

特高压直流运维 技术体系研究及应用

TEGAOYA ZHILIU YUNWEI
JISHU TIXI YANJIU JI YINGYONG

主 编 程建登
副主编 刘文泽 吴 斌
毛文俊 陈 帆

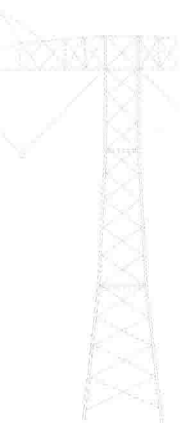


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压直流运维 技术体系研究及应用

TEGAOYA ZHILIU YUNWEI
JISHU TIXI YANJIU JI YINGYONG

主 编 程建登
副主编 刘文泽 吴 斌
毛文俊 陈 帆



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分5章,内容包括概述、特高压直流输电系统、特高压直流运维技术研究、特高压直流运维技术体系、特高压直流运维技术体系应用,并附有特高压直流运维典型业务指导书及典型作业指导书清单。

本书可供高压直流输电运维技术人员、电力工程设计运行技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

特高压直流运维技术体系研究及应用/程建登主编. —北京:
中国电力出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5198-0314-8

I. ①特… II. ①程… III. ①特高压输电-直流输电-研究
IV. ①TM726. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 005146 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2017 年 1 月第一版 2017 年 1 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.625 印张 211 千字

印数 0001—1000 册 定价 52.00 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

编 委 会

主 任 陈 兵

副 主 任 赵荣国 任达勇

主 编 程建登

副 主 编 刘文泽 吴 斌 毛文俊 陈 帆

审 核 组 禹晋云 曹继丰 常开忠 叶国亮

蔡泽祥 吕 涛 陈图腾 柳 坤

颜 波 杨 涛 邓先友 黎张文

徐 峰 魏 星 朱旭东 韩建伟

编 写 组 袁虎强 张文渊 黄殿龙 张 强

谭 佳 杨启宾 苏志龙 陈 倩

唐铁军 王井飞 曾金灿 徐栋杰

邓 焱 王玉俊 邓东旭 蒋新华

吕俊瑶 刘相宏

前言

特高压直流工程是高压直流输电研究中非常重要的一个技术领域,随着“西电东送”和全国联网的全面实施,交直流互联电力系统的格局已在我国的华南、华东、华北电网中出现,我国已进入超/特高压直流混合大电网运行的时代,其输送容量之大、落点之密集、运行之复杂均属世界罕见。但是由于特高压直流目前缺乏完善的理论支撑与经验积累,给保障其系统的安全运行带来了严峻的挑战。为配合特高压直流工程的建设和发展,同时总结特高压直流的运维经验,为更高效全面地满足特高压直流的安全运行和维护的需求,对特高压直流输电的运维技术研究已是迫在眉睫。

我国已成为世界上直流输电线路最多、直流输送容量最大的国家。特高压直流输电的应用,形成了更大规模的交直流电力系统,其运行的复杂性和难度更是前所未有的。 $\pm 800\text{kV}$ 及以上的特高压直流输电,从原理上来看类似高压直流输电,但由于特高压直流输电运行的电压等级高、输送直流功率大,其电力设备的运行条件与特性明显不同,因此,特高压直流输电的运维技术是现代电网安全可靠运行的重要环节。中国南方电网责任有限公司超高压输电公司与华南理工大学长期合作,对特高压直流输电运维体系进行了深入研究,结合特高压直流换流站运行经验组织编写了本书,是国内外率先系统论述和建立特高压直流运维技术体系的理论与应用的专著。

本书在参照与梳理当前国标、行标和企业制度的前提下,在国内首次提出了特高压直流运维技术体系的四项标准:特高压直流运维技术标准、特高压直流运维工作标准、特高压直流运维作业标准、特高压直流运维评价标准。以设备全生命周期为主线,制定研究运维验收工作标准和运维运行定检工作标准,根据周期及工作要求,建立特高压运维工作基本规范;开展特高压运维典型作业梳理,形成清单并编制作业标准,指导特高压运行维护具体作业。制定特高压直流运维工作巡视和操作作业标准,规范特高压直流运维工作维护作业标准和工作定期轮换作业标准以及工作定检作业标准。

本书共分5章：第1章简要介绍了特高压直流输电的发展历程；第2章论述了系统构成与运行技术特点等；第3章介绍了特高压直流运维技术体系研究的理论方法，主要包括设备全寿命周期管理、设备的运行可靠性特性、PDCA的“策划、实施、检查、改进”动态循环的运维模式、设备缺陷的评价与风险评估；第4章详细论述了特高压直流运维技术体系的内涵与分类，其中运行技术体系包括运维技术标准、运维工作标准、运维作业标准与运维评价标准等；第5章列举了特高压直流运维技术体系应用实例及其实际应对措施。

本书密切结合特高压直流输电运维实际工作，力求理论与实际应用相结合，可供高压直流输电运维技术人员、电力工程设计运行技术人员阅读参考。

本书在编著过程中，得到了许多专家和领导的鼓励与支持，中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局提供了大量帮助，在此，谨对所有支持和参与本书编写、出版的专家与领导表示衷心的感谢。

由于本书涉及内容广泛，限于编者水平和编写时间，书中难免存在不妥之处，恳请读者不吝批评指正。

编者

2016年11月

目录

前言

第1章 概述	1
1.1 特高压直流技术研究情况	1
1.2 我国特高压直流工程建设	3
1.3 特高压直流运维技术体系研究的必要性	6
1.3.1 特高压直流在主网架中的作用	6
1.3.2 开展运维技术体系研究的重要性	8
第2章 特高压直流输电系统	10
2.1 特高压直流输电系统构成原理	10
2.2 系统主设备简介	11
2.2.1 换流变压器	12
2.2.2 换流阀	13
2.2.3 平波电抗器	14
2.2.4 直流分流器	17
2.2.5 直流分压器	21
2.2.6 交流滤波器	23
2.2.7 直流滤波器	23
2.2.8 无功补偿装置	24
2.3 直流输电系统的接线方式	26
2.3.1 单极直流输电系统	26
2.3.2 双极系统接线方式	27
2.3.3 背靠背直流系统	28
2.4 多端直流输电系统	28
2.4.1 串联方式	29

2.4.2 并联方式·····	30
2.5 特高压直流与常规直流的区别·····	30
第3章 特高压直流运维技术研究 ·····	32
3.1 变电运维技术·····	32
3.1.1 变电运维技术特点·····	32
3.1.2 变电运维产生故障的主要原因·····	32
3.1.3 变电运维故障处理方法·····	33
3.1.4 运维技术的研究方法·····	35
3.2 多维度分析技术·····	36
3.3 设备全生命周期管理·····	38
3.4 设备缺陷分类及应用讨论·····	39
3.4.1 缺陷分析的分类·····	39
3.4.2 设备缺陷分析的应用探讨·····	41
3.5 电力设备的浴盆曲线·····	43
3.6 电力设备技术规范·····	44
3.7 事故分析·····	46
3.7.1 故障树分析·····	47
3.7.2 PDCA 循环的管理模型·····	50
3.8 闭锁因素分析·····	51
第4章 特高压直流运维技术体系 ·····	56
4.1 技术标准·····	56
4.1.1 技术标准的结构·····	56
4.1.2 技术标准的分类·····	57
4.1.3 特高压直流生产设备品的分类·····	57
4.1.4 技术标准的二维坐标梳理法·····	61
4.1.5 特高压直流运维技术标准存量·····	62
4.1.6 特高压直流运维技术标准增量·····	64
4.2 工作标准·····	67
4.2.1 设备基础管理·····	68
4.2.2 设备运维管理·····	90

4.2.3	设备检修管理	104
4.2.4	设备技术监督管理	124
4.2.5	设备指标管理	126
4.3	作业标准	129
4.3.1	作业标准定义	129
4.3.2	作业标准分类	129
4.3.3	作业标准内容	130
4.3.4	作业标准管理	137
4.4	评价标准	138
4.4.1	设备基础管理评价	138
4.4.2	设备运维管理评价	143
4.4.3	设备检修管理评价	150
4.4.4	设备技术监督管理评价	157
4.4.5	设备指标管理评价	159
第 5 章	特高压直流运维技术体系应用.....	161
5.1	特高压直流输电系统的故障统计	161
5.1.1	特高压 A 换流站故障情况	161
5.1.2	特高压 B 换流站故障情况	163
5.2	特高压直流运维技术体系应用实例	165
5.2.1	在直流闭锁预控上的应用	165
5.2.2	在阀冷系统运维上的应用	167
5.3	特高压直流运维技术体系应用效果	174
5.3.1	换流变压器套管的家族性缺陷	174
5.3.2	直流穿墙套管介损超标处置	178
5.3.3	不执行作业要求导致直流临时停电	178
附录 A	典型业务指导书清单.....	180
附录 B	典型作业指导书清单.....	182
参考文献		190

第 1 章

概 述

随着我国经济的快速发展,工业化、城镇化进程加快,电力能源需求增长迅猛,我国电力事业正处于一个崭新的发展时期。电力作为一种清洁、使用方便的二次能源,在能源工业中占有极为重要的地位,是国家进步和繁荣不可缺少的动力。随着经济的增长,我国用电需求不断增加,且基于中国能源消费与供应分布不均衡的特点,使得超远距离、超大容量的电力传输成为必然。为减少输电线路损耗和节约宝贵的土地资源,高效经济的输电方式成为必然的要求,而直流联网的特点又可以提高全国互联电网的安全稳定运行水平和供电的可靠性。

1.1 特高压直流技术研究情况

特高压直流(Ultra High Voltage Direct Current, UHVDC)输电是指 $\pm 800\text{kV}$ 及以上电压等级的直流输电及相关技术。与交流输电相比,直流输电具有输送容量大、送电距离远、电网互联方便、功率调节容易、线路走廊窄等诸多优点,因此,在远距离电能传输、非同步电网互联、分布式能源接入电网、海岛供电,以及大城市中心区域电缆供电等领域具有明显优势。

高压直流技术在国外发展较早,瑞士的 BBC、美国通用电气公司(GE)、瑞典通用电机公司(ASEA)、德国西门子(SIEMENS)公司研究技术处于领先地位。1929年,瑞典 ASEA 公司最早进行直流输电技术的研究。直到 1954 年,瑞典加泰罗尼亚(Gothland)上的第一个 100kV 、 20MW 容量的直流输电线路投入运行。巴西的伊泰普(Itaipu)直流工程运行电压等级为 $\pm 800\text{kV}$,已经成功运行了 20 多年。特高压直流输电技术起源于 20 世纪 60 年代,1966 年瑞典查尔姆斯理工大学(Chalmers University of Technology)开始研究 $\pm 750\text{kV}$ 输电导线。而在其后苏联、巴西等国家也先后开展了特高压直流输电

研究工作。美国电气与电子工程师协会（IEEE）和国际大电网会议（CIGRE）均在 20 世纪 80 年代末得出结论：根据已有技术和运行经验， $\pm 800\text{kV}$ 是合适的直流输电电压等级。

我国从 20 世纪 60 年代开始对直流输电进行试验室研究，1977 年在上海利用杨树浦发电厂到九龙变电站之间报废的交流电缆建成了国内第一个采用 6 脉动换流器的 31kV 、 150A 、 4.65MW 、 8.6km 的直流输电试验工程。1987 年全部采用国内技术的舟山直流输电工程投入运行，从此直流输电在我国得到了应用和发展。近年来，经过不断的自主创新和跨国公司的部分技术转让，国内 500kV 直流工程控制保护已基本实现自主化，我国已逐渐掌握了直流输电的核心技术。直流主设备国产化率在逐渐提高，一些国内厂家对直流控制和系统的自主化也做出了重要贡献。在对特高压直流输电的电压等级进行研究和论证时，考虑到中国对直流输电技术的研发水平和直流设备的研制能力，我国电力发展中确定一个特高压直流输电水平是必要的，并把 $\pm 800\text{kV}$ 确定为中国特高压直流输电的标称电压。这有利于特高压直流输电技术和设备的标准化、规范化、系列化开发，更有利于中国进行特高压直流输电工程的规划、设计、实施和管理。

特高压直流输电技术除了具有常规直流输电的特点外，还可将常规直流输电的优点更加充分地发挥，突出表现在以下几个方面：

（1）电压高。电压高达 $\pm 800\text{kV}$ ，对与电压有关的设备，如高压端的换流变压器及其套管、穿墙套管、避雷器等提出了更高要求。

（2）送电容量大。规划的特高压直流输电工程的送电容量高达 5GW 和 6.4GW ，相应的直流额定电流将达到 3125A 和 4000A 。

（3）送电距离长。距离长达 1500km ，有的甚至超过 2000km 。

（4）特高压直流工程相对于常规直流输电工程，其直流换流站的主接线和基本结构复杂，需要采取每极双 12 脉冲阀组的串接；为承受 $\pm 800\text{kV}$ 的外绝缘，并顾及直流的积污效应，要考虑绝缘形式和绝缘材料问题；线路的导线分裂形式和杆塔对地高度将与 $\pm 500\text{kV}$ 工程有很大的不同，要进行有关的设计实验；有较大的额定电流，接地极设计需要探讨。此外，在经济性方面，经多方面调查，肯定了 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电在长距离大容量输电上的优越性。对于一个特高压直流输电系统而言，总费用由对换流站和线路的投入资金以及后期的损耗资金所构成，一个给定传输容量的特高压直流输电系统换流站的费用随着电压的提升而增多，但是线路费用却在某个特定的电压时最低。

特高压直流输电相对于特高压交流输电具有以下状态：可中间不落点，点对点、大功率、远距离直接将电力输送至负荷中心；控制方式灵活、快速，可以减少或避免大量过网潮流，按照送、受两端运行方式变化而改变潮流；电压高、输送容量大、线路走廊窄，适合大功率、远距离输电；在交直流混合输电的情况下，利用直流有功功率调制可以有效抑制与其并列的交流线路的功率振荡，包括区域性低频振荡，提高交流系统的动态稳定性等特点，因而特高压直流输电具有非常强的工程实用性，将会得到大力的推广和使用。

我国特高压输电技术的研究已取得重要进展。从 1986 年开始，陆续将特高压输电技术研究列入国家“七五”“八五”和“十五”科技攻关计划，科研机构在特高压领域做了大量工作，特高压技术研究已进入实用化阶段，取得了一批重要科技成果。相继开展了中国更高一级电压远距离输电方式和电压等级选择问题的研究；进行了特高压输变电设备、线路、铁塔、典型变电站的分析论证；开展了特高压输电系统过电压、绝缘配合及输电线路对环境影响的研究。

随着电力大规模输电的距离逐渐加大，现有的 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电将无法满足要求，客观上需要采用更高一级的直流输电电压等级。根据对西南水电外送输电方案的多次滚动规划研究成果并结合国外的相关研究结论， $\pm 800\text{kV}$ 直流输电在技术上是可行的，比较适合中国的实际情况。但与其他国家相比，中国建设特高压输电工程将面临一些特殊问题，如高海拔、重污秽等，而这些特殊问题国外研究相对较少，却又是关系中国特高压交直流输变电设备外绝缘设计的关键，因此有待于中国进一步加强研究。

1.2 我国特高压直流工程建设

高压直流输电由于其技术与经济上的独特优势，在我国远距离、大容量输电和大区联网两方面得到了广泛的应用。在我国远距离大容量输电和大区联网两个电力工业的进步必须加快发展高压直流输电，做好高压直流输电的研究、规划和建设是今后一段时间我国电力发展的重要任务。我国特高压直流工程的建设，自云南—广东 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程于 2009 年建成投产至今，工程建设与投产进入爆发式增长阶段。

1. 云南—广东 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程

2009 年 12 月 24 日，世界上第一个 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程——云

南—广东特高压直流输电工程（又称云广特高压工程楚穗直流）单极 800kV 成功送电，树立起世界直流输电领域新的里程碑。2010 年 6 月 18 日，云广特高压直流双极竣工投产，500 万 kW 电力从云南楚雄换流站输送到广州增城穗东换流站，输送到珠三角电力负荷中心。该工程直流电压 $\pm 800\text{kV}$ ，直流电流 3125A，额定输送容量 5GW，线路长度 1418km（其中高海拔重冰区占 6.6%）。该工程起点在云南省禄丰县楚雄换流站，终点在广州市增城穗东换流站，采用双 12 脉动阀组串联接线方式。工程动态总投资 137 亿元，扣除特高压研究试验费 1.5 亿元后，单位投资 1.88 万元/(万 kW·km)比兴仁 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电工程的 2.03 万元/(万 kW·km)低约 7%。

2. 普洱—江门 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程

2013 年 9 月 3 日，云南普洱至广东江门 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程（又称糯扎渡直流工程）开始向广东送电。这是继 $\pm 800\text{kV}$ 云广特高压直流输电工程之后，中国南方电网有限责任公司（简称南方电网公司）建设的第二个特高压直流输电工程。该工程投入送电，将对优化东西部资源配置，输送西部清洁电力，保障广东电力供应发挥重要作用。糯扎渡直流工程属国家“十二五”西电东送重大能源建设项目和自主化示范工程，起于云南普洱换流站，止于广东江门换流站，途经云南、广西、广东三省区，线路全长 1451km，额定输送容量双极 500 万 kW，额定电压 $\pm 800\text{kV}$ 。该工程是南方电网公司继建成 $\pm 800\text{kV}$ 云广特高压直流示范性工程后，负责建设的第二条特高压直流输电工程。工程建设将在借鉴特高压成熟技术的基础上，进一步提高设备国产化比例，从而促进国内装备制造业的发展。该工程的投入送电，对于优化东西部资源配置、输送西部清洁电力、保障广东迎峰度夏发挥重要作用。相比云广特高压直流工程，糯扎渡直流工程性能更加优化，经济性更好，自主化程度更高，在交直流混合输电、多直流协调控制等方面已领先世界，国家的重大装备技术发展也取得了长足进步。

3. 金沙江一期工程

金沙江一期洛溪渡、向家坝电站总装机容量 18.6GW，是规划的西电东送主要水电电源之一。电站送出采用特高压直流输电技术，将电力送往 1000~2400km 外的华东、华中负荷中心，实现了能源资源的优化配置，满足了电站电力外送的需要。根据金沙江一期溪洛渡、向家坝电站输电系统规划研究成果，从提升我国输变电设备制造业自主创新能力、促进我国电网技术升级、提高远距离大容量输电效率和经济性、节约输电走廊资源和实现电力工业可持续

发展的要求出发，溪洛渡、向家坝电站送出采用 3 回 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程的方案如下：

(1) 向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程：它是目前我国自主设计和建设的世界上电压等级最高、输电容量最大、输送距离最远、技术水平最先进的高压直流输电工程。该工程西起四川复龙换流站，东至上海奉贤换流站，全长约 1907km，额定输送功率 6.4GW，最大连续输送功率达 7GW。于 2010 年 7 月 8 日投入运行，在世界范围内率先实现了直流输电电压和电流的双提升，输电容量和送电距离的双突破，标志着国家电网全面进入了特高压交流混合电网时代。

(2) 溪洛渡左—湖南 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程：该工程起点为四川宜宾县凤仪换流站，落点为湖南株洲换流站，线路长度约为 970km，于 2014 年单极投运，2015 年双极投运。

(3) 溪洛渡右—浙江 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程：该工程起点为四川高县罗场换流站，落点为浙江浙西换流站，线路长度约 1728km，于 2015 年单极投运，2016 年双极投运。

4. 锦屏—苏南 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程

锦屏—苏南 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程于 2012 年 6 月低端送电，2012 年年底全面建成投运，与向家坝—上海特高压直流工程相比，输送容量更大、送电距离更远、自主化水平更高，创造了特高压直流工程建设的新纪录，代表了世界高压直流输电技术的新高峰。该工程额定输送功率 7.2GW，线路全长 2058km，包括裕隆换流站（含接地极及其线路）、同里换流站（含接地极及其线路）和 $\pm 800\text{kV}$ 输电线路（含大跨越）。

5. 滇西北—广东 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程

2015 年 12 月 28 日，国家发展和改革委员会正式核准滇西北至广东 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程（又称滇西北直流工程）。该工程是落实国务院大气污染防治行动计划的 12 条重点输电通道之一，是国务院保证经济稳增长的重点工程，也是南方电网公司西电东送的第三个 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程。该工程起点位于云南省大理州，线路途径云南、贵州、广西、广东四省，落点位于广东省深圳市，线路全长 1928km，是南方电网线路最长的输电工程。该工程拟采用 $\pm 800\text{kV}$ 输电方案，送电能力 500 万 kW。工程总投资 222 亿元，计划于 2017 年年末具备送电能力。工程建成后每年可向广东输送清洁电量 200 亿 kWh，可进一步提高澜沧江上游梯级水电站电力外送能力，同时

缓解珠三角地区日益严重的大气环境污染问题，有力促进转变经济发展方式、推进低碳经济发展。

在“十二五”期间，±800kV 哈密—郑州（输送容量 7.6GW，工程投资 216 亿元，线路全长 2207km）、±800kV 哈密—重庆（输送容量 8GW，工程投资 240 亿元，线路全长 2230km）、±800kV 宁东—浙江（输送容量 7.6GW，线路全长 1700km）、±1100kV 淮东—成都（输送容量 10GW，线路全长 1728km）等特高压直流工程也已陆续建设。预计到 2020 年，我国建设的直流输电工程将达到 50 项左右，其中将会建成 30 多项特高压直流工程。因此，特高压直流输电技术在我国处于蓬勃发展状态，在主网中的地位越来越重要。

1.3 特高压直流运维技术体系研究的必要性

随着特高压直流的发展，其主网架中发挥着越来越重要的作用，为保障特高压直流安全可靠的运行，对其运维技术体系研究也显得尤为必要。

1.3.1 特高压直流在主网架中的作用

近年来，由于经济建设飞速发展，在这一发展趋势下，我国对用电量的需求一直处于供不应求的阶段，加上我国能源充足的地方，经济相对落后，电网网架结构薄弱，无法承担大容量的功率外送任务，使得电力供应和需求不平衡的矛盾越来越突出。由于种种原因，中国的区域经济发展极为不均衡，一般负荷中心主要集中在经济发展迅速的东南沿海地区以及中南地区，其工业用电量很大，而各种能量资源却主要集中在西南地区（云南、贵州等）、西北地区（陕西等）、华北地区（山西、蒙西等），即能源中心远离负荷中心。从煤炭储

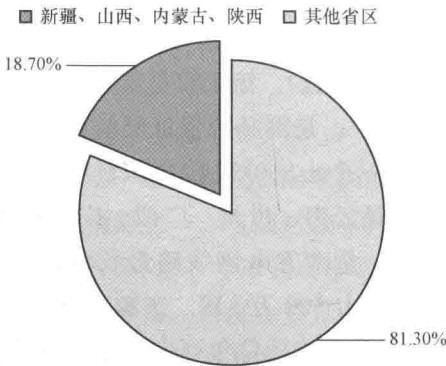


图 1-1 我国煤炭资源分布情况图

量的角度分析，我国的煤炭储量主要集中在新疆维吾尔自治区、山西省、内蒙古自治区、陕西省，其煤炭保有储量占全国煤炭储量的 81.3%，其他省区的煤炭保有储量占全国煤炭储量的 18.7%。而作为主要负荷中心的北京、天津、河北地区以及东部的六省一市，其总共的煤炭保有储量仅占全国煤炭储量的 7.0%。我国煤炭资源分布情况如图 1-1 所示。

从水力资源角度分析,中国 90% 以上的水资源集中在京广铁路以西,西部的 12 个省区水资源占全国水资源的 79.3%,仅四川、西藏和云南三个地区的水资源就占全国水资源的 57%,而作为负荷中心的东部沿海地区的 12 个省市水资源仅占全国水资源的 8.9%。并且我国的水资源利用程度在区域上有很大的不同,东部水电开发利用程度高达 68%,西部地区水资源开发程度低,仅有全国的 12.5%。在我国计划新增 1.8 亿 kW 的水电中,西部地区就占了 89%。因此,要解决近几十年的电力供应问题,必须在发展火电的基础上大力开发水电、风电、光伏等清洁能源,并且建设覆盖全国的特高压交直流输电工程,实现远距离、大容量的电力输送,从而实现全国智能电网,更最大限度地发挥电网的火电与清洁能源发电的互补调剂以及大区域间的负荷调峰作用。基于国家电网公司“十二五”发展规划目标,截至 2015 年,华北、华中、华东地区特高压电网已经形成了“三横三纵一环网”的联网格局,西南、西北、东北等能源基地将通过特高压交流输电向全国送电。此外,“十二五”期间,为使西南地区的水电、西北及华北地区的煤电和风电基地得到充分的利用,我国投入运行了包括哈郑特高压直流在内的 11 回特高压直流输电项目。

特高压直流输电电网可以更大范围的促进能源资源的优化配置,提高电力系统的稳定性和可靠性以抵御交流主网突发性事件和严重故障,显著地提高了大工业用户的供电可靠性,为全国智能电网建设打下了坚实的网架基础。更是为大规模的清洁能源外送及其更大范围的消纳提供了必要的网架结构支撑。事实上,中国风电等清洁能源主要集中在东北、华北和西北地区,然而由于经济发展水平的落后,其消纳的空间是十分有限的。因此,风电的进一步发展,客观上需要扩大风电的消耗范围,大规模的风电必须融入大规模的电网,这样才能使得风电等清洁能源大范围的消纳,构成我国大容量、远距离的清洁能源输送通道,有利于提高全国电网的稳定性。

“西电东送”是实现我国资源合理开发、优化配置、高效利用的科学选择,采用特高压直流输电技术($\pm 800\text{kV}$ 及以上的直流输电)有利于提高“西电东送”输电效率,降低输电损耗,节约输电走廊资源。2009 年 12 月,世界首个 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程云南—广东特高压直流输电工程在南方电网投产,输送容量 500 万 kW,送电距离约 1373km,充分发挥了特高压直流远距离大容量输电优势,投运以来输送电量约 1104 亿 kWh,2013 年和 2014 年输送电量分别达 293 亿 kWh、298 亿 kWh,年利用小时数都已接近 6000h,发挥了巨大的经济、环境以及社会效益。2014 年南方电网公司又建成了糯扎渡—广

东±800kV 特高压直流输电工程,形成了“八交八直”输送通道。到 2017 年,南方电网公司还将投产滇西北—广东±800kV 特高压直流输电工程。特高压直流输电在远距离大容量送电方面具有不可替代的作用,同时,也给电网安全稳定运行带来风险和难题。南方电网在应对和解决这些问题过程中取得了一些经验,保证了电网长期安全、可靠运行,这些实践促进了直流输电技术的发展。

南方电网在“十五”期间形成了“六交三直”交直流并联运行的“西电东送”通道,多回直流同时馈入受端电网,交直流系统相互影响问题比较突出。“十一五”末期,随着云广特高压直流双极投产,南方电网远距离大容量的直流输电特点更为显著,表现出强直弱交的特性。“十二五”末期,南方电网形成“八交八直”西电东送主网架,总体来说电网抵御简单事故的能力更强,但与大容量直流相关的系统风险加大。随着特高压直流输电技术成熟,运行稳定,发挥了巨大的经济、环境和社会效益,有力支撑了西电东送战略。在继续发展特高压直流技术及应用的同时,要更加注重防范大容量特高压直流引发的系统性风险,结合电网特性采取有效防控措施,如优化网架结构、分散直流落点、优化直流规模、增强受端电网无功电压支撑能力等。

1.3.2 开展运维技术体系研究的重要性

“十二五”期间,南方电网公司始终坚持绿色发展,大力发展可再生能源,提高能源资源开发利用效率,重点做好“四个坚持”:坚持清洁低碳,不断助力能源清洁发展;坚持资源节约,努力提高电网节能成效;坚持环境友好,积极搭建环境友好平台;坚持高效利用,持续推动社会能效提升。

发展特高压直流输电,有利于实现国家“十三五”发展目标,有利于牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,使电力行业向着“智能、高效、可靠、绿色”的方向发展。大力发展特高压直流有着良好的经济和社会效益。

(1) 有利于减少线路损耗率。提高电压等级可以减少线路损耗率,每年减少在线路上损耗,减少不必要的损失,提高企业的经济效益。据统计 2015 年,南方电网综合线损率完成 6.72%,比“十一五”末下降 0.69 个百分点,五年累计减少损耗电量 191 亿 kWh。

(2) 有利于发展清洁能源。特高压直流传输的电力一般是来自非化石能源,南方电网已发展成“八交八直”共 16 条西电东送大通道,送电规模达到 3500 万 kW,所送电量中 70%是水电等清洁能源,减少煤炭、石油等化石类