

特高压交流输电技术丛书

特高压 交流电气设备

刘振亚 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

特高压交流输电技术丛书

特高压 交流电气设备

刘振亚 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本套丛书针对特高压交流输电技术特点,介绍了我国特高压交流输电关键技术的研究成果,对我国建设特高压电网、促进电网现代化建设和保证大电网的安全稳定运行具有深远意义。本套丛书将介绍五个方面的研究成果。本书为《特高压交流电气设备》,是其中一本。

本书共7章,主要介绍了特高压变压器的基本结构、选型及试验;特高压并联电抗器的特点、绝缘水平、结构,以及冷却、振动和噪声等;特高压电容式电压互感器的设计原理及参数选择、结构要求及特性研究;特高压电流互感器的参数设定、设计中需要注意的问题及现场检测,以及新型电子式互感器;避雷器的结构、特性参数、试验,以及GIS罐式避雷器;特高压变压器套管和GIS套管;特高压设备带电考核场的设计,以及特高压设备考核模式的有关内容。

本书可供从事特高压交流电气设备研制工作的技术人员、从事特高压交流输电工作的运行维护和检修人员在工作中学习、使用,也可作为对其他相关人员进行培训的教材,还可作为大专院校相关专业的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

特高压交流电气设备/刘振亚主编. —北京:中国电力出版社, 2008

(特高压交流输电技术丛书)

ISBN 978-7-5083-6666-1

I. 特… II. 刘… III. 交流-高压电器 IV. TM51

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第003652号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年6月第一版 2008年6月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 11印张 137千字

印数0001—4000册 定价26.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

电力工业是关系国民经济全局的重要基础产业，是关乎千家万户安居乐业的基本保障，电力工业的发展和国民经济的整体发展息息相关。党的十七大提出要全面树立和落实科学发展观，电力行业贯彻落实科学发展观，就是要依靠技术进步与自主创新，满足国民经济发展及人民生活水平提高对电力的需求。根据规划，到2020年，我国电源装机容量将达到10亿~12亿kW。为满足我国未来电力需求快速增长的需要，迫切需要通过自主创新，提高电力系统的供电能力。国家电网公司在认真分析我国电力工业和电网发展的现状及未来发展趋势的基础上，提出了加快建设以特高压电网为骨干网架，各级电网协调发展的坚强国家电网的战略目标。

特高压输电具备超远距离、超大容量、低损耗送电的特点，建设特高压电网，促进大煤电、大水电、大核电、大规模可再生能源建设，能够推进资源的集约开发和高效利用，缓解环境压力，节约土地资源，实现能源资源在全国乃至更大范围的优化配置，具有显著的经济效益和社会效益。

2005年，国家电网公司坚持自主创新，以科学严谨的态度，组织国内相关电力科研教学、规划设计、设备制造、运行管理等单位，在借鉴、汲取国际上特高压输电经验和总结国内20多年研究成果的基础上，对特高压输电关键技术研究进行了全面、系统的规划，组织开展了涵盖系统特性、电磁环境、外绝缘特性、过电压与绝缘配合、设备制造和试验、运行、施工技术等多个方面的课题研究，取得了100多项重大科研成果。

2006年8月,国家电网公司晋东南—南阳—荆门1000kV特高压交流试验示范工程开工建设,预计2009年建成投产。今后几年将陆续建设陕北—晋东南—南阳—荆门—武汉的中线工程及淮南—皖南—浙北—上海的东线工程。与此同时,特高压直流输电工程也在按计划稳步推进。在2020年前后,将建成覆盖华北—华中—华东的坚强的交流特高压同步电网,同时建设西南大型水电基地 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流送出工程,共同构成连接各大电源基地和主要负荷中心的特高压交直流混合电网。届时特高压电网传输容量将超过2.6亿kW。

为了培养特高压电网科研、建设、运行、维护、管理等工作所需人才,加强对特高压电网工程技术人员的培训,促进特高压电网建设进程,国家电网公司组织参与特高压电网建设的专家和技术人员,编写了《特高压交流输电技术丛书》。这套书总结了我国从事特高压交流输电关键技术研究成果,凝聚了我国电力科技工作者集体的智慧。这套书包括五个方面的研究成果,即《特高压交流输电系统外绝缘》《特高压交流输电系统过电压与绝缘配合》《特高压交流输电工程电磁环境》《特高压交流电气设备》和《特高压交流输电线路维护与检测》。这套丛书的出版,是对我国特高压输电技术已取得的科研成果的总结和归纳,能为从事特高压电网科研试验、规划设计、设备制造、施工建设、运行管理等工作的人员提供指导,为高等院校师生了解最前沿的特高压输电技术提供参考,为今后特高压输电技术的进一步研究和特高压电网的建设、运行提供借鉴。

特高压输电是当今世界最先进的送电技术,随着特高压电网在中国的建设,我们仍会面临新的课题和大量工作。本书仅是我国特高压输电技术科研人员实践的总结,旨在为工程技术人员今后开展相关工作提供指导和借鉴,书中不足之处,敬请读者指正。

编 者

2008年6月

特高压交流输电技术丛书

编 委 会

主 编	刘振亚			
副 主 编	祝新民	陈进行	郑宝森	陈月明
	舒印彪	曹志安	栾 军	李汝革
编写组组长	许世辉			
副 组 长	陈维江	刘广峰	谷定燮	万启发
	邬 雄	杨迎建	胡 毅	
成 员	周沛洪	陈 勇	刘云鹏	谢 梁
	胡 伟	孟 刚	霍 锋	万 克
	谢雄杰	曹 晶	王晓琪	王保山
	伍志荣	王维州	陈江波	郭慧浩
	李 璿	汤 霖	王力农	邵瑰玮
	刘 凯	陈家宏	戴 敏	丁一正
	张 锐	胡建勋	徐 莹	刘 庭
	郑传广	江振宇		

前言

绪论	1
----------	---

第一章 特高压变压器	8
------------------	---

第一节 概述	8
第二节 特高压变压器基本结构	9
第三节 特高压变压器选型与试验	13

第二章 特高压并联电抗器	29
--------------------	----

第一节 特高压并联电抗器的作用及特点	29
第二节 特高压并联电抗器的绝缘水平	30
第三节 特高压并联电抗器的结构	31
第四节 特高压并联电抗器的冷却	36
第五节 特高压并联电抗器的振动和噪声	38
第六节 特高压并联电抗器的发展方向	40

第三章 特高压电容式电压互感器	41
-----------------------	----

第一节 特高压电容式电压互感器设计原理及参数选择 ...	41
第二节 特高压电容式电压互感器结构要求	47
第三节 特高压电容式电压互感器特性研究	54
第四节 特高压标准电压互感器的设计	63

第四章 特高压电流互感器	71
第一节 概述	71
第二节 特高压 TA 参数设定	72
第三节 特高压 TA 设计需要注意的问题	76
第四节 特高压 TA 现场检测	79
第五节 新型电子式互感器介绍	87
第五章 交流特高压避雷器	99
第一节 概述	99
第二节 金属氧化物电阻片	101
第三节 交流特高压避雷器的结构特点	103
第四节 交流特高压避雷器的设计与主要性能参数	107
第五节 交流特高压避雷器的试验	115
第六节 交流特高压 GIS 罐式避雷器	125
第六章 特高压套管	130
第一节 概述	130
第二节 特高压变压器套管	132
第三节 特高压 GIS 用套管	144
第七章 交流特高压设备带电考核	154
第一节 概述	154
第二节 考核场设计	158
第三节 特高压设备考核模式	162
参考文献	165
后记	166

绪 论

一、特高压输电的发展概况

建设创新型国家、构建资源节约型和环境友好型社会，对加快电网发展提出了新的更高的要求。国家电网公司作为能源工业自主创新的重要主体之一，肩负着推动创新型国家建设的重任，负有构建资源节约型和环境友好型社会的责任。为此，国家电网公司作出了依靠科技进步与创新，建设特高压电网的战略决策。建设特高压电网有利于充分发挥电网大范围优化能源资源配置的重要作用；有利于促进一次能源的高效集约开发和利用；有利于促进电网、电源协调发展；有利于促进电力工业技术装备升级，减少能源消耗，节约土地资源和投资；有利于统筹利用环境容量，缓解能源和环境对国民经济发展的制约。发展特高压电网有助于全面提升原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新的能力，是建设创新型国家、构建资源节约型和环境友好型社会的重大举措，充分体现了电力科技工作敢为人先，敢于走在世界电网科技发展的前列，占领世界电网科技制高点的决心与信心。

20 世纪 70 ~ 80 年代，前苏联、美国、意大利、日本、巴西、加拿大等国家先后开展了特高压交流输电技术的试验研究，前苏联和日本在试验研究结果的基础上，建成了特高压输电工程并投入运行。现均降压运行，主要是由于经济和政治的原因导致电力负荷增长缓慢，无负荷需求，而并不是技术原因和设备运行可靠性问题所致。前苏联和日本的成功经验可供借鉴，但不能照搬。我国的系统条件和技术要求与前苏联和日本等国均有不同，随着现代制造水平和技术水平的提高，我国将建设以特高压电网为骨干网架的坚强国家电网，实现大容量、

远距离输电，建设安全、经济、高效和环境友好型电网。因此，我国发展特高压输电技术，必须结合我国电网的实际情况和发展趋势，认真研究，具体实践，走出一条适合中国国情的自主创新之路。

电力设备技术具有向下兼容性，高一级电压的设备对技术和工艺的要求更高，特高压输电技术处于电力技术的制高点。自主开发特高压输电技术及其设备，不仅有利于提升我国电网技术、电力设备制造技术和相关行业的技术装备水平，而且有利于国内电力设备制造企业在本土市场，乃至国际市场占据更大份额，使我国由电力大国变成电力强国和电力技术输出国。

我国采用特高压输电必须依靠自主创新，关键是结合中国电网发展需求，在更高的起点上发展特高压技术。

我国地域广阔，电网运行条件复杂，在特高压输电技术研究和工程实践上面临着更多的挑战。我国高海拔、重污秽、覆冰、高地震烈度等环境特点对设备材料、结构设计和施工提出了更高要求；大件运输、节省占地、满足环保要求都需要创新性设计；需要解决特高压电网无功和电压控制、超大规模电网的安全稳定控制等一系列确保电网安全稳定经济运行的技术难题。发展特高压电网，设备是关键。特高压电网的建设对于国内输电设备制造企业来说，既是发展机遇，同时也是对技术实力、工艺水平、生产能力和管理水平的一次检阅。特高压开关、套管等关键设备的国产化，对于促进电工制造业的跨越式发展和科技创新能力的提升具有重大战略意义，是努力提高自主创新能力的具体实践。此外，在特高压电网规划设计、试验研究、建设施工、运行维护等技术领域需要开展深入、系统的研究。因此，特高压电网建设必将是一个跨行业、系统性的创新工程。

建设特高压电网，是世界电网发展领域的一项崭新事业，处于电网科技发展的前沿。实现特高压输电技术的自主创新，不仅可以实现我国电网重大关键技术的突破，提高自主创新能力，也将使我国抢占

世界电网技术的制高点,提高核心竞争力,推动电力工业的可持续发展。

我国十分重视特高压输电技术的研究,把它作为特高压电网建设的关键环节,并强调自主创新是实现特高压电网建设的重要保证。从1986年开始,我国将特高压输电技术研究列入国家“七五”、“八五”和“十五”科技攻关计划,从跟踪特高压输电技术在国际上的发展,收集整理国际上的特高压研究成果,到结合我国具体工程充分论证特高压输电的可行性和开展特高压输电系统外绝缘特性试验研究,为特高压输电技术研究积累了宝贵的经验。我国西北750kV输变电国产化示范工程的顺利投产和成功实践,不仅充分展示了我国自主创新的能力,而且大大地提高了我国输变电设备的制造能力和水平,为特高压输电技术装备研发和应用创造了条件,增强了自主创新的信心。

国家电网公司十分重视特高压电网试验研究基础设施的建设,不断健全特高压输电技术试验手段,为科技创新提供良好的条件。1996年在原武汉高压研究所建成了我国第一段200m的特高压交流试验研究线路,用于开展特高压输电系统外绝缘性能 and 环境影响的研究;2004年在国网电力建设研究院建成特高压电网杆塔试验站,用于开展特高压电网杆塔、线路机械特性试验研究。目前,国家电网公司正在建设特高压交流试验基地和特高压直流试验基地,为更加系统地开展特高压输电系统电磁环境、外绝缘特性、电晕特性、带电作业等研究及特高压输电设备的长期带电考核提供必要的条件。

国家电网公司于2005年全面启动特高压关键技术研究工作,组织国内相关电力科研、规划、设计、运行、设备制造等单位,在借鉴、汲取国际上特高压输电经验和总结国内20多年研究成果的基础上,对特高压关键技术研究进行了全面、系统的规划,组织安排研究课题126项,课题范围涵盖了系统特性、电磁环境、外绝缘特性、过电压与绝缘配合、设备技术、试验技术、运行技术、施工技术等多个方面,充

分体现了国家电网公司对在建设特高压电网中发挥科技创新作用的高度重视,以及对建设特高压电网的科学严谨态度。

通过认真系统的研究,相继取得了一系列重要的创新性研究成果:

(1) 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,国家电网公司提出了我国特高压电网标准的建议,即交流特高压电网的标称电压为 1000kV,最高运行电压为 1100kV,提出我国特高压电网过电压水平及主要电气设备的绝缘水平,初步形成我国主要特高压输电设备的技术规范和技术标准。

(2) 为实现建设环境友好型特高压输变电工程的目标,确立了保持特高压交流输电的电磁环境影响指标限值与我国 500kV 输电工程相当的原则。研究表明,对于 1000kV 特高压单回输电线路,导线采用 $8 \times \text{LGJ—500}$ 及以上的分裂,导线最小高度在 15m 以上时,可听噪声不大于 55dB (A)、无线电干扰不大于 58dB ($\mu\text{V}/\text{m}$),完全满足相应的国家环保标准要求。提出的我国特高压输电工程电磁环境控制指标及工程环境影响评价报告,已获国家环境保护总局的批复同意。

(3) 特高压输电关键技术研究取得了重大突破。试验研究表明,对于以空气为主要绝缘的 1000kV 特高压输电线路,特高压输电系统外绝缘操作电压特性仅处在放电饱和曲线的初始阶段,并不是以往想象中的“增加空气间隙尺寸已不能满足线路空气绝缘的要求”。操作冲击电压所要求的铁塔最小间隙距离为 6.7m,工频电压所要求的铁塔最小间隙距离为 2.7m,以此为间隙圆所要求的铁塔塔头尺寸,在设计上不需要进行特殊的设计处理。根据绝缘子污秽特性的试验结果,二级污秽地区选用国内已开发制造的结构高度为 195mm、300kN 的瓷或玻璃绝缘子 54 片,三级及以上污秽地区选用国内已开发制造的特高压线路复合绝缘子,其结构长度为 10.5m。根据研究结果设计并加工的特高压输电线路铁塔(含绝缘子串及连接金具)顺利通过了电气特性试验,证明其完全能满足特高压工程的要求。另外,特高压输电无功和电压

控制研究、超大规模交直流互联电网安全稳定控制、过电压与绝缘配合、防雷技术、特高压交流和直流输电保护控制系统、多分裂导线综合防舞措施等研究成果已达到国际先进水平。

(4) 特高压输电设备国产化取得重大进展。目前,沈阳、西安、保定三家变压器制造公司已为特高压交流试验基地分别制造了一相 1000kV、40MVA 的变压器(其套管由西安电瓷公司制造),并通过了严格的型式试验;西瓷、抚瓷开发的 1000kV 避雷器采用 4 柱并联结构,由 5 个电气元件组成,均通过了型式试验,其保护特性及电气和机械性能达到国际先进水平。特高压变压器及其套管、避雷器和 CVT 等设备的研制成功,消除了以往认为“百万伏高电压设备的制造难度和成本太高,存在巨大的技术和经济风险”的担忧。特高压电抗器/可控电抗器、罐式断路器和 CVT 等特高压交流主设备,以及二次保护装置等特高压主设备,国内设备制造企业均已具备研制基础和生产能力。通过集成创新和引进消化再创新,重点攻克气体绝缘全封闭组合电器(GIS)开关,将逐步实现特高压输变电设备的全面国产化,为特高压工程建设奠定坚实基础。

研究表明,采用特高压输电在我国不仅技术上可行,完全满足电磁环境的要求和绝缘特性的要求,而且特高压电网的安全运行和特高压设备的国产化可以得到保证。

我国特高压交流试验示范工程正在紧锣密鼓的建设之中,各项科研项目经认真细致的试验研究,得到的创新性成果一方面验证了国际大电网组织(CIGRE)专题工作组,在综合分析各国对特高压技术的研究工作后指出“特高压技术没有难以克服的技术问题”的结论是正确的,更重要的是为我国特高压工程的实施提供了科学的、符合国情的、强有力的技术支撑,全部研究成果已用于特高压交流试验示范工程之中,为努力提高自主创新能力进行了卓有成效的实践。世界性的电力科技难题在中国,电力科技创新的动力在中国。立足自主创新,

我国完全有能力建成代表世界电力最高科技水平的特高压电网，为建设创新型国家，为世界高压输电领域作出中国应有的贡献。

二、特高压交流输电关键技术

我国发展特高压交流输电，主要定位于国家电网骨干网架的建设和跨大区联网。

特高压交流输电的主要技术特点：

(1) 特高压交流输电中间可以落点，具有网络功能，可以根据电源分布、负荷布点、输送电力、电力交换等实际需要构成国家特高压骨干网架。特高压交流电网的突出优点是：输电能力大、覆盖范围广、网损小、输电走廊明显减少。

(2) 随着电力系统互联电压等级的提高和装机容量的增加，等值转动惯量加大，电网同步功率系数将逐步加强。

(3) 特高压交流输电线路产生的充电无功功率约为 500kV 的 4 ~ 5 倍，为了抑制工频过电压，线路一般需要装设并联电抗器。

本套丛书针对以上这些技术特点，总结了我国从事特高压交流输电关键技术研究成果，是一套凝聚了我国电力科技工作者智慧的集体结晶。本次将要推出的是五个方面的研究成果，即《特高压交流输电系统外绝缘》《特高压交流输电系统过电压与绝缘配合》《特高压交流输电工程电磁环境》《特高压交流电气设备》和《特高压交流输电线路维护与检测》。

本书是《特高压交流电气设备》分册，共七章，主要介绍了特高压变压器、特高压并联电抗器、特高压电容式电压互感器、特高压电流互感器、交流特高压避雷器、特高压套管及交流特高压设备带电考核等方面的内容。第一章介绍了特高压变压器的基本结构、选型及试验；第二章介绍了特高压并联电抗器的特点、绝缘水平、结构，以及冷却、振动和噪声等；第三章介绍了特高压电容式电压互感器的设计原理及参数选择、结构要求及特性研究，并介绍了特高压标准电压互

感器设计方面的内容；第四章介绍了特高压电流互感器的参数设定、设计中需要注意的问题及现场检测，并介绍了新型电子式互感器的内容；第五章介绍了避雷器的结构、性能参数、试验及 GIS 罐式避雷器等有关内容；第六章介绍了特高压套管方面的内容；第七章介绍了交流特高压设备带电考核场的设计，以及特高压设备的考核模式的有关内容。

特高压输电是当代电力技术发展的重要阶段性标志。随着特高压电网的建设和运营，新的课题还将不断出现；随着特高压关键技术的突破，特高压输电技术必将不断完善和发展。

特 高 压 变 压 器

第一节 概 述

世界上能生产特高压变压器的国家不多，前苏联的 1150kV 变压器均由乌克兰扎布罗热变压器厂（ZIR）生产，乌克兰扎布罗热变压器所（VIT）协助研制，提供给当时正在兴建的哈萨克斯坦新西伯利亚特高压输变电工程。日本于 1996 年开始在新榛名变电设备试验场进行最高电压为 1100kV 的带电考核试验，其 3 套主设备分别为东芝公司、三菱公司和日立公司的产品。意大利国家电力局在 1980 年与巴西、阿根廷和加拿大等国的公司共同参与了国际联合组织的 1000kV 特高压输变电技术研究开发工作。兴建的特高压实验工程有两座联络变电站和 20km 长的线路，其 1000kV 特高压变压器均由 Ansaldo 公司 Milan 变压器厂生产。

在国内，特变电工、西安西电变压器有限责任公司、保定天威保变电气股份有限公司三大变压器厂按双百万的标准新建或扩建了生产车间和试验室，具备了特高压变压器的设计、制造和试验能力，并且已经为特高压交流试验基地研制了 1000kV 变压器。其中，特变电工与保定天威保变电气股份有限公司正在为特高压示范工程生产特高压变压器。

由于特高压变压器电压等级高、容量大，体积和重量都很大，因此特高压变压器的研制与 750kV 和 500kV 变压器相比存在很多不同。

不论是特高压试验基地用特高压变压器，还是示范工程用特高压变压器，都是在充分研究了以下关键技术后设计的：

- (1) 主绝缘的设计：绕组间主绝缘设计、500kV 端部绝缘设计、高压绕组纵绝缘设计、1000kV 出线及 500kV 端部出线设计；
- (2) 漏磁场分析、油箱及铁芯结构件屏蔽措施（防止局部过热）；
- (3) 绕组承受突发短路的能力；
- (4) OFAF 冷却方式下的绕组温升控制；
- (5) 预防油流放电；
- (6) VFTO 问题研究；
- (7) 关键组部件的选用；
- (8) 变压器运输。

第二节 特高压变压器基本结构

一、特高压交流试验基地用特高压变压器结构

特高压交流试验基地的 3 台特高压变压器分别由特变电工沈阳变压器集团有限公司（简称沈变）、西安西电变压器有限责任公司（简称西变）和保定天威保变电器股份有限公司（简称保变）设计制造。这 3 家变压器在设计、结构上各不相同，具有很强的代表性。图 1-1 为特高压交流试验基地用特高压变压器的外观照片。

沈变设计制造的特高压变压器，铁芯为单相四柱式铁芯，采用优质高导磁、低损耗、晶粒取向冷轧硅钢片叠积。全斜接缝，粘带绑扎结构。两芯柱套绕组，高压绕组两柱串联，可以有效降低饼间工作电压。低压绕组两柱并联。绕组排布从内而外依次为 A 柱：铁芯—低压 1 绕组—高压 1 绕组；X 柱：低压 2 绕组—高压 2 绕组—调压绕组。高压 1 绕组为纠结连续式，高压 2 绕组为连续式，低压两柱绕组均为连续式，采用自粘换位导线绕制，调压绕组为螺旋式。额定分接时，两柱各 50% 容量。两柱器身均采