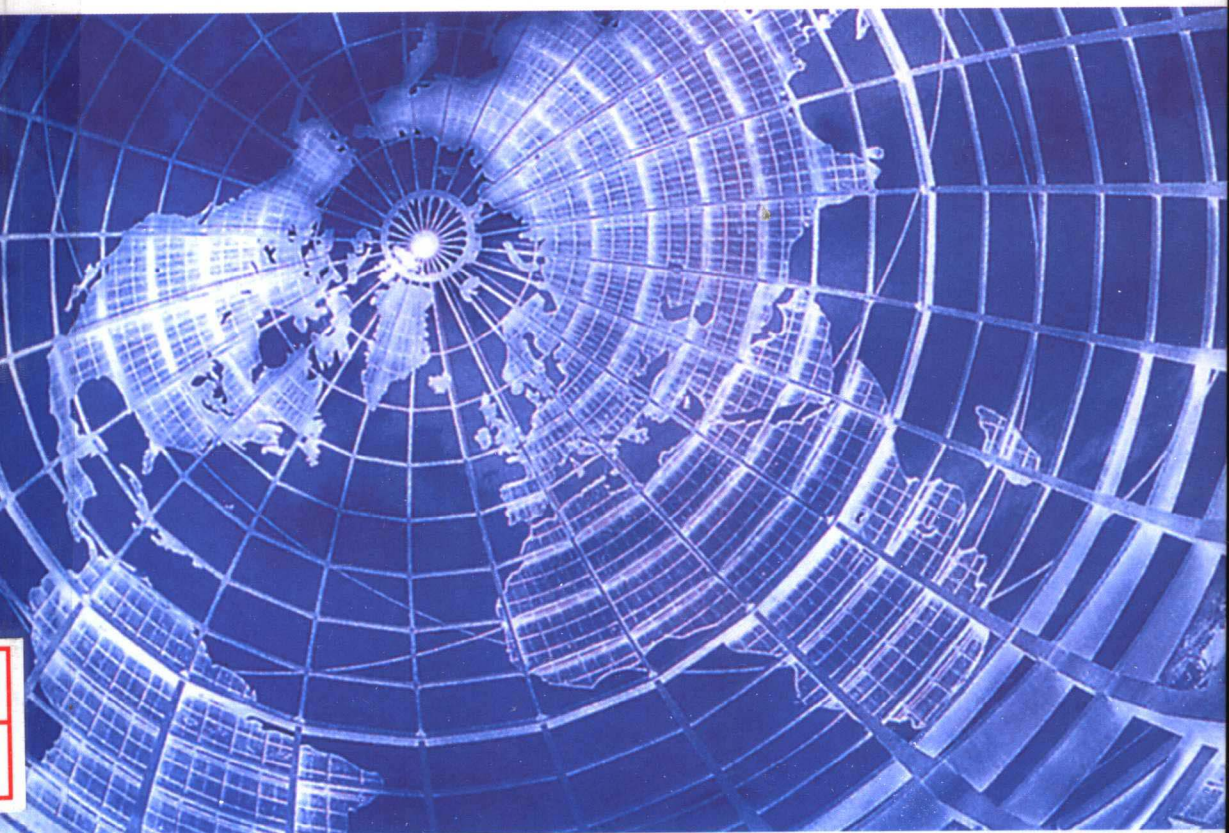


ULTRA-HIGH VOLTAGE GRID

特 高 压 电 网

刘振亚 / 主编



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

特 高 压 电 网

刘振亚 主编



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

图书在版编目(CIP)数据

特高压电网/刘振亚主编. —北京:中国经济出版社, 2005. 9

ISBN 7-5017-7226-6

I. 特… II. 刘… III. 高压电力系统 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 105098 号

内 容 提 要

特高压电网指的是以 1000kV 输电网为骨干网架,超高压输电网和高压输电网以及特高压直流输电、高压直流输电和配电网构成的分层、分区、结构清晰的现代化大电网。本书是我国第一本关于特高压电网的书籍,它对我国特高压电网的发展具有指导意义。

本书共 11 章,既介绍了电网从高压到特高压的发展历程和中国国家电网特高压骨干网架发展前景;又全面系统地阐述了特高压电网的系统特性和经济性,特高压交、直流输电的系统特性;还从技术的角度,对特高压电网内部过电压及其限制措施,特高压电网雷电过电压与防雷保护,特高压电网的绝缘与绝缘配合,特高压架空输电线路的电晕及其对环境的影响,特高压电网的工频电场和磁场,特高压架空输电线路导线、金具与杆塔,特高压变电站与特高压电气设备等内容进行了介绍。

本书的编写方式能满足不同读者群的需求。首先,本书适合高电压专业、不同研究领域的技术人员进行特高压电网的深入研究;其次,本书有助于长期从事非特高压技术的电力工程人员掌握特高压的技术知识;再次,本书对于热爱高电压技术和电力技术的莘莘学子开拓视野有一定的作用;最后,本书还能满足社会对特高压感兴趣的非电业人士的学习参考。

出版发行:中国经济出版社(100037·北京市西城区百万庄北街 3 号)

网 址: www.economyph.com

责任编辑:孙 岩

责任印制:常 毅

封面设计:白长江

承 印:北京大容彩色印刷有限公司印刷

开 本:787mm×960mm 1/16

印张:30 字数:505 千字

版 次:2005 年 10 月第 1 版

印次:2005 年 10 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5017-7226-6/F·5802

定价:70.00 元

版权所有 盗版必究

举报电话:68359418 68319282

服务热线:68344225 68369586 68346406 68309176

《特高压电网》 编委会

主 编	刘振亚			
副 主 编	祝新民	陆启洲	陈进行	郑宝森
	陈月明	舒印彪		
编委会成员	赵遵廉	吴玉生	周孝信	杜至刚
	许世辉	陈维江	张嗣兴	王广辉
	曾庆禹			
顾 问	黄毅诚	史大桢	姚振炎	陆燕荪
	陆延昌	潘家铮	李彦梦	郑健超
	吴敬儒			
编写组组长	许世辉			
编写组副组长	王广辉	陈维江	张辉明	
编写组成员	郭国川	梁宏蕴	曾庆禹	杨海涛
	林集明	赵皖君	姚国灿	陆家榆
	邵方殷	杜澍春	李启盛	张祖平
	李同生	王丽平	王景朝	尤传永
	鲁先龙	尚锦山	高 航	方国元
	王 慧	赵永亮	江振宇	魏 悦
	万启发	张晓东		

全面建设小康社会 需要坚强的国家电网[●]

(代序)

电力工业是关系国计民生的基础产业。在我国电力工业中,国家电网承担着优化能源资源配置、保障国家能源安全和促进国民经济发展的任务。国家电网公司作为国有重点骨干企业,担负着建设、运营和发展国家电网的重大责任。国家电网公司党组在认真分析我国电力工业和电网的发展现状及趋势的基础上深刻认识到,加快建设以特高压电网为核心的坚强的国家电网,对于实现更大范围的资源优化配置、推动我国能源的高效开发利用、促进经济社会可持续发展和全面建设小康社会具有重大的意义,是树立和落实科学发展观的必然要求。为了建设坚强的国家电网,国家电网公司提出了加快建设由百万伏级交流和正负800千伏级直流系统构成的特高压电网的发展目标。

建设特高压电网是我国电力工业发展的必由之路

建设特高压电网是满足未来持续增长的电力需求的根本保证。到2004年,我国电力装机总容量已达4.4亿千瓦。目前,我国经济持续快速发展,人民生活水平不断提高,电力需求快速增长。预计在未来的15年间,我国新增装机将超过5亿千瓦。我国现有电网主要以500千伏交流和正负500千伏直流系统为主,电力输送能力和规模受到严重制约。只有加快建设电压等级更高、网架结构更强、资源配置规模更大的以特高压电网为核心的国家电网,才能满

● 该文发表于2005年5月11日《人民日报》第九版。

足大规模的电力输送和供应,保障全面建设小康社会目标的实现。

建设特高压电网是提高我国能源开发和利用效率的基本途径。我国是全球第一大煤炭消费国和第二大石油、电力消费国。煤炭占全国能源生产和消费总量的比重高达2/3左右,但开发和利用的总体效率还比较低。同时,我国生产力发展水平的地区差异很大,一次能源分布严重不均衡。能源需求主要集中在东部和中部经济较发达地区,约占需求总量的3/4左右;用于发电的煤炭和水力资源,则主要分布在西部和北部地区。这种能源分布与消费的不平衡状况,决定了能源资源必须在全国范围内优化配置,以大煤电基地、大水电基地为依托,实现煤电就地转换和水电大规模开发,并通过建设特高压电网,实现跨地区、跨流域水火互济,将清洁的电能从西部和北部大规模输送到中部地区。发展特高压电网,有利于西部地区将资源优势转化为经济优势,促进西部大开发,实现区域经济协调发展;有利于在西部和北部煤炭基地发展壮大一批大型煤炭和发电企业,提高煤炭、发电行业的集约化发展水平,提高资源的开发和利用效率。

建设特高压电网是培育和发展国家电力市场的重要条件。发展电力市场的根本目的在于发挥市场对资源配置的基础性作用,有效调节电力供求关系,引导电力投资,优化能源资源配置,提高效率和效益。电网是电力市场的基础和载体。只有建设特高压电网,才能实现跨地区、远距离的电能输送和交易,更好地调节电力平衡,促进全国范围的资源优化配置,发挥国家级电力市场的作用。电力工业长期以来“重发(电)轻供(电)”,造成电网投入不足,电网建设严重滞后。近年来,随着电源建设步伐的加快,电网规划建设滞后的矛盾进一步加剧。电网建设难以有效促进西部煤电基地的集约化开发,造成东部地区新增大量煤电项目,加剧了煤炭供应和交通运输的紧张局面,降低了全国范围的能源配置和利用效率,也增加了环保压力,影响了国家的整体利益。因此,必须加快特高压电网建设,促进电网与电源协调发展,推动国家电力市场建设,满足国民

经济发展的需要。

建设特高压电网是提高电力工业整体效益的必然选择。发展大电网是电力工业发展的客观规律。大电网不仅在资源优化配置中具有重要作用,而且在安全性、可靠性、灵活性和经济性等方面具有诸多优越性。我国地域辽阔,时差、季节差十分明显,加上地区经济发展不平衡,使不同地区的电力负荷具有很强的互补性。特高压电网在合理利用能源,节约建设投资,降低运行成本,减少事故和检修备用,获得错峰、调峰和水火、跨流域补偿效益等方面潜力巨大。建设特高压电网,不仅可以节约装机、降低网损、减少弃水、提高火电设备利用率、节约土地资源,还可以提高电网的安全运行水平,避免500千伏电网重复建设等问题,具有显著的经济效益和社会效益。根据规划,特高压电网建成后,可节约发电装机2000万千瓦,每年可减少发电耗煤2000万吨。

建设特高压电网是电力工业技术创新的重大举措。我国电力工业必须依靠科技进步,不断创新,实现加速发展。以特高压电网为核心的国家电网建设,将使我国电力科技水平再上一个新台阶。建设特高压电网,是世界电网发展领域一项崭新的事业,可以增强我国的科技自主创新能力,占领世界电力科技的制高点。我们要敢为人先,敢于走在世界电网科技发展的前列。目前,我国500千伏输变电技术已基本成熟,国内具备了相应的设计、建设和运行能力,设备制造也基本实现了国产化。加快建设特高压电网,对于推进我国电网的技术升级,带动国内相关科研、设计部门以及制造、建设等企业的技术创新,提高电力及相关行业的整体技术水平和综合竞争实力,都具有重要意义。

以科学发展观为指导,走中国特色电网发展之路

加快国家电网发展,必须坚持以科学发展观为指导,充分利用高新技术和先进设备,在加强现有电网技术改造和升级的同时,大力推进特高压电网建设,提高电网的输配电能力和整体效率。

建设特高压电网是发展国家电网的核心。根据我国电网的现

状,着眼于能源资源优化配置的需要,建设特高压电网应以构建华中—华北坚强的同步电网为核心,以晋陕蒙宁煤电基地和西南水电开发为契机,在华北、华中和华东建成坚强的百万伏级交流特高压网架,并逐步向周边区域延伸,西南部分水电外送采用特高压直流,共同形成覆盖大电源基地和负荷中心的特高压电网。到2020年前后,我国特高压电网基本形成,国家电网特高压及跨区输送容量将达到2亿千瓦以上,占全国装机总容量的25%。

发展特高压电网须进一步增强自主创新能力。在过去20年里,我国科研机构在特高压领域做了大量工作,取得了一些重要科技成果,培养了一大批具有很高理论水平和实践经验的工程技术专家;我国电网技术装备水平不断提高,在输变电设备制造方面具有了较强的自主研发和创新能力,为特高压设备的研发和制造打下了良好基础。在推进特高压电网建设的过程中,通过组织技术攻关、实施试验示范工程、对部分关键技术采取技术引进和消化完善等措施,实现特高压交流设备和正负800千伏级直流设备制造的国产化是完全有可能的。

建设特高压电网应积极借鉴国际发展特高压电网的成果和经验。根据国外经验,电力快速增长、远距离输电需求迅速增加的时期,是发展特高压电网的有利时机。特高压输电技术的发展和在国际上一直受到普遍关注,并进行了比较充分的研究和论证。国外特高压电网之所以发展迟缓,主要是由于用电需求增长趋缓,不需要大规模、远距离输电,而不是技术原因。目前一些经济增长较快的国家,如印度、巴西等,也开始研究发展特高压电网的问题。我国特高压电网发展应把握机遇,加快推进,以有效解决我国能源和电力配置的瓶颈制约。

集中各方面力量,加快特高压电网建设

建设以特高压电网为核心的坚强的国家电网,关系国家能源战略和能源安全,关系国民经济可持续发展,涉及电力规划、科研、设计、建设、设备制造、国际合作等方面,极具挑战性和开拓性,是一项

具有重大政治意义、经济意义和技术创新意义的宏伟事业,必须在国家的统一领导和统一规划下,集中各方智慧,协调各方力量,有计划、有步骤地加快推进。

国家电网公司在建设坚强的国家电网中担负着重大的使命和责任。应在国家能源发展战略的指导下,在国家有关部门的大力支持下,遵循“科学论证、示范先行,自主创新、加快推进”的方针,克服困难,开拓创新,扎扎实实做好各项工作。应深入分析我国电网的现状,统筹考虑特高压电网在安全、技术、经济等方面的重大问题,积极完善特高压电网的发展规划,为国家宏观决策提供科学依据。加强组织协调,整合国家电网公司的科研和技术资源,发挥大学和科研院所的作用,集中优势力量,完善特高压输电技术实验基地,对重大工程技术问题进行攻关。特别是在规划论证的前期,对有关特高压电网发展的重大问题,应认真听取并尊重各方面的意见,做到科学决策、民主决策和依法决策。

长期以来,我国电力设备制造企业与电力企业相互支持、密切配合,为我国电力事业的快速发展作出了突出贡献。特高压电网建设,为电力设备制造业提供了良好的发展机遇。国家电网公司将努力贯彻国产化方针,在工程建设中积极采用国产化设备,全力支持我国制造业的技术升级和发展。建设特高压电网,既是历史机遇,又面临现实挑战。我们有信心在党中央、国务院的正确领导下,艰苦奋斗,顽强拼搏,努力超越,追求卓越,攀登世界电网技术的高峰,尽快把国家电网建设成为世界一流的电网,为国民经济和社会发展作出新的更大的贡献。

国家电网公司党组书记、总经理

刘振亚

前言

21 世纪伊始,美国工程院联合 30 多家美国职业工程协会,历时半年时间,评出了 20 世纪对人类社会生活影响最大的 20 项工程技术成果。其中,位列榜首的便是电力工程。其原因是电气化对城乡人民生产和生活的方方面面都产生了根本性影响,假如没有电力,20 世纪的科技、经济成果都只能是美丽的幻想。

在新的世纪,许多人都意识到,中国可能成为全球电力发展最激动人心的地方。诚如《电力革命》一书的作者 Walt Patterson 所言,中国有资源、有技术、有想象力,并且能够主动最大限度地利用席卷全球的改革思想。

感谢这个时代,感谢这片土地,为当代的中国电力人提供了空间和舞台。电力一经广泛使用,就注定它必须服务并服从于国民经济的发展。正是我国经济的健康持续发展,为电力技术的进步提供了强劲的动力。

循着欧姆定律,电力技术的进步有两条重要途径,途径之一是降低电阻,因此,超导技术在电力系统的广泛应用将会是重大的技术革命,但可以预见,它的实现仍需假以时日;途径之二是提高电压,于是,高电压技术的出现和发展,代表着电力和电工领域生产力水平的提高,而特高电压技术则是当代高电压发展的重要阶段性标志。

我国电力工业已经进入大电网、大机组、高电压、高自动化的发展时期。根据我国的能源战略,国家能源领导小组办公室将特高压工作列为能源工作的要点,要求科学论证,搞好特高压输电网架试验示范线路的建设和输变电设备国产化等方案,为特高压电网的规划建设指明了方向。从我国实际情况来看,发展特高压电网,是

落实科学发展观,贯彻国家能源政策,确保电力工业全面、协调、可持续发展的重大举措,有利于实现更大范围的资源优化配置,满足未来我国经济社会发展的用电需求,具有重大的政治意义、经济意义和技术创新意义。毋庸置疑,特高压在中国的出现,将成为中国电力发展的重要里程碑。

人类在认识和利用高电压的进程中,已经跨越了一道又一道的难关,但特高压电网工程在中国并非靠引进就能成就,仍有大量艰苦的工作要做。对特高压理论有一个比较系统、完整的把握,对特高压电网建设与我国社会主义经济建设的密切关系有一个比较全面、科学的认识,对国内外特高压输电技术的发展状况及其重要技术攻关难点有一个比较准确、深入的了解,仍是十分必要的。

在过去几十年里,和全世界众多的业内人士一道,中国电力界和电工界的许多有识之士,在特高压领域做了大量工作,为特高压技术的发展,从理论上到实践上都作出了杰出的贡献。电力系统的许多老领导、老专家和广大工程技术人员,为特高压技术的研究和发展倾注了大量的心血和汗水,取得了丰硕的成果,为中国的特高压建设工作奠定了坚实的基础。记载和传播这些宝贵的知识财富以及最新的研究成果,并努力促进其转化为生产力,是本书的目的所在。

我们希望本书能拥有较广泛的读者群。我们希望长期从事特高压技术研究的学者、工程技术人员通过本书既能了解本领域的发展动态,又能学习相关领域和专业的知识;我们希望长期从事非特高压技术的电力工程技术人员能通过本书掌握特高压技术知识,以应对特高压电网在我国建设投运后的技术、技能新要求;我们希望热爱高电压技术和电力技术的莘莘学子能通过本书的学习而开启一扇知识的大门;我们还希望对特高压感兴趣的非电业人士能通过本书找到有关特高压技术问题的解答。

按照以上思想,为兼顾不同读者群的需要,本书在内容编排方面做了技术处理,在每一章的开头,力图用简短的文字,概括出本章

的主要内容、观点和结论,让读者可以根据自己的兴趣选择是否深入阅读下去;本书从电力系统的一般特性展开,引入了特高压的基本知识、主要技术特点,介绍了特高压的技术难点和解决途径,同时,也介绍了特高压领域的国内外最新动态;本书除集中讨论了交流特高压问题,同时也涉猎了直流特高压的特殊问题;本书还给出了较丰富的参考文献,为有意进一步深入了解特高压前沿问题的读者提供指引。

我们衷心希望通过本书能让更多人士了解和重视中国建设特高压电网的意义,推动特高压输电技术在中国的实现和发展,共同创造中国电网灿烂的明天。

代 序	1
-----------	---

前 言	1
-----------	---

第一章 电网从高压到特高压的发展

◆ 第一节 电网的发展	2
一、电网的基本功能	2
二、电网的发展历史	6
◆ 第二节 特高压电压等级的选择	8
一、选择特高压电压等级的基本原则	8
二、确定特高压电压等级的方法	9
◆ 第三节 特高压电网发展的影响因素	11
一、发电机和发电厂规模经济性	11
二、燃料、运输成本和发电能源的可用性	12
三、网损和短路电流水平	13
四、生态环境	13
五、政府的政策和管理	14
◆ 第四节 特高压输电研究	14
一、特高压输电发展历程	14
二、特高压输电技术研究	16
三、特高压技术研究基本结论	22
◆ 第五节 特高压电网发展目标	23
一、特高压电网的未来	23

二、特高压电网在中国	25
------------------	----

第二章 中国国家电网特高压骨干网架

◆ 第一节 互联大电网发展趋势	28
一、国外大电网发展趋势	28
二、国内电网发展方向	30
◆ 第二节 中国国家特高压电网	32
一、国家特高压电网的基本功能	33
二、国家特高压电网的建设与发展	33

第三章 特高压电网的系统特性和经济性

◆ 第一节 电力系统的基本概念和基本分析方法	37
一、三相对称交流系统	38
二、相量分析法	40
三、对称分量法	43
四、标么值	45
五、电压级的归算	46
◆ 第二节 特高压输电线路参数特性	46
一、单位长度线路参数	47
二、导线分裂结构对线路电抗和容抗的影响	54
三、分裂导线参数对特高压输电能力的影响	55
四、特高压与超高压线路参数比较	56
五、特高压输电线路的等值电路	57
◆ 第三节 特高压输电线路输电特性	61
一、功率损耗和电压降落	62
二、自然功率	65
三、有功功率与无功功率的输送	67
四、功率—电压特性	68

◆ 第四节 特高压电网的稳定性	72
一、电力系统稳定性概述	72
二、发电机的功—角特性	74
三、电力系统功角稳定性	77
四、电力系统电压稳定性	80
◆ 第五节 特高压电网的输电能力	87
一、特高压电网的稳定性原则	87
二、特高压输电能力的计算方法	89
三、超高压和特高压输电能力比较	92
◆ 第六节 系统参数对特高压输电能力的影响	93
一、变压器参数与特高压输电线路参数的比率	93
二、发电机电抗 X'_d 与特高压输电线路参数的比率	95
三、发电机(厂、站)接入方式对特高压输电能力的影响	96
四、系统参数对特高压输电能力的影响	99
◆ 第七节 特高压输电的经济性	106
一、输变电技术经济评价方法	106
二、寿命周期成本与可靠性	108
三、特高压输电与超高压输电经济性比较	109

第四章 特高压直流输电的系统特性

◆ 第一节 高压直流输电	114
一、高压直流输电的系统构成	115
二、高压直流输电换流技术	118
三、高压直流输电运行方式和控制方式	129
四、高压直流输电的特点及应用	136
◆ 第二节 特高压直流输电	139
一、特高压直流输电的现状	139
二、特高压直流输电接线方式	142
三、特高压直流输电设备	145
◆ 第三节 特高压交、直流输电方式比较	148

一、特高压交、直流输电方式的主要技术特点	149
二、特高压交、直流输电方式的稳定性能分析	150
三、特高压交、直流输电方式的系统特性比较	155

第五章 特高压电网内部过电压及其限制措施

◆ 第一节 工频过电压及其限制措施	159
一、影响工频过电压的主要因素	159
二、限制工频过电压的可能措施	163
三、常规高抗限制工频过电压	164
四、可控高抗限制工频过电压	166
五、单相接地三相甩负荷工频过电压的实际持续时间	166
◆ 第二节 潜供电流及其限制措施	167
一、潜供电流的机理	167
二、加快特高压电网潜供电流熄灭措施	168
三、常规固定高抗线路的潜供电流和恢复电压	170
四、使用可控高抗线路的潜供电流和恢复电压	171
五、无高抗特高压短线路潜供电流和恢复电压	172
◆ 第三节 操作过电压及其限制措施	173
一、限制特高压电网操作过电压主要措施	173
二、特高压电网合闸操作过电压	174
三、特高压电网分闸操作过电压	177

第六章 特高压电网的雷电过电压与保护

◆ 第一节 雷电及其主要参数	186
一、雷电机理	186
二、雷电参数	188
三、雷电过电压	192
◆ 第二节 特高压架空输电线路的雷电绕击与保护	194

◆第三节 特高压架空输电线路的雷电反击与保护	200
◆第四节 特高压变电站的防雷保护	204
一、特高压变电站高压配电装置的直击雷保护	204
二、特高压变电站电气设备的雷电侵入波过电压保护	204

第七章 特高压电网的绝缘与绝缘配合

◆第一节 特高压电网绝缘的电气特性	210
一、特高压电网绝缘的分类	210
二、特高压架空输电线路的绝缘子	211
三、特高压架空输电线路空气间隙的放电特性	214
◆第二节 绝缘配合的方法	223
一、惯用法	223
二、统计法	224
◆第三节 特高压电网绝缘子的选择	226
一、国外特高压架空输电线路绝缘子串形及片数的选择	226
二、美国电力研究院(EPRI)污耐受电压法的外绝缘设计	228
三、国内 750kV 超高压输电工程研究的成果及工程设计经验	229
四、我国特高压架空输电线路绝缘子串形及片数的选择	230
五、国内外特高压架空输电线路绝缘子片数选择结果比较	236
六、特高压架空输电线路的绝缘子串形与片数的选择	236
七、变电站用绝缘子的污秽闪络特性	237
◆第四节 特高压架空输电线路空气间隙的选择	238
一、工作电压下导线对杆塔空气间隙的选择	238
二、操作过电压下导线对杆塔空气间隙的选择	239
三、雷电过电压下导线对杆塔空气间隙的选择	241
四、特高压架空输电线路导线对杆塔的空气间隙	242
五、操作过电压下绝缘子串长与空气间隙的协调	243
六、操作/雷电过电压对档距中间导线和地之间空气间隙的要求	243
◆第五节 特高压变电站空气间隙的选择	244
一、工作电压要求的空气间隙	244