

2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述

舒印彪, 刘泽洪, 袁 骏, 陈葛松, 高理迎

(国家电网公司 特高压办公室, 北京市 西城区 100031)

A Survey on Demonstration of UHV Power Transmission by State Grid Corporation of China in the Year of 2005

SHU Yin-biao, LIU Ze-hong, YUAN Jun, CHEN Ge-song, GAO Li-ying

(UHV Office of State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: At the end of 2004, State Grid Corporation of China (SGCC) put forward the strategic objective of developing UHV power transmission. Here, the demonstration process of developing UHV power transmission in China by SGCC since 2005 and the significance and necessity of carrying out such demonstration, the selection of demonstration project for UHV AC power transmission and the demonstration process of UHV DC power transmission from Xiluodu and Xiangjiaba hydropower stations in Jinsha River valley, as well as the research results on the key technologies of UHV power transmission, for instance the selection of voltage class for UHV power transmission, environment protection, AC over-voltage, etc., are presented. Above-mentioned substances show that the research and demonstration processes are scientific and democratic, the results of research and demonstration are reasonable and reliable, and these results can give strong and vigorous supports for the construction of domestic UHV power transmission.

KEY WORDS: Ultra high voltage power transmission; Research and demonstration; Test and pilot project; Overvoltage and insulation coordination

摘要: 2004 年底, 国家电网公司提出了发展特高压输电的战略目标。介绍了 2005 年以来, 国家电网公司发展特高压输电的论证经过以及开展特高压输电论证研究的重要性和必要性, 交流特高压输电试验示范工程选择和金沙江送出方案的论证过程, 以及运行电压选择、环境保护、过电压及绝缘等特高压关键技术的研究结论。说明了特高压输电的论证过程是科学、民主的, 论证成果是科学、可靠的, 为我国发展特高压输电提供了坚强的技术支撑。

关键词: 特高压输电; 论证; 试验示范工程; 过电压与绝缘配合

1 引言

国家电网公司开展特高压输电论证既是一个

科学、缜密的论证过程, 也是一个民主决策的过程, 和以科学发展观为指导, 推动电力和电工制造业自主创新、实施跨越式发展, 支撑经济社会持续协调发展的重大创举。

2004 年底, 国家电网公司认真分析了我国电力工业和电网发展的现状及未来的发展趋势, 提出了加快建设以特高压电网为核心的坚强国家电网的战略目标。1 年多来, 国家电网公司坚持科学、民主决策的原则, 按照“科学论证、示范先行、自主创新、扎实推进”的指导方针稳步开展特高压研究工作, 采取“企业推动、广泛参与”的方针, 充分发挥自身优势和专家智囊团的作用, 依靠社会各方力量全面开展特高压研究工作。

国家电网公司建立了重大技术问题由专家院士顾问组审核把关的机制, 并向国内外特高压领域的专家和机构请教, 广泛听取社会各界的意见和建议, 积极委托中国工程院、国务院发展研究中心、中国国际工程咨询公司等权威机构就发展特高压的重大战略问题进行咨询论证。依靠各界力量, 充分发挥各方优势, 组织阵容强大的攻关队伍。中国机械工业联合会、中国电力工程顾问集团公司、电工设备制造厂家等单位纷纷抽调骨干组成了多个研究攻关小组, 覆盖了科研、设计、设备制造等主要环节。

在借鉴国外经验的基础上, 仅用一年的时间就完成了国外多年的研究工作, 取得了丰硕的技术成果, 且在一些关键技术领域达到国际先进水平。

2 特高压输电研究的重要性和必要性

在我国发展特高压是一项极具挑战性的工作。为建设特高压网架, 必须进行大量认真细致的研究

工作, 搞清搞透特高压输电的关键技术问题。对于特高压这一全新的电压等级, 必须坚持研究工作先行, 通过试验验证研究结果, 根据试验结果反复修正的原则, 努力做到在一两年内获得对特高压电网的物理特性和运行特点深刻了解和准确把握, 同时在特高压交流试验示范工程建设过程中应用科研成果, 积累经验。

社会的发展需要开展特高压研究工作。目前我国已形成具有中国特色的电网网架结构。虽然美国、日本、前苏联、意大利和加拿大相继开展了特高压的研究工作, 前苏联和日本还建成了线路, 最终由于经济发展速度降低而未能实现特高压电网的完全商业化运行。我国的经济近年来快速发展, 带来了电力需求的快速增长, 极大地促进了特高压输电技术在我国的应用和发展。我国的能源分布极不平衡, 需要从能源大量集中的西部将电力送往东部的负荷中心, 特高压交直流输电技术是长距离大容量送电的最佳选择。特高压交直流研究作为我国的特高压远距离输电提供坚强的技术支撑^[1-10]。

技术的进步需要开展特高压研究工作。目前我国 500 kV 超高压电网网架已经形成, 750 kV 超高压输变电示范工程也已顺利建成并投产^[11]。在电网建设和运行方面, 也积累了大量的经验, 每年的事故率逐步降低, 应该说我国的电网建设和运行水平已达到了国际先进水平。1000 kV 特高压电网的建设为我国的电力科研、设计、建设、运行工作者提供了新的机遇和挑战, 相信通过科研工作者的努力, 我国的电力工业水平会达到一个新的高度。

设备制造业的进步需要加快特高压研究工作。多年来, 在“装备制造国产化”目标的指引下, 经过三峡送出等重点工程的实践, 我国电工制造业的技术实力、工艺水平、生产能力和管理水平有了很大提升, 有能力制造出优良的输变电设备。大力发展特高压输电技术研究、建设以特高压网架为骨干的国家电网对于国内输电设备制造企业来说, 是千载难逢的发展机遇, 同时也是一次重大的技术、工艺水平的检阅。实现特高压设备的国产化, 有利于国内电工制造业实现技术水平的跨越式发展, 提升技术创新能力, 占领技术制高点, 形成核心竞争力, 提高现有输变电产品的设计与制造水平, 有利于我国电网的持续健康发展, 意义重大。

3 特高压输电论证经过

3.1 建立论证的组织保障体系

2004 年 12 月 27 日国家电网公司成立了以公司党组书记、总经理刘振亚同志为组长的特高压电网工程领导小组, 对国家电网规划和特高压工程建设进行统一领导, 对特高压工程重大问题进行决策。2005 年 1 月 11 日成立了由 9 名院士和 4 名资深专家组成的顾问小组, 对特高压的重大问题和关键技术进行咨询。2005 年 9 月 1 日, 抽调科研、设计和工程建设等部门的骨干组建了特高压办公室, 具体负责特高压电网工程的建设实施。公司所属中国电力科学研究院、武汉高压研究所、国电自动化研究院、国网动力经济研究中心和国电电力建设研究所等科研单位均成立特高压关键技术攻关小组, 积极开展特高压研究和论证工作。中国机械工业联合会、中国电力工程顾问集团公司、电工设备制造厂家等单位, 纷纷抽调骨干组成了多个研究攻关小组。

通过全面动员, 形成了产学研相结合、社会各界共同参与特高压研究的良好局面, 聚集了国内大批优秀专家学者和工程设计人员。据不完全统计, 2000 多人直接参与和承担了特高压电网的研究咨询工作。其中, 院士 30 多人, 教授及教授级高级工程师 300 多人, 高级工程师及博士 800 多人, 工程师、在校研究生及其他人员超过 1000 人。此外, 还有很多老专家、老领导以不同的方式参与和支持特高压研究工作。

3.2 建立论证的咨询机制

建立论证的咨询机制。①重大技术问题由专家院士顾问组审核把关; ②组织开展广泛的技术交流, 向国内外特高压领域的专家和机构请教, 广泛听取社会各界的意见和建议; ③积极委托中国工程院、国务院发展研究中心、中国国际工程咨询公司等权威机构就发展特高压的重大战略问题进行咨询论证; ④充分借鉴日本、俄罗斯的经验, 在一些关键技术问题上开展对日和对俄咨询。

积极开展重大战略问题咨询工作。2005 年 7 月国家电网公司委托中国工程院就发展特高压的一些重大问题进行咨询。中国工程院非常重视, 成立了由 32 位院士及 11 名相关专家参加的“特高压”咨询课题组, 围绕“特高压输电技术的必要性”、“特高压输电技术的创新意义及可行性”和“特高压试验示范工程”开展了一系列的咨询研究。经过严密论证, 形成了《关于我国特高压输电研究与工

程建设的咨询意见》^[12],明确指出,特高压输电技术在我国有重要的工程应用前景,应该加快特高压输电研究和工程应用的步伐。国务院发展研究中心完成了《中国能源输送方式研究》^[13],提出输电与输煤并举,优先发展输电的方针,建议形成以特高压电网输电和铁路大通道输煤为支撑,相互补充、分工合理的能源输送方式,实现输煤与输电的良性互动,提出了加快发展特高压输电的建议。

积极开展国际技术交流。先后组团8次赴日本、俄罗斯、印度等国考察特高压系统设计、设备制造和试验基地,开展技术交流,充分借鉴国际经验。2005年国家电网公司先后组织开展了9次大规模的技术交流活动,邀请瑞典ABB、德国SIEMENS、法国Areva、荷兰KEMA以及日本东京电力、东芝、三菱、AE Power、NGK等国际厂商和咨询机构进行了专题研讨。美国、德国、瑞士、意大利、日本、南非、俄罗斯、乌克兰等国的知名专家都参加了技术交流活动。

积极开展对日咨询工作。2005年10月26日,国家电网公司与日本东京电力公司和电力中央研究院签订了特高压咨询合同,就无功补偿配置、过电压及其保护、高抗配置方案、防雷及避雷器配置、电磁环境及生态保护、外绝缘及污秽试验、杆塔设计及荷载、导线防舞动等关键技术问题进行咨询。双方还分别成立了中日咨询线路联合工作组和变电站联合工作组。

3.3 制订特高压关键技术研究框架

2005年初,根据“组织落实,智力、技术落实,资金落实”三落实精神,在充分吸取各方建议和意见的基础上,国家电网公司分别编制了《1000kV级交流输电系统关键技术研究框架》^[14]和《±800kV级直流输电系统关键技术研究框架》^[15],系统提出了特高压关键技术研究总体规划。公司先后下达特高压关键技术研究课题84项,其中特高压交流研究课题46项,特高压直流研究课题38项。

截至目前,共有13项课题通过评审,其余多数课题的科研进度超前,大部分特高压交流研究课题已初步完成。2005年,在满足特高压工程可研、设计的基础上,研究确定了1000kV交流系统和±800kV直流系统标准电压,并上报国家电压标准委员会;提出了1000kV交流输电线路和±800kV直流输电线路的电磁环境标准,并通过国家环保局组织的审查;完成交流特高压主设备规范的制定,为设备研制争取了时间;完成了交流特高压主接线

型式和相关技术问题研究等。

4 特高压电网的规划论证

4.1 论证工作

从2004年11月起,国家电网公司就开始滚动规划特高压电网,包括特高压骨干网架规划、同步电网构建方案和电压序列论证,组织中国电力工程顾问集团公司及所属6大电力设计院、中国电力科学研究院和国网动力经济研究中心深入开展研究、反复优化,先后组织召开了20多次较大规模的审查和研讨会,参加人数超过1000人次。

根据交、直流特高压电网的技术特点,首先明确了特高压电网的功能定位。特高压交流定位于更高一级电压等级的网架建设和跨大区联网送电,特高压直流定位于西部大水电基地和大煤电基地的超远距离、超大容量外送。在此基础上,根据我国资源分布和用电负荷增长的特点,预测了电力流向和规模,提出特高压电网的构建方案。

4.2 特高压骨干网架的规划论证

以晋陕蒙宁新煤炭基地开发为契机,在华北与华中电网率先建设贯通南北的1000kV交流通道,并逐步将华中、华北和华东构筑成为联系紧密的同步电网。西北电网建设覆盖陕甘宁青新的750kV交流骨干网架,与特高压交流所在电网通过直流实现异步联网;东北电网通过直流背靠背与华北电网异步互联;西南水电基地主要通过特高压直流向华东、华中送电。到2020年前后,全国将形成华北—华中—华东、西北、东北、南方4个主要的同步电网,特高压及跨区电网输送功率超过200GW,大电网在资源优化配置方面的优势将得到充分发挥^[5]。

依据《电力系统安全稳定导则》^[16],利用国际先进的电力系统仿真分析软件,对规划电网进行深入细致的安全稳定研究。为确保数字仿真的准确性,还利用亚洲规模最大、技术领先的模拟中心进行仿真实验。研究表明,国家电网公司所推荐的特高压电网规划方案完全符合安全稳定导则的要求;保证了电网的安全可靠性和结构合理性^[2];安全稳定水平高,经济性能优越;对应于2020年目标网架及负荷水平,并考虑与东北、西北的联网效益,在统一安排检修的情况下,可减少装机20GW,减少弃水电量6TWh。

4.3 特高压交流试验示范工程方案比选论证^[17]

尽快建设试验示范工程是发展特高压输电的重要步骤。为落实首批特高压交、直流工程方案,国

国家电网公司委托中国工程院、中国电力工程顾问集团公司、中国电力科学研究院、国网动力经济研究中心、北京网联直流输电系统工程有限公司等单位就交流特高压试验示范工程方案和金沙江一期直流特高压送出工程方案进行优化比选,先后召开 50 多次规模较大的专题讨论会,形成了最终的推荐方案。

根据中国工程院对试验示范工程的功能定位,国家电网公司严格按照“自主创新、标准统一、规模适中、安全可靠”的原则,深入开展试验示范工程方案比选工作,在前期规划的基础上提出了 3 个具有代表性的方案:即晋东南—荆门、淮南—上海、乐山—重庆工程,分别代表网对网的南北互供、点对点网的皖(火)电东送、网内的西(水)电东送三种输电类型。从电网长远发展角度来看,这 3 个项目均有必要建设,但考虑试验示范工程的工期、设备供货等各方面的特殊性,晋东南—荆门特高压输电方案更合理,主要体现在:

(1) 系统条件合理,安全可靠。通过大网组织电源可以解决试验电源及建设初期送电电源问题,不需要为试验示范工程建设新的电源,不影响现有的电源规划,大大降低了电网和电源投资的关联风险;在两大网之间送电,由于不存在电磁环网问题,可有效避免因重载线路跳闸产生大功率转移引起雪崩效果,不影响现有电网的安全运行;试验条件优越,能够方便地实现大功率、大电流和全电压试验;晋东南和荆门两侧系统坚强,特高压输电线路发生故障时两侧系统安全有保障,两侧电网内部故障时,全网和特高压线路均能安全稳定运行。

(2) 工程规模具有典型性,考核全面。晋东南—荆门特高压工程包括 2 座变电站和 1 座开关站,线路全长 654 km,变电容量 2×3 GVA。该规模在我国未来特高压长距离送电工程中具有代表性,能够充分反映特高压输电系统的基本特征及其在我国的发展特点,有利于全面考核设备性能,符合中国工程院“全面严格试验验证方案”的建议,可为后续工程起到直接的示范作用。

(3) 工程建设条件优越,易于实施。该工程水、陆运输条件较好,大件运输有保证;气象条件适中,无酷寒和严重覆冰情形;线路走廊拆迁相对较少;海拔高度较低,有利于解决特高压设备外绝缘问题;有利于促进设备国产化。

(4) 工程建设投资回收有保障。根据工程投运不同阶段输送容量和年运行小时数,按照不同电价计算方法计算结果,在经营期内本工程引起的输

送电量平均加价低于湖北、山西两地新建火电机组核准的上网电价之差,可以保证投资的回收。

(5) 工程潜在效益显著,发展前景广阔。晋东南—荆门处于南北能源互供的主通道上,联接华北和华中两大电网,能够将山西丰富的煤炭资源转化为电能输送到华中缺能地区,在丰水期还能够将华中富余的水电输送到以火电为主的华北电网,充分发挥水火互济、调峰、错峰,使得联网系统的水火电源比例更加合理,系统调节性能更佳。通过联网,可以减少系统装机备用容量,就建设初期的华北和华中电网而言,由此可减少装机约 1000 MW,相当于节省投资 40 多亿元。

晋东南—荆门百万伏级工程作为特高压试验示范工程是较为理想的方案,得到了各方的认同。

4.4 溪洛渡、向家坝水电送出方案优化论证^[18]

金沙江下游 4 个水电站总装机容量达 38 GW,其中一期工程包括溪洛渡和向家坝 2 个梯级水电站,总装机容量达 18.6 GW,距离负荷中心 1 000~2 000 km,必须采用具备长距离、大容量送电能力的输电方式。

目前,溪洛渡电站已正式开工,向家坝电站也将于 2006 年内开工,加快电站送出方案的研究与落实关系到国家“西电东送”战略的实施。1996 年以来,对金沙江下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝 4 个水电站水电送出方案进行了统一的滚动规划研究。在预测电力市场,确定水电的主要输送方向为华东(输送 55%~60%)和华中(输送 40%~45%)的前提下,论证采用:①纯直流输电方案;②纯交流输电方案,采用 1000 kV 级特高压交流送电;③交直流混合方案,华东方向采用直流输电,华中方向采用交流输电或交直流混合输电。有关单位对 40 多种可能的组合方案进行了全面比选研究,最终证明纯直流方案经济性较好,方案清晰,过渡方便,运行模式简单,对受端电网的影响小,不存在严重危及系统安全的技术问题。6 回 ± 800 kV、6400 MW 直流方案在所有参与比选的方案中,输变电工程投资最少、年费用最低,具有明显优势。

同时,针对溪洛渡、向家坝水电 18.6 GW 的外送方案也进行了反复的比选和论证工作。具体有 3 种直流输电方案:① 5 回 ± 620 kV、3800 MW;② 4 回 ± 800 kV、4800 MW;③ 3 回 ± 800 kV、6400 MW,最终推荐一期工程采用 3 回 ± 800 kV、6400 MW 特高压直流方案,其中 1 回送电华中,2 回送电华东。该推荐方案不仅大量节约输电走廊资源,节省工程

投资,而且送、受端系统坚强,电网安全有保障。通过论证,该方案也得到了多方认可。2005年12月22日,国家发展改革委在发改能源[2005]2730号文中明确提出:(金沙江一期电站送出)输电方案初定采用3回 ± 800 kV、6400 MW的直流输电方案。

4.5 特高压工程的经济性分析^[18-19]

1000 kV交流输电方案的单位输送容量投资约为500 kV交流输电的73%,节省走廊面积超过50%。 ± 800 kV直流输电方案的单位输送容量投资约为 ± 500 kV直流输电方案的72%,节省线路走廊面积达25%。以金沙江下游溪洛渡、向家坝、乌东德和白鹤滩水电站送出工程为例,与采用620 kV、3800 MW和 ± 800 kV、4800 MW直流方案相比,采用 ± 800 kV、6400 MW直流方案可将直流线路分别从10回和8回减少到6回,节省综合投资均超过150亿元,节省走廊占地超过200 km²。

5 设备供应和国产化论证

5.1 论证工作

发展特高压,设备是关键。设备国产化和自主创新是特高压输电工程健康发展的必要保障,是试验示范工程建设的重要目标。国家电网公司一直将设备问题作为发展特高压的核心问题,会同中国机械工业联合会,组织厂商与科研、设计单位开展了大量工作。对特高压设备进行了系统、深入的调查研究与专题技术交流,掌握了特高压设备的供货能力,编写了《特高压输变电设备国产化调研报告》^[20],明确了试验示范工程及金沙江直流送出工程设备的国产化实施方案。结合我国特高压工程建设的需要,积极促成国内外厂家合作,为实现关键设备国产化供货创造条件。

5.2 设备供货能力调研

2005年3月,国家电网公司和中国机械工业联合会联合组织30多位院士和国内资深专家,对国内12个主要输变电设备制造厂家进行了大规模调研,全面考察了国内现有生产条件、试验条件、技术水平、设备研发能力和国内外技术合作情况,掌握了特高压设备的供货能力。2005年4月20日,国家电网公司在北京主持召开了特高压输变电设备国产化调研报告的研讨会。根据与会领导和专家提出的意见,分别修编《特高压设备国产化调研报告》^[20]和《特高压电网工程设备供货和国产化意见》^[21]。

2005年8月26日至27日,国家电网公司组织考察了西安电力电子研究所、西安电力机械制造公

司和西安交通大学。听取了关于现有5"晶闸管元件供货情况、优化设计可行性及其方案的介绍,6"晶闸管元件研发技术可行性分析、6"晶闸管生产计划和工期安排,以及与ABB、SIEMENS公司谈判进展情况的汇报。重点调研了开关设备研制、变压器和电抗器生产能力、高压电器研究所特高压开关试验能力等内容。重点考察了5"晶闸管管芯和封装测试生产线、变压器生产车间、高压设备试验大厅、开关总装车间,以及电力设备电气绝缘国家重点实验室等。通过实地考察进一步明确了特高压主设备国产化在技术上的可行性。目前,6"晶闸管的研制进展顺利,特高压主设备研发正在稳步推进。

5.3 确定特高压设备国产化原则

对特高压输电设备确定了以下原则:

(1) 坚持以我自主的国产化之路。近年来,随着电网装备水平的不断提高,相关设备制造企业的技术水平和国产化能力也不断提升,我国设备制造业已基本具备发展特高压的能力。目前,500 kV输变电设备已实现了国产化,并基本具备生产 ± 500 kV直流主设备和直流控制保护设备的能力,常规直流工程具备自主设计、自主建设的能力。西北750 kV输变电示范工程于2005年投产并安全稳定运行,通过750 kV输变电设备制造技术的引进和消化吸收,国内电工设备制造厂对变压器、电抗器等主要特高压输变电设备均具有研制和供货能力。变压器和高抗出厂试验一次通过,显示了我国在输变电设备制造方面较强的自主研发和创新能力,为特高压设备研发和制造打下了良好基础。特高压设备研发和供货要牢牢掌握以自我创新为主的原则。

(2) 勇于创新,研制适合中国国情的设备,获得自我知识产权。特高压技术和装备的研发和应用是一项具有挑战性的课题。国外研究和试验成果为我国发展特高压技术和装备提供了有益的借鉴,在我国特高压电网发展的起步阶段,需要也必须积极借鉴国际上已有的成果和经验,通过学习和引进技术,逐步消化吸收,努力增强自主开发能力,促进国产化水平的提高。

(3) 本着实事求是的精神,针对不同的设备,根据不同的基础区别对待。如变压器、电抗器、导线、金具等,均具有研制和供货能力,直接采用国产化供货。对部分设备,如百万伏级的特高压套管、全封闭式组合电器(GIS)等的基础相对较差,尚需引进国外关键设备和技术,逐步推进国产化。我国目前已经基本具备生产 ± 500 kV直流主设备、直流控

制保护的能力, 经过努力能够做到第一回 $\pm 800\text{kV}$ 级直流的绝大部分设备由国内提供, 包括: 低端换流变、控制保护设备、直流线路、接地极、交流开关场设备、交直流滤波器元件、绝缘子、金具以及所有辅助设备和材料等。

对于换流阀、高端换流变压器、平波电抗器等关键设备, 由于与 $\pm 500\text{kV}$ 直流技术相比变化较大, 初期需要采用“技贸结合、引进技术、联合研制、产权共享、国内生产”的方针供货。

(4) 制定长远的国产化计划, 分步实现特高压直流设备全面国产化。通过三常、三广和三沪工程引进技术, 消化吸收, 锻炼队伍, 我国已完全具备实现超高压直流工程全面国产化的能力, 采用自主设计, 设备完全国产的灵宝背靠背直流工程已顺利投产并稳定运行; 目前正在进行前期工作的几回超高压直流工程将全部采用灵宝模式建设。第一回特高压直流工程的系统研究、成套设计和直流控制保护可以采用国内多做工作, 由经验更丰富的跨国公司技术负责。控制保护设备国内制造, 自己编制软件。可以用少量市场换取国外关键技术, 缩短全面国产化的时间, 加速进程, 保证第一回特高压直流工程的工期和质量。从第二回 $\pm 800\text{kV}$ 级直流工程开始, 要基本实现设备的国产化, 第三回要实现全面国产化。

5.4 设备技术规范书编制

2005 年 6 月 3 日至 4 日, 国家电网公司在北京组织召开了交流特高压试验示范工程技术条件书初稿审查会议。国内科研、设计、制造、试验单位和高等院校的 150 多位专家参加了会议, 对晋东南—南阳—荆门 1000kV 交流特高压试验示范工程的变压器、电抗器、断路器、隔离开关、避雷器、电流互感器、电压互感器等设备的技术条件进行了审查, 推荐了该工程设备的短路电流水平和绝缘水平, 对变压器参数配置及其调压方式、高压电抗器参数配置、断路器额定参数和合闸电阻取值、避雷器参数配合提出了明确意见。

2005 年 6 月 18 日, 特高压交流主设备技术条件书(第一版)^[22]正式发布, 为设备研制工作指明了方向。在此基础上, 委托西安交通大学会同荷兰 KEMA 公司等单位全面总结国际特高压交流与 750kV 交流的设备规范与标准, 编制特高压交流设备试验规范, 结合厂家设备概念设计结果, 修订了

设备技术条件书。10 月 19 日至 20 日, 组织国内 120 多位专家对特高压交流设备技术规范书与试验规范进行了全面审查。根据评审意见对规范书进行修订后, 通过组织设计单位老专家修订和专家函审的方式, 形成了设备采购的技术标书。

6 关键技术的论证

6.1 论证工作

发展特高压电网是一项极具创新性的系统工程, 必须依靠高水平的科研攻关为支撑。国家电网公司科研力量雄厚。公司所属中国电力科学研究院、武汉高压研究所、国电自动化研究院、国电电力建设研究所等单位, 技术水平高, 在电力科研的相关领域均处于国内领先地位, 有些方面还达到国际领先水平。

围绕特高压电网建设, 国家电网公司在总结国内外研究成果的基础上, 先后下达了关键技术研究课题 80 多项, 覆盖特高压交流和特高压直流输电的各个关键环节, 投入科研资金超过亿元。国家电网公司所属的各科研机构、中国电力工程顾问集团公司和国内多所知名大学参与了特高压关键技术的研究。通过各方努力, 在电压标准选择、电磁环境影响、过电压及绝缘配合、潜供电流限制、无功电压控制、线路和变电站设计、防雷技术等关键技术研究方面取得了重大突破。

6.2 电压等级的选择^[23]

中国电力科学研究院会同国内规划、科研、设备等方面的专家, 综合考虑电网安全、经济性能、设备研制能力、海拔高度和污秽情况等多种因素, 提出了我国特高压电压标准的初步建议。2005 年 4 月 12 日, 经中国电机工程学会、中国机械工业联合会、中国电力工程顾问集团公司讨论, 明确了我国交流特高压额定电压为 1000kV , 设备最高运行电压为 1100kV , 直流特高压额定电压为 $\pm 800\text{kV}$ 。

6.3 电磁环境和对区域生态环境的影响^[24-26]

国家电网公司对电磁环境问题高度重视, 提出了建设环境友好型输电工程的目标, 请国内外权威机构开展了深入研究, 确立了保持交流特高压的电磁环境等影响指标限值与我国 500kV 输电工程水平相当、特高压直流的电磁环境等影响指标限值与我国 $\pm 500\text{kV}$ 输电工程水平相当的原则。特高压输电工程电磁环境的控制指标限值及工程环境影响评价报告已通过国家环保总局组织的审查。所确立的环

境指标控制限值既能满足环保要求,又能以适当的造价在工程中实现。研究结论如下:

(1) 只要设计合理,可使特高压输电工程的工频电场、工频磁场、合成场强、离子流强度和可听噪声水平与超高压输电工程的相当。

(2) 提出我国特高压输电线路的工频电场、工频磁场、合成场强、离子流强度和可听噪声的推荐限值。建议 1000 kV 级交流输电线路的工频电场和工频磁场的限值与我国 500 kV 交流输电线路的相同;可听噪声限值满足我国噪声标准要求。具体限值详见表 1 和表 2。

表 1 特高压交流架空输电线路的电磁环境暂行控制指标

Tab.1 Temporary indexes of electric and magnetic environment of UHV AC overhead transmission lines

电磁环境影响因子	确认控制指标
工频电场	临近居民住房控制指标为 4 kV/m; 线路跨越公路处为 7 kV/m; 其他地区为 10 kV/m。
工频磁场	0.1 mT (同 500 kV 标准)。
无线电干扰	线路边相投影外 20 m 处不超过 55 dB μ V/m (0.5 MHz, 好天气)。
可听噪声	距线路边相投影外 20 m 处的可听噪声的限制值为 55 dB(A), 临近居民住房执行国家标准《城市区域环境噪声标准》(GB 3096-1993)。

表 2 特高压直流架空输电线路的电磁环境暂行控制指标

Tab.2 Temporary indexes of electric and magnetic environment of UHV DC overhead transmission lines

电磁环境影响因子	确认控制指标
合成场强	30 kV/m 作为直流输电线路下方地面最大合成场强控制指标; 25 kV/m 作为临近居民住房的地面最大合成场强强度, 同时满足 80% 测量不超过 15 kV/m 为控制指标。
离子流密度	100 nA/m ² 。
直流磁场	10 mT。
无线电干扰	距极导线投影外 20 m 处不超过 55 dB μ V/m (0.5 MHz, 好天气); 海拔大于 2000 m 时, 可以按照 61 dB μ V/m 作为控制指标。
可听噪声	距当地功能区划的声环境标准执行, 无功能区划的地区按《城市区域环境噪声标准》(GB 3096-1993) 的相关规定评价。

(3) 工频电场、工频磁场、合成场强、离子流强度和可听噪声对人和某些动物有确定的有害影响的阈值远高于输电线路下的限值; 特高压输电线路电磁环境有关量所取限值不会对人和动物造成有害影响。特高压输电线路工频电场和合成场强不会对线下农作物、植物和树木的生长带来不利影响。特高压输电线路对动物的迁徙、活动不会带来不利影响。在输送相同功率的条件下, 与采用超高压输电相比, 采用特高压输电占用土地少, 对生态环境的影响面小。

6.4 过电压^[27-29]

由于目前尚无中国特高压过电压的标准, 对 1 000 kV 试验示范工程晋南荆线内过电压进行了详细研究, 反复计算, 并吸取他国的经验, 决定采用下列过电压允许水平, 作为进一步研究的参考和依据: ①工频过电压, 限制在 1.3 pu 以下, 在个别情况下线路侧可短时(持续时间 ≤ 0.1 s)允许在 1.4 pu 以下; ②相对地统计操作过电压(出现概率为 2% 的操作过电压), 对于变电站、开关站设备应限制在 1.6 pu 以下, 对于长线路的线路杆塔部分限制在 1.7 pu 以下; ③相间统计操作过电压, 对于变电站、开关站设备应限制在 2.6 pu 以下, 对于长线路的线路杆塔部分限制在 2.8 pu 以下。

(1) 高抗配置。晋南荆线的高抗配置方案如表 3 所示。

表 3 晋南荆线的高抗配置方案

Tab.3 Configuration scheme of high voltage shunt reactor of UHV AC pilot transmission projects

位置	晋南线		南荆线	
	晋东南	南阳	南阳	荆门
高抗容量/Mvar	960	720	720	600

(2) 无论是母线侧还是线路侧的金属氧化物避雷器(MOA)的额定电压均选为 828 kV。

(3) 晋南荆线利用并联电抗器中性点小电抗可将最大潜供电流限制在 9 A, 最大恢复电压梯度限制在 7.6 kV/m。单相重合闸无电流间歇时间可限制在 1 s 左右。不需要装设高速接地开关。具体数据如表 4 所示。

表 4 晋南荆线特高压交流线路潜供电流及恢复电压

Tab.4 The secondary current and recovery voltage of UHV AC pilot transmission lines

运行方式		潜供电流/A		恢复电压/kV		小电抗最高电压/kV
		送端	受端	送端	受端	
晋东南单机	晋东南—南阳	3.0	0.3	13.1	1.2	87.5
	南阳—荆门	1.0	0.6	9.9	6.2	81.8
晋东南4台机	晋东南—南阳	8.5	2.6	37.4	11.8	91.6
	南阳—荆门	2.4	1.5	24.9	15.3	79.4

(4) 由于起主要作用的是合空载线路过电压, 断路器合闸电阻可选为 400~600 Ω 。

(5) 对于晋南荆线交流特高压试验示范工程, 接地故障过电压不高, 单相接地故障过电压最大为 1.58 pu, 对绝缘水平选择不起控制作用。

(6) 对于晋南荆线交流特高压试验示范工程, 线路分闸可不采用分闸电阻, 通过避雷器的合理配置来限制分闸过电压。

6.5 无功补偿方案^[30-35]

在初步确定了晋东南—荆门交流特高压试验

示范工程规模的基础上, 结合“1 000 kV 级交流特高压输电系统电磁暂态研究”项目, 综合考虑特高压输电系统限制工频过电压和无功调相调压的要求, 研究提出了晋东南—荆门交流特高压试验示范工程的无功配置方案:

(1) 变压器参数。

1) 变压器容量为 3 000 MVA/3 000 MVA/1 000 MVA, 调压方式为无励磁调压, 调压级差为 2.5%, 调压范围为 $\pm 5\%$ 。变压器三次侧的额定运行电压为 110 kV, 最高运行电压为 126 kV。

2) 变压器三次侧容性无功补偿装置在最高运行电压 126 kV 下的总容量不应超过变压器三次侧的额定容量, 应控制在 960 Mvar 以下, 按 4 个分组考虑, 低压容性补偿设备单组容量为 240 Mvar, 最高运行电压为 126 kV; 低压电抗器单组容量为 240 Mvar, 额定电压为 105 kV, 最高运行电压为 115 kV。

(2) 无功配置方案。

1) 根据表 3 的高压电抗器配置方案, 即使考虑到线路可能的最小长度和高抗误差, 线路的补偿水平合理, 全相运行谐振频率小于 48 Hz, 不会发生非全相工频谐振过电压。

2) 晋东南—荆门交流特高压试验示范工程低压无功补偿配置推荐方案为: 晋东南变电站安装 3 组低压容性补偿装置, 2 组低压电抗器; 荆门变电站安装 3 组低压容性补偿装置, 2 组低压电抗器。

3) 在考虑的运行方式下, 电容器组分组容量考虑为 240 Mvar 时, 投切单组设备引起的中压侧和高压侧电压波动均小于额定电压的 2.5%。

4) 特高压输电线路充电功率很大, 空载线路一端合闸而另一端未合闸时, 在开路端会产生较高电压。建议晋东南—荆门线路规定合空载线路顺序, 即先合闸晋东南和武汉侧, 最后合闸于南阳开关站。

5) 配置方案能够满足 2008 年特高压输电系统示范工程无功平衡的需求, 将来输电线路传输功率增加时, 低压侧无功补偿容量可适当增加。

6.6 稳定及控制技术^[36]

国家电网公司高度重视电网规划及其安全稳定水平, 对于特高压试验示范工程, 根据不同规模和网架结构进行了多次反复计算。计算结果表明:

(1) 特高压电网各水平年的安全稳定水平均能满足安全稳定导则的要求。

(2) 特高压电网的安全稳定控制系统的设计满

足安全稳定导则的要求, 三道防线的配置互相协调。第一道防线根据网络结构按三相故障和单相永久故障考核; 第二道防线应按区域型安全稳定控制装置配置; 第三道防线应根据安全稳定措施要求, 采用高频切机和低压解列相配合的措施, 保持系统稳定。

(3) 金沙江等流域大型水电站外送特高压直流与川西水电外送特高压交流并列运行, 并列运行特高压交流或特高压直流故障均能满足安全稳定导则要求。特高压直流具备功率紧急支援功能, 可对并列运行的系统线路形成支援, 减少送端切机, 有利于系统稳定。

(4) 特高压电网继电保护设备动作越快, 对系统稳定越有利, 如沿用 500 kV 电网继电保护设备的动作时间, 在安全性方面可满足稳定导则的要求。特高压电网单相重合闸设备沿用 500 kV 重合闸动作时间也能满足系统安全稳定要求。

总体说来, 特高压电网各水平年安全性较好, 在常规的安全稳定控制技术的基础上, 辅以交直流协调控制等先进控制技术, 可进一步提高特高压电网的安全性, 在满足更大范围内优化配置能源资源的基础上, 进一步提高特高压电网输电的效益和质量。

6.7 绝缘配合^[37-39]

1000 kV 特高压输电线路绝缘子串形、型式的选择。在综合考虑国内外特高压输电线路工程经验和研究分析的基础上, 1000 kV 特高压输电线路杆塔中相采用 V 形串, 边相采用 I 形串是比较合适的。确定输电线路绝缘子的串长通常有 2 种方法: 一种是根据爬电比距来决定绝缘子的串长, 另一种方法是根据试验得到绝缘子耐污闪电压, 使选择的绝缘子串的耐污闪电压大于该线路的最大工作电压。海拔高度 1 000 m 及以下地区绝缘子的具体选择如表 5 所示。

表 5 1000 kV 输电线路的双伞型和三伞型绝缘子片数和串长

Tab. 5 The number of the double-shed type and tri-shed type insulators and the length of string on UHV AC transmission lines

污秽等级	等值盐密/(mg/cm ²)	I 形串				V 形串			
		XWP-300	XSP-300	XWP-300	XSP-300	XWP-300	XSP-300	XWP-300	XSP-300
		片数	串长/m	片数	串长/m	片数	串长/m	片数	串长/m
轻	0.03~0.06	41	8.00	37	7.22	38	7.41	34	6.63
中等	0.06~0.1	48	9.36	43	8.39	44	8.58	39	7.61

注: ①400 kN 绝缘子参数可参照同类型的 300 kN 绝缘子计算得出; ②双层伞型 XWP-300 和三伞型 XSP-300 的结构高度皆为 195 mm。在重污秽和很重污秽地区 (3、4 级污区), 应采用复合绝缘子, 其额定机械破坏负荷取 300 kN 和 400 kN。V 形串和 I 形串的复合绝缘子的结构高度都为 9.1 m。

变电站主要设备绝缘水平的选择。综合多种方法所得的计算结果,对1000kV变电站设备绝缘水平的要求如表6所示。比前苏联的低,比日本的高。这是结合我国的设备制造能力和过电压水平而确定的,是适合中国国情的。

表6 1000kV设备绝缘水平建议值
Tab.6 Suggestion on insulation level
of 1000 kV equipments

设备	雷电冲击 耐受电压/kV	操作冲击 耐受电压/kV	短时工频 耐受电压/kV
变压器、电抗器	2250	1800	1100
断路器、隔离开关	2400	1800	1100
CVT, CT	2400	1800	1100
纵绝缘	2400+900	1675+900	1100+635

6.8 防雷保护^[40-41]

6.8.1 线路防雷

前苏联特高压线路的运行经验表明,雷击跳闸是线路跳闸的主要原因,同时特高压线路的杆塔比较高,较易发生绕击。为保障特高压线路的安全运行,降低特高压工程的雷击跳闸率,中国电力科学研究院和武汉高压研究所分别进行了大量的防雷技术研究。

编制了研究避雷线屏蔽作用的电气几何模型计算程序,可考虑导线工作电压瞬时值的影响。采用该程序对4种特高压线路塔型进行了避雷线屏蔽效果的计算研究。平原地区绕击闪络率的研究结果和相应的100km线路每年绕击跳闸次数如表7和表8所示。

表7 1000kV输电线路绕击闪络率
Tab.7 Flashover rate of shielding failure
along 1000 kV transmission lines

塔型-导线排列	保护角/(°)	绕击闪络率/%
M型水平	9.23	0.51
M型三角	5.92	0.11
3V型水平	9.72	2.19
3V型三角	6.62	1.21

表8 100km特高压输电线路每年雷绕击跳闸次数
Tab.8 Number of trip-out for lightning shielding failure
every year per 100 km UHV transmission line

塔型-导线排列	保护角/(°)	跳闸次数/(次/(100km·年))		
		$T_d=20$ 日	$T_d=40$ 日	$T_d=80$ 日
M型水平	9.23	0.019	0.047	0.116
M型三角	5.92	0.005	0.012	0.029
3V型水平	9.72	0.075	0.189	0.469
3V型三角	6.62	0.048	0.121	0.300

注: T_d 为年雷暴日数。

如参照我国500kV系统多年雷击跳闸次数0.146次/(100km·年)的运行数据,则3V型杆塔避雷线保护角宜作调整。表9为保护角减小后的计算结果。表10为特高压架空输电线路的雷电反击闪络率,表11为每100km线路每年雷电反击跳闸次数。可以

表9 保护角减小后线路每年雷电绕击跳闸次数
Tab.9 Number of trip-out for lightning shielding failure
every year per 100km UHV transmission line
after reducing protection angle

塔型-导线 排列	保护 角/(°)	避雷线间 距离/m	绕击闪 络率/%	跳闸次数/(次/(100km·年))		
				$T_d=20$ 日	$T_d=40$ 日	$T_d=80$ 日
3V型水平	6.06	33.25	0.610	0.021	0.053	0.132
	3.08	35.92	0.116	0.004	0.010	0.025
3V型三角	5.01	20.06	0.590	0.023	0.059	0.147
	2.45	24.28	0.106	0.004	0.011	0.027
M型水平	7.01	38.80	0.127	0.005	0.012	0.029

表10 特高压架空输电线路的雷电反击闪络率

Tab.10 Rate of flashover for lightning reverse
stroke on UHV overhead transmission lines

塔型	塔高/m	导线排列	单回闪络	双回闪络
拉线V型(前苏联)	46	水平	1.6×10^{-4}	—
自立塔(中国)	62.3	水平(M串)	4.7×10^{-4}	—
自立塔双回(日本)	88~148	双回垂直	3.9×10^{-3}	3.4×10^{-4}

注: 后者用于计算的塔高108m。

表11 特高压架空输电线路雷电反击跳闸次数

Tab.11 Number of trip-out for lightning reverse
stroke on UHV AC overhead transmission lines

塔型	跳闸次数/(次/(100km·年))		
	$T_d=20$ 日	$T_d=40$ 日	$T_d=80$ 日
拉线V型	2.3×10^{-4}	5.7×10^{-4}	1.4×10^{-3}
自立塔	8.3×10^{-3}	2.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}
自立塔双回 (单回/双回)	0.06/0.005	0.15/0.013	0.37/0.033

看出,单回线路反击跳闸率很低,而自立塔双回路因塔高影响反击跳闸率较高。

减小地线保护角可显著降低绕击跳闸率。当保护角 α 在 5° 或 6° 以下,即使地面倾斜角 $\theta=20^\circ$,其绕击跳闸率基本能达到预期的要求。建议1000kV线路的地线保护角度要随沿线地面倾斜角的变化而提出不同的要求。例如平原地区($\theta \leq 10^\circ$),地线保护角 α 宜在 10° 以下;山区($10^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$),地线保护角 α 宜在 5° (猫头塔)或 6° (酒杯塔)以下。

6.8.2 变电站防雷

采用国际通行的EMTP程序和IEC、国际大电网会议(CIGRE)、IEEE等国际组织推荐的方法进行研究。其中绕击电流的确定采用电气几何模型理论来计算。采用惯用法和统计法进行绝缘配合,考虑的运行方式包括:①正常运行方式,单线单变双母线(双断路器和单断路器);②特殊运行方式,单线方式。单线方式下的过电压最严重,但该方式出现的概率很小。

(1) 晋东南特高压GIS变电站雷电侵入波过电压。

MOA布置方式为:进线段CVT侧、高抗侧和主变侧各装有1组MOA,母线I、母线II各装有1组

MOA, 主变侧 MOA 和主变的距离应小于 20 m。在正常运行方式下, 最大侵入波过电压在允许范围内。

单线运行方式下, 按照初设布置 MOA, GIS 设备过电压非常高, 达到 2 550 kV, 超出绝缘允许范围。可采取下列措施: GIS 套管外增加 1 组 MOA, 高抗上过电压为 1 741 kV, 其余设备上最大过电压为 1 894 kV, 各设备过电压在允许范围内; 高抗支路与 GIS 套管直接相连, 高抗电压从 1 743 kV 升至 1 898 kV, GIS 设备上的侵入波过电压满足 15% 的绝缘裕度要求。

(2) 南阳特高压空气绝缘组合开关(AIS)开关站雷电侵入波过电压。

MOA 的布置为: 进线段 CVT 侧和高抗侧各装有 1 组 MOA, 母线 I、母线 II 各装有 1 组 MOA, 荆门串内两组断路器之间装 1 组 MOA。正常运行方式下, 侵入波过电压在允许范围内, 高抗上的最大过电压为 1 775 kV, 其余设备上的最大过电压为 1 885 kV。

单线运行方式下, 按照初设布置 MOA, 荆门侧线路受雷击时, 侵入波过电压在绝缘允许范围内; 晋东南侧线路受雷击时, 断路器套管、CT 和母线上各设备的侵入波过电压超出允许范围。建议减小地线保护角, 从而减小绕击电流, 达到减小绕击过电压的目的。最大绕击电流应限制在 16 kA 之内。

(3) 荆门特高压混合型气体绝缘组合开关(HGIS)变电站雷电侵入波过电压。

MOA 的布置为: 进线段 CVT 侧、高抗侧和主变侧各装有 1 组 MOA, 母线 I、母线 II 各装有 1 组 MOA。正常运行方式下, 主变侧 CVT 的最大绕击侵入波过电压为 2 157 kV, 超出绝缘允许范围。因此须将主变侧 CVT 移至主变 MOA 旁边。本文的结论均为将主变侧 CVT 通过 8 m 管母直接与主变 MOA 相连后得到的结果。正常运行方式下, 按照初设布置 MOA, 最大侵入波过电压在裕度允许范围内。

单线运行方式下, 按照初设布置 MOA, 高抗过电压为 1 732 kV, CVT 过电压为 1 842 kV, 均在允许范围内, 但 GIS 设备上的过电压非常高, 达到 2 670 kV, 超出绝缘允许范围。可采取下列措施: GIS 套管外增加 1 组 MOA, 高抗上过电压为 1 694 kV, CVT 过电压为 1 834 kV, GIS 设备上最大过电压为 1 841 kV, 各设备过电压在允许范围内; 高抗支路与 GIS 套管直接相连, 高抗上过电压升至 1 828 kV,

GIS 设备上最大过电压为 2 042 kV, 满足 15% 的绝缘裕度要求; 进线段 CVT 支路与套管直接相连, 高抗上过电压为 1 768 kV, 其余设备上最大过电压为 1 921 kV, 满足绝缘裕度的要求。

除通过合理配置变电站避雷器以防止雷电侵入后造成变电站设备损坏以外, 目前正在研究在变电站出口 2 km 范围内的线路上采用以下措施来减小雷电对变电站设备的影响: ①进一步减小出口线路的地线保护角, 使之小于 0° ; ②加大边相两根地线距离, 使其分别保护边相导线, 在中间加装第三根地线来保护中相导线; ③采用良导体、添加接地电阻剂等措施, 进一步减小杆塔接地电阻。

6.9 特高压直流技术^[1]

采用 3 回 6 400 MW 特高压直流输送金沙江一期的电力是最经济和最环保的方案。进一步研究表明, 对于每极 1 个 12 脉动换流器的接线方案, 送端大容量换流变压器将受到运输条件的限制而无法完成设备运输。因此, ± 800 kV 特高压直流输电工程换流器的接线方案应采用每极 2 组 12 脉动换流器串联的结构。12 脉动换流器电压可从 (600+200) kV、(500+300) kV、(400+400) kV (“+” 前是低端 12 脉动换流器两端电压, “+” 后是高端 12 脉动换流器两端的电压) 分配方案中优选。研究发现, (600+200) kV 换流器接线方案中, 低压端 600 kV 换流变压器容量大, 仍然超出了运输条件的限制。因此, 主要比较 (500+300) kV、(400+400) kV 两种换流器电压分配方案。

组织国内相关厂家和特高压直流工作组成员针对这两种方案进行了详细的设备设计, 在主设备参数选择、性能、造价方面进行了对比研究。具体对象涉及换流变压器、换流阀、直流旁路断路器、绝缘配合以及过电压保护、直流控制保护的差别、运行灵活性等。研究结果表明: (400+400) kV 换流器电压分配方案有利于换流变阀侧绕组纵绝缘设计、有利于采用统一的分接开关、有利于阀和水冷系统的模块化设计、有利于直流旁路断路器的端口电压分配、有利于提高运行灵活性和直流系统可靠性, 且换流器造价降低 3%~5%。

在确定直流系统主接线和换流器电压分配方案的基础上, 针对向家坝—上海特高压直流工程, 完成了直流主回路的参数设计, 具体如表 12 所示。

特高压直流输电系统最关键的问题是过电压和绝缘配合。在上述主接线和主回路参数的条件

表 12 金沙江一期向家坝—上海±800 kV

直流输电工程主回路参数

Tab. 12 The primary parameters of Xiangjiaba-Shanghai UHV DC transmission lines

参 数	向家坝换流站	上海换流站
额定功率(整流器直流极母线处) P_N /MW	6400	6400
最小功率 P_{\min} /MW	640	640
额定直流电流 I_{dN} /A	4000	4000
直流最大短路电流 I_{kmax} /kA	47	47
额定直流电压 U_{dN} /kV(极对中性母线)	±800	±800
直流降压运行电压(80%) U_{r1} /kV (极对中性母线)	±640	±640
直流降压运行电压(70%) U_{r2} /kV (极对中性母线)	±560	±560
额定空载直流电压 U_{d0N} /kV	227.37 229.99	211.96 214.40
换流变压器短路阻抗/%	16 18	16 18
理想空载直流电压最小值 U_{diomin} /kV	207.41 207.69	191.57 193.86
理想空载直流电压最大值 U_{diomax} /kV	230.33 233.01	211.47 214.09
额定整流器触发角 $\alpha/(^\circ)$	15 (12.5~17.5)	—
额定逆变器熄弧角 $\gamma/(^\circ)$	—	17
换流变压器容量 (单相双绕组换流变压器)/MVA	317.5 321.12	296 299.36
换流变压器网侧绕组额定(线)电压/kV	525	515
换流变压器阀侧绕组额定(线)电压/kV	168.37 170.30	156.95 158.76
换流变压器分接开关级数	+28/-5 +29/-5	+36/-4 +35/-4
分接开关的分接间隔/%	1.25	1.25
平波电抗器电感值/mH	300~400	300~400

下,分别开展了换流站和直流输电线路各种过电压的计算分析,研究了交、直流系统过电压水平和过电压保护方案,包括主要设备的避雷器配置方式、参数和能耗以及防止过电压应采取的特殊控制保护措施;研究了±800 kV 换流站绝缘配合,研究了换流站主要设备的绝缘水平和最小空气间隙;研究了±800 kV 换流站绝缘配合设计规程和标准所要求的相关参数;根据输电线路各污秽等级情况和绝缘子污秽耐电压值研究了绝缘子片数的要求,分析计算了直流架空输电线路的耐雷水平和减小雷击跳闸率的措施;研究了杆塔的空气距离和输电线路的极线距离等。

此外,对特高压直流输电工程的其他关键技术问题也进行了深入的研究,如换流无功消耗和补偿、换流站谐波、交/直流滤波器的配置、换流站布置、户内直流场设计等。

总的来说,对特高压直流输电技术的研究已经从大的方案可行性论证进入到具体设备、具体配置方式、具体设计的研究。研究所取得的成果可作为设备研发、工程设计的基础条件。

7 结论

通过科学规划、科研攻关和设备研发等论证,使我们进一步认识了发展特高压输电的必要性和可行性。发展特高压电网是满足我国电力需求持续增长的基本保证,是优化我国能源资源配置方式的必要途径,是促进电网与电源协调发展的有效手段,是提高电力和社会综合效益的必然选择,是推动输变电技术自主创新的重大举措,是带动电工制造业技术升级的重要机遇。通过大量的特高压基础性课题的研究,攻克了一系列技术难题,获取了较全面的技术解决方案,用具体的技术数据和设备方案客观论证了我国发展1000kV特高压交流输电和±800kV、6400MW特高压直流输电的可行性。

发展更高一级电压等级输电已纳入国家“十一五”规划纲要;特高压输变电试验示范线路建设和特高压设备国产化工作已纳入“今明两年的能源工作要点”;特高压输电技术及设备研究已纳入“国家中长期科学和技术发展规划纲要”。

回顾过去,国家电网公司统筹谋划,积极推进,集中国内电力和电工制造业的优势力量,对发展特高压技术的各个相关领域进行了广泛、深入和卓有成效的论证。所提出的发展特高压思路及设备国产化供货方案,符合全国科学技术大会所倡导的“自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来”的精神。

展望未来,在党中央和国务院的领导下,在政府相关部门大力支持下,国家电网公司有决心、有信心、有能力将晋东南—荆门输变电项目建设成集试验、示范和商业运行功能于一体的交流特高压典范工程,将±800 kV、6400 MW 直流输电项目建设成直流特高压样板工程,为建设世界一流的交、直流输电工程,建设我国以特高压网架为核心的坚强国家电网开好头、起好步,为促进经济社会发展作出更大的贡献。

参考文献

- [1] 舒印彪,刘泽洪,高理迎,等. ±800kV 6400MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Gao Liying, et al. A preliminary exploration for design of ±800kV UHVDC project with transmission capacity of 6400MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.
- [2] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 1-6.
Qi Xu, Zeng Dewen, Shi Dajun, et al. Study on impacts of UHVDC transmission on power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 1-6.

- [3] 苏宏田, 齐旭, 吴云. 我国特高压直流输电市场需求研究[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 1-4.
Su Hongtian, Qi Xu, Wu Yun. Study on market demand of UHVDC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 1-4.
- [4] 舒印彪. 1 000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T1-T6.
- [5] 张运洲. 对我国特高压输电规划中几个问题的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T11-T14.
- [6] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4.
Wu Jingru, Xu Yongxi. Development prospect of UHV AC power transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 1-4.
- [7] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
Yuan Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.
- [8] 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.
Zhou Hao, Yu Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9.
- [9] 邵方殷. 我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 1-7.
Shao Fangyin. Phase conductor configuration and power frequency electromagnetic environment of UHV transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 1-7.
- [10] 许伟, 陈水明, 何金良. 1 000 kV 交流输电线路的故障激发过电压研究[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 10-13.
Xu Wei, Chen Shuiming, He Jinliang. Research on switching overvoltage caused by faults in 1 000 kV UHV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 10-13.
- [11] 印永华, 房喜, 朱跃. 750 kV 输变电示范工程系统调试概况[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 1-9.
Yin Yonghua, Fang Xi, Zhu Yue. General situation of system commissioning for 750 kV transmission pilot project[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 1-9.
- [12] 中国工程院“特高压”咨询课题组. 关于我国特高压输电研究与工程建设的咨询意见[Z]. 北京: 中国工程院, 2005.
- [13] 国务院发展研究中心. 中国能源输送方式研究[Z]. 北京: 国务院发展研究中心, 2005.
- [14] 国家电网公司. 1 000 kV 级交流输电系统关键技术研究框架[Z]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [15] 国家电网公司. ± 800 kV 级直流输电系统关键技术研究框架[Z]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [16] DL 755-2001, 电力系统安全稳定导则[S].
- [17] 国家电网公司, 中国电力工程顾问集团公司. 交流特高压试验示范工程优化比选研究[Z]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [18] 国家电网公司. 金沙江一期工程溪洛渡、向家坝水电站直流输电方案论证与电压选择报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [19] 赵彪, 李敬如, 韩丰. 晋东南—南阳—荆门交流特高压试验示范工程经济效益分析[R]. 北京: 国网动力经济研究中心, 2005.
- [20] 国家电网公司, 中国机械工业联合会. 特高压设备国产化调研报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [21] 国家电网公司, 中国机械工业联合会. 特高压电网工程设备供货和国产化意见[Z]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [22] 国家电网公司. 交流特高压主设备技术条件书(第一版)[Z]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [23] 张祖平, 侯俊贤, 吴丽华, 等. 我国交流特高压电网最高运行电压的选择研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [24] 吴桂芳, 李光范, 崔鼎新. 1000kV 级输变电工程对区域生态环境影响的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [25] 郭雄, 万保权. 1 000 kV 级交流输电线路电磁环境的研究[R]. 武汉: 武汉高压研究所, 2005.
- [26] 陆家榆, 鞠勇. ± 800 kV 直流架空输电线路电磁环境限值研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [27] 林集明, 班连庚, 王晓刚, 等. 国家电网 1 000 kV 特高压输电系统过电压与绝缘配合研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [28] 谷定燮, 周沛洪, 修木洪, 等. 交流 1 000 kV 输电系统过电压和绝缘配合研究[R]. 武汉: 武汉高压研究所, 2005.
- [29] 谷定燮, 周沛洪, 修木洪, 等. 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门试验示范工程过电压研究[R]. 武汉: 武汉高压研究所, 2005.
- [30] 申洪, 卜广全, 周勤勇, 等. 交流特高压输电系统过电压与无功控制方案[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [31] 申洪, 卜广全, 周勤勇, 等. 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门试验示范工程无功补偿方案研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [32] 申洪, 卜广全, 周勤勇, 等. 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门试验示范工程高抗配置方案研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [33] 谷定燮, 周沛洪, 修木洪, 等. 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门试验示范工程高压电抗器配置方案和容量选择研究[R]. 武汉: 武汉高压研究所, 2005.
- [34] 周利, 康义, 周献林. 1000kV 荆门变电站第三线卷额定电压选择及低压无功设备配置专题研究[R]. 武汉: 中南电力设计院, 2005.
- [35] 刘建琴, 曹玉杰, 王绍德. 1 000 kV 晋东南变电站低压无功配置方案研究[R]. 北京: 北京国电华北电力工程有限公司, 2005.
- [36] 郭强, 周勤勇. 1 000 kV 级输电系统稳定及控制技术的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [37] 周军, 宿志一. 1 000 kV 级交流工程线路绝缘子选型[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [38] 张翠霞. 1 000 kV 特高压输电系统绝缘配合的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [39] 谷定燮, 周沛洪, 修木洪, 等. 1000kV 系统绝缘配合研究[R]. 武汉: 武汉高压研究所, 2005.
- [40] 张翠霞, 杜澍春, 葛栋. 1 000 kV 特高压输电系统防雷保护研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [41] 谷定燮, 周沛洪, 戴敏, 等. 1 000 kV 交流输电工程防雷保护研究[R]. 武汉: 武汉高压研究所, 2005.

收稿日期: 2006-02-16.

作者简介:

舒印彪(1958-), 男, 国家电网公司副总经理、党组成员;

刘泽洪(1961-), 男, 硕士, 国家电网公司特高压办公室副主任, 从事特高压输电工程的建设管理和研究工作;

袁 骏(1971-), 男, 硕士, 从事特高压输电工程的建设管理和研究工作;

陈葛松(1971-), 男, 博士, 从事特高压输电工程的建设管理和研究工作;

高理迎(1963-), 男, 博士, 从事特高压输电工程的建设管理和研究工作.

(责任编辑 马晓华)