

国家电网公司



STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

特高压交流输电技术

研究成果专辑

(2011年)

主 编 刘振亚



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压 交流 输电技术

研究成果专辑

(2011年)

主 编 刘振亚

副主编 郑宝森 舒印彪 帅军庆



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书系统介绍了 2011 年度国家电网公司完成的 36 项特高压交流输电技术课题和单项专题的研究成果。

本书共分 6 章,第 1 章概述了 2011 年度特高压交流输电技术主要研究成果,第 2 章为特高压交流输电系统技术研究,第 3 章为特高压交流工程设计专题研究,第 4 章为特高压交流设备研制,第 5 章为特高压交流工程施工技术研究,第 6 章为特高压交流工程调试与运行技术研究。

本书可供从事特高压交流输电规划、设计、科研、工程建设等方面的技术人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

特高压交流输电技术研究成果专辑. 2011 年 / 刘振亚主编. —北京: 中国电力出版社, 2012.11

ISBN 978-7-5123-3572-1

I. ①特… II. ①刘… III. ①特高压输电-交流输电-输电技术-研究 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 236535 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 12 月第一版 2013 年 4 月北京第三次印刷
880 毫米×1230 毫米 16 开本 21.25 印张 407 千字
印数 6201—7200 册 定价 120.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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



前 言

国家“十二五”规划纲要指出，我国将加快现代电网体系建设，发展特高压等大容量、高效率、远距离先进输电技术。“十二五”期间，国家电网公司规划建设以特高压交流为骨干网架的“三华”同步电网，线路长度超过 2 万 km、变电容量约 2.6 亿 kVA，可支撑中东部地区受入电力约 2 亿 kW。加快推进特高压电网工程建设，提升能源资源在全国范围内优化配置能力，对于构建稳定、清洁、安全、高效的能源供应体系，保障国民经济健康可持续发展具有重大意义。

2011 年 12 月 16 日，1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程扩建工程正式投入运行，调试期间最大输送功率达到 5720MW，完全具备了稳定输送 5000MW 电力的能力，充分验证了特高压大容量、远距离、低损耗输电的优势，成为世界上运行电压最高、输送容量最大、技术水平最先进的交流输电工程。截至 2011 年底，试验示范工程累计送电超过 270 亿 kWh，成为我国南北方向重要的能源输送通道，有效促进了节能减排和能源资源优化配置，显著提升了特高压输电在国家能源战略中的地位和作用。

为满足安徽两淮煤电基地电力安全可靠送出和长三角地区用电增长需要，国家发展和改革委员会于 2011 年 9 月批准建设 1000kV 皖电东送淮南—上海特高压交流输电示范工程。该工程为世界首个同塔双回路特高压交流输电工程，同时也是特高压交流输电技术规模化应用的标志性工程。工程于 10 月正式开工建设。截至 2011 年底，线路基础完成近 10%，变电

站场平按里程碑计划有序推进。

回顾特高压交流输电的发展历程，国家电网公司依托重大工程建设，始终坚持科研为先导，联合国内设计、设备等单位，加大科研投入力度，建立完善的试验研究体系，形成创新合力，全面开展关键技术和设备研制，现已在电压控制、外绝缘配置、电磁环境控制、系统集成、试验检测和设备制造六大方面实现全面突破。扩建工程的成功投运和皖电东送工程的开工建设，标志着我国已全面掌握特高压交流输电核心技术，完全具备大规模推广应用的技术基础。

长期以来，国家电网公司注重科研成果的总结与完善，组织相关科研、设计、咨询、设备和高等院校等单位，按年度编写出版《特高压交流输电技术研究成果专辑》。本书是继《特高压交流输电技术研究成果专辑》2005年版至2010年版之后，对2011年特高压交流输电技术主要研究成果的回顾和总结，系统介绍了其中36项研究成果，主要包含特高压交流输电系统技术、工程设计、设备研制、施工技术和调试与运行等方面研究，是全体参与特高压交流输电科研攻关和工程建设人员集体智慧的结晶。本书可帮助读者全面了解2011年度特高压交流输电技术研究取得的成果和进展情况，并为读者深入了解特高压前沿问题提供指引。

一年来，特高压输电技术研究的参与者付出了辛勤劳动，换来了累累硕果，承担研究任务的单位全力以赴，攻坚克难，圆满完成了任务，在此表示衷心感谢，并藉此向为本书编辑出版提供支持和帮助的单位和个人致谢！

国家电网公司

2012年10月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
第 1 节 特高压交流工程建设工作回顾	2
第 2 节 特高压交流输电技术主要研究成果概要	6
第 2 章 特高压交流输电系统技术研究	14
1 特高压交流工程特快速瞬态过电压抑制措施应用	15
2 特高压串补对系统电磁暂态特性的影响	21
3 特高压输电系统加装串补继电保护的适应性研究及 试验验证	31
4 特高压串补装置的防雷保护	39
5 特高压交流同塔双回线路应用电气几何模型的适应性 与改进思路研究	49
第 3 章 特高压交流工程设计专题研究	58
1 特高压交流工程环境影响报告书编制中关键问题	59
2 特高压交流工程水土保持方案报告书编制中关键 问题	66
3 特高压交流同塔双回线路相序优化	72
4 特高压交流工程钢管塔典型构件微风振动起振临界 风速计算方法	81
5 特高压交流工程钢管塔结构体系有限元分析	90
6 多分裂导线体型系数风洞试验及确定方法	96

7 特高压交流工程耐张塔电磁环境控制措施	105
8 特高压交流工程铝合金导线应用	120
第4章 特高压交流设备研制	131
1 特高压串补关键技术条件	132
2 特高压串补装置用电容器绝缘性能及质量控制措施研究	140
3 特高压串补平台相间空气间隙放电特性研究	148
4 特高压串补连接回路抗震性能分析	153
5 特高压串补用金属氧化物限压器研制	161
6 特高压串补用旁路开关研制	167
7 特高压串补用旁路隔离开关研制	176
8 特高压串补用控制触发型火花间隙研制	182
9 特高压串补用光纤柱研制	190
10 特高压串补用阻尼装置研制	196
11 特高压 4500MVA 大容量变压器研制	203
12 特高压变压器用国产高压出线装置绝缘裕度试验研究	211
13 特高压可控并联电抗器研制	222
14 特高压 63kA 断路器的容量试验方法研究	232
15 特高压钢管塔研制	241
第5章 特高压交流工程施工技术研究	249
1 特高压交流串补平台安装技术研究	250
2 特高压交流工程新型轻载式载人登塔装备研制	259
3 特高压钢管塔大扭矩螺栓紧固扳手研究	267
4 特高压交流工程施工技术安全风险管理研究	275
第6章 特高压交流工程调试与运行技术研究	282
1 特高压交流试验示范工程扩建工程系统调试	283
2 特高压交流试验示范工程隔离开关带电操作调试研究	299
3 华北与华中特高压联络线功率控制研究	313
4 特高压交流试验示范工程变电一次设备运行状态评估	322

2011

特高压交流输电技术研究成果专辑



第 1 章

概 论



第 1 节 特高压交流工程建设工作回顾

2011 年，国家电网公司坚持“科研为先导、设计为龙头、设备为关键、建设为基础”的工作方针，以建设“安全可靠、自主创新、经济合理、环境友好、国际一流精品工程”为目标，全面完成了特高压交流工程建设年度工作任务。1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程扩建工程（简称扩建工程）年底成功建成并投运；1000kV 皖电东送淮南—上海特高压交流输电示范工程（简称皖电东送工程）获得核准并全面开工建设；锡盟—南京工程、淮南—南京—上海等后续特高压交流工程前期工作积极推进；关键技术深化研究取得重要成果，新设备研制取得重大突破，特高压交流输电技术进入加快推广应用的新阶段。

一、扩建工程建成投运

为充分发挥特高压大容量、远距离、低损耗的输电优势，进一步提高华北和华中两大电网之间的资源优化配置能力，特高压交流试验示范工程扩建工程于 2010 年 12 月 29 日获得国家发展和改革委员会核准，2011 年 1 月 6 日开工建设，12 月 16 日正式投运。工程在长治、荆门站各扩建一组 3000MVA 特高压变压器，南阳站扩建两组 3000MVA 特高压变压器，配套建设开关等其他一、二次设备。晋东南—南阳段线路装设 40%串补，分散布置在长治和南阳两站，每站 20%。南阳—荆门线路装设 40%串补，集中布置在南阳站。投运后，工程具备稳定输送 5000MW 电力的能力。

扩建工程采用的特高压串补装置、63kA 特高压断路器以及双柱特高压变压器等设备均为世界首次研制，需要实现新的技术突破，技术创新难度大。工程需采用特高压串补装置 3 套、特高压变压器 12 台、特高压断路器 11 个间隔，数量比特高压交流试验示范工程翻一番，技术水平高、制造难度大，对设备供货能力和批量生产的质量稳定性提出了严格要求。工程建成后连接华北、华中两大区域电网，输电能力达 5000MW，必须具备与送电规模相适应的安全可靠性，确保万无一失。

在深入总结特高压交流试验示范工程建设运行经验的基础上，工程建设以科研结论为支撑，采用联合设计、集中攻关的模式，攻克了加装串补后的大容量特高压交流输电系统集成技术，实现了设计方案最优化。全面优化了站区和电气总平面布置，实现了技术和经济的有机统一。开展了全场域电场计算分析，结合真型设备电晕试验，掌握了大型复杂电极的电晕特性，严格控制了电极表面场强和变电站空间场强，实现了环境友好目标。开展了变电站全场域抗震计算分析，结合设备真型抗震试验，实现

了工程七度设防的抗震要求。设计过程中,试行模块化和标准化设计,建立了设计监理与考核工作机制,提高设计校审等级,保证了设计成品的高质量。

针对建设周期短、建设与运行交叉界面多等特点,工程建设以里程碑计划统领全局,以风险管理为抓手,严格控制安全和质量,周密策划、科学组织,推行标准化工艺,追求最高施工安装质量,高质量完成建设,高标准通过验收,实现了一次成优,实现了安全零事故目标。特高压串补平台长 27m、宽 12.5m、高 11.2m,吊装重量 70t,工程所有 12 个平台均按照“高度偏差小于 2mm,垂直度偏差小于 10mm”的要求一次吊装成功,创造了大型设备施工安装的典范。工程所有 12 台特高压变压器以及所有 11 个间隔的特高压断路器、14 个间隔的 500kV 开关均一次安装成功、一次试验成功,实现了最高安装质量。

工程建设坚持全面严格考核的原则,开展了投切变压器、投切线路、投切开关、投切低压电容器/电抗器以及特高压串补试验、联网试验、人工单相接地短路试验、大负荷试验等 39 大项系统调试,以及电磁暂态过程、电磁环境干扰等 11 大类测试。调试过程中,对特高压联网系统的电压、电流、频率、潮流和相角进行了实时监控,对工程设备和输电线路的电、磁、热及噪声、振动、色谱等参数进行了连续测量,系统运行平稳、设备状态正常,过电压、电磁环境等各项性能指标完全符合预期。工程成功经受了人工短路严重故障的考验,控制保护等二次系统动作正确,成功实现了 0.7s 内的单相重合闸。工程成功进行了大负荷试验,在单回 640km 特高压交流线路上,实现了稳定输送 5000MW 的电力,创造了高压交流输电能力的世界纪录。

二、皖电东送工程开工建设

皖电东送工程是世界首个同塔双回路特高压交流输电示范工程,工程建设可满足安徽两淮煤电基地电力安全可靠送出和长三角地区用电增长需要。工程起于安徽淮南变电站,经皖南变电站、浙北变电站,止于上海沪西变电站,变电容量 21 000MVA,线路全长 656km,全线采用同塔双回路架设。工程于 2011 年 9 月 27 日获得国家发改委核准,10 月开工,计划 2013 年底建成投运。

与特高压交流试验示范工程相比,皖电东送工程共需特高压主变压器 21 台、高压电抗器 24 台、GIS 开关 33 台,钢管塔 1421 基、塔材重约 26 万 t,主设备及材料供货压力大。作为首个同塔双回路示范工程,钢管塔全部采用带颈法兰和对接焊连接形式,加工精度、焊缝等级等技术要求远高于常规钢管塔,钢管塔研制难度很大。工程全线杆塔尺寸均与常规工程大跨越塔相似,塔材小运、堆放和组塔难度均显著高于常规工程和试验示范工程。华东地区河网泥沼密布,浙北站位位于山地,沪西站位位于鱼塘河网地带,工程施工难度大。

钢管塔供货按照全过程质量管控的原则,建立了塔与其关键原材料(含带颈法兰、



直缝焊管 8.8 级、高强螺栓)的生产技术标准体系。开展了钢管塔及关键原材料的监造大纲和实施细则的编制工作,对带颈法兰和对接焊两个关键环节的质量监督引入了第三方检验,建立了驻厂监造、原材料延伸监造、第三方检验、关键点见证和专家巡检相结合的监造体系。组织开展了钢管塔焊接技术培训、焊工技能竞赛和焊接自动生产线操作培训,推动了塔厂焊接技术水平进一步提升。

工程建设采用统筹协调、集约管控,总部和分部一体化运作,直属公司专业化和省公司属地化优势相结合的管理模式。10月19日,工程建设动员大会召开,标志着工程全面开工,至2011年底,线路基础完成10%,变电站场平按里程碑计划有序推进。

三、关键技术深化研究取得重要成果

针对扩建工程加装串补的特点,系统开展了特高压串补基本设计、过电压与绝缘配合、开关暂态恢复电压特性(TRV)、特快速暂态过电压(VFTO)测量与控制、潜供电流、电磁环境、大型复杂电极操作冲击放电特性、抗地震技术、串补平台施工技术、大电网运行控制技术等73项关键技术攻关,取得了新突破。开展了特高压系统的电磁暂态、控制保护和带串补互联系统运行特性的仿真分析,平台仿真计算结果与工程实际测试结果高度吻合。在世界上首次进行了大型复杂电极长波前操作冲击放电试验研究,获得了串补平台真型电极相间、相地空气间隙在1000 μ s长波前操作冲击电压下的放电特性曲线。建立了世界首套特高压GIS设备VFTO试验平台及252kV GIS设备VFTO电弧特性研究平台,开展了大规模仿真计算和试验研究,在世界上率先掌握了特高压系统VFTO的幅值水平、概率分布和波形特征,掌握了VFTO作用下隔离开关的击穿规律、弧阻特性和熄弧规律,为工程设计、设备研制和建设运行奠定了坚实基础。

针对皖电东送工程首次采用钢管塔双回路架设的特点,全面开展了雷电防护差异化设计、杆塔结构深化研究等关键技术攻关。依托关键技术研究成果,启动了铁塔优化设计工作,杆塔重量指标降低约10%,取得了显著经济效益。组织完成了钢管塔重型构件河网地区运输方案、同塔双回钢管塔组立及螺栓紧固大扭矩电动扳手等关键施工技术研究。研究编制了钢管塔运输、组立共15项重大典型化施工方案。

四、特高压交流新设备研制取得重大突破

针对扩建工程及后续特高压工程设备研制的新需求,在国家电网公司全面主导下,立足国内、自主创新,产学研用联合攻关,全面推进特高压新设备研制。

2011年5月,特高压串补电容器组、控制保护、平台及其支撑系统等全部设备通过型式试验。旁路开关、旁路隔离开关、火花间隙、限压器、阻尼装置、支柱绝缘子等关键设备均为世界首次研制,性能指标达到国际最高水平。电容器的预期年故障率

从常规产品的千分之几降低到万分之三以内。火花间隙短时耐受电流高达 63kA、峰值耐受电流高达 170kA。旁路开关实现了 30ms 的快速合闸,通流能力达到 6300A,能可靠关合 160kA 高频电流,达到国际同类设备的最高水平。扩建工程竣工后,特高压串补设备在 12 月通过了系统调试,经受了人工接地短路、500 万 kW 大负荷试验和 168h 试运行的严格考核,实现了科研攻关、工程设计、设备选型、设备研制、成套设计、安装调试和调度运行的全面自主化。

2011 年 3 月,在双柱 1000kV/1000MVA 特高压自耦变压器通过型式试验的基础上,1000kV/1500MVA 特高压自耦变压器样机优化方案通过审查,4 月审定设计方案,5 月正式开始制造。在生产过程中国家电网公司多次组织专家进行检查。11 月审定样机试验方案。12 月 4 日,样机一次通过型式试验考核,标志着我国成功研制目前世界上电压最高、容量最大的电力变压器,代表了国际同类设备制造最高水平。

五、后续特高压交流工程前期工作积极推进

锡盟—南京特高压交流工程专题评估工作基本完成,取得了工程环评、水保和用地预审批复意见。淮南—南京—上海、蒙西—长沙特高压交流工程环评、水保报告已具备送审条件。积极推进雅安—皖南、靖边—连云港、浙北—福州等后续工程前期专题评估工作。努力开展特高压前期专题评估关键技术深化研究。结合特高压工程特点,完成特高压工程环评、水保报告关键问题编制规范研究,为特高压工程前期专题评估报告的标准化、规范化编制奠定基础。

六、特高压交流输电标准化及知识产权工作稳步开展

2011 年,按照科研攻关、工程建设、标准化和知识产权工作同步推进的思路,稳步、有序开展标准化及知识产权工作,发布《1000kV 变电站设计规范》、《1000kV 架空输电线路设计规范》等 5 项国标和《1000kV 变电站运行规程》、《1000kV 油浸式变压器、并联电抗器检修导则》等 7 项行业标准,累计发布国家标准 21 项,行业标准 8 项。25 项标准通过送审稿审查,17 项具备审查条件,6 项正在征求意见。特高压交流输电标准体系的全部 77 项标准已经全部完成主要编制工作,为特高压输电技术推广应用奠定了坚实基础。

至 2011 年底,获得“一种特高压张力架线的方法”等专利授权 38 项,申报 66 项,累计受理 497 项,获授权 350 项。



第2节 特高压交流输电技术主要研究成果概要

为适应特高压电网不断发展的需要,国家电网公司持续推动技术创新,通过系统性的研究攻关,在特高压交流输电技术上取得了持续突破。开展了特高压交流输电系统、设计、施工、调试和运行等方面的技术研究,成功研制了特高压大容量变压器、特高压串补等一批特高压新设备,巩固扩大了我国在特高压交流设备和关键技术领域的领先优势,为进一步提升后续工程建设水平创造了更加有利的条件。

一、特高压交流输电系统技术研究

1. 特高压交流工程特快速瞬态过电压抑制措施应用

特高压输电系统 GIS 的雷电冲击耐受电压与特快速瞬态过电压(VFTO)间的裕度减小,需要研究 VFTO 的抑制措施。本研究对特高压隔离开关通过装设阻尼电阻来限制 VFTO 的方法和使用效果进行了研究,提出了在满足 VFTO 限制要求的前提下,结合设备制造、经济性等方面因素综合选取其阻值的方法,并对 MOA、磁环等抑制措施进行了分析。

2. 特高压串补对系统电磁暂态特性的影响

特高压输电工程采用串联补偿装置后,需要研究其对稳态沿线电压分布、单相重合闸过程中的潜供电流、断路器瞬态恢复电压、线路工频过电压和操作过电压、合空载变压器谐振过电压等电磁暂态特性的影响。依托扩建工程,完成了串补对上述电磁暂态特性影响的研究。研究表明,系统增加串补设备后,在一些故障条件下线路断路器瞬态恢复电压(TRV)峰值较高,需研制具有高幅值 TRV 耐受能力的断路器。串补对其他电磁暂态特性影响较小,不影响系统的安全运行。

3. 特高压输电系统加装串补继电保护的适应性研究及试验验证

特高压串补的应用改变了线路参数沿线分布的均匀性,串补本体保护的動作又使线路故障时出现变结构与变参数现象,增加了继电保护故障判断的复杂性与难度,需要研究现有保护装置对带串补特高压系统的适应性。依托扩建工程,提出了特高压串补物理模型,建立了带串补特高压动态模拟系统及数字仿真系统,研究了带串补特高压系统的电气特性及对继电保护装置的影响,并对 1000kV 线路保护、串补控制保护进行动模试验验证。试验研究结果为我国带串补特高压输电系统线路保护、串补控制保护系统的设计、配置方案及装置研制提供了重要技术依据,对确保现场调试和投运的顺利进行具有重要意义。

4. 特高压串补装置的防雷保护

串补装置装设在串补平台上,设备高度相对较高,需对变电站避雷器布置是否满足防雷保护要求进行研究。本研究对串补装置的直击雷防护和雷电侵入波的防护措施进行了仿真计算。研究表明,特高压长治站和南阳站串补装置在线路侧安装避雷器后,变电站在单线双变、单线单变和启动方式下,串补及变电站设备的安全运行年满足标准要求,而且有所提高。

5. 特高压交流同塔双回线路应用电气几何模型的适应性与改进思路研究

针对日本特高压交流同塔双回输电线路采用经典电气几何模型(EGM)计算得到的绕击率与实际观测数据存在较大差异的问题,提出了一种特高压交流同塔双回线路应用 EGM 计算雷电绕击特性的改进思路。研究结果对改进我国特高压交流同塔双回线路雷电绕击性能计算方法,提高防雷性能评估水平具有重要意义。

二、特高压交流工程设计专题研究

1. 特高压交流工程环境影响报告书编制中关键问题

特高压交流工程输送距离长,所经区域自然环境复杂,在编制工程环境影响报告书时,不同评价单位提交的报告内容深度不一。通过对现有环境保护法律法规、标准、规范和特高压交流工程设计及施工规范、导则的梳理,提出环境保护目标、工程分析、声环境、电磁环境、生态环境、拆迁、公众参与等关键问题的编制规范,明确特高压交流工程环境影响报告书的内容和深度,有助于提高环境影响报告书的编制质量和工作效率。

2. 特高压交流工程水土保持方案报告书编制中关键问题

特高压交流工程输送距离长,所经区域水土流失因子复杂多变,在编制工程水土保持方案报告书时,不同编制单位提交的报告内容深度不一。通过对现有水土保持法律、法规、标准、规范和特高压交流工程设计及施工规范、导则的梳理,提出占地面积、土石方量及流向、直接影响区范围、主体工程水土保持分析与评价、水土流失预测时段及预测参数、防治措施布设等关键问题的编制规范,明确特高压交流工程水土保持方案报告书的内容深度,有助于提高水土保持方案报告书的编制质量和工作效率。

3. 特高压交流同塔双回线路相序优化

交流同塔双回线路可有多种相序排列方式,各有优缺点。1000kV 同塔双回线路采用何种相序排列方式更优,须从电磁环境、电晕损失、线路参数的不平衡度、潜供电流与恢复电压、感应电压和感应电流、线路实施方案等方面综合考虑。通过对几种典型的特高压杆塔进行研究,指出逆相序有利于限制潜供电流,地面场强也较低,无线电干扰、可听噪声与电晕损失影响不大。综合考虑后,在一般情况下特高压同塔双回线路建议采用逆相序排列方式。考虑采用异相序或同相序时,须研究采取相应附



加措施。

4. 特高压交流工程钢管塔典型构件微风振动起振临界风速计算方法

由于钢管塔的节点形式多样,与一般线路杆塔结构具有不同的端部约束条件,需要对微风振动起振临界风速的计算方法进行研究。本研究针对两端固接、两端铰接、一端固接一端铰接以及悬臂等多种钢管塔杆端约束条件,提出钢管塔构件微风振动起振临界风速的近似简化算法,计算结果与设计技术规定给出的一阶起振临界风速 V_{cr} 曲线结果一致,并完善了曲线的边界条件。通过自振频率试验,对典型插板连接型式(I、T、C、U、+)五种典型插板连接钢管构件的端部约束条件进行了测定,对构件的起振临界风速进行了风洞试验研究,提出了典型插板连接钢管构件微风振动起振临界风速的工程计算方法。

5. 特高压交流工程钢管塔结构体系有限元分析

皖电东送工程全线采用钢管塔,平均高度超过100m,精确分析典型结构构件受力状况,总结大型钢管塔结构受力特点,对钢管塔结构设计具有重要意义。本研究采用梁杆混合单元模型,对皖电东送工程5基典型钢管塔结构体系进行有限元分析,研究了弯矩对主材受力的影响,从结构布置形式上对弯矩影响进行了优化分析。研究结果为特高压钢管塔结构设计优化提供技术依据。

6. 多分裂导线体型系数风洞试验及确定方法

特高压输电线路采用了多分裂导线后,计算风荷载时子导线之间的屏蔽效应越来越明显,如何选取导线体型系数(也称阻力系数)影响线路的风荷载计算。通过对多分裂导线的风洞试验,提出体型系数的确定方法。试验表明,计算的风荷载比现行规范计算结果降低15%,可以节约工程造价。

7. 特高压交流工程耐张塔电磁环境控制措施

皖电东送工程特高压同塔双回耐张塔跳线结构复杂,金具类型多样,容易产生电晕噪声和无线电干扰等问题。本研究对皖电东送同塔双回耐张塔刚性跳线及金具等部位进行电位、电场分布计算,提出进一步优化跳线及金具的结构型式和跳线连接方式,改善跳线及金具的电晕现象,提高特高压交流东送工程新型同塔双回耐张塔的运行可靠性。

8. 特高压交流工程铝合金导线应用

铝合金芯铝绞线及中强度全铝合金绞线可减少线路损耗,工程应用时,还需要确定导线的规格与参数,并对其特性进行研究及试验验证。研究表明,两种铝合金绞线外径及拉重比相当,但直流电阻减小近3%,使得年费用有所降低;提出两种新型导线的技术条件,通过试验研究及型式试验表明,导线性能满足特高压交流工程的要求;完成了两种铝合金绞线配套的耐张线夹及接续管优化研究,试制的金具通过了握力、电阻、温升及热循环试验,满足相关技术条件要求;针对 JL/LHA1-465/210-42/19

及 JLHA3-675-61 导线, 完成了配套的耐张线夹、接续管的压接工艺研究, 编制了压接工艺导则。

三、特高压交流设备研制

1. 特高压串补关键技术条件

特高压串补的研制应用为世界首次, 为提高串补工程的经济性和安全可靠, 宜根据工程情况合理确定串补额定参数等关键技术条件。依据扩建工程, 阐述了确定特高压固定串补技术参数及规范的方法及原则, 提出了串补度、串补电容器额定电流、串补额定容量及串补的安装位置等串补的基本参数, 提出了串补装置基本设计原则、各主要元件设计要求和性能要求, 为串补装置技术规范的制定提供了技术依据。

2. 特高压串补装置用电容器绝缘性能及质量控制措施研究

由于串补装置电容器用量大, 为降低电容器的故障率, 提高串补装置整体的运行可靠性, 对近几年国内高压电容器的运行状况和主要制造厂的生产工艺水平进行了调研分析, 研究了电容器绝缘性能和质量控制技术, 给出了特高压串补装置用电容器的绝缘设计取值和质量控制要求, 研究结果有助于提高特高压串补装置的整体质量。

3. 特高压串补平台相间空气间隙放电特性研究

特高压串补装置为世界上首次研制, 其串补平台相间距离的确定缺乏相应的参考和依据, 须对串补平台的相间空气间隙放电特性进行研究, 为特高压串补装置平台布置设计提供依据。通过特高压模拟串补平台相间操作冲击放电试验, 获得了模拟串补平台相间在 1000s 长波前时间操作冲击电压下的放电特性曲线, 提出了特高压串补平台最小相间距离, 为特高压串补平台相间距离设计提供了指导。

4. 特高压串补连接回路抗震性能分析

特高压串补连接回路由不同的设备通过各种形式的金具与管形母线连接, 设备之间的连接方式及各设备动力特性均对整体回路系统的抗震性能有一定影响。依托扩建工程, 采用符合实际情况的单元形式的组合模拟回路系统, 确立了回路系统的建模原则、抗震性能分析的边界条件及荷载组合方式; 根据特高压设备的重要性, 对特高压串补连接回路系统进行了抗震、抗风力学性能分析, 指出支柱绝缘子为回路系统的最薄弱部位, 最大应力发生在支柱绝缘子根部; 形成统一的抗震安全评估标准, 对串补回路进行了整体抗震安全评估, 为回路系统的抗震设计提供参考依据。

5. 特高压串补用金属氧化物限压器研制

特高压串补装置的限压器还没有研制先例, 更没有工程应用经验。限压器研制的难度主要在于电阻片的配组, 使其在限压过程中流过各非线性电阻片柱的电流尽可能一致。在超高压串补用限压器研究工作的基础上, 研制了瓷套和复合外套两种外套形式的限压器, 均通过了 63kA/0.2s、800A/1s 压力释放试验的考核, 均流性能好, 电流



分布系数不大于 1.03, 满足工程需求。在特高压中线扩建工程中, 特高压串补装置采用了单节式瓷套限压器, 通过了人工短路试验并投入运行。

6. 特高压串补用旁路开关研制

特高压串补用旁路开关用于投入和退出串补装置, 尤其是在线路或串补设备故障等紧急情况下快速退出串补装置, 是串补装置的关键控制和保护设备, 国内外均没有现成产品可供选用, 需要开展研制工作。本研究研制出 SF₆ 瓷柱式特高压旁路开关, 绝缘水平高, 通流能力强, 动作速度快, 机械寿命长, 可靠性高, 开断和关合能力强。研制的特高压旁路开关成功投入特高压中线扩建工程运行, 满足了串补装置的使用要求, 技术性能优异, 运行稳定可靠。

7. 特高压串补用旁路隔离开关研制

特高压串补装置旁路隔离开关用于辅助投入和退出串补装置, 是串补装置中的重要控制设备, 国内外均没有现成产品可供选用, 需要开展研制工作。本研究提出并实现大幅提高敞开式隔离开关转换电流开合能力的方法, 成功研制出三柱水平断口旋转翻转式特高压旁路隔离开关, 整体结构强度高, 操作平稳, 触头通流能力强。研制的旁路隔离开关已随特高压串补装置投入特高压中线扩建工程运行, 满足了串补装置的使用要求, 技术性能优异, 运行稳定可靠。

8. 特高压串补用控制触发型火花间隙研制

特高压串补火花间隙与 500kV 串补的相比, 额定电压更高, 通流容量更大, 面临更为复杂的电磁环境, 对绝缘恢复性能提出了更高的要求。在 500kV 串补火花间隙研制的基础上, 成功研制双主间隙串联和三主间隙串联两种结构的控制触发型火花间隙, 试验验证了火花间隙动作后的绝缘恢复能力, 满足性能要求, 触发控制系统具有极强的抗电磁干扰能力, 通过了各项电磁兼容试验的考核。工程采用了双主间隙串联结构的火花间隙, 并通过了人工接地短路试验, 动作正确、工作正常。

9. 特高压串补用光纤柱研制

光纤柱是串补装置的重要设备之一, 其绝缘水平与平台支柱绝缘子一致, 特高压串补用光纤柱既没有研制先例, 更没有工程应用经验。在超高压串补用光纤柱研制的基础上, 对特高压串补用光纤柱的结构形式、绝缘设计、光路设计、电场分布等关键技术进行了研究, 并对光纤柱的绝缘性能、机械性能、密封性能等进行了试验考核。研制的光纤柱已通过了定型试验, 并在特高压串补工程中得到应用。

10. 特高压串补用阻尼装置研制

特高压串补阻尼装置电压高、容量大, 国内外均没有现成产品, 需要开展研制工作。本研究研制出多芯体结构复合外套阻尼电阻器, 采取多柱氧化锌阀片串联电阻均流技术, 均流性能优异, 通过放电电流及能量耐受试验验证了设备的可靠性。研制的