

特高压输电若干关键技术研究

舒印彪¹, 张文亮²

(1. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085)

Research of Key Technologies for UHV Transmission

SHU YIN-Biao¹, ZHANG Wen-liang²

(1. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: UHV transmission projects can suffice the quickly increased demand of electrical power in the future, and suffice the requirement of grids extending and uniting with the sustaining development of power system in China. The present paper introduces the research actuality of the whole world on UHV transmission project. According to the analysis of chinese actual conditions, the some technical problems in both 1000 kV UHVAC and ± 800 kV UHVDC power transmission projects, including the problems of over voltage and insulation dependence, external insulation characteristics, electromagnetic environmental and the standards of UHV equipment's manufacture and test. Along with the come into being of the State Grid UHV AC test base and the State Grid UHV DC test base, the above problems can be correctly solved. Test results can be used to direct the designs and the constructions of UHV transmission projects in our countries.

KEY WORDS: UHVAC; UHVDC; transmission line; test base

摘要: 特高压输电工程建设能够满足我国未来快速的电力增长需求, 满足电网规模逐步扩大、跨区联网基本形成的网络联结要求。该文介绍了特高压输电技术在国内外的研究现状, 基于中国的实际情况, 分析了中国 1000 kV 特高压交流输电工程和 ± 800 kV 特高压直流输电工程中, 过电压与绝缘配合、外绝缘特性、电磁环境以及特高压设备制造与检验、检测等方面面临或亟待解决的问题。分析认为, 依托国家电网公司一流的特高压交流试验基地和特高压直流试验基地, 上述问题可以得到很好的研究解决, 得到试验数据和分析结果可直接用以指导我国特高压输电工程的设计和建设。

关键词: 特高压交流; 特高压直流; 输电线路; 试验基地

0 引言

我国地域辽阔, 能源储备和电力负荷分布极不均衡。在电网建设中, 能源分布和电力传输始终是

一个需要综合考虑的问题。随着经济的发展, 建立长距离、大容量、低损耗的输电系统已成为我国电网发展的必然^[1]。特高压交、直流输电网除了能实现电能大规模和远距离输送的需求外, 还可以大幅度提高电网自身的安全性、可靠性、灵活性和经济性, 具有显著的社会、经济效益。然而电网的运行电压等级越高, 相应的技术要求也就越高^[2]。

随着四川复龙至上海南汇 ± 800 kV 特高压直流示范工程、晋东南-南阳-荆门 1000 kV 特高压交流试验示范工程相继由国家发展改革委员会核准建设, 我国的特高压交、直流输电技术研究及其基础实验设施亟待完善。国家电网公司特高压交流试验基地和直流试验基地的建设和逐步投入使用, 将使我国具备可靠的试验和测试平台, 同时可以为我国特高压交、直流输电技术在工程设计和建设方面起到重大的支撑作用。本文针对我国的国情, 对特高压输电技术若干关键问题的进行研究。

1 特高压输电技术研究现状

1.1 国外特高压输电现状

美国、日本、前苏联、意大利和巴西等国于 20 世纪 60 年代末和 70 年代初相继开始了特高压交、直流输电技术的研究, 并建设了相应的试验室及短距离试验线路^[3]。

在特高压交流输电方面, 前苏联于 20 世纪 80 年代着手建设联接西伯利亚、哈萨克斯坦和乌拉尔联合电网的 1150 kV 输电工程, 成为世界上第一个(也是唯一的)具有成熟特高压输电运行经验的国家。进入 20 世纪 90 年代, 受其国内经济形势及电力需求变化的影响, 该工程降压至 500 kV 运行。日

本、意大利等国家也曾经展开过特高压交流输电工程计划,但由于世界经济发展速度减缓以及国际大环境变化而导致上述国家的电力需求停滞甚至衰退,特高压输电工程纷纷下马,已经建成的高压输电线路也只能以低电压等级运行。

在特高压直流输电方面,目前世界上运行电压等级最高的是巴西伊泰普 ± 600 kV 级直流输电工程,而这一电压等级与我国建设的 ± 800 kV 级的直流输电工程仍具有较大差距。

1.2 我国特高压输电技术研究现状

采用特高压输电,对实现更大范围的资源优化配置、提高输电走廊的利用率和保护环境,都具有十分重要的意义^[4]。我国大气污染严重,“西南水电”的送出又带来高海拔、覆冰等问题,因此气候和地理环境对电磁环境指标及外绝缘特性的影响与国外研究机构的试验环境和试验条件有较大差异,国外的研究结论很难应用。更重要的是,我国建设的 ± 800 kV 特高压直流输电工程是世界上电压等级最高、输送容量最大、输送距离最长的直流输电工程,该工程的实现必须要基于我国实际情况而开展。

我国特高压输电技术研究始于 1986 年,在过去的 20 多年里,我国的科研机构在特高压交、直流输电领域相继开展了“远距离输电方式和电压等级论证”、“特高压输电前期论证”和“采用交流百万伏特高压输电的可行性”等研究,在特高压输电系统过电压水平、绝缘配合、输电线路对环境影响以及设备、线路、铁塔、典型变电站(换流站)的选择与论证方面,取得了初步成果^[5-6]。

随着我国电网建设的发展,输电线路数量不断增多,输电线路走廊将日益紧张,由此必将带来交直流输电线路同走廊、直流输电线路导线多种排列方式、多回直流输电线路同杆架设等新问题^[7]。同时,国家环保部门对电磁环境方面的管理越来越严格,特高压工程的设计必须要满足相关管理制度、法律、法规的要求。

特高压输电工程的建设需要经过特高压试验研究、特高压设备研制、特高压设备试运行的考核等几个阶段,而特高压交流试验基地和直流试验基地的建设是特高压输电技术研究的基础。

为满足特高压输电工程相关研究的需求,2006 年 8 月,国家电网公司特高压直流试验基地奠基于北京中关村科技园区昌平园东区,该基地功能全面完整、高效实用,基地的建设紧密结合我国 ± 800 kV

特高压直流输电工程实际。2006 年 10 月,国家电网公司特高压交流试验基地奠基于武汉 500 kV 凤凰山变电站西侧。该试验基地的试验线段部分包括单回路和双回路各一条(目前均已实现带电运行),杆塔布置均为耐-直-直-耐方式,试验线段在导线、地线的选用上,与晋-南-荆试验示范工程保持一致。建成后的国家电网公司特高压试验基地将为我国特高压交流试验示范工程和直流示范工程建设和运行提供强有力的技术支持。

2 特高压试验基地研究项目

2.1 过电压与绝缘配合

在特高压输电系统运行过程中,将承受操作冲击、故障冲击、雷电冲击等引起的过电压。由于目前我国尚无特高压过电压标准,因此,对过电压与绝缘配合进行研究,选择正确和经济的方式降低设备的过电压水平和绝缘水平,对系统安全运行是十分重要的。

由于特高压输电工程的特殊性,导线的布置方式有多种选择,绝缘子串型和塔头间隙种类较超高压线路多,如同杆并架,导线水平排列、垂直排列,绝缘子 I 串、V 串甚至 Y 串等。

我国特高压输电线路跨越高海拔地区的国情还决定必需对不同海拔条件下的空气间隙放电电压特性进行研究。因此,在常规研究项目基础上,研究不同条件下空气间隙的放电特性对于指导特高压输电工程的设计更具深远意义。表 1 为国家电网公司特高压试验基地在空气间隙及设备绝缘特性方面可进行的具体研究内容。

表 1 特高压空气间隙及设备绝缘特性研究
Tab. 1 Researches on air clearance and insulating character of equipment under UHVAC and UHVDC test conditions

序号	特高压直流	特高压交流
1	换流站各种间隙进行雷电和操作冲击试验、直流耐压试验	变电站各种间隙进行雷电和操作冲击试验、交流耐压试验
2	对各种设备如变压器、绝缘子等进行雷电和操作冲击电压试验	对各种设备如变压器、绝缘子等进行雷电和操作冲击电压试验
3	对直流杆塔各种间隙进行冲击放电试验	对交流杆塔各种间隙进行冲击放电试验
4	直流叠加冲击试验	工频叠加冲击试验
5	直流带电作业	交流带电作业

2.2 污秽外绝缘问题

通常,污秽外绝缘问题研究的主要内容为绝缘子及套管的人工污秽、淋雨、覆冰和低气压(高海拔)条件下的外绝缘试验,试验的关键是在全电压下进行。在我国特高压输电工程的前期研究中,由于缺乏高电压等级的污秽电源,1000 kV 交流、 ± 800 kV 直流线路长串绝缘子的试验不得不在国外进行,如日本 NGK、瑞典 STRI。

国外对特高压交流输电问题研究比较多,并且有前苏联 1150 kV 的运行经验可以借鉴。然而,考虑到我国特高压输电工程经过地域的环境及地理气候条件(如高海拔、重污秽等),国外的建设经验不宜照搬。以目前我国 1000 kV 级交流输电线路采用的 8 分裂导线设计为例,根据国外特高压运行经验,该特高压线路至少需要 300 kN 以上的大盘径大吨位绝缘子^[6]。由于不同的绝缘子积污情况、耐污闪能力、老化性能、机械性能等相差很大,因此,以下 4 个方面问题是影响特高压输电工程外绝缘设计和选择的关键问题:

(1) 设备外绝缘的耐污闪能力。与国外特高压输电工程不同,我国的地域辽阔,地理环境复杂,不同地区污秽情况有很大差别。同时,我国的大气污染程度较美国、前苏联等国要严重得多。随着我国经济高速发展,工业污染日益严重,可以预见,在将来 1000 kV 交流特高压和 ± 800 kV 直流特高压输电工程中,线路外绝缘的染污放电问题将会越来越严重,因此,特高压输电线路在外绝缘设计时,首先应考虑的是设备外绝缘的耐污闪能力。

(2) 复合外绝缘的性能及可靠性。面对日益严重的大气污染问题,在特高压交、直流输电工程上大量采用复合绝缘子已不可避免,然而国外特高压输电工程在此方面的研究比较薄弱,可借鉴的经验不多。因此,需要对复合绝缘子机电特性、老化、机械疲劳、内部缺陷探测等问题,以及复合绝缘子在高海拔、覆冰条件下的外绝缘问题等进行深入、细致的研究。此外,部分线路绝缘子、变电设备采用 RTV 涂料(包括 PRTV 涂料)来增加设备外绝缘的耐污闪能力时,RTV 涂料(包括 PRTV 涂料)的可靠性、使用寿命的定义和判据也需要进一步研究。

(3) 外绝缘的串长及串型选择。对输电线路而言,绝缘子的串长是确定塔头尺寸和塔头结构设计的基础。耐污闪性能好的绝缘子,其串长就相对较小。相反地,耐污闪性能差的绝缘子会导致绝缘子

串长较长,此时输电线路的工程造价势必会大大增加。综合考虑国内外特高压输电线路工程经验和运行特性分析,我国特高压输电线路可能采用与普通型输电线路不同的绝缘子布置方式,如 V 形串等。由于采用 V 形串时的绝缘子的积污以及闪络电压同悬垂串都有所不同,因此,需要解决不同串形下的外绝缘水平选择问题。

(4) 高海拔和覆冰问题。与平原地区相比,高海拔地区的染污绝缘问题更为严重^[7-9]。世界上的发达国家主要在平原地区,很少遇到高海拔问题,因此,他们在此领域所做研究很少,只有前苏联、日本、加拿大、瑞典等国家曾做过一些高海拔外绝缘污闪特性短串或模型的试验^[5-6]。由于我国特高压交、直流输电线路将经常性穿越高海拔、覆冰等气候恶劣地区(如规划中的向家坝-苏南 ± 800 kV 特高压直流输电线路中,线段的最高海拔达到了 3680 m),因此,各种环境条件下,输电线路合理的绝缘配置也是特高压输电技术研究的关键问题,此问题的研究关键仍然是必须在全电压等级下进行。

2.3 电磁环境研究

电磁环境问题是特高压交、直流输电线路设计、建设和运行中必须考虑的重大技术问题。现阶段,此问题在世界范围内仍属于热点研究课题^[3-4,10]。特高压输电线路的电磁环境与输电线路电晕特性有关,线路的电晕会造成电晕损耗、工频电磁场(交流输电)、直流电场效应(直流输电)、无线电干扰和可听噪声等方面的后果。其中,可听噪声问题已经成为特高压输电线路导线设计的最重要影响因素。

在高海拔地区,输电线路的电磁环境问题比平原地区更为严重,然而目前国内外对此问题的研究却很不充分。因此,如何有效利用特高压交流试验基地和直流试验基地的污秽及环境压力容器试验室,展开高海拔地区输电线路电磁环境等问题的研究,也是面临的新课题。

与 ± 500 kV 直流输电工程相比,特高压直流输电工程具有电压高、导线截面大、铁塔高、单回线路走廊宽等特点,因此其电磁环境问题与 ± 500 kV 直流线路有一定的差别。由于特高压直流输电工程的电磁环境与导线型式、架线高度等密切相关,具体的选择方式不仅直接影响到工程的技术方案和建设造价,还将直接影响工程建设环保是否达标等问题。

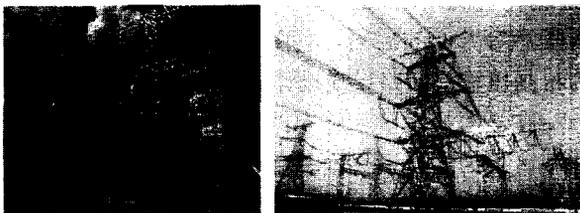
目前, ± 800 kV 特高压直流输电在国际上没有先例,没有经验可以借鉴,相应的电磁环境也没有

相关标准可循。而在 1000 kV 交流特高压输电线路电磁环境问题方面,其主要涉及到工频电场、工频磁场、无线电干扰和可听噪声等几个方面,虽然已经有部分研究成果应用于晋-南-荆试验示范工程,但是对于减小电晕损耗、降低可听噪声以及无线电干扰的措施尚需进一步研究。

综上所述,需要开展特高压交、直流输电工程的电磁环境研究内容如表 2 所示。为了开展特高压直流电磁环境研究,国家电网公司在北京建设了一条长 900 m、双回试验电压 ± 1200 kV 的可调整导线布置方式的特高压直流试验线段,如图 1(a)所示,以及一套尺寸为 70m \times 22m \times 13m 的两厢式电晕笼(既可以进行单极试验,又可进行双极试验),在武汉建设了长度 1km 左右的特高压交流试验线段(单回路和双回路各一条)如图 1(b)所示,待建一套尺寸为 35m \times 8m \times 8m 的电晕笼。

表 2 特高压交直流输电电磁环境方面内容
Tab. 2 Content of electromagnetic environment on UHVAC and UHVDC

输电方式	导线布置方式	所处地区	电磁环境研究内容
特高压直流	极导线水平和垂直布置、多回直流线路同杆架设、交直流同杆架设等新的输电方式	平原地区和高海拔地区	空间电场、静电感应、离子流、合成电场、电晕特性、电晕损耗、可听噪声以及无线电干扰等研究
	单回线路、多回交流线路同杆架设	平原地区和高海拔地区	工频电场、工频磁场、无线电干扰、可听噪声和电晕损耗等



(a) 直流试验基地

(b) 交流试验基地

图 1 国家电网公司特高压试验基地试验线段

Fig. 1 Test lines at UHVDC and UHVAC test bases

2.4 特高压输变电设备的制造、检验及运行检测

2.4.1 我国输变电设备制造业的发展

我国输变电设备制造业经过 50 年的发展,高压、超高压以及特高压输变电设备从无到有、从小到大。随着我国电网技术、装备水平不断提高,相关设备制造企业的技术水平和国产化能力也不断提升^[1,10]。近年来,在“装备制造国产化”目标的指引下,经过 ± 500 kV 直流输电工程、750 kV 交流输电工程、三峡送出工程等实践,我国电力设备制造业在产品的设计、制造、试验检测技术等方面均有

了迅速发展,基本满足了我国电力建设的需要。

目前,国内设备制造厂已具备导线、金具、避雷器、电容式电压互感器和电容器以及悬式绝缘子等特高压输变电设备的研制和供货能力;而特高压变压器、电抗器、高速接地开关以及开关设备尚需加速开发研制;特高压套管、GIS、可控电抗器等设备制造难度大,国内目前还无制造能力,在特高压输电工程建设初期,尚需引进国外产品^[11]。

2.4.2 长期带电考核、运行状态检测与检修技术

特高压电网的建设决策是一项带有战略性和方向性的决策,具有很大的挑战性^[12],设备的长期带电考核对于保证系统的安全可靠运行具有重要意义^[7]。考虑到我国电网所经地区海拔高、污秽重、气象条件恶劣,这就对特高压设备的绝缘等级和技术条件提出了更高的要求,无论是国内研发还是直接引进,都需要对其进行长期的带电考核^[13-14]。

特高压设备的运行状态检测和检修技术的水平与能力是特高压输变电工程运行的可靠性指标。运行状态检测,尤其是在线监测技术的应用可以防患于未然。但由于我们在相关方面经验仍存在较大的不足,因此对现有在线监测技术的评估,选择可靠性强的运行状态检测与检修技术,提出相应的检修项目、检测周期、检验工具、检验标准和规范等。

3 若干关键技术研究成果与结论

3.1 过电压与绝缘配合

3.1.1 空气间隙操作冲击和雷电冲击

± 800 kV 直流输电塔头空气间隙操作冲击和雷电冲击 50%击穿电压的试验分别在中国电力科学研究院户外试验场(6000kV/300kJ 冲击电压发生器)和国家电网公司特高压直流试验基地户外试验场(7200kV/480kJ 冲击电压发生器)进行。图 2 所示为国家电网公司特高压直流试验基地户外场门型塔悬吊 ± 800 kV 单极模拟塔头的现场实拍图。



图 2 特高压直流试验基地户外场

Fig. 2 Outdoor test site of UHV DC test base

改变绝缘子串之间的横担长度以及 V 形串每边的长度可以得到不同的导线到横担和导线到立柱的空气间隙距离, 对 $\pm 800\text{kV}$ 直流线路 V 形串塔头空气间隙进行的正极性 50% 操作冲击放电特性试验, 得到的直流线路杆塔 V 形串在不同空气间隙下与正极性 50% 操作冲击放电电压的关系如图 3 所示。

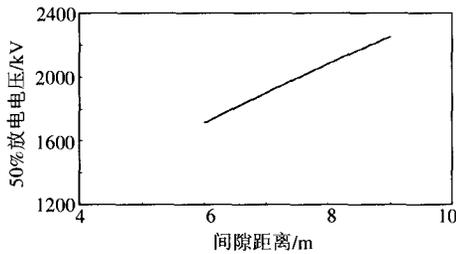


图 3 $\pm 800\text{kV}$ 直线塔空气间隙操作冲击放电特性曲线
Fig. 3 Switch impulse flashover voltage of air gap of $\pm 800\text{kV}$ straight tower

3.1.2 系统过电压水平

特高压交流输电系统工频过电压水平: ①线路断路器的变电站侧 1.3 pu。其中, $1.0\text{ pu} = 1100\sqrt{2}/\sqrt{3}$; ②线路断路器的线路侧 1.4 pu, 持续时间小于 0.4 s。

特高压交流输电系统操作过电压水平: ①变电站: 对地为 1.6 pu, 相间线路断路器内/外为 2.8/2.9 pu; ②线路: 对地为 1.7 pu, 相间为 2.9 pu。

为考验长期工作可靠性, 短时工频耐受电压被引入。中国特高压交流变压器、GIS 设备的短时工频耐受电压取值及加压方式如下:

变压器: $1.5\text{ pu} \times 1\text{ h} + \sqrt{3}\text{ pu} \times 5\text{ min} + 1.5\text{ pu} \times 1\text{ h}$

GIS: $1.5\text{ pu} \times 30\text{ min} + \sqrt{3}\text{ pu} \times 1\text{ min} + 1.5\text{ pu} \times 30\text{ min}$

特高压输电系统的绝缘配合以避雷器的操作、雷电冲击保护水平为基础, 考虑配合系数(安全裕度), 采用惯用法加以确定电气设备的操作、雷电冲击耐受电压。我国特高压交直流设备的冲击耐压水平如表 3 所示。

根据计算分析结果, 特高压交流一般输电线路雷击跳闸率不宜低于 0.1 次/100km·a, 特高压交流大跨越线路雷电安全运行年不宜低于 50 年, 特高压交流变电站(开关站)雷电侵入波安全运行年不宜低于 1500~2000 年。

表 3 特高压交流设备和特高压直流母线的冲击耐受电压
Tab. 3 Insulation impulse withstand voltages of China UHVAC elements and UHVDC bus

运行电压	雷电冲击耐压/kV		操作冲击耐压/kV	
	变压器 电抗器	其它 设备	变压器 电抗器	其它 设备
交流 1000 kV	2250	2400	1800	1800
直流 $\pm 800\text{kV}$	2050(DC 母线)		1675(DC 母线)	

3.2 污秽外绝缘选型

通过对多种特高压 1000kV 级交流绝缘子和 $\pm 800\text{kV}$ 级直流绝缘子在常压下及不同气压下进行了不同污秽、不同气压下的污闪试验发现, 不同类型、不同形状的绝缘子盐密和闪络电压的关系曲线, 以及海拔高度与闪络电压之间的关系曲线存在较大差异。结合特高压线路具体情况, 就不同类型绝缘子的耐污闪特性而言, 耐污闪能力依次为: 复合、三伞、双伞、玻璃、棒形瓷、普通, 后 4 种相差不大(交流试验结果)。

由试验得到的数据已用于我国 1000 kV 特高压交流输电和 $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流输电工程中线路、变电站、换流站设备外绝缘的选择方式, 具体包括在不同污秽地区、不同海拔地区、不同覆冰地区的绝缘子种类、伞形、串形、片数、串长和最小爬电距离的选择等。

需要特别注意的是, 在特高压交、直流输电系统中, 进行全电压等级的污秽外绝缘问题研究是必须的, 国家电网公司特高压试验基地待建的污秽及环境试验室正为此提供了可靠的技术研究平台。

3.3 电磁环境研究

根据我国 $\pm 800\text{kV}$ 直流工程的初步研究成果, 线路下方的地面合成场强应不大于 30 kV/m , 离子流密度不大于 100 nA/m^2 。这 2 种电晕效应受导线的对地高度影响较大, 因此可不作为制约导线选型的依据。导线选型主要由其产生的无线电干扰水平和噪声水平决定。

根据文献[15]中的规定, 在距直流架空输电线路正极性导线对地投影外 20m 处, 由电晕产生的可听噪声 50% 值应不超过 45dB(A); 海拔高度大于 1000m 时应不超过 50dB(A)。特高压直流试验基地内的试验结果表明, 按照线路设计运行条件, 采用 $6 \times 720\text{ mm}^2$ 导线的 $\pm 800\text{kV}$ 直流试验线段即使在相对湿度较大时, 可听噪声也能满足设计运行要求, 较标准低约 13.3%~17.7%(夜间), 同时其在可听噪声方面也低于 58dB($\mu\text{V/m}$)的限值, 即特高压工程可研阶段确定的 $6 \times 720\text{ mm}^2$ 导线在无线电干扰和噪声方面是满足电磁环境需要的。

需要注意的是, 输电线路的可听噪声与导线结构、导线对地高度、湿度、温度、风速、季节等因素有关, 新旧导线的可听噪声也会不同, 要较明确地掌握特高压架空输电线路电晕产生的可听噪声范围, 需要进行长期的监测与统计。

目前特高压直流试验基地正在进行多次合成场强和离子流的试验,以研究合成场强和离子流在不同天气、湿度、加压时间、老化程度下的分布特性和变化规律。

3.4 设备的制造、检验及运行检测

目前正在制定的高压输电设备的技术规范和试验标准、电气设备监造导则、现场交接试验方法和标准、现场预防性试验方法和规程及现场试验设备技术条件等标准和协议可直接指导设备的设计、生产、验收和检测。

伴随着特高压交、直流设备的陆续排产,长期带电考核以及检验与检修技术将是特高压设备在投运前及运行过程中必需进行的工作。而国家电网公司特高压交流试验基地和直流试验基地带电考核试验回路的建设,正满足了带电考核的各种需要。

4 结论

为了建好国家特高压输电工程,需要开展大量的特高压试验研究和特高压设备考核测试工作,国家电网公司特高压交流试验基地和直流试验基地的建立为我国特高压交流试验示范工程和直流示范工程提供了一流的试验及测试平台。

目前我国在特高压输电工程中的过电压与绝缘配合、外绝缘特性、电磁环境以及特高压设备的长期带电考核、检验与运行检测技术研究等方面已取得一定进展,所得的部分试验和数据分析结果可直接用于我国特高压交、直流输电工程建设。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 张文亮, 吴维宁, 胡毅. 特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 16-18, 31.
Zhang Wenliang, Wu Weining, Hu Yi. Research on UHV transmission technology and development of power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 16-18, 31(in Chinese).
- [3] 万启发. 浅谈我国交流特高压输电前景[J]. 高电压技术, 1999, 25(2): 30-31, 34.
Wan Qifa. Personal opinion on prospects of AC UHV power transmission on China[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(2): 30-31, 34(in Chinese).
- [4] 吴桂芳, 陆家榆, 邵方殿. 特高压等级输电的电磁环境研究[J]. 中国电力, 2005, 38(6): 24-27.
Wu Guifang, Lu Jiayu, Shao Fangyin. Research on electromagnetic environment of the next voltage level of transmission system in China[J]. Electric Power, 2005, 38(6): 24-27(in Chinese).
- [5] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [6] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
Zhang Wenliang, Yu Yongqing, Li Guangfan, et al. Researches on UHVDC Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7(in Chinese).
- [8] 张文亮, 吴维宁, 胡毅, 等. 特高压输变电用绝缘子技术和经济可靠性分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 22-25.
Zhang Wenliang, Wu Weining, Hu Yi, et al. Reliability analysis of insulators technology and economy for UHV transmission and distribution equipment[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 22-25(in Chinese).
- [9] Rudakova V M, Tikhodeev N N. Influence of low air pressure on flashover voltage of polluter insulators: test data, generalization attempts and recommendations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 607-613.
- [10] 李光范, 宿志一, 李庆峰. 美国、加拿大特高压直流试验基地考察报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [11] 李光范, 车文俊, 李鹏. 特高压输变电设备[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
- [12] 张文亮, 胡毅. 发展特高压交流输电, 促进全国联网[J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 20-22.
Zhang Wenliang, Hu Yi. To develop UHV AC power transmission and advance the united power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(8): 20-22(in Chinese).
- [13] 郭剑波, 姚国灿, 徐征雄, 等. 2020年以前我国电网出现更高一级交流电压等级的系统技术问题研究——全国联网和更高一级交流电压等级技术问题研究之二[J]. 电网技术, 1998, 22(7): 62-64.
Guo Jianbo, Yao Guocan, Xu Zhengxiong, et al. Technical investigation of the future chinese interconnected power systems and higher AC voltage (part 2)-Prospective application of higher AC voltage over 500kV in the future Chinese power systems[J]. Power System Technology, 1998, 22(7): 62-64(in Chinese).
- [14] 郑美特. 电网结构规划原则的研究[J]. 中国电力, 1999, 32(6): 9-12.
Zheng Meite. Study on principle of power net work configuration planning[J]. Electric Power, 1999, 32(6): 9-12(in Chinese).
- [15] 国家电网公司企业标准. Q/GDW145-2006 ±800kV 直流架空输电线路电磁环境控制值[S].

收稿日期: 2007-10-14.

作者简介:

舒印彪(1958—), 男, 国家电网公司党组成员、副总经理;

张文亮(1954—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高电压技术和电磁兼容方面的研究, wizhang@epri.ac.cn.

(编辑 王剑乔)