

最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材

(初、中、高级工及技师、高级技师适用)

总主编 丁毓山 罗毅

送电线路



知识

技能

题库

主 编 鞠志涛 李 超
副主编 程云峰 喻亮亮



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材

(初、中、高级工及技师、高级技师适用)

总主编 丁毓山 罗毅

送 电 线 路

主 编 鞠志涛 李 超
副主编 程云峰 喻亮亮



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书根据劳动和社会保障部的电力行业《国家职业技能鉴定规范》、电力行业职业技能鉴定指导中心的《电力行业职业技能鉴定指导书》(第二版)、《电力工人技术等级标准》及相关专业国家标准、行业标准和岗位规范编写,为《最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材》之一。

本书共六篇 24 章,内容包括:基础知识,电气设备,电力网的杆塔与导线,杆塔的施工,微机保护和带电作业,技能操作等。为了便于学习和培训,每章后附有大量复习思考题与习题,并附有答案。

本书为电力行业职业技能鉴定及岗位培训教材,也可供相关技术人员及管理人员在日常工作中学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

送电线路 / 鞠志涛, 李超主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 1

最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材

· 初、中、高级工及技师、高级技师适用

ISBN 978-7-5084-7214-0

I. ①送… II. ①鞠… ②李… III. ①输电线路—技术培训—教材 IV. ①TM726

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第023318号

书 名	最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材 (初、中、高级工及技师、高级技师适用) 送电线路
总 主 编	丁毓山 罗 毅
作 者	主 编 鞠志涛 李 超 副主编 程云峰 喻亮亮
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 30.25 印张 717 千字
版 次	2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	58.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

为了提高电力技术工人的业务素质，满足电力行业职业技能鉴定和岗位培训工作的需要，根据劳动和社会保障部制定的电力行业《国家职业技能鉴定规范》和电力行业技能鉴定指导中心组织编写的《电力职业技能鉴定指导书》（第二版）的要求，本书作者编写了《最新统一编写电力行业职业技能鉴定暨岗位培训教材·送电线路》。

随着电力体制改革的深入，我国电力网正在向大电网、大电厂、超高压和特高压、核电站、高度自动化的方向发展，输电网、配电网和发电厂正在经历着一次重大的变革。面对电力系统这种发展的新形势，以往教材的内容已略显陈旧，特别是有些内容与当代的现实相差较远。为了配合新形势下电力系统人员培训的需要，中国水利水电出版社决定，组织有关专家和培训一线的教师编写这套教材。其编写原则是：反映电力新技术、新设备、新方法，以满足当前电力企业的培训要求：不要求面面俱到，力求少而精，抓住重点，深入浅出。全书包含三方面内容：知识、技能、题库。为此，总主编聘请了辽宁省电力公司、沈阳农业大学、华北电力大学、中国农业大学、沈阳大学有关专家和教授参与编写。

本套培训教材在编写过程中注重各工种专业技术知识的系统性和全面性，将公用基础理论知识融汇到专业技术知识当中，力求做到学以致用，避免理论与实际相脱节。本套培训教材还具有专业技术丛书的功能，突出技能方面的要求，坚持实用性。本套培训教材不仅适用于各工种专业技术人员的岗位培训及职业技能考核的需要，而且对现场的工程技术人员，也有较好的参考价值。

本书共分六篇 24 章，其主要内容包括：基础知识，电气设备，电力网的杆塔与导线，杆塔的施工，微机保护和带电作业，技能操作等。在附录中只给出了初级和中级人员的理论鉴定试题，以供参考。每章后皆附有复习思考题与习题，并附有答案。

本套培训教材由丁毓山、罗毅担任总主编。

参与本书编写的人员有：鞠志涛、李超、喻亮亮、张冰、高秀萍、李伟、

刘宁、李奎生、冯勃、王天策、周丽、程云峰、裴路国、侯庭阳、孙成宝、金开宇、张福华、吕志恒、唐艳、邢焱、周晓彤、鞠英俊、刘志、邹德清、陈伍传、刘春荣、曲晓宇、徐中新、孙晓光、孙玉波、吴秀华、陈春玲、丁毓山。全书由丁毓山、罗毅统稿。

提供资料并参加本书部分编写工作的还有：叶常容、谈文华、张强、王卫东、石威杰、贺和平、潘利杰、张娜、石宝香、李新歌、尹建华、苏跃华、刘海龙、李小方、李爱丽、王志玲、李自雄、陈海龙、韩国民、刘力侨、任翠兰、张洋、李翱翔、孙雅欣、李景、赵振国、任芳、吴爽、李勇高、杜涛涛、李启明、郭会霞、霍胜木、李青丽、谢成康、马荣花、张贺丽、薛金梅、李荣芳、孙洋洋、余小冬、丁爱荣、王文举、徐文华、李键、孙运生、王敏州、杨国伟、刘红军、白春东、魏健良、周凤春、董小玫、吕会勤、孙金力、孙建华、孙志红、孙东生、王惊、李丽丽等。

作者虽尽了很大努力，但疏漏之处定然难免，深望广大读者多加批评指正。

作者

2010年1月

目 录

前言

绪论	1
----	---

第一篇 基础知识

第一章 直流电路与磁路	9
第一节 直流电路的基本概念和简单直流电路	9
第二节 电流的磁场	20
复习思考题与习题	26
第二章 交流电路	29
第一节 单参数单相交流电路	29
第二节 多参数单相交流电路	30
第三节 三相电路的计算	36
复习思考题与习题	39
第三章 识绘图知识	51
第一节 识图的一般概念	51
第二节 制图的基本原理	54
第三节 机件的表达方法	60
复习思考题与习题	64
第四章 工程力学基础	65
第一节 向量	65
第二节 正弦量的向量表示	68
第三节 力的基本概念	70
第四节 平面汇交力系的合成与分解	75
第五节 力矩与力偶	78
第六节 弯曲的概念	82
第七节 力学在送电线路中的应用	83
复习思考题与习题	90

第二篇 电气设备

第一章 变压器	93
第一节 变压器的工作原理	93

第二节 变压器的额定技术数据	94
第二章 互感器	99
第一节 电压互感器基本结构	99
第二节 电压互感器工作原理与接线方式	100
第三节 电流互感器基本结构	102
第四节 多抽头式电流互感器	107
复习思考题与习题	109
第三章 防雷与接地设备	113
第一节 大气过电压	113
第二节 防雷保护设备	114
第三节 接地	117
复习思考题与习题	120
第四章 真空断路器	122
第一节 真空断路器的基本结构	122
第二节 户内、户外真空断路器	127
第三节 真空断路器机械参数及其调整	129
复习思考题与习题	132
第五章 六氟化硫 (SF₆) 断路器	137
第一节 六氟化硫 (SF ₆) 气体的特性安全防护	137
第二节 SF ₆ 断路器结构和灭弧原理	139
复习思考题与习题	144
第六章 环网供电	148
第一节 概述	148
第二节 有关环网柜的技术要求	151
第三节 RM6、AR6 环网柜	153
第四节 环网柜的检修操作	155
第五节 环网柜电缆的连接工艺	158
第六节 环网柜的应用实例	162
复习思考题与习题	164

第三篇 电力网的杆塔与导线

第一章 电力网	166
第一节 电力系统与电力网	166
第二节 送电线路的杆塔	170
第三节 导线和避雷线	177
复习思考题与习题	181
第二章 高压绝缘子和线路金具	186
第一节 高压绝缘子	186

第二节 线路金具	188
复习思考题与习题	190
第三章 导线和避雷线的机械计算	192
第一节 导线和避雷线的机械荷载	192
第二节 架空线各种档距的计算	195
第三节 线长、弧垂的计算	199
第四节 架空线弧垂的观测计算	200
第五节 导线的振动与防振	204
第六节 附件安装	210
复习思考题与习题	212

第四篇 杆 塔 的 施 工

第一章 线路的测量与分坑	220
第一节 送电线路施工图	220
第二节 施工工艺过程	223
第三节 线路的测量	224
第四节 杆塔的定位与分坑	235
复习思考题与习题	245
第二章 杆塔的基础施工	247
第一节 杆塔的基础	247
第二节 挖坑与底盘吊装与校正	249
第三节 铁塔基础施工	252
第四节 混凝土施工	255
第五节 拉线的安装	258
复习思考题与习题	262
第三章 起重工具	265
第一节 绳索的选择和安全使用	265
第二节 桩锚的应用计算	271
第三节 滑车的应用计算	275
第四节 抱杆承载力验算及使用中的安全技术	280
第五节 绞磨的强度验算和安全使用	285
复习思考题与习题	287
第四章 杆塔组立	290
第一节 组塔的准备和地面组装	290
第二节 整体立杆	294
第三节 杆塔的分解组立	303
复习思考题与习题	312
第五章 导、地线的架设	314

第一节	放线工艺	314
第二节	导、地线的连接处理	318
第三节	紧线工艺	325
第四节	送电线路的安全距离	327
第五节	导线相对跨越物垂距的测量	332
第六节	高空作业的安全要求	334
	复习思考题与习题	335

第五篇 微机保护和带电作业

第一章	线路保护	337
第一节	35/10kV 微机线路保护的整定计算	337
第二节	66kV 微机线路保护装置	340
	复习思考题与习题	348
第二章	变压器保护	350
第一节	概述	350
第二节	瓦斯保护	353
第三节	变压器比率差动保护与保护判据	356
第四节	按二次、偶次谐波原理形成的差动保护	361
第五节	变压器微机后备保护	363
	复习思考题与习题	368
第三章	带电作业	370
第一节	带电作业的安全距离和绝缘工具的长度	370
第二节	带电作业方法	372
第三节	带电作业工具	378
第四节	带电作业的安全要求	384
第五节	触电急救措施	387
	复习思考题与习题	390

第六篇 技能操作

第一章	单项操作	392
第一节	导、地线单项操作	392
第二节	杆塔及杆塔施工的单项操作	399
第三节	绝缘子单项操作	405
第四节	测量与起重单项操作	408
第二章	多项操作	412
第一节	杆塔施工的多项操作	412
第二节	导线施工的多项操作	416
第三节	绝缘子施工的多项操作	425

第三章	综合操作.....	428
-----	-----------	-----

附 录

附录一	职业技能鉴定要求及考评人员标准.....	439
附录二	职业技能鉴定培训大纲.....	439
附录三	职业技能鉴定《送电线路》初级工理论知识试题.....	448
附录四	职业技能鉴定《送电线路》高级工理论知识试题.....	450
附录五	职业技能鉴定《送电线路》中级工理论知识试题.....	452
附录六	《送电线路》考核题集锦	454

绪 论

一、我国电网发展的简要回顾

我国电网正在向大电网、大电厂、大机组、超高压、高度自动化的方向发展。回顾我国电网发展的历程，新中国成立以前，我国电力工业很少，发展非常缓慢，输电线路建设同样很迟缓，电压等级低而繁。追溯到 100 年前，1908 年建成 22kV 的昆明线路，1921 年建成 33kV 石景山电厂至北京城的线路，1933 年建成 66kV 抚顺线路，1934 年建成 66kV 延边至老头沟线路，1935 年建成 154kV 抚顺至鞍山线路，1943 年建成 110kV 镜泊湖至延边的线路。

新中国成立以后，我国电网逐步统一电压等级，形成经济合理的电压等级系列。1952 年配合官厅水电站建设 110kV 京官线，全长达 106km，逐渐形成京津唐 110kV 输电网。1954 年建成丰满到李石寨的 220kV 线路，以后相继建设辽宁到李石寨、抚新至青堆子 220kV 线路，逐步形成东北电网的 220kV 骨干网架。到 1972 年建成 330kV 刘家峡至关中输电线路，全长 534km，以后逐渐形成西北电网 330kV 骨干网架。到 1981 年建成 500kV 姚孟到武昌的输电线路，逐步形成华中电网 500kV 的骨干网架。1989 年建成 ± 500 kV 直流输电工程，实现了华中和华东电网的直流联网。到 2005 年 9 月 26 日，官厅到兰州东 750kV 输变电示范工程正式投产，西北电网最高电压等级提高到了 750kV。

2006 年 8 月，1000kV 晋东南至荆门交流实验示范工程获得国家核准，现已进入全面实施阶段，争取 2008 年、确保 2009 年投产。2007 年将开工建设 ± 800 kV 向家坝至上海直流工程，计划 2011 年投产。

发电装机容量，1949 年我国的装机容量仅 185 万 kW，新中国成立之后我国发电装机的规模迅速增长，1996 年装机容量和发电量均跃居世界第二位，成为世界电力生产和消费大国。1994 年我国自行设计、制造、施工的浙江秦山核电站和中外合作引进法国机组建设的广东大亚湾核电站相继建成投入商业化运行，改写了我国电源结构长期以来无核电的历史。1987 年，也就是 20 年前，全国装机容量 1 亿 kW；1995 年，达到了 2 亿 kW；2000 年，达到了 3 亿 kW；2005 年，达到了 5 亿 kW；2006 年底，达到了 6.2 亿 kW。电力的发展速度确实是非常快的。

我国城市电网采用电压等级系列在各区域有所不同，可分为三类：

(1) 大部分地区为：500/220/110/10/0.4kV 系列（部分城市采用 220/35/10/0.4kV）。

(2) 东北地区为：500/220/66/10/0.4kV 系列。

(3) 西北区域主要为：330/110/35/10/0.4kV 系列。

计算指出，500/220/110/20/0.4kV 系列为最优系列，我国南方有些地区已经采用这种电压系列。

二、全国经济开始进入结构性调整时期

1. “九五”期间我国电力供需情况经历了一个曲折的变化过程

“九五”初期，全国经济开始实施结构性调整，虽延续了“八五”期间的增长势头，但增速有所降低（1996 年增长 9.7%），而电力需求增速开始放慢（1996 年仅增长 6.9%），其中占最大比重的工业用电增长速度明显减慢，尤其是高耗电行业。随着结构调整的深入，经济增长速度进一步下降，用电则以更快速度下滑，出现了近 20 年来的首次电力供过于求的局面。由于国家采取了限制电源建设和压缩小火电的措施，加上经济恢复性增长，使得电力需求快速反弹，部分地区电力供应再度紧张。整个“九五”期间，国内生产总值年均增长 8.3%，用电量年均增长 6.4%，电力消费弹性系数为 0.77，略低于“八五”期间水平。

2. “九五”期间负荷率逐年下降，峰谷差增大，调控矛盾突出

“九五”期间，东北、华中、川渝等地区电力需求增长缓慢，电力供应相对富余。华东、华北、广东、贵州、西北部分地区用电增长较快，其中浙江、广东、京津唐、河北南部、宁夏等省、地区在“九五”后两年电力供应一度紧张。一些水电比重大的地区如广西，在枯水期和来水不好时，高峰时段电力供应趋于紧张。“九五”期间各电网负荷率逐年下降，峰谷差继续增大，调控矛盾更加突出。2000 年电力最高负荷在发电量大幅度上升的同时也继续攀升，华北、东北、华东、华中、西北和南方电网最高负荷分别达到 3093 万 kW、2164 万 kW、3920 万 kW、2555 万 kW、1103 万 kW、2671 万 kW，比 1999 年增长较大。

3. “九五”期间的电力供应

“九五”期间全国发电跃上 3 亿 kW 新台阶，到 2000 年底达到 31932 万 kW，发电量 13685 亿 kWh，年平均增长率分别为 8.0% 和 6.3%。“九五”后期国家在电网领域加大了投资力度，特别是城乡电网改造，使电网的可靠性、灵活性和经济性得到了显著提高。电网主网架建设逐步加强，500kV 主网架已开始取代 220kV 电网，承担跨省、跨地区的电力输送和交换任务。以计算机为主的国际先进调度自动化系统已普遍采用并达到了实用化程度。2000 年，220kV 及以上输电线路达到 1636360km，220kV 及以上变电容量为 41489 万 kVA；500kV 直流输电线路达到 1045km，而额定换流容量达到 120 万 kW。

4. 电力需求方面

全社会用电量实现快速增长，2000 年达到 13466 亿 kW，比 1995 年增长 136.5%；“九五”期间全社会用电量年均增长率为 6.4%，低于“八五”期间 9.6% 的增速。人均用电量从 1995 年的 816.2kWh 上升到 2000 年的 1039kWh，年均增速达 5.4%；电能消费在终端能源消费中所占比例逐年上升，从 1995 年的 9.2% 上升到 2000 年的 11.2%，人均电能消费水平仍然较低。“九五”期间，第一、第二产业用电量波动性缓慢增长，用电比重逐渐降低；第三产业和居民生活用电快速增长，用电比重相应增加；居民生活用电一直是我国电力需求的增长点，“九五”期间年均增长 10.7%。就地区而言，中南、华东和华北地区用电增长率较高，西北、西南次之，东北地区用电增长依然缓慢；且各地区用电增长速度差异较大，东南沿海地区、西部大部分地区及北京、河北、内蒙古等用电增速较快；而中部内陆地区、东北地区以及甘肃、陕西等用电增速较慢。

总之,“九五”期间全国电力供需保持了基本平衡的格局,但这种基本平衡只是初步的、暂时的、低用电水平下的基本平衡,即电力供需平衡的基础和水平比较低。要知道,2000年,中国人均装机容量仅0.25kW,人均发电量不足1080kWh,只有世界平均水平的一半,全国至今仍有2800万人没有用上电,这些正是今后电力供需中需要解决的主要矛盾。

“九五”期间我国电力的增长比发达国家高。我国发电量年均增速6.3%,而美国、日本、俄罗斯、加拿大、德国、法国(1995~1999年)电力增速分别为3.4%、1.8%、-0.4%、1.9%、1.0%、2.9%,这是中国电力工业在1996年跃居世界第二位后又持续五年增速超过工业发达国家。

三、“十五”期间电网的高速发展

“十五”期间,电力行业有了长足的发展,我国每年新增发电装机容量达1500万~1800万kW,不仅年发电量已超过日本,而且总装机容量也已超过日本,仅次于美国居世界第二位。

1. 发电装机和用电量

到2005年底,全国发电装机容量达到6.22亿kW,2006年装机新增约1亿kW,比2005年增长20%。2006年全社会用电量达到2.82万亿kWh比2005年增长14%。

2. 电网规模

到2006年底,我国220kV及以上线路长度达到28.2万km,变电容量9.8亿kVA,分别比2005年增长10.4%和15.7%。最大的华东电网20kV以上的输电线路现在达到了48697km,变电容量0.5亿kVA。国家电网公司拥有220kV及以上交流线路21.9万km,20kV以上电压等级输电线路22万km,变电容量7.4亿kVA,直流线路3900km,直流输电容量1050万kW。直流输电拥有的规模是世界第一位。

3. 全国联网和跨区输电得到较大发展

除海南、新疆、西藏、台湾以外,全国基本形成联网格局,电网发展进入资源优化配置新阶段。2006年12月,三沪直流工程建成投产,华东与华中电网联网容量提高到了720万kW,2006年国家电力市场交易电量达1685亿kWh。跨区输电和一些直供线路,价值达到了1685亿元,接近全公司售电量的10%,2006年国网公司的售电量是17097亿kWh。

4. 区域电网和网架得到了较快发展

华北电网形成了万顺、大房、神保、侯廉、托克托5个500kV西电东送通道,京津唐受端环网得到强化,山东电网通过辛安—聊城双回500kV线路与华北主网相连。北京的500kV电网建设大大加强,2006年建成了城北和通州2个500kV变电站,使北京的500kV变电站从4个增长到6个,计划于2008年前再建2个,达到8个变电站,负荷约1200万kW。华东电网在长江三角洲地区形成了跨省市500kV主环网,福建电网通过福州500kV线路与华东主网相连,华中电网形成以三峡为核心的500kV主干网架,东北电网形成了纵贯南北的链式500kV主网结构,满足北电南送、西电东送的需要。西北电网形成覆盖陕西、甘肃、青海、宁夏四省330kV主干网架。在官厅到兰州东750kV输变电示范工程的基础上,西北电网750kV输电线路的建设正在加快推进。

5. 城乡电网建设与改造取得可喜成绩

经过多年的建设和改造,城乡电网结构与装备水平得到改善,供电能力和可靠性有了较大提高。北京、上海、天津等已经在城市外围形成了 500kV 环网结构,多数城市已形成了 220kV 环网,部分城市的 220kV 变电站深入市区中心,“两改一同价”的实施,提高了农网的供电质量,降低了农村电价水平,推动了农村用电水平的持续增长和地方经济的发展。

2006 年 3 月,国家电网公司启动了经营区域内农村户户通电工程。到 2006 年底,投资 58 亿元,新增 54.5 万通电户,户户通电省份由年初的 6 个增加到 18 个。

6. 二次系统装备水平得到很大提高

电力通信基本实现了规划确定的主干通道光纤化数据传输网络化的目标,基本形成了“三纵三横”的主干网架,省级及以上调度机构配置了能量管理系统,实现了电力调度数据采集自动化,微机继电保护装置得到广泛应用,信息技术应用从生产自动化向企业信息化全面发展和深化。

7. 全国联网的格局初步形成

目前全国已经形成华北、东北、华东、华中、西北五个区域电网和南方电网,其中华东、华北、华中、东北四个区域电网和南方电网已经形成了 500kV 的主网架,西北电网在 330kV 网架的基础上,第一条 750kV 官亭—兰州东输变电示范工程已于 2005 年 9 月 26 日建成投运。西电东送已经进入全面建设阶段,形成了北中南三大送电通道:北通道目前已经形成由山西、蒙西向京津塘和河北南网送电的 9 回 500kV 线路;中通道由两条正负 500kV 直流线路,将三峡、川渝、华中主网的电力送到华东地区;南通道已形成“三交二直”5 条送电通道,将云南、贵州、广西三省电力送至广东。目前全国各大区域电网之间联网线路达到“三交三直”6 条联网线路,即连接华中、华东的两条 $\pm 500\text{kV}$ 的直流线路;连接东北、华北的双回 500kV 的交流线路;连接华北、华中电网的一条 500kV 的交流线路;连接华中与南方电网的一条 $\pm 500\text{kV}$ 的直流线路。全国联网规模达到 4.3 亿 kW,交流同步网规模达到 2 亿 kW。因此西电东送、南北互供、全国联网的格局已经初步形成。

8. 采用新型输电网

(1) 灵活交流输电。该项技术是现代电力电子技术与电力系统相结合的产物,通过利用大功率电力电子器件的快速响应能力,实现对电压、有功潮流、无功潮流等的平滑控制,从而在不影响系统稳定性的前提下,提高系统传输功率能力。

(2) 高压直流输电。高压直流输电系统中,电能从三相交流电网的一点导出,经换流站转换成直流电,通过架空线或电缆传送到接收点。直流电在另一侧换流站转化成交流电后,再进入接收方的交流电网。由于直流输电只需 1 根(单极)或 2 根(双极)导线,其架空线路杆塔结构也较简单,因此,直流线路的造价会大幅度的降低。一般而言,在同等级输送功率的情况下,直流输电线路的占地面积只是交流输电线路的一半,对于一个延续上千公里的输电线路来讲,节约下来的土地面积非常可观。这一点,对于中国日益紧张的土地资源来说,更具有特殊的意义。另外,高压直流输电不存在系统稳定性问题,可实现电网的非同期互联。而且直流系统的“定电流控制”限制短路电流可快速地将短路电流限制

在额定功率附近,短路容量不因互联而增大。直流输电还可通过晶闸管换流器快速调整有功功率,实现潮流翻转,在事故情况下可实现健全系统对故障系统的紧急支援,也能实现振荡阻尼和次同步振荡的抑制。

(3) 紧凑型输电。紧凑型输电技术突破了常规线路的导线结构及布置方式,使三相导线置于同一塔窗内,呈三角形布置,极大地压缩了导线的相间距离,从而降低了线路阻抗,在额定电压不变的条件下,提高额定自然功率。紧凑型输电线路的单位走廊宽度的自然传输功率可以达到高一级电压等级的常规型输电线路自然传输功率水平。这是一种比较经济的提高超高压交流输电能力的输电技术。目前,我国 500kV、330kV、220kV 电压等级都有紧凑型线路投运,其中 500kV 昌房线已投运 6 年多,220kV 安电线已投运 11 年,已投运的各条线路运行情况良好。紧凑型输电技术运行可靠、技术先进,目前已形成成熟的运行经验和完整的设计规程,设计制造完全国产化,已作为电网先进使用技术之一在国家电网公司系统推广应用。

(4) 高温超导输电。与常规电缆相比,高温超导电缆具有体积小、重量轻、损耗低和传输容量大的优点。利用它,可以大大降低电力系统的损耗,提高电力系统的总效率,实现大容量输电。我国第一组超电缆系统于 2004 年 4 月 19 日在云南省昆明市普吉变电站投入运行,这标志着继美国、丹麦之后,我国成为世界上第三个将超导电缆投入电网运行的国家。

除此之外,气体绝缘线路(GIL)在我国电网中也有少量采用。2004 年 6 月 18 日,华东电网首条 500kV 的 GIL 线路管道在浙江杭州市电力局瓶窑变顺利投入运行。有专家称,GIL 线路管道的顺利投运为将来 500kV 母线分裂改造工程创造了有利条件。

9. 变电容量快速增长

2004 年底全国 220kV 及以上的输电线路有了 223 万 km,变电设备容量有 69676 万 kVA,500kV 的线路有 56000km,变电容量 21082 万 kVA,与 2000 年相比 220kV 以上的输电线路增加了 5.9 万 km,增长 36%,变电容量增加 28187 万 kVA,增长 67.9%,增长率也是很高的。其中 500kV 线路增加了 2.9 万 km,增长了 107%,变电容量增加 11635 万 kVA,增长了 123%。2005 年是全面实现“十五”计划,衔接“十一五”计划的关键年份,又是继续落实科学发展观,继续加强和改善宏观调控的重要时期。随着各地区负荷密度的增加,大容量变压器(额定电压为 500kV、1000MVA 或以上的变压器)将逐渐应用到电网中。目前我国主要在负荷密集的华东、南京电网中陆续采用 100 万 kVA 设备。据统计,“十五”期间安排投产 25 组 100 万 kVA 变压器。北京新增变电站也拟采用 120 万~150 万 kVA 的变压器。目前,我国变压器发展主要有两方面:一是超高压大型变压器向大容量(超过 1000MVA)、轻结构、三相式和组合式方向发展;二是中小型变压器向节能化、小型化、低噪声、高阻抗、防爆型发展。变压器性能、质量水平的高低取决于变压器的专用制造设备性能、设计技术的优化以及新材料的开发与应用。现在,变压器制造设备与工具逐渐专业化,争取以装备水平、设备性能来保证加工质量,克服人为因素,提高质量和生产效率;而智能化优化设计程序、CAD 参数化设计始终是设计技术的努力方向。

10. 实现跨省、跨区配电平衡

跨省、跨区的输变电工程相继投产和开工,三广直流工程通过国家验收,贵广直流工

程建成投产,东北与华北加强联网工程已经建成投运,西北与华中的直流背靠背联网工程进入调试阶段,三峡至上海 500kV 直流输电工程已正式开工,区域电网和省级电网的网架得到了明显加强。2004 年全年电网建设与改造投资完成 825 亿元,同比增长 12.7%,共投产 220kV 及以上交流输电线路 2.4 万 km、变电站容量 11360 万 kVA,直流输电线路 1857km、换流容量 600 万 kW。电网跨区的资源优化加大电网间的电力输送规模,实现跨区、跨省平衡的配电供需,将对调节电力余缺,缓解电力供应紧张和促进资源优化配置发挥重要作用。2004 年我国跨区、跨省互送电力完成 2259 亿 kWh,同比增长 35%,跨区电量完成 690 亿 kWh,同比增长 79.6%,大区域间、省级间的互送电量 1569 亿 kWh,同比增长 21.7%。

按照中国“十五”发展计划纲要,我国将深化电力体制改革,逐步实行厂网分开、竞价上网,建立竞争性发电市场;开放省内电力市场,发展区域电力市场,推进全国联网,培育国家电力市场;规范和理顺电价,健全合理的电价形成机制;实行政企分开,推进投资主体多元化,建立现代企业制度,推进电力企业进入国际、国内资本市场。

从东北电网“大扰动”试验到西北 750kV 示范工程,在“十五”的 5 年时间里,电网建设业绩辉煌。“十五”期间,成为了新中国成立以来电网建设速度最快的阶段。

四、“十一五”期间我国电网发展的总体思路

1. “十一五”我国电力工业发展的总体态势

我国发电资源和用电负荷的分布极不平衡。一方面可开发的水电资源近 2/3 分布在西部的四川、云南、西藏三省,煤炭的保有储量 2/3 分布在山西、陕西、内蒙古三个省,而东部沿海和京广铁路沿线以东地区经济比较发达,其用电负荷占全国的 2/3,但这些地区发电资源严重不足。我国能源资源的需求分布和基本特征决定了我们必须结合国情走具有中国特色的电力发展之路。为了满足我国全面建设小康社会的电力需求,就要把市场经济与电力工业自身发展规律紧密结合起来,树立落实科学发展观,始终坚持电力先行,电网适度超前发展,不断提高电气化发展水平。坚持开发与节约并重,加强需求侧管理,建设高效节能、节电型社会,以结构调整为主线,在发展中加快调整结构,在调整结构中促进发展,以改革开放和促进社会发展为动力,促进电力与经济、社会、生态环境的和谐协调发展。

2. 电力发展的总体规划目标

“十一五”计划期间,我国电力发展的趋向是:提高能源效率、保护生态环境,加强电网建设,大力开发水电,优化发展煤电,推进核电建设,稳步发展天然气发电,加快新能源发电,深化电力体制改革。为了满足全面建设小康社会对电力增长的需求,预计到 2010 年我国全社会用电量将达到 30450 亿 kWh 左右,发电装机总量将达到 6.7 亿 kW 左右。2020 年全社会用电量将达到 46000 亿 kWh 左右,需要的发电装机容量应该在 10 亿 kW 左右,其中常规的水电按最大能力开发可能达到 2.6 亿 kW,抽水蓄能为 2000 万 kW,核电为 4000 万 kW,气电为 6000 万 kW、新能源发电为 2000 万 kW,其余都需要依靠燃煤电站,大概在 6 亿 kW 左右,这是总体规划目标。在“十一五”期间,随着我国大电网格局的逐步形成,高电压、大容量变压器需求将大幅增长,如配套 60 万 kW 以上的大型发电机组的 500kV 以上电压等级,720MVA 及以上大容量变压器;500kV 级以上电

压等级枢纽站中 1000MVA 以上容量的联络变压器,且心式、壳式、组合式变压器都有需求;±500kV 直流输电工程用换流变压器。与长江三峡工程配套的三相大容量变压器及直流变压器也是以后开发的重点。

“十一五”期间,西北电网要建立特高压电网,东北的沈阳电网将迅速扩容,华北的天津将投资百亿元来加强电网,山西电网将力争全国十强,华中的江西电网的建设投资达 207 亿元,重庆将建设 6 座 500kV 变电站,华东江苏建设电网投资达 800 亿元,南方电网的广西将投资百亿元,海南将用 80 亿元来改建电网。目前国家有关部门对“十一五”期间电源和电网结构调整十分重视。在电网建设方面,国家计划加大西电东送的力度。在北通道,继续加大内蒙古西部和山西向京津冀电网送电规模,促进西北黄河上游水电与宁夏火电联合以及陕北火电向华北和山东电网的送电。在中通道,要重点建设三峡水电站,同时开工建设金沙江和四川水流域大型水电站向华东和华中送电工程。而在南通道,要在国家已经批准建设项目的基礎上继续开工一批电力项目,保证西电东送目标按期完成。此外,“十一五”期间,还将继续加强和完善区域主干电网架和各省网架建设。

3. 加强电网建设

电网规划要以建设坚强国家电网为重点,做到四个统筹:一是统筹各网、省的电网发展;二是统筹电网发展规划与电源的布局和建设;三是统筹输电网与城乡配电网的规划;四是统筹电网的一次系统和二次系统的发展规划,努力促进电网的协调发展。电网是电力市场的载体,它的发展和布局要立足于最大范围内实现资源优化配置。我国发电资源和用电需求分布的特征决定了加强电网建设的重点应该是:以建设特高压为核心的坚强的国家电网,推进西电东送、南北互供和全国联网;加强区域联网,形成合理的同步电网,实现更大范围的资源优化配置;加大西电东送力度,继续加大各区域电网和省电网的主干网架建设,重点发展跨省、跨区输电和联网线路;加强城乡电网改造,深化“两改一同价”工作;同步建设二次系统,全面提高电网各级调度自动化的设备应用水平,推进电力市场的技术系统建设,为尽早建立比较完善的电力市场提供条件,为建立竞争性区域电力市场奠定技术基础。

(1) 华北区域电网统筹规划“三西”、渤海湾经济区域,特高压跨区域电网与华北区域电网结构与布局。加强京津唐与河北南网的联网,建成华北电网东部地区坚强的京津冀受端电网;加强山东电网与华北电网联系,促进区域电网内的资源优化配置。统筹规划全国联网项目在华北电网电力电量消纳和落点选择,使得华北电网 500kV 主网架结构对区内和跨区西电东送电源布局和送电规模的变化具有适应性。

(2) 东北区域电网总体呈现西电东送和北电南送的格局。重点加强辽宁沈阳、抚顺、本溪、鞍山、辽阳重负荷地区受端环网和大连负荷中心的网架结构。统筹规划和合理布局蒙东呼伦贝尔、霍林河和锡林郭勒三大西电东送的通道,完善北电南送中通道和统筹规划好北电南送东通道。加快打开省间的电磁环网。

(3) 华东区域电网在以特高压为核心的坚强国家电网协同的基础上,充分接受西南水电和“三西”煤电,建设南北两条西电东送的大通道。区域内形成皖电外送的通道。各省市建设坚强的区域和省级网架,形成东、西两个 500kV 双环网主网架,各省电网以两至三个 500kV 通道与主环网相连。