设的三沪直流工程吸取教训,采取了相应措施。

### 3 ±500 kV 高压直流工程的国产化

葛南直流工程建设时,±500 kV 高压直流国产化已经做了一些工作,但成效并不理想。从天广直流工程建设开始,特别是三峡高压直流输电工程在规划设计、设备研发制造过程中,始终贯彻国产化的方针。三常直流国产化率约占30%,三广直流国产化率约占50%。正在建设的三沪直流工程确定了“以我为主、联合设计、合作生产、外方保证”的国产化方针,做了如下一些工作,使国产化率基本达到70%:

(1) 直流系统设计、设备成套:由外方总负责,中方全面参与;

(2) 直流控制与保护:外方总负责,中方参与联合设计(站控系统软件以中方为主),并负责硬件成套制造、出厂试验及现场调试、售后服务;

(3) 换流阀及水冷设备、晶闸管元件:外方负责,联合设计,自主采购。换流阀中方分包50%,晶闸管元件中方供货70%;

(4) 换流变及平波电抗器联合设计,中方自主采购材料,分包50%;

(5) 常规交流设备由中方采购国内供货;

(6) 关键设备监造:意大利CESI公司总负责,网联直流咨询公司全面参与。

目前,换流站设备国产化还存在一些问题,如三沪直流宜都站和华新站的500 kV GIS,断路器(含CT)全部由ABB供货,国内沈高厂和西开厂只供母线、隔离开关等次要部件,占合同价不足40%。三峡右岸电站500 kV GIS也有类似的情况。

高压直流工程的国产化工作离不开政府政策引导,设计、制造部门的努力,建设、运营单位的支持。现在这3个条件都已具备,是全面落实国产化工作的好时机。

## 4 特高压直流输电工程

### 4.1 特高压直流输电工程启动的契机

中国是世界上水电能源大国,中国的水电资源

在西南,仅四川、云南两省的水电可开发容量近200 GW。按照我国能源开发战略,近期将重点开发西南水电,采用特高压直流将电能输送到沿海经济发达地区。位于四川、云南接壤的金沙江下游溪洛渡、向家坝、白鹤滩和乌东德4个大型水电站,总装机容量达39 600 MW,一期工程开发2个电站,溪洛渡2005年底已正式开工,向家坝将在2006年正式动工兴建,两站的装机容量合计18 600 MW,首批机组发电时间分别为2012年和2013年,所发电量主送华中、华东,送电距离约1 000~2 000 km(部分电能是否送南方电网待定)。

溪洛渡、向家坝两电站电能输送方式最初论证可供选择的方案有:①直流±620 kV,3 800 MW 5回;②±800 kV,4 800 MW 4回;③±800 kV,6 400 MW 3回;④特高压交流1 100 kV送出等,最终决定采用方案③。该方案的优点是出线少,为后继开发的西部水电送出预留出十分宝贵的线路走廊资源,可节省资金70多亿元。

国家发改委已经批准了南方电网公司结合小湾水电站送出建设云南楚雄至广州穗东±800 kV,5 000 MW 直流输电国产化试验示范工程。

### 4.2 特高压直流输电备受关注的几个问题

时至今日,我国建设特高压直流输电工程可谓尘埃落定。今后除了加紧研究大量关键技术问题,抓紧重要装备研发之外,仍有一些备受关注的问题。

(1) 电磁环境和生态影响。国内外对超高压交流输电的电磁环境和生态影响都做了长期、广范的跟踪研究,目前评价特高压直流工程的电磁环境和生态影响基本上沿用以往在超高压输电工程中适用的指标。值得注意的是,特高压直流线路和换流站要比高压直流工程的额定电压更高,单回线路走廊更宽,换流站设备更复杂,且因其电磁场、离子流、可听噪声和无线电干扰等具有的特殊性,使换流站出现可听噪声超标问题,更应引起重视。随着生活水平的提高,人们对环境和生态要求的期望值也会越来越高。因此,是否需要站在更高的角度,对经济发达地区的电磁环境标准重新审视和评价,值得商讨。

(2) 换流站设备研制。就特高压直流输电线路来说,导线地线、铁塔、金具、绝缘子等设备已经具备国内供货的能力,如720 mm<sup>2</sup>导线、大吨位悬式绝缘子已经批量生产并大量使用;多分裂导线金具的设计制造能力可满足特高压直流工程需要;我国已经设计建造世界第一高达346.5 m的江阴交流大跨越铁塔。不少专家认为,±800 kV 特高压直流工程建设的关键是换流站设备。国家电网公司和南方电网公司会同中国机械联合会组织有关科研、设计单位,大专院校和设备制造企业,做了大量前期调研和课题攻关,积极开展中外交流,加快引进关键技术。特高压

直流换流变压器、换流阀、6英寸晶闸管、干式平抗、长套管和支柱绝缘子、直流隔离开关、控制保护系统等各类设备的研发工作已全面展开。

(3) 国产化与设备质量。到目前为止,世界上还没有已经建成并按  $\pm 800$  kV 长期运行的特高压直流输电工程,国外特高压直流研究成果并没有实际应用。因此,我国建设特高压直流工程,只能走也必须走自主开发研制为主的设备国产化道路。我国有交流高压设备制造所积累的人才、技术和经验,有引进高压直流技术分包制造的业绩,这是对国产化有利的一面;但我们面临着特高压直流工程研发制造周期短(云广工程2009年投运、向家坝-上海工程2011年投运)、输送容量大(单回5000~6400 MW)、建设项目多(近期5~6回,远期10~15回)、高压直流设备设计制造经验少等诸多困难。必须强化企业管理,加强质量监管,确保设备制造质量。

## 5 结语

中国已经成为世界上高压直流输电强国。已建

成投运的三常、三广、天广、贵广和葛南高压直流输电系统运行可靠性指标逐年提高,输送电量稳步上升,确保了三峡电站、红水河水电和贵州火电电力外送,优化了电力资源配置,有利于环境保护。

中国将成为世界上特高压直流输电强国。未来15年内,我国将陆续建设一批  $\pm 500$  kV 高压直流工程,背靠背直流联网工程和跨海直流电缆输电工程;新建一批  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程。不可否认,我国的高压直流输电事业与国际先进水平还有一定差距,只要我们认真总结经验,立足自主创新,加强国际合作,中国的高压直流输电事业将会迎来一个丰收的季节。

## 参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 刘振亚. 特高压直流输电技术 研究成果专辑(2005年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

## 简讯

### 王季梅教授获真空放电与绝缘领域国际 Dyke Award 奖

2006年9月25日~29日在日本举办的第22届国际真空放电与绝缘会议上,西安交通大学电气工程学院王季梅教授荣获国际真空放电与绝缘领域的杰出贡献奖-Dyke Award 奖。

Dyke Award 奖于1988年设立,以真空绝缘领域做出突出贡献的 Walter P Dyke 的名字来命名。该奖的授予由国际真空放电与绝缘会议的常设国际科技委员会来决定,每次会议颁发给一名在国际范围内认可的对真空放电和绝缘领域做出杰出贡献的学者。至今已有9名国际著名专家获此殊荣,王季梅教授是第10名获奖者,也是第1位获得该国际大奖的中国人。

国际真空放电与绝缘会议于1964年在美国创立,每两年在世界各地召开。该会议是国际上唯一专门研讨真空放电与绝缘方面的会议,在该学术领域具有很高的学术声誉。2000年第19届国际真空放电与绝缘会议曾在我国西安举行。今年的会议在日本的松江市举办,吸引了全世界240余名学者参会,我国有来自西安交通大学、大连理工大学、上海交通大学、沈阳工业大学、北京科技大学和西安斯瑞公司的17名代表参加会议。我国大连理工大学的邹积岩教授和西安交通大学的贾申利教授为该会议的“常设国际科技委员会”委员。我国代表在会议中有较为出色的表现。西安交通大学王季梅教授作了 Dyke Award 奖获奖报告,题为“我在中国的真空电弧研究生涯”;西安交通大学贾申利教授担任“真空电弧物理”分会主席,并作了题为“纵向磁场作用下真空电弧的实验研究和仿真综述”的特邀报告;大连理工大学邹积岩教授作了题为“用真空断路器可控开断并联电容器组”的口头报告;大连理工大学廖敏夫博士作了题为“单断口和三断口串联真空灭弧室绝缘强度及其统计规律”的口头报告。该大会还专门设立了两个讨论组-“高电压真空开关讨论组”和“平板显示器讨论组”。在“高电压真空开关讨论组”,有来自日本、德国、法国等国家的多位专家学者做了专题发言,西安交通大学的刘志远博士作了题为“高电压真空断路器在中国的发展”的专题报告。国际真空放电与绝缘会议由 IEEE 的 DEIS 技术分会协办,每次从会议论文中选出一部分优秀论文在 IEEE Transactions on Plasma Science 和 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 的专刊上发表。

下一届国际真空放电与绝缘会议(第23届)将于2008年在欧洲的罗马尼亚举行。欢迎我国有关高等院校、西安高压电器研究所、中国电力科学研究院、上海电器科学研究所等科研院所和真空开关制造企业、真空灭弧室制造企业、触头材料制造企业等相关企业前往参加会议,进一步扩大我国真空开关产业的国际影响。

(刘志远)