

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

(2012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

(2012年)

主 编 刘振亚

副主编 舒印彪 郑宝森 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 2012 年度国家电网公司完成的 41 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 5 章,第 1 章概述了 2012 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。

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. 2012 年 / 刘振亚主编. —北京: 中国电力出版社, 2014.5

ISBN 978-7-5123-5318-3

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 (2013) 第 293804 号

审图号: GS (2014) 338 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

*

2014 年 5 月第一版 2014 年 5 月北京第一次印刷
880 毫米×1230 毫米 16 开本 24.75 印张 475 千字
印数 0001—3000 册 定价 140.00 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



STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

编写人员名单

主 编	刘振亚				
副 主 编	舒印彪	郑宝森	帅军庆		
编委会成员	孙 昕	陈维江	田 璐	韩先才	王益民
	刘 博	李 正	文卫兵		
编写组组长	孙 昕	陈维江	田 璐	韩先才	
编写组副组长	王绍武	王怡萍	袁 骏	毛继兵	孙 岗
	陈海波	邱 宁	丁 锐	宋 倩	丁 雁
编写组成员	白凤春	班连庚	常建伟	陈 允	陈 健
	陈龙元	仇宇舟	崔 翔	崔博源	崔景春
	党镇平	董四清	杜 宁	冯万兴	高 飞
	葛 栋	龚钢军	谷 琛	谷山强	关永刚
	郭 军	韩 彬	韩亚楠	何 斌	何 剑
	何嘉希	贺 虎	侯 镭	胡 伟	黄 平
	黄瑞平	黄伟中	黄显昌	霍 锋	郎福堂
	李 博	李柏青	李光范	李金忠	李启盛
	李志兵	梁 冬	刘 龙	刘 鹏	刘 臻
	刘成柱	刘建锋	刘雪丽	卢建利	卢铁兵
	鲁先龙	陆家榆	逯 遥	吕 铎	罗本壁

苗峰显	闵 绚	缪 谦	莫 娟	南 敬
倪 园	倪向萍	聂 峰	聂 琼	聂任员
裴春明	彭宗仁	乔振宇	秦 剑	秦晓辉
任大伟	任玉锁	邵瑰玮	施毅舟	苏荣臻
苏秀成	宿志一	孙德新	孙健涛	汤 浩
汤 霖	汤祖澎	田 浩	万建成	王 韬
王 晰	王 歆	王 炎	王 咏	王保山
王承玉	王国俊	王红雨	王景朝	王力争
王小松	王银顺	王志强	王志勇	魏劲容
文志科	吴光亚	吴玉坤	伍志荣	夏拥军
项祖涛	肖贵成	谢辉春	谢雄杰	熊 易
徐德录	徐国庆	许佐明	杨 山	杨 熙
杨大业	杨文智	印永华	于昕哲	张 健
张 磊	张 锐	张 霞	张翠霞	张建功
张润理	张书琦	张亚迪	张业茂	张媛媛
张月华	章 涵	赵 淳	赵志刚	郑 彬
周 兵	周 军	周佩朋	周勤勇	周永利
邹 俊				

前 言

党的十八大报告中明确提出，实现电力长期安全可靠供应，保障全面小康社会建设对能源和电力的需求。国家电网公司坚持走中国特色的电网发展道路，加快实施“一特四大”战略。自 2004 年提出建设特高压电网以来，坚持走自主创新道路，实现了一系列重大突破。特别是公司自主建设的 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程和向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程的建成投运和稳定运行，全面验证了特高压的可行性、安全性、经济性和优越性。

2012 年，“特高压交流输电关键技术、成套设备及工程应用”荣获国家科学技术进步奖特等奖，这是党和国家对特高压创新成果给予的最高褒奖，也是我国电工领域在国家科技奖上获得的最高荣誉，标志着代表国际高压输电最高水平的特高压交流输电技术已经成熟，为特高压交流输电大规模应用打下了坚实基础。淮南—南京—上海、浙北—福州、雅安—武汉工程获准开展前期工作，核准支持性文件已全部齐备，建设准备快速推进，一批后续工程可研正在全面开展，特高压交流输电工程进入大规模建设的新阶段。皖电东送工程按里程碑计划有序推进，现场安全、质量保持良好局面。特高压交流试验示范工程投运四年多来，一直保持安全稳定运行，累计送电超过 440 亿 kWh，已经成为我国南北方向重要的能源输送通道，显著提升了特高压输电在国家能源战略中的地位和作用。

根据国家电网公司规划，“十二五”期间将新建 17 项特高压交流工程，新建交流输电线路 2.7 万 km、变电容量 2.1

亿 kVA; “十三五”期间, 特高压电网进一步加快发展, 新建 11 项特高压交流输电工程, 新建交流输电线路 1.3 万 km、变电容量 1.0 亿 kVA。未来国家电网公司将继续建设坚强智能电网, 坚持特高压交、直流协调发展, 加快推进特高压交流, 以成熟的特高压输电技术支撑新能源大发展, 推动发展方式绿色转型。按照“建设大基地、融入大电网”的发展思路, 加快调峰电源和特高压跨区输电通道建设, 从根本上解决新能源消纳问题。

本书是对 2012 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 41 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内容。这些成果是参与特高压交流输电科研攻关和工程建设全体人员集体智慧的结晶。一年来, 特高压输电技术研究的参与者付出了辛勤劳动, 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

2013 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
第 1 节 2012 年特高压交流工程建设工作回顾	2
第 2 节 2012 年特高压交流输电技术主要研究成果概要	4
第 2 章 特高压交流工程前期专题评估、系统技术研究	15
1 特高压交流工程水土保持典型措施研究	16
2 特高压交流工程环评公示及简本编制规范	23
3 特高压变电站噪声影响评价深化研究	30
4 特高压交直流混合电场测量方法的研究	39
5 特高压可控高压并联电抗器需求分析方法研究	48
6 特高压交流工程运行电压控制策略深化研究	58
7 皖电东送工程系统调试研究	66
8 皖电东送工程高压并联电抗器中性点电磁暂态特性及 绝缘水平研究	75
9 特高压交流工程 VFTO 抑制措施研究	85
10 皖电东送工程特高压 GIS 变电站 VFTO 仿真研究	96
第 3 章 特高压交流工程设计专题研究	107
1 皖电东送工程施工防雷预警技术应用研究	108
2 皖电东送工程沿线雷电参数分布研究	114
3 特高压交流避雷器内外绝缘性能研究	127
4 皖电东送工程变电站电场强度计算研究	136

5	皖电东送工程线路沿线污秽调查及测量	147
6	皖电东送工程线路金具标准化设计	154
7	特高压交流试验示范工程电磁环境后评估	166
8	特高压高海拔外绝缘特性研究	173
9	特高压绝缘子串弯曲特性对风偏计算的影响研究	183
10	8 分裂 725k900 扩径跳线研制	193
11	特高压输电线路黄土地基微型桩基础试验研究	205

第 4 章 特高压交流设备研制..... 217

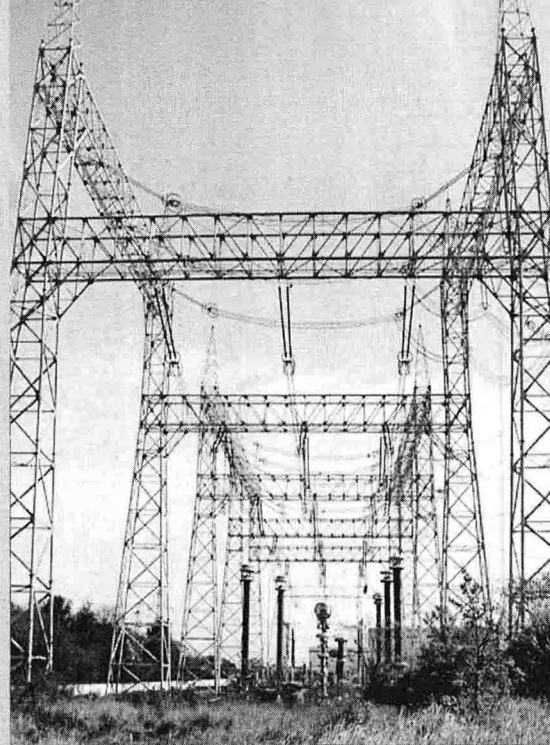
1	特高压变压器有载调压关键技术和工程应用	218
2	大容量干式并联电抗器发热特性和样机验证	227
3	特高压 GIS 用盆式绝缘子质量控制措施研究	236
4	特高压 GIS 用空心复合绝缘子运行性能及机械强度优化设计研究	245
5	特高压交流油气套管研制	255
6	特高压变压器用电磁线关键性能指标研究	264
7	皖电东送工程出线装置、套管和硅钢片国产化应用	268
8	特高压钢管塔对接环焊缝超声波检测影响因素分析	275
9	特高压钢管塔关键原材料应用研究	279

第 5 章 特高压交流工程施工技术研究..... 288

1	特高压交流工程施工危险源辨识及控制措施研究	289
2	特高压交流工程大型组塔吊装设备研究及应用	299
3	特高压高塔施工作业轻型升降机的研制与应用	305
4	特高压钢管塔组立和架线施工技术虚拟现实仿真系统开发与应用	312
5	特高压高塔组立施工通信指挥系统研究与应用	323
6	内悬浮外拉线抱杆组塔安全监控系统的研究与应用	329
7	特高压 8 分裂扩径导线刚性跳线安装工艺研究与应用	337
8	特高压变电站导线、金具和悬式绝缘子串安装定位研究	348
9	特高压支柱瓷绝缘子 PRTV 自动化喷涂技术研究	356
10	特高压变电站施工现场智能通信与安全监视系统研究	365
11	软地基上大型设备基础质量控制措施研究	371

2012

特高压交流输电技术研究成果专辑



第 1 章

概 论



第 1 节 2012 年特高压交流工程建设工作回顾

2012 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 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）全面完成里程碑计划，“三交”（淮南—南京—上海、浙北—福州、雅安—武汉）工程前期专题评估工作全面完成，建设准备工作快速推进，1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程（简称特高压交流试验示范工程）保持安全稳定运行，特高压设备研制与供货有序推进，关键技术深化研究取得重要成果，项目管理水平进一步提升。

一、皖电东送工程全面完成里程碑计划

为保障华东地区长期安全可靠供电，缓解长三角地区的土地资源和环境保护压力，将安徽的资源优势转化为经济优势，皖电东送工程于 2011 年 9 月 27 日获得国家发展改革委正式核准，2011 年 10 月开工建设。工程既是世界首个同塔双回路特高压交流工程，也是我国华东电网“西电东送”的重要通道、华东电网骨干网架的重要组成部分，与向家坝—上海、锦屏—苏南等特高压直流输电工程相互支撑、相互配合，形成“强交强直”输电格局，具有重要的输电和联网功能。

皖电东送工程包括四站三线，起于安徽淮南变电站，经安徽皖南变电站、浙江浙北变电站，至上海沪西变电站，变电容量 2100 万 kVA，线路全长 $2 \times 648.7\text{km}$ ，途经安徽、浙江、江苏、上海四省（市），先后跨越淮河和长江。变电站采用额定容量 300 万 kVA 的大容量特高压变压器、额定开断电流 63kA 的 SF₆ 气体绝缘金属封闭组合电器（GIS）。线路全线同塔双回路架设，采用新型钢管塔，导线截面 $8 \times 630\text{mm}^2$ ，走廊宽度 75m，单位走廊能力是常规 500kV 同塔双回路的 3 倍以上，代表了国际特高压交流输电技术研究、装备制造和工程应用的最高水平。

工程建设以里程碑计划统领全局，有序推进工程设计、设备研制、施工等建设工作，安全质量保持良好局面。截至 2012 年底，线路原材料供货全部完成，线路基础浇筑基本完成，钢管塔发货累计完成 62%，组立完成 45%，首档放线施工完成准备；变电站完成土建主体施工，全面开始电气设备安装；主变压器完成 14 台（共 26 台）产品出厂试验，3 台到站，3 台在运；高压并联电抗器完成 21 台（共 29 台）出厂试验，8 台到站；GIS 完成 65 相（共 99 相）断路器间隔出厂试验，运抵现场 51 相；母线约

14%完成制造,设备供货符合现场施工需求。与此同时,工程系统调试研究提前启动,正在开展系统调试与测试方案研制,积极开展线路参数测试方案研究。

贯彻安全第一、质量至上的理念,全面落实工程建设“安全年”活动。印发《国家电网公司关于加强皖电东送工程建设安全质量工作的意见》,提出46项措施并组织落实。推动施工单位配备双平臂落地抱杆、大扭矩电动扳手、专用履带车、重型索道等先进施工装备。推动成立设备租赁公司,研制配置了30套新型塔机、10台专用履带车,回购施工单位25套双平臂落地抱杆,实现重大施工装备的集约化管理和高效利用,提升组塔安全和施工机械化水平。工程建设保持良好局面。

二、关键技术深化研究取得重要成果

国家973计划“特高压输电系统电磁与绝缘特性的基础性研究”取得重要进展,通过国家组织的中期考核。特高压交流工程环评、水保关键问题编制规范,变电站噪声影响评价深化研究按时完成,有力保证了后续工程前期专题评估质量。特高压无功电压控制技术深化研究持续推进,掌握了可控高压并联电抗器需求特性与无功电压控制策略。皖电东送工程系统调试研究、高压并联电抗器中性点电磁暂态特性及绝缘水平研究提前启动,为启动调试提供技术保障。特高压交流工程VFTO机理、仿真分析方法以及抑制措施研究取得重要成果,针对皖电东送工程提出了抑制措施和解决方案,为开关选型、设计提供理论基础。依托皖电东送工程建设,开展了大量沿线污秽与雷电分布调研、施工雷电预防、变电站电场强度控制、工程外绝缘配置等研究工作,取得了一批科研成果,掌握了特高压电磁与绝缘特性基本理论,这些研究成果将在工程中大量实践。

三、特高压交流设备研制与扩能取得新进展

采取产学研联合研制模式,开展特高压盆式绝缘子质量控制重大专项活动,制定统一技术规范,严格执行型式试验和抽样试验,各厂盆式绝缘子批量产品质量稳定性显著提高。套管、出线装置、硅钢片等关键组部件和原材料的研制取得重大进展。完成特高压盆式绝缘子、硅钢片、电磁线技术规范制定,为推进关键部件国产化奠定基础。便于运输的新型大容量特高压变压器、有载调压特高压变压器,自主研发的特高压开关、高电气寿命投切电容器组专用开关等新设备研制取得重大突破,进一步巩固了我国在国际特高压输电领域的领先优势。

钢管塔供货生产高效有序,积极推动产能扩大。在供货方面,采用“样塔先行、总结提升、稳步推进”的工作思路,优化钢管塔供应管理模式。强化原材料厂、钢管塔厂和施工单位的协调,保障了原料供货、塔材生产、现场组立等各环节顺畅运转。在总结皖电东送工程钢管塔供货经验的基础上,积极引导钢管塔厂进一步完善设备、工艺和人力配置,提升工效、扩大产能。积极扩大关键原材料供货来源,完成钢管塔



及原材料技术文件修编和审查。调研分析公司系统物资供应、监造服务资源,初步形成钢管塔采购供应服务、质量监督方案和关键原材料采购及质量管控方案。

四、后续特高压交流工程前期工作积极推进

高质量完成“三交”工程全部前期专题评估工作。取得“三交”工程环评、水保和用地预审批复文件。结合蒙西—长沙工程可研调整,修改完善环评、水保报告并完成内部复审,环评、水保已基本具备报送主管部门审批的条件。取得锡盟—南京工程枣庄变电站补充水保、补充环评批复意见,与国土部门沟通用地预审办理工作。积极应对环保部门要求部分换流站、750kV变电站厂界噪声达标等重大问题,深化法律法规、技术标准研究。结合特高压交流工程特点,就特高压变电站设置噪声控制区、声环境达标等问题,加强与环保部门的沟通汇报,得到基本认可,并在“三交”工程环境影响报告批复中得到确认,为合理控制工程投资、推进工程顺利实施创造了有利条件。

五、特高压交流输电标准化及知识产权工作稳步开展

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,特高压交流标准体系中77项标准基本已颁布或上报标准主管部门待颁布。2012年,新颁布行业标准13项,新增授权专利37项,新申请专利17项。

第2节 2012年特高压交流输电技术主要研究成果概要

2012年,国家电网公司持续推动技术创新,开展了特高压交流输电工程前期、系统、设计、设备、施工等方面的技术研究,取得了持续突破,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、特高压交流工程前期专题评估、系统技术研究

1. 特高压交流工程水土保持典型措施研究

特高压交流工程具有距离长、点位多且分散、所经区域自然环境复杂等特点,导致部分工程水土保持方案中的措施布设不合理,直接影响方案报告书的编制质量。本研究通过对相关法律、法规、标准、规范和特高压交流工程设计、施工规范的研究,规范了特高压交流工程水土流失防治分区的划分,针对不同分区提出水土保持措施体系,并对水土保持典型工程措施、植物措施和防护措施设计等提出典型设计规范,使特高压交流工程的水土保持典型措施更加合理科学。

2. 特高压交流工程环评公示及简本编制规范

在特高压交流工程环境影响评价的评价阶段,环境影响评价信息公示和环境影响报告书简本公示的内容、深度等方面在一定程度上将影响工程的审批和工程建设的顺利实施。本研究根据国家法律法规的有关规定,通过对特高压交流工程环境影响报告书简本中关键内容的梳理,明确了环境影响评价信息公示及环境影响报告书简本的内容、深度,有利于规范环境信息公开工作和提高环境影响报告书质量,为项目环评审批奠定基础。

3. 特高压变电站噪声影响评价深化研究

特高压变电站的环境噪声影响已受到公众、环保部门的广泛关注,全面掌握变电站噪声特性,确定并规范噪声预测的方法和参数,对于特高压变电站声环境影响预测及控制具有重要意义。本研究在变电站噪声产生机理及特性的基础上,对特高压交流试验示范工程变电站噪声进行系统地测量和分析,获得特高压变电站噪声的声学特性,为特高压变电站噪声预测及控制提供依据。

4. 特高压交直流混合电场测量方法的研究

特高压交流线路与直流线路相邻架设时,会对直流线路电晕放电所伴随的离子产生、漂移、复合等过程产生影响,形成混合电场问题。因此合理设计交直流线路走廊或同塔架设结构,进行混合电场测量方法的应用研究和原理探索性研究,能够达到控制甚至降低地面离子流场的效果。本研究基于交流工频电场、直流合成电场和离子流密度的测量技术,开发相应的测量装置,设计并搭建交直流并行线路模型校验测量系统的有效性,实现地面混合电场的测量,利用Bragg光栅波长变化与电致伸缩器件在电场中微应变之间的关系,达到电场测量的目的。

5. 特高压可控高压并联电抗器需求分析方法研究

为了平衡无功、控制运行电压和限制特高压交流工程过电压,通常在长距离线路上装设固定容量的高压并联电抗器,但线路输送较大潮流时固定容量的高压并联电抗器为系统重载运行带来了较大的无功负担,增加了系统的网损,也影响到特高压线路的输电能力,限制过电压和容性无功补偿的矛盾较为突出。在长距离重载线路及潮流变化大的线路上安装容量灵活可调的可控高压并联电抗器是一种有效的解决方法。本研究提出一种以变电站为中心的无功平衡分析方法。将这种方法应用到特高压电网可控高压并联电抗器的需求和布点研究中,不仅可以对指定的规划方式进行定量分析,还可以给出变电站临界潮流和变压器负载率之间的关系曲线及其变化趋势,从而增强研究结论对不同负载水平和运行方式的适应性。

6. 特高压交流工程运行电压控制策略深化研究

在特高压电网建设初期,1000kV 电网层面电压和无功调节手段有限,尚未形成



1000kV 电网自动电压控制(AVC)系统,可能存在充电功率过大引起的沿线电压升高、特高压功率波动引起的电压波动、系统故障后出现的稳态过电压等新问题。制定特高压交流工程的运行电压控制策略,是保障特高压输电工程及其近区电网安全稳定运行的重要措施。本研究通过分析特高压线路电压分布特性、功率波动导致的电压波动特性和稳态过电压特性,提出特高压变电站 500kV 母线的运行电压控制策略,并提出特高压交流试验示范工程扩建工程和皖电东送工程的运行电压控制策略建议。

7. 皖电东送工程系统调试研究

皖电东送工程涉及 4 站 6 线,电磁耦合特性复杂,多种新技术、新设备首次在工程中应用。工程建成后,处于特高压电网形成初期,存在 1000/500kV 电磁环网,系统无功和电压控制难度大。为确保调试方案合理可行,保证试验安全顺利地进行,需深入开展皖电东送工程系统调试潮流与稳定、过电压及电磁暂态等方面的仿真分析,从而研究试验系统运行方式安排、试验项目控制策略、试验期间特高压变电站主设备的过电压和过电流水平及安全措施。其成果可为系统调试项目的确定、调试方案的编写提供技术依据,也为皖电东送工程的安全顺利投运提供技术保障。

8. 皖电东送工程高压并联电抗器中性点电磁暂态特性及绝缘水平研究

为了加快特高压系统潜供电弧熄灭,保证重合闸成功,高压并联电抗器(简称高抗)中性点均需装设接地电抗器(一般称小电抗)来限制潜供电流和恢复电压。特高压双回路和单回路相比,线路的充电功率大,且双回路之间存在静电和电磁耦合,在线路非对称故障及非全相运行下高抗中性点的电压和通过高抗中性点小电抗的电流较大,保护设备的参数(主要为避雷器)及高抗中性点绝缘水平不能简单套用特高压交流试验示范工程的成果。本研究针对皖电东送工程的系统条件,对高抗中性点的电磁暂态特性进行分析,提出了避雷器的配置方案、小电抗过电流耐受能力及绝缘水平等关键参数,为工程安全可靠运行提供了技术基础。

9. 特高压交流工程 VFTO 抑制措施研究

GIS 设备的隔离开关在关合、开断空载短母线时会产生特快速瞬态过电压(Very Fast Transient Overvoltage, VFTO),可能威胁一次设备的绝缘,并对二次设备产生影响。由于特高压系统的绝缘裕度较其他电压等级系统更小,VFTO 的威胁更大,因此需要研究 VFTO 的抑制措施。本研究在考虑磁导率特性、涡流损耗和趋肤效应的基础上,提出了高频磁环的多阶 LR 电路模型,提高了仿真计算磁环抑制 VFTO 结果的准确度。该方法可以作为磁环抑制 VFTO 效果的评估方法,其结果可用于指导现场应用时磁环装置的设计工作。通过仿真计算和试验证明,该磁环装置对 VFTO 有显著抑制作用。

10. 皖电东送工程特高压 GIS 变电站 VFTO 仿真研究

特高压交流试验示范工程中,为治理长治 GIS 变电站 VFTO 将超过设备雷电绝缘

保证强度问题,长治变电站 GIS 隔离开关均装设了 500Ω 的阻尼电阻以解决 VFTO 问题。研究和试验均表明,隔离开关装设阻尼电阻可有效抑制 VFTO 现象,但提高了设备造价,且复杂的结构不利于提高设备可靠性。皖电东送工程中淮南、芜湖、安吉、练塘四个变电站均为 GIS 变电站,可能存在 VFTO 风险。本研究结合以往专题研究及工程应用经验,分别对四个变电站的 VFTO 水平及特性进行仿真研究及风险分析,探讨采取抑制措施的必要性和具体方案,为工程隔离开关选型、设计等提供技术依据。

二、特高压交流工程设计专题研究

1. 皖电东送工程施工防雷预警技术应用研究

皖电东送工程处于我国东部雷电活动高频发区域,对组塔架线施工的雷电防护提出了严格要求。本研究基于多数据融合预警方法及模型,开发了施工防雷预警软件,建立了施工防雷预警系统。利用现代高科技手段,将雷电预警引入施工作业面防雷安全管理中,以每个作业面为中心的雷电活动逼近分级预警,为工程指挥部和各个作业面在雷暴天气下做好安全作业,以及应对工作提供方便应用的手段。

2. 皖电东送工程沿线雷电参数分布研究

为配合皖电东送工程线路防雷设计,本研究基于国家电网雷电监测网监测数据,采用线路走廊网格法统计分析了皖电东送工程沿线典型雷电参数特征,用特高压线路走廊的雷电参数校核计算了绕击跳闸率,获得了工程沿线雷电活动分布规律,提取出了易受雷击段和易闪段,结果可为工程设计和运行部门提供参考。

3. 特高压交流避雷器内外绝缘性能研究

目前,特高压交流避雷器仅在我国实现工程应用,国际上没有成熟的标准、规范可供借鉴,加强其内外绝缘性能的深化研究非常重要。本研究根据相关标准中特高压交流避雷器的经验数据,给出了计算特高压交流避雷器内外绝缘耐受性能的方法。并通过制定接受实际运行条件的合理试验方案,对三种内部采取不同布置条件的特高压交流避雷器内外绝缘性能进行工频电压、雷电冲击电压、操作冲击电压耐受试验,并与计算结果进行了比较分析,为特高压交流避雷器设计、试验以及标准制定提供了参考性资料。

4. 皖电东送工程变电站电场强度计算研究

电磁环境是特高压交流工程设计、建设和运行的关键技术问题。变电设备、金具及其连接方式是特高压设备的重要接口,直接关系到设备、导线、金具的电晕特性,同时其安装方式也会对设备的内外电场分布产生影响。本研究通过仿真计算皖电东送工程变电站的电场分布,深入研究特高压设备、金具及其连接方式的均压特性和电晕特性,通过对其表面的电位与电场分布进行可视化电场调控,优化金具结构和连接方式,提出合理的变电设备均压屏蔽方案和金具连接方式,为皖电东送工程变电站母线



对地高度的选取、设备排布连接及金具设计提供理论依据。

5. 皖电东送工程线路沿线污秽调查及测量

皖电东送工程沿线所经地区环境差异较大，部分地区污染严重，污闪严重威胁输电线路安全运行。本研究基于皖电东送工程线路沿线气象、环境和污染源的调查分析情况，现场调研沿线污秽情况和邻近线路运行情况，选点测试现场污秽度，准确评估沿线污秽水平，提出了线路外绝缘设计原则与技术措施，为后续工程安全稳定运行提供技术依据。

6. 皖电东送工程线路金具标准化设计

开展线路金具标准化设计研究，通过科学设定技术参数和规范加工技术条件，不仅有利于提高线路金具设计和加工制造效率与水平，还将对线路金具采购招标、施工安装、运行检修及减少备品备件数量等方面发挥积极作用。本研究在总结特高压交流试验示范工程金具研制经验的基础上，重点开展双回路特高压金具优化研究，规范金具结构型式，确定统一命名方法，绘制金具串图和金具元件标准化图，提出制造加工技术要求。对主要串型、串内金具进行电场计算，合理配置均压屏蔽方案，有效改善绝缘子串的电压分布和电场分布情况，降低均压屏蔽环及金具表面的电场强度，并通过电晕试验验证，为线路工程金具设计和制造积累了十分丰富和宝贵的经验。

7. 特高压交流试验示范工程电磁环境后评估

对特高压交流试验示范工程的电磁环境水平开展后评估，对于评价措施效果、掌握技术规律、改进措施方法作用显著。本研究对特高压交流试验示范工程实际线路对短波测向台的干扰影响，以及对邻近线路居民电视的有源干扰等热点问题，开展大量的实测与试验研究，并将研究结果与前期设计进行对比，获得了经实际工程验证过的研究成果。经实测验证，特高压交流试验示范工程的电磁环境工频电磁场、无线电干扰、可听噪声均满足环保限值要求；前期对于特高压线路对短波测向台的无源干扰影响的分析方法是可行的；初步获得了沿线电视干扰（TVI）的影响程度及水平，提出了 TVI 的防护措施。

8. 特高压高海拔外绝缘特性研究

随着海拔升高，空气密度逐渐下降，空气间隙的工频电压、操作冲击和雷电冲击的 50%放电电压、绝缘子的污闪电压都将随之降低。我国海拔高于 1000m 的地区超过全国土地总面积的一半，西北水力、煤炭等一次能源主要分布于高海拔地区。为保证高海拔地区特高压交流工程外绝缘的安全性和经济性，有必要开展高海拔特高压输变电工程外绝缘特性研究。本研究通过开展高海拔现场试验和人工低气压模拟试验，获得不同海拔空气间隙和绝缘子闪络特性参数，提出了杆塔间隙操作、雷电冲击和绝缘子污闪、冰闪电压海拔修正系数，满足工程设计和运行要求，为高海拔地区特高压输