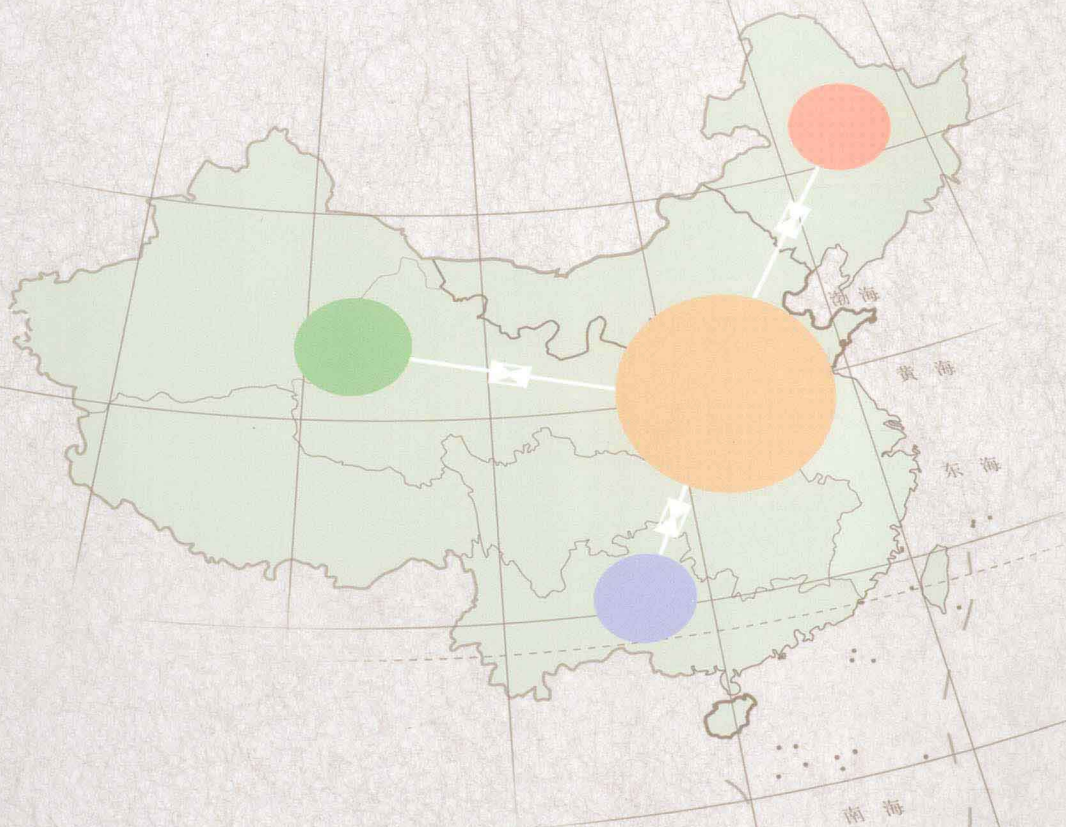


特高压

ULTRA-HIGH VOLTAGE
AC & DC GRID

交直流电网

刘振亚◎编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压

ULTRA-HIGH VOLTAGE
AC & DC GRID

交直流电网

刘振亚◎编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 简 介

本书从电网发展的历程、现状和趋势入手，指出电网在现代能源供应体系中发挥着不可替代的作用，建设以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网是解决能源和电力发展深层次矛盾的治本之策，是满足各类大型能源基地和新能源大规模发展的迫切需要。本书首先详细分析了特高压电网发展的历程，论述了交直流输电的技术特点及特高压交直流输电系统的优势；然后在此基础上提出了中国特高压交直流电网构建设想及其论证分析，分专业阐述了中国特高压输电技术的科技创新和工程实践成果；最后总结了特高压工程技术应用经验和技术标准。

图书在版编目（CIP）数据

特高压交直流电网/刘振亚编著. —北京：中国电力出版社，
2013. 12

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4552 - 2

I. ①特… II. ①刘… III. ①高压电力系统 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 125282 号

审图号：GS（2013）1425 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>）

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 12 月第一版 2013 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 32 印张 739 千字

定价 156.00 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



刘振亚

国家电网公司董事长、党组书记
中国电力企业联合会理事长
教授级高级工程师

作者长期从事电力与能源工作，组织和参与了中国特高压和智能电网的创新与建设，已出版有《中国电力与能源》、《特高压电网》、《智能电网技术》、《特高压交流输电技术丛书》、《特高压直流输电技术丛书》等。

前言

纵观世界电网百余年的发展历程，一直接电压等级由低到高、联网规模由小到大、资源配置能力由弱到强的客观规律快速发展。从 21 世纪初开始，建设具有跨国和跨洲电力配置能力、灵活适应新能源发展和多样化需求服务的现代电网体系——坚强智能电网，成为世界电网发展的方向和战略选择。建设坚强智能电网对于促进能源、经济、环境全面协调发展具有重要意义。

一、安全、高效、清洁是能源发展的战略方向

能源是经济社会发展的基本保障。随着全球资源紧张、气候变化问题日益加剧，资源和环境对能源发展的约束越来越强。如何以新一轮能源革命为契机，加快能源战略转型，保障能源安全、高效、清洁供应，是世界各国面临的共同挑战。

能源问题涉及能源政策、能源科技、能源市场、能源环境等诸多方面。要解决好能源问题，应当树立“大能源观”，以全球化视野、可持续理念、战略性举措、创新性技术着力转变能源发展方式，统筹能源与经济社会环境协调发展，推动能源结构由高碳转向低碳、能源利用由粗放转向集约、能源配置由局部地区转向全球范围、能源服务由单向供给转向智能互动，构建以安全发展、高效发展、清洁发展为目标现代能源保障体系。

21 世纪以来，世界能源开发利用规模不断增大，新能源开发利用持续快速发展，能源结构多元化趋势明显。电能是安全、优质、高效、清洁的二次能源。用电能替代化石能源在能源终端消费中的份额已成为能源发展的重要趋势。电网是电能传输、资源配置、市场交易、客户服务的基本载体，要实现安全、高效、清洁的能源发展目标，就要充分发挥电网的能源转换和资源配置作用，推动以电为中心的能源发展思路，促进一次能源多元化，这是能源可持续发展的必由之路。《第三次工业革命》一书的作者杰里米·里夫金提出，以互联网技术和新能源为特征的第三次工业革命正在蓬勃兴起，并将深刻影响着全球发展格局。建设坚强智能电网是推动第三次工业革命的重要基础。近年来世界各国纷纷将电网发展作为新能源发展的战略重点。

二、建设特高压电网是实现能源安全、高效、清洁供应的客观要求

新形势下，作为能源领域的重要骨干企业，国家电网公司面临着如何保障电能供应、如何保证电网科学发展的战略选择和严峻挑战。

国家电网公司认真研判经济社会发展对电能的需求，深入研究我国能源资源与能源需求呈逆向分布的特点，树立“大能源观”和全球化视野，推动技术创新，着力转变能源和电力发展方式，制定实施“一特四大”战略，即加快特高压电网建设，促进大煤电、大水电、大核电、大型可再生能源基地集约开发，着力于“以电代煤、以电代油、电从远方来”，实现电能替代，促进经济社会可持续发展。

建设以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网是解决能源和电力发展深层次矛盾的治本之策，是满足各类大型能源基地

和新能源大规模发展的迫切需要。特高压电网承担着将西北、东北、蒙西、川西、西藏及境外电力输送至我国东中部地区负荷中心的重要职能。我国 76%的煤炭资源分布在北部和西北部地区，80%的水能资源在西南部地区，陆地风能主要集中在西北、东北和华北北部，而 70%以上的能源需求来自东中部地区。随着煤炭开发的重点逐步西移和北移，西部水电大规模集约化开发利用，电力发展方式正在加快转变，由就地平衡发展模式转变为大电网联网供电模式。东部地区由于环境压力大、运输成本高、土地资源紧张，已不适宜再大规模建设燃煤电厂，客观上决定了我国能源和电力发展必须走远距离、大规模输电和全国范围优化资源配置的道路。大型能源基地与东中部地区负荷中心之间的输电距离为 1000~3000 千米，超出传统超高压输电线路的经济输送距离，这就要求电力能够经济高效地大规模、远距离输送和大范围消纳。通过以特高压为特征的大电网接入水电、风电、太阳能发电等电源，构建多能互补的配置平台，推动绿色、清洁能源大发展，减少碳排放，是建设美丽中国切实可行的措施和必然选择。

三、特高压电网的创新实践和前景展望

发展特高压输电被纳入中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个和第十二个五年规划纲要，以及《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006~2020 年）》，是国家能源发展战略的重要组成部分。

2009 年 1 月，我国自主研发、设计和建设的 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程建成并正式投入商业运行。这是迄今为止世界上电压等级最高、输送能力最大、技术水平最先进的特高压交流输变电工程。2010 年 7 月，向家坝—

上海±800kV 特高压直流输电示范工程建成并正式投入商业运行。特高压交直流输电示范工程的建成投运和稳定运行，全面验证了发展特高压输电的可行性、安全性、经济性和优越性。随后的三年中，国家电网公司又建成了两个特高压交流输电工程和两个特高压直流输电工程，工程投运后一直安全稳定运行。

2011年4月，特高压交流试验示范工程获中国工业大奖，这项工程被国际大电网组织誉为“一个伟大的技术成就”。2013年2月，“特高压交流输电技术、成套设备及工程应用”荣获国家科学技术进步奖特等奖，中国拥有完整的自主知识产权，同时也是世界上唯一掌握这项技术的国家。国际电工委员会评价认为，中国建成世界上电压等级最高、输电能力最强的交流输电工程，是“电力工业发展史上的一个重要里程碑”，确立了中国在特高压输电领域的国际领先地位。

特高压电网发展取得的成就，是党中央、国务院高瞻远瞩和坚强领导，以及社会各界大力支持和积极配合的结果，是国家电网公司立足自主创新、不懈努力和艰苦奋斗的结果。目前，中国特高压电网建设取得了丰硕成果：建成特高压交流、特高压直流、高海拔、工程力学四个试验基地和大电网仿真、直流成套设计两个研发中心，形成功能齐全的特高压、大电网试验研究体系，全面掌握特高压交直流输电核心技术和整套设备制造能力；在特高压交直流输变电、大电网控制保护、智能电网、清洁能源接入等领域取得一批世界级创新成果；建立了特高压与智能电网技术标准体系，已制订企业标准363项、行业标准145项、国家标准66项，编制国际标准19项，中国的特高压交流电压成为国际标准电压；国际电工委员会（IEC）将高压直流、大容量可再生能源接入电网等4个分技术委员会秘书处设

在国家电网公司。中国特高压输电工程的成功，树立了世界电网发展新的里程碑，开启了以特高压为最高电压等级电网建设的新纪元，在电网科技领域实现了“中国引领”和“中国创造”，完成了从追赶到超越的历史性转变。

2020年，国家电网公司经营区域内的东中部12个受电省（市）需要从区外受进电力达3.5亿千瓦，风电和太阳能等装机容量将分别达到2亿千瓦和5000万千瓦，这对电网的远距离、大容量电能输送和间歇性清洁能源消纳的能力提出了更高要求。根据规划，国家电网公司将建成“五纵五横”特高压交流网架和27项特高压直流输电工程，具备4.5亿千瓦电能大范围配置能力，满足输送5.5亿千瓦清洁能源的需求，每年可消纳清洁能源1.7万亿千瓦时，替代原煤7亿吨，减排二氧化碳14亿吨、二氧化硫390万吨。

随着特高压输电等先进技术的全面推广应用，电网不仅是传统意义上的电能输送载体，还是功能强大的能源转换、高效配置和互动服务平台。通过这个平台，能够将煤炭、水能、风能、太阳能、核能、生物质能、潮汐能等一次能源转换为电能，实现多能互补、协调开发、合理利用；能够连接大型能源基地和负荷中心，实现电力远距离、大规模、高效率输送，在更大范围内优化能源配置；能够与互联网、物联网、智能移动终端等相互融合，满足客户多样化需求，服务智能家居、智能社区、智能交通、智慧城市发展。电网将成为我国未来的能源互联网平台。

全面总结和推广应用特高压电网建设的成果具有重要意义。本书从电网发展的历程、现状和趋势入手，分析了特高压电网发展的动因，并论述了交直流输电的技术特点及特高压交

直流输电系统的优势，提出了中国特高压交直流电网的构建设想及其论证分析；分专业阐述了特高压输电技术的科技创新和工程实践成果；总结了特高压工程技术应用经验和技术标准。希望通过本书的系统总结，使广大读者全面了解中国特高压电网建设的基本情况，也希望更多的领导、专家学者对中国特高压电网的发展提出宝贵意见和建议，以博采众长、再接再厉，进一步推动电力工业全面、协调、可持续发展，为经济社会发展和实现中华民族伟大复兴的中国梦贡献力量。

作者

2013年12月

目 录

前言

第一章 电网发展和电压提升	1
第一节 电网发展与互联	1
一、电网基本概念	1
二、电网发展历程	3
三、电网互联现状	5
四、电网发展趋势	7
第二节 特高压输电发展动因及研发历程	11
一、特高压输电发展动因	11
二、国际特高压输电研发历程	14
三、中国特高压输电创新与实践	15
第三节 特高压交直流混合电网	18
一、交直流输电技术的特点	18
二、特高压交直流混合电网特征	19
三、特高压电压等级选择的原则	20
参考文献	22
第二章 特高压交流输电系统特性	24
第一节 特高压交流输电线路参数	24
一、单位长度的线路参数	24
二、导线分裂结构对线路感抗和容抗的影响	29
三、超/特高压交流输电线路参数的比较	30
四、特高压交流输电线路的等值电路	30
第二节 特高压交流输电线路输电特性	34
一、自然功率	34
二、有功功率与无功功率的输送	35
三、功率损耗与电压降落	37
四、功率—电压特性	39
第三节 特高压交流系统稳定性及输电能力计算方法	42
一、电力系统稳定性的基本概念	42
二、电力系统安全稳定标准及稳定性判据	51
三、特高压交流系统输电能力的计算方法	53

第四节	系统参数对特高压交流系统输电能力的影响	55
一、	变压器电抗与特高压输电线路电抗的比率	55
二、	发电机电抗与特高压输电线路电抗的比率	57
三、	发电机(厂、站)接入方式对特高压输电能力的影响	58
四、	系统参数对特高压输电能力的影响	59
	参考文献	64
第三章	特高压直流输电系统特性	65
第一节	高压直流输电的基本原理	65
一、	高压直流输电换流技术基础	65
二、	6脉动换流器	66
三、	12脉动换流器	70
第二节	特高压直流输电系统特点	71
一、	系统构成	71
二、	直流输电系统运行方式	75
三、	特高压直流输电的特点及应用	79
第三节	特高压直流输电系统安全稳定运行	82
一、	交流系统对特高压直流系统运行的支撑作用	82
二、	特高压直流系统接入交流系统的方式	83
三、	特高压直流系统接入交流系统的稳定评价方法	84
四、	特高压直流系统与交流系统的相互影响	88
	参考文献	89
第四章	中国特高压电网构建	90
第一节	中国未来电力需求预测	90
一、	国民经济发展趋势	90
二、	电力需求水平及负荷分布	91
三、	电源结构与布局	93
四、	电力流格局	96
第二节	大型电源基地的电力输送方式选择	99
一、	大型电源基地概述	99
二、	大型电源基地电力输送方式	101
三、	特高压交直流电网与大型电源基地的关系	104
第三节	中国电网发展模式	107
一、	中国电网发展的特点	107
二、	电网发展方案筛选	108
三、	电网发展方案安全性分析	111
四、	“三华”特高压同步方案经济性评价	119
五、	“三华”特高压同步电网的社会效益	122

参考文献	123
第五章 特高压电网内部过电压及其限制措施	124
第一节 内部过电压分类及特高压系统过电压水平	124
第二节 暂时过电压及其限制措施	126
一、工频过电压及其限制措施	126
二、谐振过电压及其限制措施	130
第三节 潜供电流及其限制措施	134
一、潜供电流及其恢复电压	134
二、潜供电流限制措施	135
三、潜供电弧自灭特性	136
四、固定高抗中性点电抗选择	139
五、可控高抗中性点电抗选择	140
六、快速接地开关选择	141
七、串联补偿电容对潜供电流暂态过程的影响	141
八、相序排列对同塔双回线路潜供电流的影响	142
第四节 操作过电压及其限制措施	143
一、合闸操作过电压及其限制措施	143
二、分闸操作过电压及其限制措施	147
第五节 特快速瞬态过电压及其限制措施	151
一、特快速瞬态过电压的产生及影响	151
二、特快速瞬态过电压的特性	151
三、特快速瞬态过电压的限制措施	155
第六节 直流输电系统内过电压及其限制措施	156
一、直流输电系统内过电压起因	156
二、直流输电系统内过电压的限制措施	157
三、直流输电系统内过电压限制效果	160
参考文献	166
第六章 特高压电网的雷电过电压与保护	168
第一节 雷电及其主要参数	168
一、雷电机理	168
二、雷电参数	169
三、雷电过电压	172
第二节 特高压架空输电线路防雷保护	173
一、特高压架空输电线路防雷保护的特点	173
二、特高压架空输电线路雷电跳闸率的计算方法	174
三、特高压架空输电线路防雷保护工程应用	179
第三节 特高压变电站和换流站防雷保护	184

一、特高压变电站和换流站防雷保护仿真方法	184
二、特高压变电站防雷保护	185
三、特高压换流站防雷保护	187
参考文献	189
第七章 特高压输电外绝缘特性与绝缘配合	190
第一节 特高压输电外绝缘放电特性	190
一、特高压输电外绝缘分类	190
二、特高压架空输电线路空气间隙的放电特性	190
三、特高压变电站和换流站空气间隙的放电特性	201
四、海拔修正	205
五、特高压电网绝缘子的沿面闪络特性	206
第二节 特高压架空输电线路空气间隙	208
一、工作电压要求的导线对杆塔空气间隙	208
二、操作过电压要求的导线对杆塔空气间隙	210
三、雷电过电压要求的导线对杆塔空气间隙	212
四、特高压架空输电线路导线对杆塔的空气间隙推荐值	213
第三节 特高压变电站和换流站空气间隙	214
一、工作电压要求的空气间隙	214
二、操作过电压要求的空气间隙	215
三、雷电过电压要求的空气间隙	217
四、特高压变电站空气间隙的推荐值	219
五、特高压换流站直流场空气间隙的推荐值	219
第四节 特高压绝缘子的选择	221
一、架空输电线路绝缘子型式与片数的选择	221
二、变电站和换流站用绝缘子的选择	223
第五节 特高压电气设备的绝缘水平	224
一、避雷器参数	224
二、特高压交流电气设备的绝缘水平	226
三、特高压直流电气设备的绝缘水平	229
参考文献	232
第八章 特高压输变电工程的电磁环境	233
第一节 输变电工程电磁环境简述	233
第二节 特高压输变电工程的电场和磁场	234
一、特高压交流输变电工程的电场和磁场	234
二、特高压交流输电线路工频电场和磁场的限值	240
三、特高压直流输电工程的合成电场和直流磁场	241
四、特高压直流输电线路合成电场和直流磁场的限值	245

五、工频电场和磁场的环境影响	246
第三节 特高压输变电工程的噪声	247
一、可听噪声的物理量度和 A 声级	247
二、架空输电线路可听噪声特性及影响因素	247
三、特高压输变电工程可听噪声计算	251
四、特高压架空输电线路可听噪声限值	253
五、特高压变电站和换流站噪声限值	254
六、特高压输变电工程降低可听噪声的措施	254
第四节 特高压架空输电线路的无线电和电视干扰	256
一、架空输电线路的无线电和电视干扰特性及影响	256
二、架空输电线路无线电干扰计算	259
三、特高压架空输电线路无线电干扰限值	260
四、特高压架空输电线路降低无线电干扰的措施	261
第五节 特高压架空输电线路的电晕损失	262
一、架空输电线路的电晕现象	262
二、特高压架空输电线路电晕试验	262
三、交流输电线路电晕损失计算	265
四、直流输电线路电晕损失计算	267
参考文献	269
第九章 特高压架空输电线路设备	270
第一节 特高压架空输电线路杆塔	270
一、特高压杆塔塔型及特点	270
二、特高压杆塔结构的设计与优化	272
三、杆塔基础	277
第二节 特高压架空输电线路导、地线	280
一、特高压架空输电线路导、地线的结构型式	280
二、特高压架空输电线路振动	289
第三节 特高压架空输电线路绝缘子	297
一、特高压交流架空输电线路绝缘子	297
二、特高压直流架空输电线路绝缘子	300
第四节 特高压架空输电线路金具	304
一、间隔棒	304
二、悬垂金具	304
三、耐张金具	305
四、屏蔽环与均压环	306
五、跳线金具	307
参考文献	307

第十章 特高压变电站与特高压交流电气设备	309
第一节 特高压变电站	309
一、特高压变电站电气主接线.....	309
二、特高压变电站电气设备	310
三、特高压变电站布置	313
第二节 特高压变压器与并联电抗器	318
一、特高压变压器	318
二、特高压并联电抗器	324
第三节 特高压开关设备	331
一、特高压气体绝缘金属封闭开关设备	331
二、特高压断路器	333
三、特高压隔离开关	337
第四节 特高压串联补偿装置	340
一、特高压串联补偿装置的结构	340
二、特高压串联补偿装置的关键技术条件	340
第五节 特高压避雷器	345
一、特高压避雷器的主要作用	345
二、特高压避雷器的主要性能参数	346
三、特高压避雷器的结构设计	348
第六节 特高压支柱绝缘子及套管	349
一、特高压支柱绝缘子	349
二、特高压套管	350
第七节 特高压电压互感器与电流互感器	351
一、特高压电压互感器	351
二、特高压电流互感器	354
第八节 特高压变电站重要电气设备的抗震	355
一、特高压电气设备的结构特点	355
二、特高压电气设备抗震能力的研究现状	355
三、特高压电气设备的抗震设计	356
参考文献	358
第十一章 特高压换流站与特高压直流电气设备	359
第一节 特高压换流站	359
一、特高压换流站直流电气主接线	359
二、特高压换流站交流电气主接线	360
三、特高压换流站电气总平面布置	361
第二节 特高压换流阀及阀控系统	362
一、特高压换流阀	362

二、特高压换流阀控制系统	364
第三节 特高压换流变压器与平波电抗器	366
一、特高压换流变压器	366
二、特高压平波电抗器	370
第四节 特高压换流站滤波器	372
一、特高压直流滤波器	372
二、特高压交流滤波器	374
第五节 特高压换流站避雷器	377
一、特高压换流站避雷器的种类及特点	377
二、特高压直流避雷器的结构	379
第六节 特高压直流支柱绝缘子与套管	379
一、直流绝缘子污秽特性	379
二、特高压直流支柱绝缘子	380
三、特高压直流穿墙套管	381
第七节 直流开关设备	382
一、直流转换开关	382
二、直流隔离开关	384
三、旁路断路器	385
第八节 特高压直流测量装置	386
一、直流电流测量装置	386
二、直流电压测量装置	388
第九节 特高压直流控制和保护设备	389
一、特高压直流控制和保护的特点	389
二、特高压直流控制和保护分层结构	390
参考文献	392
第十二章 中国特高压输电工程实践	393
第一节 特高压交流输电工程	393
一、1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程	393
二、1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程扩建工程	396
三、1000kV 淮南—上海特高压交流输电示范工程	398
第二节 特高压直流输电工程	401
一、向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程	401
二、锦屏—苏南±800kV 特高压直流输电工程	405
三、哈密南—郑州±800kV 特高压直流输电工程	409
第三节 特高压试验设施	412
一、特高压交流试验基地	412
二、特高压直流试验基地	417