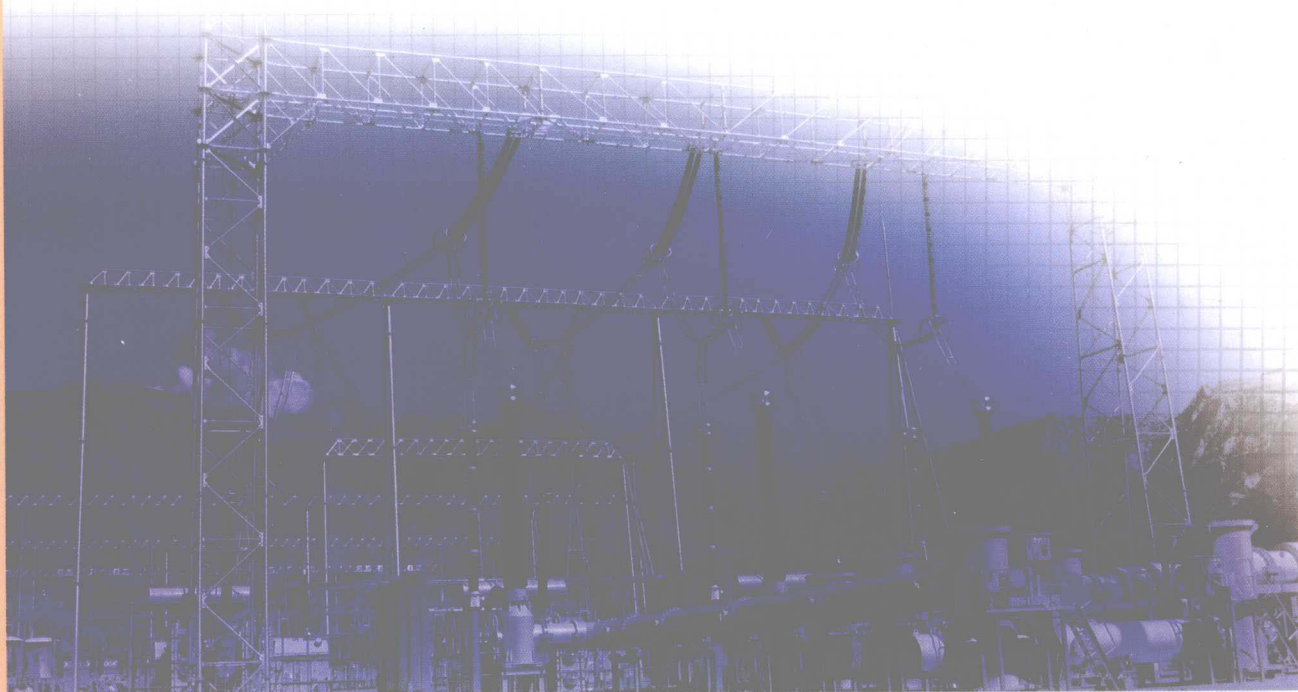


刘振亚 主编

特高压 电网(工程) 前期论证



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



刘振亚 主编

特高压 电网(工程) 前期论证



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

发展特高压输电是由我国能源资源和生产力逆向分布的基本特性决定的,是我国能源和电力工业可持续发展的必由之路。国家已经把发展特高压输电纳入《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》和《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》。

国家电网公司在我国近20年特高压输电技术研究的基础上,并充分吸纳世界各国特高压输电研究和实践的成果,从2004年开始全面系统地开展特高压电网(工程)前期研究论证工作。特高压电网(工程)前期研究论证包括对我国能源输送方式、能源基地建设及电力中长期发展规划、特高压同步电网构建以及特高压电网建设和试验示范工程选择等重要软课题进行的专项研究,以及159项特高压交、直流关键技术研究,覆盖了规划、系统、设计、设备、施工、调试、运行维护等各个方面。

为了全面系统、真实客观地反映特高压电网前期论证工作的历程和重要成果,国家电网公司组织编写了《特高压电网(工程)前期论证》一书。全书共分12章,主要包括必要性论证、电压等级论证、关键技术论证、经济性论证、环保论证、安全性论证、特高压规划、试验示范工程比选与可研、试验基地建设、重大论证活动等内容。

本书可为电力行业的科研、规划、设计、制造、施工、运行等方面的技术人员和管理人员提供参考,也可供关心特高压输电技术的各界人士研读。

图书在版编目(CIP)数据

特高压电网(工程)前期论证 / 刘振亚主编. —北京:中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-7776-6

I. 特… II. 刘… III. 高压电力系统—研究 IV. TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第127516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

*

2008年8月第一版 2008年8月北京第一次印刷

880毫米×1230毫米 16开本 13.25印张 243千字

印数0001—3000册 定价80.00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

前 言

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。进入 21 世纪以来，随着全球经济的复苏，世界能源需求增长强劲，供需矛盾日趋紧张。虽然我国能源资源蕴藏总量丰富，但人均拥有量只有世界平均水平的 40% 左右，加之国民经济持续稳定发展带来对能源需求的不断增长，保障能源稳定、经济、清洁、安全供应的形势日趋严峻。

国家电网公司作为关系国家能源安全和国民经济命脉的国有重要骨干企业，在贯彻落实科学发展观，着力加强电网建设，充分发挥电网的市场和网络功能，促进资源优化配置，保障国家能源安全，推动国民经济持续健康发展等方面肩负重大责任。2004 年底，国家电网公司在认真分析我国电力工业发展现状及未来趋势的基础上，提出了“一特三大”战略，即建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强国家电网的发展目标，促进大煤电、大水电、大核电基地集约化开发。

特高压输电是当今世界电力技术的制高点。20 世纪 60 年代，国际上一些发达国家就开始大规模研究特高压输电技术，建成并投运了一些特高压试验站和输电工程，但后来由于这些国家电力需求趋缓等原因，特高压输电技术没有得到进一步发展。中国对特高压输电技术的研究始于 20 世纪 80 年代，近年来国家电网公司为了满足经济社会快速发展对电力的需求，大力组织开展特高压输电技术攻关，取得了一系列重要成果。国内外研究均表明，特高压输电在技术上是可行的，没有不可克服的障碍。我国发展特高压输电是由能源资源和生产力逆向分布的基本特性决定的，是我国能源和电力工业可持续发展的必由

之路，国家已把发展特高压输电技术与装备纳入我国《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006～2020 年）》、《国家自主创新基础能力建设“十一五”规划》和《中国应对气候变化国家方案》。

由于目前世界上没有特高压输电工程投入商业运行，我国发展特高压电网面临巨大的挑战。在国家发改委的统一领导和有关各方的大力支持配合下，国家电网公司知难而上，遵循“科学论证、示范先行、自主创新、扎实推进”的方针，在我国近 20 年特高压输电研究的基础上，充分吸纳世界各国特高压输电研究和实践的成果，全面系统地开展了特高压输电前期研究论证工作。国家电网公司邀请和组织国内一流的科研咨询机构与知名专家就我国能源输送方式、能源基地建设及电力中长期发展规划、特高压同步电网构建以及特高压电网建设和试验示范工程选择等重要课题进行专项研究，并先后组织开展了 126 项特高压交、直流关键技术研究 and 33 项工程单项研究专题，覆盖了规划、系统、设计、设备、施工、调试、运行维护等各个方面。通过这些课题和关键技术研究，进一步论证了发展特高压电网的必要性、可行性和紧迫性，明确了特高压电网建设一系列重大技术方案和设计原则，确定了特高压交、直流输电的电压水平及其他技术标准。在电磁环境影响、系统无功补偿、过电压与绝缘配合、潜供电流控制、系统安全稳定控制、变电站和线路设计、施工技术等方面取得了一系列重要成果，为特高压工程建设夯实了基础。

近三年来，国家电网公司始终坚持重大问题科学民主决策的方针，广泛听取各方面意见，多次组织技术交流和专题研讨活动，集中各方力量和智慧，充分体现了科学严谨、求真务实的精神。特高压输电前期工作具有论证内容系统全面、论证方法科学严谨、论证过程民主、论证人员广泛、论证结论权威、决策程序严格等主要特点。据不完全统计，有 2000 多人直接参与了特高压输电技术研究咨询工作，其中院士 30 多人，高级工程师及以上 1100 多人；先后召开了 240 多次重要专题论证会议，与会专家和代表超过 7000 人次。在国务院领导的关怀下，在国家有关部门和各级政府的大力支持下，国家电网公司与有关规划、咨询、科研机构与制造行业携手共进，攻坚克难，使特高压前期研究论证工作取得了重大进展。2006 年 8 月和 2007 年 4 月，特高压交、直流试验示范工程先后获得国家发展改革委核准，全面进入了建设实施阶段。

特高压输电前期研究论证工作取得的成绩，倾注了诸多领导、专家以及广大工程技术人员的心血和汗水，凝聚着中国乃至世界电力界有识之士的集体智慧。为使更多的人了解我国特高压电网科学论证、民主决策的历程，推动特高压输电在我国的发展和应用，为关心特高压输电技术发展的各界人士提供借鉴，国家电网公司组织编写了《特高压电网（工程）前期论证》一书，前后历时 7 个月，超过 40 人直接参与撰写、编辑和审定工作。全书共分 12 章，主要包括电压等级选择、关键技术论证、经济性论

证、环保论证、安全性论证、特高压输电规划、试验示范工程比选与可行性研究、试验基地建设、重大论证活动内容，全面系统、真实客观地反映了国家电网公司特高压电网前期论证工作的主要历程和重要成果。

在本书即将出版之际，国家电网公司向关心、支持和参与特高压工作的各位领导、专家和全体同仁表示衷心的感谢。

国家电网公司

二〇〇七年九月



STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

编写人员名单

主 编	刘振亚				
副 主 编	舒印彪				
编委会成员	孙 昕	陈维江	张 贺	刘泽洪	丁 扬
	郭丁平	刘开俊	王运丹	于 刚	于永清
	胡 毅	张运洲	杨建平	吴维宁	
顾 问	周小谦	刘本粹	杜至刚		
编写组组长	孙 昕				
编写组副组长	陈维江	张 贺	刘泽洪	丁 扬	刘开俊
	王运丹				
编写组成员	韩先才	高理迎	毛继兵	王怡萍	袁 骏
	王绍武	余 军	吕 健	陈小良	修 建
	陈葛松	孙 岗	韩 丰	李勇伟	万启发
	甄为红	乔振宇	赵 强	鲁丽萍	项 维
	王 帅	印永华	张祖平	刘先进	郭 强
	班连庚	宿志一	谷定燮	陈 勇	张翠霞
	李光范	陆家榆	杨志栋	赵 彪	刘海波
	邬 雄	李雪明	陈江波	陈松林	李海英
	何长华	邬 炜			

目 录

前言

1	绪论	1
1.1	发展特高压输电符合国家的战略部署	2
1.2	国外特高压输电技术研究与工程实践	4
1.2.1	特高压输电试验研究	4
1.2.2	特高压交流输电主要设备研制	5
1.2.3	特高压交流输电线路建设	6
1.2.4	特高压交流输电工程与设备运行情况	7
1.3	我国特高压输电论证	7
1.3.1	理论研究	7
1.3.2	工程论证	8
1.3.3	标准化建设	9
1.4	我国特高压输电论证体系	10
1.4.1	组织体系	10
1.4.2	关键技术论证体系	10
1.4.3	标准体系	12
2	必要性论证	13
2.1	构筑稳定、经济、清洁、安全的能源供应体系	14
2.1.1	电力需求持续快速增长的客观需求	14
2.1.2	远距离大容量输电的客观需要	14
2.1.3	电网发展基本规律的客观要求	15
2.2	实现电力工业协调发展	16

2.2.1	电力工业结构调整的要求	16
2.2.2	电力产业布局优化的要求	17
2.3	特高压输电具有显著的优越性	17
2.3.1	输送容量大	17
2.3.2	节约土地资源	17
2.3.3	输电损耗低	17
2.3.4	工程造价省	17
2.4	特高压输电具有重要的创新意义	18
2.4.1	提高科技自主创新能力	18
2.4.2	实现电网技术升级	18
2.5	特高压输电促进装备制造业的发展	19
2.5.1	交流输变电装备产业形成国际竞争力	19
2.5.2	提升直流输电装备产业的国际地位	20
3	电压等级论证	21
3.1	特高压电网电压等级论证的内容	22
3.2	交流特高压电网标称电压的论证	23
3.2.1	交流特高压电网标称电压的选择	23
3.2.2	影响标称电压选择的主要因素	24
3.2.3	特高压电网标称电压的选择研究	25
3.3	交流特高压电网最高运行电压的论证	26
3.3.1	交流特高压电网最高运行电压的选择范围	26
3.3.2	影响最高运行电压选择的主要因素	27
3.3.3	特高压电网最高运行电压的选择研究	28
3.4	直流特高压输电额定电压的论证	31
3.4.1	国内外直流输电工程的额定电压	31
3.4.2	直流特高压输电额定电压的选择研究	31
3.5	主要结论	33
4	关键技术论证	34
4.1	关键技术论证体系	34
4.2	特高压交流过电压与绝缘配合	36
4.2.1	研究内容	36
4.2.2	论证过程	41

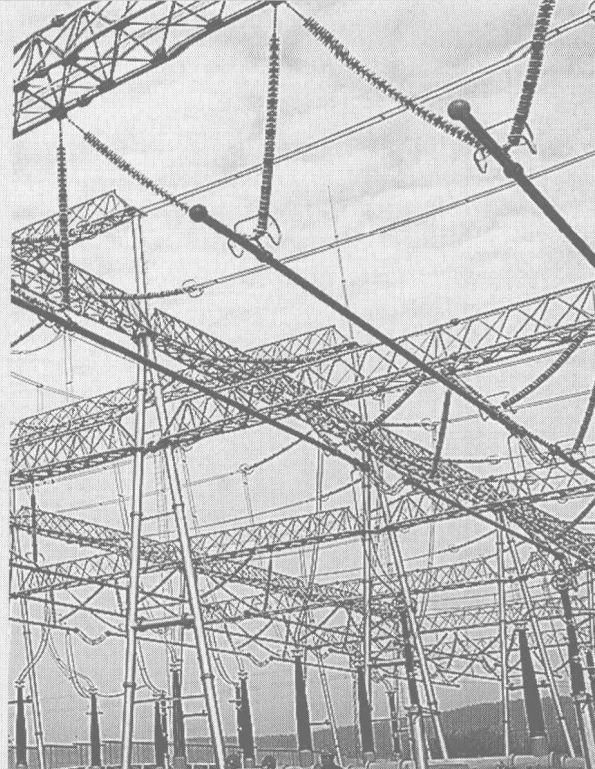
4.2.3	主要结论	42
4.3	交流系统无功补偿	42
4.3.1	研究内容	44
4.3.2	论证过程	44
4.3.3	主要结论	45
4.4	潜供电流和恢复电压的控制	45
4.4.1	研究内容	46
4.4.2	论证过程	47
4.4.3	主要结论	48
4.5	交流输变电工程设备外绝缘特性	49
4.5.1	研究内容	49
4.5.2	论证过程	51
4.5.3	主要结论	51
4.6	特高压直流过电压与绝缘配合	52
4.6.1	研究内容	53
4.6.2	论证过程	57
4.6.3	主要结论	57
4.7	特高压直流工程换流站无功补偿和控制	58
4.7.1	研究内容	59
4.7.2	论证过程	59
4.7.3	主要结论	59
4.8	直流工程外绝缘	60
4.8.1	研究内容	61
4.8.2	论证过程	62
4.8.3	主要结论	62
5	经济性论证	64
5.1	特高压输电技术的经济性	65
5.1.1	国外对特高压输电技术经济性的研究	65
5.1.2	特高压输电与输煤的经济性比较	65
5.1.3	交流输电技术的经济性比较	68
5.1.4	直流输电技术的经济性比较	68
5.2	特高压电网的经济性	69

5.2.1	经济效益测算	70
5.2.2	投入产出分析	70
5.2.3	输电价竞争力分析	71
5.3	特高压交流试验示范工程的经济性	72
5.3.1	输电价竞争力分析	72
5.3.2	财务能力分析	73
5.4	特高压直流示范工程的经济性	73
5.4.1	输电竞争力分析	73
5.4.2	财务能力分析	74
6	环保论证	75
6.1	概述	75
6.1.1	输变电工程的电磁环境问题	76
6.1.2	环保论证的过程	77
6.2	交流电磁环境影响	79
6.2.1	可听噪声	79
6.2.2	无线电干扰	80
6.2.3	工频电场与磁场	82
6.2.4	电磁环境指标的经济性比较	83
6.3	直流电磁环境影响	84
6.3.1	直流线路的电磁环境	85
6.3.2	换流站的电场和无线电干扰	88
6.3.3	换流站的噪声	90
6.3.4	直流接地极的环境影响	91
6.4	特高压工程的环境影响评价	92
6.4.1	交流工程的环境影响评价	92
6.4.2	直流输电工程环境影响评价	92
7	系统安全性论证	94
7.1	系统仿真研究方法	95
7.1.1	特高压电网安全性论证采用的系统仿真研究方法	95
7.1.2	采用全数字仿真方法的研究课题及其主要内容	96
7.1.3	采用数模混合仿真方法的研究课题及其主要内容	98
7.1.4	采用动态模拟方法的研究课题及其主要内容	98

7.2	特高压交流试验示范工程安全性论证	99
7.2.1	工程的安全稳定	99
7.2.2	研究过程	99
7.2.3	主要结论	100
7.3	直流示范工程安全性论证	101
7.3.1	工程的安全稳定	101
7.3.2	研究过程	101
7.3.3	主要结论	102
7.4	特高压电网规划方案安全性论证	103
7.5	二次系统对电网安全的作用和影响	104
7.5.1	二次系统对特高压电网安全稳定运行的影响	104
7.5.2	研究过程	104
7.5.3	主要结论	105
8	电网规划论证	107
8.1	特高压电网规划	108
8.1.1	规划思路及原则	108
8.1.2	全国电力流分析	109
8.1.3	特高压电网推荐规划方案	110
8.2	金沙江溪洛渡、向家坝输电系统规划	111
8.2.1	规划思路及原则	111
8.2.2	电能消纳方案分析	112
8.2.3	推荐输电方案	113
8.3	锦屏输电系统规划	114
8.3.1	规划思路及原则	114
8.3.2	电能消纳方案分析	114
8.3.3	推荐输电方案	115
9	工程选择及可研论证	116
9.1	交流试验示范工程选择	116
9.1.1	建设特高压试验示范工程的主要原则及技术路线	116
9.1.2	试验示范工程备选方案及工程比选	117
9.1.3	风险评估	119
9.1.4	主要结论	119

9.2	直流送出方案比选	119
9.2.1	直流送出方案	120
9.2.2	方案比选	120
9.2.3	主要结论	122
9.3	特高压交流试验示范工程可研	123
9.3.1	工程建设的必要性	123
9.3.2	系统方案	124
9.3.3	工程建设规模	125
9.4	特高压直流示范工程可研	126
9.4.1	工程建设的必要性	126
9.4.2	系统方案及系统要求	127
9.4.3	工程建设规模	127
10	设备自主化论证	129
10.1	特高压交流设备自主化	130
10.1.1	国外研发现状	130
10.1.2	特高压交流设备的自主化	131
10.2	特高压直流设备自主化	133
10.2.1	国外研发现状	133
10.2.2	我国自主化历程	134
11	特高压试验基地和电网仿真中心建设	139
11.1	国外试验基地建设情况	139
11.1.1	美国的试验研究线段	139
11.1.2	前苏联特高压试验线段	140
11.1.3	日本特高压试验线段	140
11.1.4	意大利特高压试验场(站)	141
11.1.5	加拿大建设特高压试验基地情况	142
11.2	特高压交流试验基地	142
11.2.1	基地的建设内容	143
11.2.2	基地建设情况	146
11.2.3	主要研究成果	147
11.2.4	基地科研计划	149
11.3	特高压直流试验基地	150

11.3.1	基地的建设内容	151
11.3.2	基地建设情况	154
11.3.3	主要研究成果	154
11.4	特高压工程力学试验基地	156
11.4.1	基地的功能	156
11.4.2	主要研究成果	158
11.4.3	基地研究计划	159
11.5	国家电网仿真中心	160
11.5.1	建设的必要性	160
11.5.2	建设目标及功能	160
11.5.3	建设的关键技术	163
12	重大论证活动	166
12.1	2005 特高压输电技术国际研讨会	166
12.2	国家发改委组织召开特高压输电技术研讨会	167
12.2.1	北戴河会议	167
12.2.2	北京座谈会	168
12.3	关于我国特高压输电研究与工程建设的咨询意见	169
12.4	国务院发展研究中心开展的调研工作	170
12.5	特高压相关专著出版	171
12.6	2006 特高压输电技术国际会议	172
12.7	对外交流及咨询活动	174
12.8	标准化工作进程	175
12.8.1	交流标准化工作进程	175
12.8.2	直流标准化工作进程	175
12.8.3	IEC/CIGRE 特高压国际标准研讨会	176
附录 1	特高压关键技术研究课题汇总	178
附录 2	特高压工程大事记	183
参考文献		195



1 绪 论

2004 年底以来，按照国务院和国家发改委的指示精神，遵循“科学论证、示范先行、自主创新、扎实推进”的基本原则，国家电网公司在国内外已有成果和经验的基础上，集中系统地开展了特高压关键技术的研究与论证工作。通过前期论证，特高压交流试验示范工程和直流示范工程相继获得国家发展改革委核准。

特高压电网（工程）前期论证结论可归纳为：

（1）特高压骨干网架规划论证结论：特高压交流定位于高一级电压电网建设，在华北、华中及华东形成结构坚强的骨干网架，覆盖大的煤电基地、水电基地、核电基地和负荷中心，推动能源资源的有效开发和利用。特高压直流定位于西部大电源基地的远距离外送，依托坚强的交流电网发挥作用。最终形成“强交流和强直流”输电结构，改善电网结构，提高系统的安全可靠性。

（2）能源运输方式研究成果：输煤输电并举，优先发展输电，形成以特高压电网输电和铁路大通道输煤为支撑，相互补充，分工合理的能源输送方式，实现输煤与输电的良性互动。

（3）重大技术问题咨询结论：中国工程院于 2005 年 7 月成立了包括 27 位院士和 7 名专家组成的咨询课题组，咨询意见明确指出特高压输电技术在我国有重要的工程应用前景，应该加快特高压输电研究和工程应用的步伐。建议按照“全面严格试验验证方案”，实施特高压交流试验示范工程。

（4）特高压输电技术可行性研究结论：通过大量的科研攻关和设备调研，证实了



我国发展 1000kV 特高压交流输电和 ± 800 kV、640 万 kW 特高压直流输电的技术可行性和工程可行性。

（5）试验示范工程方案优化比选结论：按照“安全可靠、自主创新、标准统一、规模适中”原则开展了晋东南—荆门、淮南—上海、乐山—重庆三个工程的优化比选工作，最终推荐晋东南—荆门试验示范工程方案。

1.1 发展特高压输电符合国家的战略部署

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。进入 21 世纪以来，随着全球经济的复苏，世界能源需求增长强劲，供需矛盾日益突出。加快解决能源短缺问题是世界各国面临的共同难题。

随着我国经济的快速发展，工业化、城镇化进程不断加快，能源需求尤其是电力需求增长很快，电力工业必须加快发展。按照目前的预计，到 2020 年我国发电装机容量将超过 10 亿 kW，预计达到 13.2 亿 kW，燃煤机组将达到 7.5 亿 kW 以上、水电机组将超过 2 亿 kW，核电 0.4 亿 kW。

我国水能资源蕴藏量居世界第一，煤炭探明储量居世界第三，煤炭资源占全国化石能源资源总量的 90% 以上。煤炭资源的 2/3 以上分布在北方，水电资源的 80% 在西部，而 2/3 以上的能源需求集中在中东部地区，水电和煤电基地距离负荷中心约 800~2000km。能源与生产力发展不均衡的基本国情，决定了能源资源大规模、大范围优化配置势在必行。

长期以来，我国电网建设投入严重不足，电网累计投资占电力投资的比例仅为 30% 左右，远低于发达国家 50% 以上的水平，电网发展严重滞后，电网网架无法满足远距离、大容量的电力输送要求。近两年来我国发电装机每年以超过 0.65 亿 kW 的速度递增，电源建设和投产速度的加快，使电网发展滞后的矛盾更加突出，难以适应经济社会发展的需要。

面对上述形势，加快实现电网跨越式发展，从根本上解决电网建设滞后的问题，是我国电力行业发展的必然选择。特高压输电技术使我国跨地域、大容量输电成为可能。其原因如下：一是特高压电网可以将电能输送到 1000~1500km 以外，甚至达到 2000km，且经济合理；二是特高压远距离、大容量输电具有成本低、损耗小的固有经济优势，特高压输电比 500kV 输电线损率降低约 65%；三是特高压电网节省走廊占地超过 50%， ± 800 kV 直流输电比 ± 500 kV 直流输电节省线路走廊占地达 25%，同时，目前的研究表明，特高压输电的环境影响可控制在与常规 500kV 输电工程相当的水平；四是采用特高压输电，把电力送到华东、华北、广东等人口稠密的负荷中心，可以减小对人口密集区的污染，减轻人口密集区环境容量的压力。

特高压输电的科学合理性在国内外专家的充分研究、讨论中日臻成熟。2005年6月,国家发展和改革委员会在北戴河主持召开了特高压输电技术研讨会,经过广泛交流,会议认为我国发展特高压输电是必要的,应该尽快建设试验示范工程,掌握和验证特高压关键技术。2005年10月,国家发改委再次召开特高压座谈会,进一步认为中国有必要发展特高压输电技术。2005年11月,由27位中国工程院院士参与的课题组,在经过缜密的论证之后,提交了《关于我国特高压输电研究和工程建设的咨询意见》,指出我国有必要加快特高压输电研究和工程应用的步伐,试验示范工程方案符合要求,建议作为国产化的依托工程,纳入国家中长期科技发展规划、高技术产业计划和重大装备自主创新计划。

从国家电网公司提出发展特高压输电技术,建设以特高压电网为核心的坚强国家电网的战略构想以来,该项工作一直得到党中央、国务院的高度重视。2005年2月,国家发改委印发了《关于开展百万伏级交流、 ± 80 万伏级直流输电技术研究工作的通知》(发改办能源[2005]282号),全面启动了特高压工程的前期研究工作。2005年6月,国务院总理温家宝主持能源领导小组第一次会议,在2005年、2006年能源工作要点中,明确提出制定好特高压输变电试验示范线路建设和输变电设备国产化等方案;2005年9月,在750kV投运仪式上,曾培炎副总理要求:要加快电网建设,继续推进西电东送、南北互济,积极探索特高压输变电方式。

我国能源结构特点、未来经济发展要求以及特高压输电的科学合理性,使发展特高压输电成为国家战略部署的一部分。2005年12月,特高压输电技术被国务院正式列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》,把“研究开发大容量远距离直流输电技术和特高压交流输电技术与装备”纳入了国家中长期科学和技术发展规划纲要中能源重点领域的优先主题。2006年2月,国务院下发了《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》,将特高压设备研制确定为16个重大技术装备关键领域之一。2006年8月,国家发改委正式核准建设晋东南至荆门特高压交流试验示范工程。2006年10月,国家科技部将“特高压输变电系统开发与示范”列为国家“十一五”国家科技支撑计划项目,支持开展交、直流特高压工程关键技术及主设备核心技术研究。2007年2月,国家发改委正式批复向家坝—上海 ± 800 kV特高压直流工程换流站设备采购方案。2007年4月,国家发展改革委正式核准建设向家坝—上海 ± 800 kV特高压直流输电示范工程。

通过这一战略的实施,将为国家能源宏观调控提供重要手段,为能源资源优化配置提供有效途径;为推动我国乃至世界电力技术创新和电工制造业的技术升级作出重要贡献,将作为里程碑载入电力工业发展的史册。