

中国电气工程大典编辑委员会



CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

第 8 卷

电力系统工程

主编 周孝信 卢强 杨奇逊 黄其励



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

中国电气工程大典编辑委员会

第 **8** 卷

电力系统工程

主编 周孝信 卢强 杨奇逊 黄其励



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的。它是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化等15卷。

本书为第8卷，电力系统工程卷。主要内容包括电力系统规划、远距离大容量交流输电系统、高压直流输电系统、灵活交流输电系统、电力系统互联、电力市场、电力系统可靠性、电力系统分析与仿真、电力系统有功功率调整和频率控制、电力系统无功补偿和电压控制、电力系统稳定性及稳定控制、电力系统控制理论与方法、电力系统调度及调度自动化、电力系统继电保护和自动装置、电能质量、配电系统及其自动化、电力系统通信、电力信息系统、超导电力技术、分布式能源电力系统。

本书主要供电力系统技术人员和管理人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国电气工程大典. 第8卷, 电力系统工程/周孝信等主编; 中国电气工程大典编辑委员会编. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-8946-2

I. 中… II. ①周…②中… III. ①电力工程—中国②电力系统—系统工程—中国 IV. TM TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 094985 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>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

2010年1月第1版 2010年1月北京第1次印刷

880mm×1230mm 1/16 · 79.125印张 · 3345千字 · 1插页

定价 290.00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

委 员：(按姓氏笔画排列)

丁杰	卜广全	于龙	于坤山	于明	于新颖	马小亮	马文忠	马伟明	马伟斌
马旭东	马济泉	马晓茜	马隆龙	丰镇平	王之杰	王为民	王正鸣	王占奎	王永骥
王成山	王兆安	王志峰	王作民	王国海	王明渝	王金元	王学伟	王泽忠	王建生
王建华	王绍武	王春华	王厚余	王炳忠	王勇	王素英	王振铭	王乘	王维洲
王景芹	王强	王锡凡	王新新	王黎明	王德宽	王贇基	文习山	文劲宇	方晓燕
方磊	尹天文	邓长胜	孔力	孔伯汉	孔昭年	石萍萍	卢强	卢澎湖	叶奇基
田东强	田培斌	史进渊	史毓珍	白少林	白俊光	白晓民	白继彬	冯江华	司马文霞
邢毓史	戎一农	吕征宇	吕鸿达	朱庆明	朱英浩	朱宝四	朱晓明	朱家驹	朱耀泉
仲明振	任兆宏	任修明	任俊生	危师让	邹雄	刘大明	刘广峰	刘卫宁	刘友梅
刘公直	刘文华	刘平安	刘伟	刘仲儒	刘希清	刘杰	刘高明	刘国林	刘泽洪
刘建飞	刘建明	刘屏周	刘瑛岩	刘德志	齐剑波	关志成	江秀臣	江哲生	池涌
汤涌	汤蕴林	祁恩兰	许江宁	许忠卿	许洪华	阮江军	阮新波	阮毅	孙才新
孙凤杰	孙成群	孙林	孙牧海	严宏强	严陆光	严俊杰	严萍	苏秀草	社正春
杜毅威	杨玉岗	杨守权	杨寿敏	杨其国	杨奇逊	杨奇娟	杨怡元	杨俊智	杨耕
杨维迅	杨雯	杨道刚	杨德才	李卫	李文健	李永东	李成榕	李旭	李兴源
李安定	李农	李若梅	李杰仁	李宝树	李定中	李奎	李彦明	李晓明	李颂哲
李朗如	李培植	李盛涛	李崇坚	李道本	李道林	李鹏	李新	李肇林	李耀星
酆凤山	肖立业	肖昌汉	肖辉乾	肖湘宁	肖耀荣	吴正国	吴剑之	吴远东	吴志坚
吴国平	吴质根	吴晓波	吴培豪	邱爱慈	何木云	何阿平	何金良	何梓年	何湘宁
何瑞华	佟为明	余志	余贻鑫	邹云屏	邹金昌	邹孟奇	应百川	辛德培	辛耀中
汪继强	汪集强	汪樵生	汪德良	沈小宇	沈江	沈兵	沈邗农	沈梁伟	宋文武
宋汉武	宋哲仁	迟速	张艺滨	张文才	张玉花	张业广	张乔根	张仲超	张兆鹤
张伯明	张治文	张启平	张波	张亮	张洪钟	张祖平	张勇传	张晚江	张晓锋
张敏	张望	张景洲	陆永平	陆宪惠	陆俭国	陆剑秋	陆祖良	陆家榆	陆嘉明
陈汉民	陈伟根	陈仲	陈众励	陈庆国	陈坚	陈伯时	陈国柱	陈治明	陈建颢
陈星	陈思婧	陈勇	陈哲良	陈恩鉴	陈雪梅	陈清泉	陈超志	陈敬超	陈辉明
陈黎平	陈德昌	陈德胜	陈德桂	邵岚	苟锐锋	林云生	林公舒	林集明	易学勤
罗永浩	罗景华	金如麟	周小谦	周以国	周双喜	周平	周仲仁	周远翔	周孝信
周建中	周思刚	周家启	周娟	周锡生	郑小康	郑云之	郑永红	郑克文	郑明光
宗建华	宓传龙	孟庆东	赵玉文	赵光宙	赵伟	赵红一	赵昌宗	赵治华	赵宗让
赵荣祥	赵相宾	赵洁	赵敏	赵婉君	赵琨	赵毅	赵紫青	荣命哲	胡方莉

胡安施	胡学浩	胡振岭	胡荃清	段善旭	段献忠	侯子良	俞志德	俞智斌	饶芳权
贺德馨	施鹏飞	洪元颐	姚本荣	姚尔昶	姚家韩	姚福生	贺建华	贺益康	贺湘琨
贺东旭	骆仲决	秦和	秦裕碧	袁余军	袁建生	袁建敏	都兴有	耿英三	莫会成
徐凤刚	夏立	夏祥贵	顾四行	顾国彪	钱昌燕	钱宝良	钱照明	倪维斗	徐元辉
高子瑜	徐永法	徐兆丰	徐国政	徐洪海	徐殿国	徐铎	徐德鸿	殷禄祺	莫大华
郭振岩	高文胜	高庆国	高京生	高理迎	高培庆	郭天兴	郭国顺	郭保良	郭洁
黄国治	郭灏	唐任远	唐炬	唐春潮	陶星明	黄少锋	黄仁乐	黄妙庆	黄其励
崔志强	黄学清	黄宝生	黄晚丽	黄崇祺	黄景湖	梅生伟	曹一家	曹惠彬	戚庆成
葛少云	崔翔	康勇	章名耀	章定邦	梁维宏	梁维燕	梁曦东	彭宗仁	葛大麟
惠世恩	葛诗慧	葛蓉生	葛溪亭	葛增茂	董卫国	蒋洪德	蒋善定	韩民晓	韩英铎
舒惠芬	覃大清	程天麟	程钧培	程时杰	程树康	程浩忠	傅书遍	焦依	焦树建
雷银照	曾文星	曾正中	曾明富	曾南超	曾雁鸿	曾嵘	游亚戈	谢开贵	谢秋野
薛以太	雷清泉	戴庆忠	蔡崇积	管瑞良	廖胜松	廖瑞金	缪鸿兴	黎晓晖	颜渝坪
	戴先中		戴慧珠	魏光辉					

序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程,是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性产业,是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑,是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高,对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用,对提高整个国民经济效益,促进经济社会可持续发展,提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放 30 年来的发展,我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系,成为世界电力工业大国之一。至 2007 年底,我国发电装机容量达 7.13 亿 kW,三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程,以及正在建设的交流 1000kV、直流 ±800kV 特高压输变电工程等举世瞩目;大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广,大容量电力电子技术的研究和应用,风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用,超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入 21 世纪以来,电气工程领域全面贯彻科学发展观,新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用,拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品,自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品,在满足国内市场需求的基础上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就,要求对原有知识的不断更新,广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆廷昌两位老部长的倡议和领导下,由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会,联合组织了电气工程各领域近 2000 位专家和学者,历

时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的一项公益性奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日

前 言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源,在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来,电气技术的不断发展,电力生产及应用的日益增长,迅速改变了人类社会的面貌,也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放30年来,我国科学技术取得了突飞猛进的发展,科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域,新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用,涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设,大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展,特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和运用,先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造,大电网智能化动态稳定监控系统和信息管理系统的广泛应用,具有先进水平的电气装备制造业的高速发展,大容量电能变换与节能节电技术,风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用,计算机和信息技术在电气领域的普及,明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术,纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用,都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩,引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品,已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多,涉及面广,技术进步快,科研成果多,许多科研成果需要总结和积累,许多新的知识需要普及和传播。盛世修典,素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就,总结已有的科研成果,传播工程领域最新的科学技术知识,中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会,联合组织了电气工程各领域的约2000位专家和学者,编撰了《中国电气工程大典》。

本套书的编写工作于2004年开始启动，编委会多次召开工作会议，精心组织，按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料；内容体现新颖性、先进性、实用性；表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则，反复讨论并修改编写大纲，确定编写内容。经过4年磨砺，数易其稿，终于付梓出版。《中国电气工程大典》共15卷约5000万字，包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要的基础性工作，他们认真负责，辛勤耕耘，倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中，得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持，还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献，才使得这部大典能顺利编写出版，编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著，涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域，总结了改革开放30年来电气工程各领域的技术发展与成功经验，展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态，汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验，体现了科学性、先进性和实用性的结合，是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书，也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广，参与人员多，写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力，倾注了无数心血，但书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陆延昌



本卷前言

进入 21 世纪以来,在国民经济快速发展和技术进步的推动下,我国电力工业发展迅速。到 2008 年底,全国发电装机容量已达到 7.93 亿 kW。随着三峡电站和西部大型水、火电站的开发,以“西电东送”为目标的大容量远距离输电工程建设速度加快。已建成数条输电能力为 300 万 kW 的超高压直流输电线路,形成了以 500kV 交流输电和 ± 500 kV 直流输电为骨干的大容量远距离输电系统。电力负荷快速增长和相应的电源、输变电建设,推动了电网的快速发展。各区域电网的规模不断扩大,如华东电网 2008 年统调装机容量达 1.6 亿 kW,全网最高用电负荷超过 1 亿 kW。各大区域电网已形成以 500kV (330kV) 线路为骨干的网架结构。通过大区电网互联,于 2005 年基本实现全国联网。

在电力工业快速发展的同时,以“厂网分开”为重点的电力市场化改革取得较大进展。电力系统技术进步的步伐明显加快。

大容量远距离交流和直流输电技术。包括 1000kV 特高压交流输电技术和 ± 800 kV 特高压直流输电技术,750kV 超高压交流输电技术,提高现有 500kV 超高压输电系统输电能力的技术等。近年来,在国家和电网公司的支持下,大容量远距离交直流输电技术的研究、试验和工程实践都取得显著进展。在自主创新和引进、消化吸收再创新技术的支持下,750kV 超高压交流输电示范工程已于 2006 年在西北电网建成投产,1000kV 特高压交流输电试验示范工程已于 2008 年底投入运行, ± 800 kV 特高压直流输电工程也已开工建设。研究开发成功的晶闸管控制的可控串联电容补偿(TCSC)、静止无功补偿(SVC)、可控高压并联电抗器,可关断电力电子器件控制的静止同步补偿装置(STATCOM),以及常规串联电容补偿装置、紧凑型输电线路、大截面新型耐热导线等新技术在电网中采用,较大幅度地提高了传统超高压交流输电系统的输送能力。

大电网安全稳定运行技术。包括电网运行及调度自动化技术,电力系统稳定及稳定控制技术,继电保护、安全稳定控制装置技术,电力系统分析和仿真技术,电力市场及其技术支持系统,电力通信和信息技术等。近年来,美国等国家电网







大停电事故的发生,促进了世界各国对电网运行分析控制新技术的研究开发。随着我国电网的发展特别是大规模的电网互联,相应出现了诸如暂态稳定水平恶化、弱阻尼低频振荡等危及电网安全稳定运行的问题。结合中国电网的实际,研究开发了一系列安全稳定新技术。其中基于全球卫星定位系统(GPS)和光纤通信网络的电网广域监测系统(WAMS)、大电网全数字实时和超实时数字仿真、电网安全稳定控制技术等先进技术的采用,为提高电网抵御事故干扰能力、实现大规模互联电网在线动态安全分析、预警和监控提供了先进的技术手段。

配电和用电新技术。包括配电系统分析和规划技术,配电能量管理和自动化技术,提高电能质量新技术等。我国经济的快速发展带来了电力负荷的快速增长,电力用户对供电可靠性和供电质量的要求也不断提高。近年来国家重视城乡配电网建设,实施了大规模的城乡电网改造工程,使我国配电网的技术装备和自动化水平有很大提高。

面向未来的电力系统新技术。展望21世纪,我国电力负荷将继续保持快速增长的趋势。面临能源、资源和环境的严峻挑战,要进一步提高电网的经济性,提高电能利用的总体效率,优化资源的配置和利用;要充分注意环境保护;要满足电力用户对电能质量日益提高的要求。与此同时,可再生能源发电占有比例的不断增长将是我国电力发展不可避免的趋势。为适应不断发展的需求,要大力研发面向未来的电力系统新技术。超导电力技术、大容量电力电子技术、高效储能技术、高速电力通信和信息技术,以及可再生能源电能的传输、吸纳和补偿技术等新技术的开发和实现将使电网技术提高到一个全新的水平,为新一代可持续发展电力系统的建设奠定基础。

《中国电气工程大典电力系统工程卷》本着大典是综合性专业工具书,强调内容新颖、注重实用便查的定位和特点,针对电力系统工程技术相关领域,重点介绍国内外近年来、特别是进入新世纪以来我国工程建设、科研开发的新成果、新进展和新的发展动向。全卷共分20篇,内容涵盖电力系统工程主要领域:电力系统规划、远距离大容量交流和直流输电系统、灵活交流输电系统、电力系统运行控制和电力市场、电力系统稳定性和可靠性、电力系统调度及配电自动化、电力系统继电保护和自动装置、配电系统及电能质量、电力系统通信和信息系统、超导电力应用和分布式能源电力系统等。





本卷的编写始终在大典编委会的组织和指导下进行。编写、审阅工作在本卷各位主编、全体编写人员的共同努力下顺利完成。编审过程中得到编审人员所在单位以及中国电机工程学会的大力支持和帮助，在此谨向各参编单位和全体编审人员表示诚挚的谢意。

周孝信



目 录

序	
前言	
本卷前言	
第 1 篇 电力系统规划	1
第 1 章 绪论	3
1 电力系统规划设计的主要内容	3
1.1 电力系统规划按规划时段划分	3
1.2 电力系统规划设计按地区划分	4
1.3 电力系统规划设计按具体工作内容划分	4
2 电力系统规划设计的主要原则	4
2.1 电力系统规划设计必须严格执行国家各 相关法规、政策	4
2.2 电力系统规划设计要符合国家国民经济 与社会发展战略需求	4
2.3 电力系统规划设计应满足供电可靠性、 灵活性和经济性的要求	4
2.4 电力系统规划设计应实行动态管理	4
第 2 章 我国电网发展现状 (2005 年有关数据)	5
1 东北电网	5
2 华北电网	5
3 西北电网	6
4 华中电网	6
5 华东电网	6
6 南方电网	7
第 3 章 我国能源资源概况	8
1 能源资源现状分析	8
2 煤炭资源储量分析	8
3 石油资源储量分析	9
4 天然气资源储量分析	9
5 水资源储量分析	9
6 新能源及可再生能源资源分析	10
6.1 核能	10
6.2 太阳能	10
6.3 风能	10
6.4 地热能	11
6.5 海洋能	11
6.6 生物能	11
第 4 章 电力系统负荷预测	12
1 电力负荷的分类	12
2 电力系统负荷预测方法	12
2.1 需电量的预测方法	12
2.2 最大负荷值预测方法	13
3 电力系统负荷曲线	13
3.1 电力负荷曲线的分类	13
3.2 电力负荷曲线的特性指标	14
3.3 电力负荷曲线编制	14
第 5 章 电源规划	15
1 动力资源开发及利用	15
1.1 能源需求预测	15
1.2 能源供应分析	15
1.3 煤炭、电力、运输综合平衡	15
2 电源规划准则	15
2.1 电源规划可靠性	15
2.2 可靠性指标	15
3 发电系统总容量的确定	16
4 电源结构及布局	16
4.1 电源结构及运行特性	16
4.2 电源结构选择原则	16
4.3 电源布局原则	17
5 电力电量平衡计算	17
5.1 电力平衡中容量组成	17
5.2 电力电量平衡的一般要求	17
5.3 电力、电量平衡代表年、月的选择	18
5.4 电力平衡	18
5.5 电量平衡	19
6 调峰平衡	20
6.1 电力系统调峰	20
6.2 电力系统调峰平衡	20
7 电厂建厂条件调查	21
7.1 水电厂的建厂条件	21
7.2 火电厂的建厂条件	21
7.3 核电厂的建厂条件	21
7.4 新能源电厂的建厂条件	21
8 电源建设方案优化	21
8.1 电源优化数学模型	21
8.2 常规设计方法	22
第 6 章 电网规划设计	23
1 电网规划设计原则	23
2 电网规划安全稳定标准	23
2.1 电力系统的静态稳定储备标准	23
2.2 电力系统承受大扰动能力的安全稳定标准	24
3 电压等级的选择	24
3.1 电压等级选择的原则	24
3.2 交流电网电压等级选择	24
4 交流线路输电能力及导线截面选择	25
4.1 自然功率	25
4.2 经济输电容量	25
4.3 按导线允许持续发热条件确定输送能力	26
4.4 超高压远距离输电线路的暂态稳定极限 的传输能力	26
4.5 导线截面选择	27
5 电力网结构	27
6 变电站布局、规模	27
6.1 变电站布局原则	27
6.2 变电站规模	28
7 主网架规划	28
7.1 大型电源送出输电系统规划	28
7.2 受端系统规划	28
7.3 联网规划	28
8 电源接入系统设计	29
8.1 发电系统接入系统的主要原则	30
8.2 发电厂接入系统的电压等级	30
8.3 发电厂与系统连接的网络方案	30

8.4	电源接入系统的安全标准	30	3.1	河流水电规划	42
9	无功规划	30	3.2	可行性研究	42
9.1	无功功率平衡原则	30	4	电网项目建设前期工作	42
9.2	无功负荷、无功电源及其运行特性	31	4.1	电网项目可行性研究	42
9.3	无功补偿设备的选型	31	4.2	变电站(换流站)站址选择	42
9.4	无功补偿容量配置	32	4.3	线路路径选择	43
10	电网规划设计方法	32	第9章	电网二次系统规划	44
11	高压直流输电	32	1	电网二次系统规划的主要内容	44
11.1	直流输电的优势	32	2	电网二次系统规划的原则	44
11.2	直流输电的形式	32	3	电力系统通信规划	44
11.3	直流输电电压等级选择	33	3.1	网络需求分析与预测	45
11.4	换流站无功平衡与无功补偿	33	3.2	技术体制	46
11.5	直流输电换流变压器选择	34	3.3	传输网规划	46
11.6	直流输电线路导线截面选择	34	3.4	数据网规划	46
第7章	主要电气计算	35	3.5	交换网规划	46
1	潮流计算	35	3.6	业务系统规划	46
2	稳定计算	35	4	调度自动化及电力市场运营系统规划	47
2.1	运行方式选取	35	4.1	能量管理系统(EMS)/电网动态监视和预警系统规划、调度员培训仿真系统规划	47
2.2	静态稳定计算	35	4.2	水调自动化系统、雷电定位监测系统、调度管理信息系统规划	48
2.3	暂态稳定计算	35	4.3	电力市场运营系统规划	48
2.4	动态稳定计算	36	4.4	综合数据平台与网络规划	48
2.5	提高稳定极限的措施	36	4.5	厂站自动化规划	49
3	短路电流计算	37	4.6	安全防护、冗余备份系统规划	49
3.1	计算的假定条件	37	5	继电保护规划	50
3.2	短路电流计算	37	5.1	继电保护规划	50
3.3	限制短路电流的措施	37	5.2	保护及故障信息管理系统	50
4	调相调压计算	37	5.3	直流控制保护	50
4.1	电网电压标准	37	5.4	通道及接口要求	50
4.2	电网无功补偿原则	37	6	安全稳定控制系统规划	50
5	工频过电压计算	38	6.1	电网安全稳定对控制系统的要求	50
5.1	过电压标准	38	6.2	电网稳定计算和分析	50
5.2	运行方式及故障型式	38	6.3	安全稳定控制系统方案	51
6	谐振过电压计算	38	6.4	在线预决策系统规划	51
6.1	发电机自励磁	38	6.5	电力系统解列及黑启动	51
6.2	带高压并联电抗器线路的谐振过电压	38	7	信息系统规划	52
6.3	变压器铁磁谐振过电压	38	7.1	信息平台建设规划	52
6.4	220kV及以下系统谐振过电压	38	7.2	业务系统规划	52
7	潜流电流计算	39	7.3	数据中心(仓库)及决策支持系统规划	52
8	操作过电压计算	39	第10章	经济比较方法	54
8.1	线路合闸和重合闸过电压	39	1	经济比较的概念和意义	54
8.2	空载线路分闸过电压	39	2	经济比较评价的原则	54
8.3	线路非对称故障分闸和振荡解列过电压	39	3	经济评价的主要内容	54
8.4	隔离开关操作空载母线的过电压	39	4	财务评价与国民经济评价的差别	54
8.5	操作并联电容器的过电压	39	5	最小费用法	54
8.6	操作空载变压器和并联电抗器等的过电压	40	5.1	费用现值比较法	54
8.7	开断高压感应电动机的过电压	40	5.2	计算期不同的现值费用比较法	55
8.8	66kV及以下系统单相间歇性电弧接地故障时的过电压	40	5.3	年费用比较法	55
第8章	电源电网项目建设管理	41	6	净现值法	55
1	火电项目建设前期工作	41	7	内部收益率法和差额投资内部收益率法	55
1.1	初步可行性研究	41	7.1	内部收益率法	55
1.2	可行性研究	41	7.2	差额投资内部收益率法	55
2	火电厂厂址选择	41	8	折返年限法及相关算法	55
2.1	火电厂厂址选择的工作程序	41	9	财务评价方法简介	56
2.2	火电厂厂址选择的基本原则	41	9.1	财务内部收益率(FIRR)	56
3	水电项目建设前期工作	42			

9.2	投资回收期	56	5.2	静止同步串联补偿 SSSC	81
9.3	固定资产投资借款偿还期 P_d	56	5.3	转换静止补偿器 CSC	81
10	国民经济评价方法简介	56	6	改善系统动态稳定性的其他措施	82
10.1	经济内部收益率	56	6.1	配置电力系统稳定器 PSS	82
10.2	经济净现值	56	6.2	直流输电附加控制	83
10.3	经济净现值率	56	第 5 章	超高压及特高压交流输电系统工频过电压	84
参考文献		57	1	工频过电压特性及其限制措施	84
第 2 篇	远距离大容量交流输电系统	59	1.1	产生工频过电压的主要原因	84
第 1 章	概述	61	1.2	限制工频过电压的可能措施	86
1	必要性及前景	61	2	超高压及特高压输电系统工频过电压	86
2	国外远距离大容量交流输电情况	61	3	可控高压并联电抗器在限制工频过电压中的作用	87
2.1	美国远距离大容量交流输电工程实例	61	4	串联电容补偿对工频过电压的影响	88
2.2	加拿大远距离大容量交流输电工程实例	61	第 6 章	潜供电流及其恢复电压	89
2.3	巴西远距离大容量交流输电工程实例	62	1	潜供电流及其抑制措施	89
2.4	苏联的 1150kV 交流输电线路	62	2	超高压及特高压输电系统的潜供电流及其恢复电压	91
2.5	日本的 1000kV 线路	62	2.1	常规固定高压并联电抗器线路的潜供电流和恢复电压	91
第 2 章	超高压及特高压交流输电系统特性	64	2.2	使用可控高压并联电抗器线路的潜供电流和恢复电压	91
1	超高压及特高压交流输电线路参数及特性	64	2.3	无高压并联电抗器特高压短线路的潜供电流和恢复电压	91
2	超高压及特高压交流输电线路理论传输能力	66	3	串联电容补偿对潜供电流暂态过程影响	92
2.1	线路热稳定输电能力	66	第 7 章	超高压及特高压交流输电系统操作过电压	93
2.2	线路静态稳定输电能力	66	1	操作过电压及限制措施	93
2.3	线路受暂态稳定和动态稳定限制输电能力	67	2	合闸操作过电压	94
3	超高压及特高压交流输电系统稳定特性	68	2.1	合闸过电压产生的物理过程	94
3.1	远距离大容量输电系统暂态稳定特性	68	2.2	仅采用 MOA 限制合闸过电压	94
3.2	远距离大容量输电系统动态稳定特性	69	2.3	使用 MOA 及控制合闸相角方式限制过电压	94
第 3 章	超高压及特高压交流输电系统无功电压控制问题	71	2.4	使用断路器合闸电阻及 MOA 限制合闸过电压	94
1	远距离大容量输电系统无功特性	71	3	分闸 (甩负荷) 操作过电压	96
1.1	充电电容	71	3.1	甩负荷操作过电压	96
1.2	线路自然功率	71	3.2	清除接地故障转移过电压	97
1.3	输电系统的无功损耗	71	第 8 章	固定串联补偿电容与可控高压并联电抗器	99
1.4	输电系统的电压降	72	1	固定串联补偿电容	99
2	超高压及特高压交流输电系统无功电压控制问题	72	1.1	固定串补基本组成	99
2.1	发电机调节端电压	72	1.2	固定串补保护	99
2.2	变压器调节分接头	72	1.3	串联电容补偿系统中的特殊问题	100
2.3	安装低压无功补偿设备	73	2	可控并联电抗器	101
2.4	远距离大容量输电系统无功电压控制问题	73	2.1	可控并联电抗器的基本原理	101
3	改善超高压及特高压交流输电系统无功电压问题的措施	73	2.2	可控并联电抗器控制系统	102
3.1	可控高压并联电抗器	73	2.3	可控并联电抗器本体保护	103
3.2	串联补偿设备	74	2.4	500kV 可控并联电抗器控制策略研究	103
第 4 章	提高超高压及特高压交流输电系统输电能力的措施	75	2.5	500kV 可控并联电抗器的工程应用	103
1	自动重合闸	75	2.6	国外可控并联电抗器的发展情况	104
2	紧凑型线路	75	参考文献		105
3	串补及可控串补	76	第 3 篇	高压直流输电系统	107
3.1	固定串补原理及作用	76	第 1 章	概述	109
3.2	可控串补原理及作用	76	1	高压直流输电的发展	109
3.3	串补的应用情况	77	1.1	国外直流输电的发展	109
4	动态无功补偿	78	1.2	中国直流输电的发展	109
4.1	动态无功补偿装置原理及作用	78	2	技术特点	110
4.2	动态无功补偿的应用情况	79			
5	其他 FACTS 技术	80			
5.1	统一潮流控制器 UPFC	80			

2.1 直流输电的优点	110	3.2 滤波系统构成	132
2.2 直流输电的缺点	111	3.3 无功补偿与交流侧滤波的关系和协调	132
3 应用场合及工程实例	111	3.4 交流滤波技术的发展	133
3.1 应用场合	111	4 直流侧滤波器	133
3.2 工程实例	112	4.1 直流侧谐波的危害	133
4 发展趋势	113	4.2 滤波系统的性能要求	133
4.1 特高压大功率直流输电	113	4.3 滤波系统构成	134
4.2 自换相电压源换流器的应用	113	4.4 直流滤波器型式	135
4.3 超导直流输电	114	4.5 直流有源滤波器	135
第2章 高压直流输电系统构成	115	第6章 换流站消耗的无功及无功补偿	136
1 两端直流输电系统	115	1 换流站消耗的无功功率	136
1.1 单极系统	116	1.1 电网换相换流器的无功功率特性	136
1.2 双极系统	116	1.2 无功消耗的工程计算方法	136
1.3 背靠背直流系统	117	2 换流站的无功补偿	136
2 多端直流输电系统	117	2.1 交流系统的无功支持能力和无功需求	137
第3章 换流站主接线及主要设备	119	2.2 无功补偿设备的类型	137
1 换流站主接线	119	2.3 无功补偿设备容量的确定	137
1.1 换流阀组接线	119	2.4 无功补偿设备的分组	138
1.2 换流变压器与换流阀的连接	119	第7章 直流输电系统的控制保护	139
1.3 交流滤波器接入系统的方式	120	1 控制系统	139
1.4 直流开关场接线	120	1.1 控制系统的配置要求	139
1.5 换流站特殊接线方式	121	1.2 换流器触发相位控制	139
2 换流站主要设备	121	1.3 直流系统基本控制原理	139
2.1 换流阀	121	1.4 换流器基本控制方式及其配置	140
2.2 换流变压器	124	1.5 直流输电控制系统功能	142
2.3 直流电抗器	125	2 保护系统	142
2.4 其他设备	125	2.1 直流输电系统的故障形态	142
第4章 直流输电换流技术	126	2.2 直流输电工程的保护系统	144
1 概述	126	3 控制保护系统实例	145
2 6脉动换流器	126	第8章 直流输电系统稳态运行特性	147
2.1 6脉动整流器工作原理	126	1 额定运行方式	147
2.2 6脉动逆变器工作原理	127	1.1 额定直流功率	147
3 12脉动换流器	128	1.2 额定直流电流	147
4 直流输电稳态计算常用公式	128	1.3 额定直流电压	147
4.1 换流站极对中性母线电压 (U_d)	128	2 最小输送功率	147
4.2 直流电流 (I_d)	128	3 降压运行方式	148
4.3 直流功率 (P_d)	128	4 功率反送方式	148
4.4 直流回路电压降 (ΔU_d)	128	4.1 正常潮流反转	149
4.5 直流回路损耗 (ΔP_d)	128	4.2 紧急潮流反转	149
4.6 换流站消耗的无功功率 (Q_d)	129	5 双极对称和不对称运行方式	149
4.7 换流站和交流系统交换的无功功率 (Q_d)	129	5.1 双极对称运行方式	149
4.8 换流站的功率因数 ($\cos\varphi$)	129	5.2 双极不对称运行方式	150
4.9 换流器的换相角 (μ)	129	6 有功功率及无功功率控制方式	150
4.10 换流器交流侧电流 (I_a)	129	6.1 有功功率控制方式	150
4.11 换流变压器的视在功率 (S)	129	6.2 无功功率控制方式	151
第5章 换流站产生的谐波及滤波措施	130	7 过负荷能力	151
1 换流站交流侧谐波	130	7.1 连续过负荷	151
1.1 特征谐波	130	7.2 短期过负荷	151
1.2 非特征谐波	130	7.3 暂时过负荷	151
1.3 其他谐波源	130	7.4 影响过负荷的因素	152
2 换流站直流侧谐波	131	8 直流输电系统损耗	152
2.1 特征谐波	131	8.1 换流站损耗	152
2.2 非特征谐波	131	8.2 直流输电线路损耗	153
3 交流侧滤波器	131	8.3 接地极系统损耗	153
3.1 滤波系统性能要求	131	第9章 交、直流混合系统运行特性	154
		1 交流系统故障对直流系统的影响	154

1.1	交流系统阻抗	154
1.2	故障期间的传输功率	154
1.3	故障清除后的系统恢复	154
1.4	故障期间和故障后恢复期间的无功消耗	154
1.5	交流故障引起的甩负荷	154
1.6	无功功率设备的投切	154
1.7	故障期间谐波电压和电流的影响	155
1.8	运行控制方式转换	155
1.9	直流功率调制及紧急功率减小	155
2	直流系统故障对交流系统的影响	155
2.1	换流站内交流滤波器、无功设备及交流母线故障	155
2.2	换流单元故障	155
2.3	直流电抗器、直流滤波器及其他直流设备故障	155
2.4	直流线路故障	156
2.5	接地极线路故障	156
2.6	金属回线线路故障	156
3	直流输电受端为弱交流系统的特点	156
3.1	动态过电压	156
3.2	电压稳定性	156
3.3	谐波谐振	156
3.4	电压闪变	157
3.5	直流控制方式	157
4	直流多落点交流系统的特点	157
4.1	多落点直流有效短路比及有效惯性常数	157
4.2	大扰动下交、直流系统的相互作用	158
4.3	小扰动下交、直流系统的相互作用	159
4.4	接地极入地电流的相互影响	159
5	利用直流输电改善交流系统的运行性能	159
5.1	利用直流系统的有功控制改善交流系统的潮流及频率	159
5.2	利用直流进行交流动态电压控制及协调无功源的相互作用	160
5.3	改善交流系统的稳定性	160
第 10 章	直流输电过电压保护及绝缘配合	162
1	直流输电系统的过电压	162
1.1	暂时过电压	162
1.2	操作过电压	162
1.3	雷电过电压	163
1.4	陡波过电压	163
2	过电压保护措施	163
2.1	阻尼装置	163
2.2	控制系统措施	163
2.3	保护间隙	164
2.4	避雷器	164
3	换流站的绝缘配合	164
3.1	避雷器配置	164
3.2	换流站主要设备的绝缘水平	165
4	换流站防雷保护	165
第 11 章	直流输电线路	167
1	直流输电架空线路	167
1.1	架空线路导线截面的选择	167
1.2	架空线路绝缘水平的确定	169
1.3	绝缘子选型及绝缘子片数的确定	170
1.4	铁塔设计原则及塔型分类	170
1.5	地线的选择	170
1.6	交、直流架空线路输送功率和损耗的粗略比较	171
2	直流电缆线路	172
2.1	直流电缆的应用场合	172
2.2	直流电缆的技术特点	172
2.3	直流电缆的种类和结构	173
3	直流感地极线路	173
3.1	接地极线路的绝缘水平	173
3.2	接地极线路的导线截面选择	173
3.3	接地极线路设计原则	174
3.4	接地极线路的行塔	174
第 12 章	直流输电接地极	175
1	接地极的作用及类型	175
1.1	接地极的作用	175
1.2	接地极的类型	175
2	接地极的运行特性	175
2.1	电磁效应	175
2.2	热效应	175
2.3	电化效应	175
3	对接地极址的要求	175
4	对接地极材料的要求	176
5	接地极的设计原则	176
5.1	电力系统条件	176
5.2	设计寿命	176
5.3	最大允许跨步电压	177
5.4	最大允许温升	177
5.5	接地极基本参数	177
第 13 章	直流输电工程的现场调试	178
1	现场调试的要求及准备	178
1.1	预调试	178
1.2	分系统调试	178
1.3	站系统调试	178
1.4	端对端系统调试	178
2	现场调试的内容	179
2.1	预调试内容	179
2.2	分系统调试内容	179
2.3	站系统调试内容	180
2.4	端对端系统调试内容	180
3	现场调试总结	181
第 14 章	背靠背直流输电	182
1	背靠背直流输电的特点	182
1.1	主回路设计	182
1.2	背靠背换流站主接线	183
1.3	无功功率(或交流电压)控制	183
1.4	利用快速控制改善交流系统的运行性能	184
1.5	暂时过电压的限制	184
1.6	谐波的影响	184
2	背靠背直流输电的应用与发展	184
第 15 章	多端直流输电	186
1	应用场合及发展概况	186
1.1	意大利—科西嘉—撒丁岛三端直流输电	186
1.2	魁北克—新英格兰五端直流输电	186
1.3	新信浓三端背靠背直流输电	187
1.4	纳尔逊河直流输电	187
1.5	太平洋联络线直流输电	187