

中国电力教育协会审定



全国电力高职高专“十二五”规划教材
电力技术类（电力工程）专业系列教材

电力系统分析

全国电力职业教育教材编审委员会 组编
李梅兰 武娟 主编



配套课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

中国电力教育协会审定



全国电力高职高专“十二五”规划教材

电力技术类（电力工程）专业系列教材

电力系统分析

全国电力职业教育教材编审委员会 组 编

李梅兰 武 娟 主 编

李凌舟 辛 华 舒 辉 陈金星 副主编

邱碧丹 黄 朵 编 写

刘晓春 陈 坚 主 审



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国电力高职高专“十二五”规划教材、电力技术类（电力工程）专业系列教材，本课程在专业基础课与后续专业课间起着承上启下的作用。

全书分 11 个学习情境，分别详尽讨论电力系统的基本知识、中性点运行方式、参数计算及等值电路（学习情境 1、2、3），电力系统短路计算和潮流计算（学习情境 4、5），电力系统有功功率平衡和无功功率平衡（学习情境 6、7），电能损耗计算及降低的措施（学习情境 8），电力系统稳定性分析（学习情境 9）和远距离输电及电力网设计（学习情境 10、11）。在取材方面，除力求讲清基本概念、理论外，也注意介绍本学科发展现状及方向，尽量保证该学科的系统性和完整性。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业教材，也可作为电力工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

电力系统分析/李梅兰，武娟主编；全国电力职业教育教材编审委员会组编. —北京：中国电力出版社，2014.9

全国电力高职高专“十二五”规划教材 电力技术类（电力工程）专业系列教材

ISBN 978-7-5123-5596-5

I. ①电… II. ①李…②武…③全… III. ①电力系统—系统分析—高等职业教育—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 035566 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>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.5 印张 570 千字

定价 47.00 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

全国电力职业教育教材编审委员会

主 任 薛 静

副 主 任 张薜鸿 赵建国 刘广峰 马晓民 杨金桃 王玉清
文海荣 王宏伟 朱 飙 何新洲 李启煌 王宏伟_(女)
陶 明 杜中庆 杨建华 周一平

秘 书 长 鞠宇平 潘劲松

副秘书长 李建强 谭绍琼 武 群 黄定明 樊新军

委 员 (按姓氏笔画顺序排序)

丁 力	马敬卫	方舒燕	毛文学	王火平	王玉彬
王亚娟	王 宇	王俊伟	兰向春	冯 涛	任 剑
刘家玲	刘晓春	汤晓青	阮予明	齐 强	余建华
佟 鹏	吴金龙	吴斌兵	宋云希	张小兰	张进平
张惠忠	李建兴	李高明	李道霖	李勤道	陈延枫
屈卫东	罗红星	罗建华	郑亚光	郑晓峰	胡起宙
胡 斌	饶金华	倪志良	郭连英	盛国林	章志刚
黄红荔	黄益华	黄蔚雯	龚在礼	曾旭华	董传敏
解建宝	廖 虎	潘汪杰	操高城	戴启昌	

参 编 院 校

山东电力高等专科学校

山西电力职业技术学院

四川电力职业技术学院

三峡电力职业学院

武汉电力职业技术学院

江西电力职业技术学院

重庆电力高等专科学校

西安电力高等专科学校

保定电力职业技术学院

哈尔滨电力职业技术学院

安徽电气工程职业技术学院

福建电力职业技术学院

郑州电力高等专科学校

长沙电力职业技术学院

电力工程专家组

组 长 解建宝

副 组 长 李启煌 陶 明 王宏伟 杨金桃 周一平

成 员 (按姓氏笔画排序)

王玉彬 王 宇 王俊伟 刘晓春 余建华 吴斌兵

张惠忠 李建兴 李道霖 陈延枫 罗建华 胡 斌

章志刚 黄红荔 黄益华 谭绍琼

出版说明

为深入贯彻《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)》精神,落实鼓励企业参与职业教育的要求,总结、推广电力类高职高专院校人才培养模式的创新成果,进一步深化“工学结合”的专业建设,推进“行动导向”教学模式改革,不断提高人才培养质量,满足电力发展对高素质技能型人才的需求,促进电力发展方式的转变,在中国电力企业联合会和国家电网公司的倡导下,由中国电力教育协会和中国电力出版社组织全国14所电力高职高专院校,通过统筹规划、分类指导、专题研讨、合作开发的方式,经过两年时间的艰苦工作,编写完成全国电力高职高专“十二五”规划教材。

本套教材分为电力工程、动力工程、实习实训、公共基础课、工科专业基础课、学生素质教育六大系列。其中,电力工程和工科专业基础课系列教材40余种,主要针对发电厂及电力系统、供用电技术、继电保护及自动化、输配电线路施工与维护等专业,涵盖了电力系统建设、运行、检修、营销以及智能电网等方面内容。教材采用行动导向方式编写,以电力职业教育工学结合和理实一体化教学模式为基础,既体现了高等职业教育的教学规律,又融入电力行业特色,是难得的行动导向式精品教材。

本套教材的设计思路及特点主要体现在以下几方面。

(1) 按照“行动导向、任务驱动、理实一体、突出特色”的原则,以岗位分析为基础,以课程标准为依据,充分体现高等职业教育教学规律,在内容设计上突出能力培养为核心的教学理念,引入国家标准、行业标准和职业规范,科学合理设计任务或项目。

(2) 在内容编排上充分考虑学生认知规律,充分体现“理实一体”的特征,有利于调动学生学习积极性。是实现“教、学、做”一体化教学的适应性教材。

(3) 在编写方式上主要采用任务驱动、行动导向等方式,包括学习情境描述、教学目标、学习任务描述、任务准备、相关知识等环节,目标任务明确,有利于提高学生学习的专业针对性和实用性。

(4) 在编写人员组成上,融合了各电力高职高专院校骨干教师和企业技术人员,充分体现院校合作优势互补,校企合作共同育人的特征,为打造中国电力职业教育精品教材奠定了基础。

本套教材的出版是贯彻落实国家人才队伍建设总体战略,实现高端技能型人才培养的重要举措,是加快高职高专教育教学改革、全面提高高等职业教育教学质量的具体实践,必将对课程教学模式的改革与创新起到积极的推动作用。

本套教材的编写是一项创新性的、探索性的工作,由于编者的时间和经验有限,书中难免有疏漏和不当之处,恳切希望专家、学者和广大读者不吝赐教。

前言

本书“以行动为导向，以学习任务为驱动”作为编写思路；以因材施教，改革教学方法，激发学习兴趣，主动学习和培养学生行动能力为核心的教学模式为编写指导。

本书的编写参考了最新电力系统稳定运行导则、电力系统相关规程及大量相关教材。本书贴近电力生产实际，为新型教材，具有易于讲授、便于自学的特点。书中采用了大量电力系统现场实例，理论紧密联系电力系统实际，循序渐进，重点突出，层次分明，能够培养学生的行动能力，调动学生的学习积极性，指导“教、学、做”一体化，从而达到教学的最佳效果。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位和技术等级要求，具有科学性、先进性和教学适用性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位培训教材。

本书适用于“发电厂及电力系统”、“电力系统及自动化”、“电力系统继电保护”、“输配电”、“供用电技术”、“电力系统自动化技术”等相关专业，也可作为电气工程专业技术人员学习参考用书。

本书由李梅兰、武娟老师主编，五所电力高职高专院校的老师联合编写，福建电力职业技术学院李梅兰老师为本书统稿。

学习情境1由山西电力职业技术学院武娟老师编写；学习情境2由西安电力专科学校辛华老师编写；学习情境3由四川电力职业技术学院李凌舟老师编写；学习情境4由长沙电力职业技术学院舒辉老师和福建电力职业技术学院吴佩雄老师共同编写；学习情境5和10由福建电力职业技术学院陈金星老师编写；学习情境6由四川电力职业技术学院李凌舟老师和福建电力职业技术学院李梅兰老师共同编写；学习情境7、8、9由福建电力职业技术学院李梅兰老师编写；学习情境11由西安电力专科学校辛华老师和福建电力职业技术学院李梅兰老师共同编写。

本书由山西电力职业技术学院刘晓春和国家电网泉州供电公司副总工程师陈坚主审，提出了宝贵的修改意见，在此一并表示衷心感谢。

由于本书采用“行动为导向，任务为驱动”新型教材编写，难免存在不足之处，敬请读者批评指正，不胜感激！

编者

2014年5月

目 录

出版说明

前言

学习情境 1 电力系统的基本知识	1
学习任务 1.1 电力系统和电力网的概念	1
学习任务 1.2 电力系统额定电压的确定	9
学习任务 1.3 电力线路	14
学习任务 1.4 电力系统电能质量标准	21
学习任务 1.5 电力负荷	25
小结	31
复习思考题	32
学习情境 2 电力系统中性点运行方式	33
学习任务 2.1 中性点不接地的三相系统	33
学习任务 2.2 中性点经消弧线圈接地的三相系统	37
学习任务 2.3 中性点直接接地的三相系统	38
学习任务 2.4 中性点经电阻接地的三相系统	40
小结	41
复习思考题	42
学习情境 3 电力系统参数计算及等值电路	43
学习任务 3.1 线路的参数计算及等值电路	43
学习任务 3.2 变压器的参数计算和等值电路	49
学习任务 3.3 标幺值的计算	56
学习任务 3.4 电力系统等值电路	60
小结	65
复习思考题	66
学习情境 4 电力系统短路和短路电流计算	67
学习任务 4.1 电力系统的短路和短路计算	67
学习任务 4.2 无限大容量系统供电电路三相短路的分析计算	71
学习任务 4.3 有限大容量系统供电电路三相短路分析计算	79
学习任务 4.4 对称分量法及序网络概念	94
学习任务 4.5 电力系统不对称短路的分析计算和限制短路电流的措施	106

小结	118
复习思考题	119
学习情境 5 电力系统潮流计算	120
学习任务 5.1 一端电源供电网潮流分布计算	120
学习任务 5.2 两端电源供电网潮流分布计算	129
学习任务 5.3 复杂网潮流分布计算	137
小结	171
复习思考题	172
学习情境 6 电力系统有功功率平衡和频率调整	174
学习任务 6.1 电力系统综合负荷的频率静态特性	174
学习任务 6.2 电力系统综合负荷的频率调整	181
学习任务 6.3 发电厂有功功率经济分配	186
小结	189
复习思考题	190
学习情境 7 电力系统无功功率平衡和电压调整	191
学习任务 7.1 电力系统综合负荷的电压静态特性	191
学习任务 7.2 电力系统的无功电源及无功功率平衡	193
学习任务 7.3 电力系统的电压调整和无功管理	198
学习任务 7.4 电力系统的调压措施	201
小结	215
复习思考题	215
学习情境 8 电能损耗计算及降低的措施	217
学习任务 8.1 电力系统电能损耗概念	217
学习任务 8.2 面积法电能损耗计算	219
学习任务 8.3 均方根电流法电能损耗计算	221
学习任务 8.4 最大负荷损耗时间法电能损耗计算	226
学习任务 8.5 等值功率法电能损耗计算	232
学习任务 8.6 降低网损的技术措施	234
小结	241
复习思考题	242
学习情境 9 电力系统运行的稳定性分析	244
学习任务 9.1 电力系统的稳定性基本概念	244
学习任务 9.2 简单电力系统的机电特性	246
学习任务 9.3 简单电力系统静态稳定性	250
学习任务 9.4 小扰动法在分析电力系统静态稳定性中的应用	254
学习任务 9.5 电力系统电压、频率及负荷静态稳定性	258
学习任务 9.6 提高电力系统静态稳定性的措施	262
学习任务 9.7 简单电力系统的暂态稳定性分析等值电路	267
学习任务 9.8 简单电力系统暂态稳定性的定性分析	271

学习任务 9.9 极限切除角与极限切除时间	274
学习任务 9.10 提高电力系统暂态稳定运行的措施	276
学习任务 9.11 电力系统振荡的概念	284
小结	288
复习思考题	290
学习情境 10 远距离输电	292
学习任务 10.1 交流远距离输电	292
学习任务 10.2 高压直流输电	300
小结	305
复习思考题	306
学习情境 11 电力网设计	307
学习任务 11.1 电力网设计内容及基本原则	307
学习任务 11.2 电力网电压等级的选择	311
学习任务 11.3 网络结构的设计一般方法	313
学习任务 11.4 受端系统与联络线设计	319
学习任务 11.5 电力线路导线截面的选择	322
学习任务 11.6 电力网中线点的接地方式	327
复习思考题	329
附录 A 常用电气参数	330
附录 B 并联电力电容器参数	345
附录 C 导线的允许载流量	350
附录 D 有关的法定计量单位名称与符号	352
附录 E 发电机技术规范	354
附录 F 汽轮发电机和水轮发电机运算曲线	357
参考文献	362

学习情境 1

电力系统的基本知识

电能是二次能源,它不仅为工业、农业、现代科学技术和现代国防提供了必不可少的动力,而且与国民经济和现代社会生活联系密切,电能已经广泛应用到社会的各个领域。电力工业是国民经济的重要组成部分,从世界各国经济发展的进程看,国民经济每增长1%,就要求电力工业增长1.3%~1.5%,所以,国民经济的发展必须以电力工业的先行作为基础。

学习任务 1.1 电力系统和电力网的概念

【教学目标】

- 知识目标: (1) 掌握电力系统、电力网的概念及电力网的分类;
(2) 掌握电力生产的特点和对电力系统的基本要求;
(3) 了解国内外电力传输技术的发展概况;
(4) 了解智能电网概念和微电网概念。

- 能力目标: (1) 能区分电力系统、动力系统、电力网的范围;
(2) 能说出变电站、输电线路、配电线路的作用,能说出高压输电、低压配电的原因;
(3) 能根据电力工业现状说明联合电力系统的优越性。

- 态度目标: (1) 与学习小组成员主动沟通协作圆满完成任务;
(2) 树立全局为重、局部服从全局的观念。

【任务描述】

参观省(市)调度中心、变电站和线路,或参观电力调度仿真系统、仿真变电站、仿真发电厂。查询近五年的全国电力工业统计快报及相关资料,形成学习报告。内容包括①对动力系统、电力系统、电力网的认识;②电力系统生产的特点及对电力系统的基本要求;③我国电力系统发展概况及电力新技术;④用国内外电力系统发展的具体事例说明联合电力系统的优越性。

【任务准备】

课前作如下准备。

- (1) 上网检索近五年的全国电力工业统计快报;

(2) 检索查询科技期刊, 了解国内外电力系统发展概况;

(3) 做好到现场参观的准备。

课前预习相关知识部分, 并独立回答下列问题。

(1) 什么叫电力系统、动力系统、电力网?

(2) 电力生产的特点是什么? 电力生产对电力系统的基本要求是什么?

(3) 电力网按不同的分类方法可有哪些类型?

【相关知识】

一、电力系统和电力网

将自然能转变为电能的过程称为发电。自然能称为一次能源, 目前用于发电的一次能源有煤炭、石油、水力、原子能、风力、太阳能等, 利用这些能源发电的电厂分别称为火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂、风力发电场、太阳能发电场等。地热能、潮汐能也在被人们逐渐开发利用。此外, 电气体、磁流体发电也在一些国家进入了工业化试验阶段。

电能为二次能源, 与其他能源不同, 其主要特点是不能大规模储存, 发电、输电、配电和用电在同一瞬间完成; 发电和用电之间必须实时保持供需平衡, 若不能保持实时平衡, 将危及电力生产的安全性和连续性。

在线路输送功率不变的情况下, 通过提高线路电压输送电能可以减少电流在导线中的功率损耗、电压损耗。考虑到用电的安全性和经济性, 电能输送至负荷中心后必须进行降压处理, 用户才能使用。用于改变电压和联络、汇聚、分配电能的场所, 称为变电站(所)。发电厂、变电站和电力用户之间通过电力线路联系。按其供电功能, 电力线路可分为输电线路和配电线路。输电线路将发电厂的电能输送到远方的负荷中心, 配电线路是将负荷中心的电能配送给城市、郊区、乡镇和农村各用户。根据消费电能对象的不同要求, 可将电能再一次降压, 进行再分配, 进一步分配和供给工业、农业、商业、居民以及特殊需要的用电部门。

如图 1-1 所示, 发电、变电、输电、配电和用电等的各种电气设备连接在一起的整体称为电力系统。它包括发电厂的电气部分、升压变压器、降压变压器、输配电线路及各类用电设备。

电力系统加上各种类型发电厂的动力部分(如火力发电厂的热力部分、水力发电厂的水力部分、原子能反应堆部分等)以及热力用户, 称为动力系统。

在现代电力系统中, 把变电和输配电线路构成的网络称为电力网, 简称电网。

为方便分析计算, 电力网可分为地方电力网、区域电力网和远距离输电网。地方电力网电压较低(110kV 以下), 输送功率较小, 线路较短, 计算时可作较多简化。区域电力网一般电压较高(110kV 以上), 输送功率较大, 线路较长, 计算时只能作一定简化。远距离输电网电压在 330kV 及以上, 输电线路长度超过 300km, 计算时一般不能简化。输电线路将发电厂发出的电能输送到消费电能的地区(也称负荷中心), 或进行相邻电网之间的电能互送, 使其形成互联电网或统一电网, 保持发电、用电或两电网之间供需平衡。

按电压的高低分, 电力网又可分为低压网(1kV 以下)、中压网(1~10kV)、高压网(35~220kV)、超高压网(330~750kV)、特高压网(1000kV 及以上)。±800kV 及以上的直流输电网为特高压直流输电网。

按电力网在电力系统中的作用可分为系统联络网与供用电网两类。系统联络网主要是为

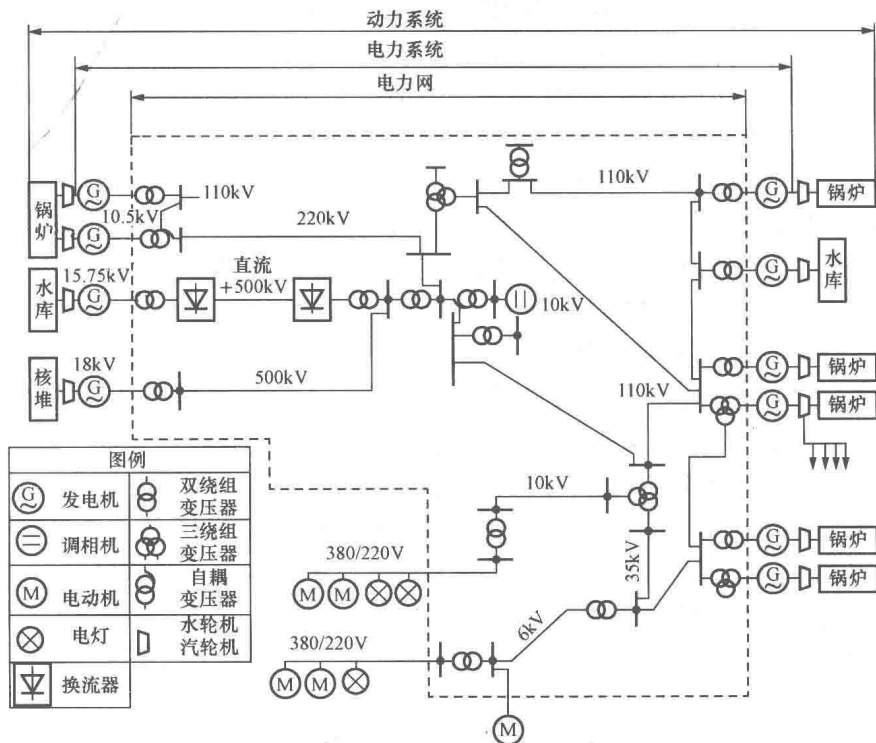


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网示意图

系统运行调度服务；供用电网主要是为用户服务的。

按接线方式分，电力网还可分为一端电源供电网（又称为开式网）、两端电源供电网（包括环网）和多端电源供电网（又称复杂网），两端电源供电网和多端电源供电网均称为闭式网。一端电源供电网是指用户只能从一个方向得到电能的电力网，其特点是接线简单、经济、运行方便，但供电可靠性较差。两端电源供电网是指用户可从两个方向得到电能的电力网，其特点是接线较简单、运行灵活、供电可靠性较高，电力系统网架和向一级负荷或重要二级负荷供电的电网，常采用这种接线方式。多端电源供电网是指电网中有从三个或三个以上方向得到电能的变电站或负荷点，其特点是可靠性高，运行、检修灵活，但接线复杂、投资大，继电保护、运行操作复杂，这类电网主要用于电力系统网架接线，以加强发电厂之间及发电厂与枢纽变电站之间的联系。各种接线方式如图 1-2 所示。

由中小型电力系统逐渐联络，形成电压高、输电容量大、输送距离远的联合电

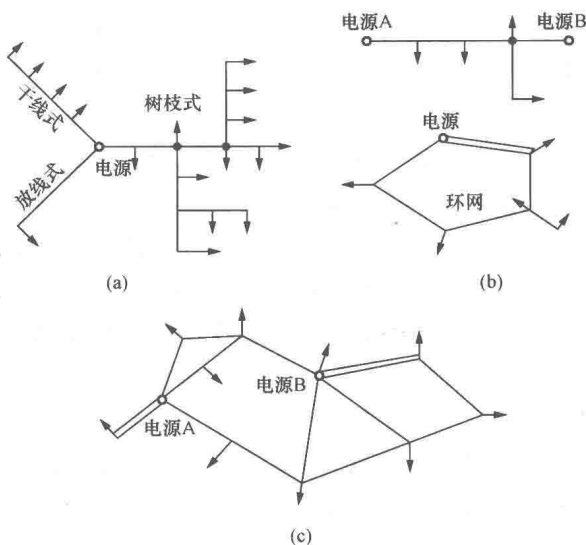


图 1-2 电力网的接线方式图

(a) 开式网；(b) 两端电源供电网及环网；(c) 复杂网

力系统,在技术和经济上有许多明显优越性。联合电力系统可更合理地利用能源,提高经济效益;可采用大机组以降低造价和燃料消耗,加快建设速度;可互相调剂,互相支援,减少系统总备用容量;可利用地区时差及水火电之间的调节,取得错峰和调峰效益等。

二、电力系统发展概述

1. 世界电网发展概况

1831年法拉第发现电磁感应定律,从本质上解释了电与磁之间的关系,为电力系统的形成奠定了理论基础。1882年法国人德普勒将在慕尼黑郊外57km的水电厂的电力输送到慕尼黑,形成了世界上最早、最简单的电力系统,它是一种直流输电系统,其发展受到了许多限制。直至1891年生产出了三相异步电动机、三相变压器,建立了三相交流输电系统,才奠定了近代输电技术的基础。

三相交流电的出现及人们对电力需求的日益增加,使电力系统的容量、输送功率逐渐增加,输电电压逐渐增大。目前,世界上最高线路电压已达1150kV(苏联在20世纪80年代建成世界上第一条1150kV特高压乌拉尔—西伯利亚的输电线路),电力系统装机容量已超过12亿kW。随着输电距离及容量的不断增大,电力系统运行的稳定性问题也日益突出,20世纪50年代直流输电又重新被人们所认识和利用。现在,世界上出现了许多超高压和特高压交、直流输电的大型电力系统。

2. 中国电力系统的发展

在中国,1882年在上海有了第一座发电厂(容量为150kW),主要供附近地区的照明负荷用电需要。1949年以后电力工业逐年发展,尤其在改革开放以来,电力系统的规模也逐渐壮大起来。1978年底,全国装机容量仅5712万kW,35kV及以上输电线路长度仅为23.1万km,变电设备容量为1.3亿kVA。改革开放以来,我国电力系统建设步伐不断加快。

据中国电力企业联合会网站资料,截至2012年年底,全国发电装机容量达到114491万kW,同比增长7.8%。其中,水电24890万kW(含抽水蓄能2031万kW),占全部装机容量的21.7%;火电81917万kW(含煤电75811万kW、气电3827万kW),占全部装机容量的71.5%;核电1257万kW,并网风电6083万kW,并网太阳能发电328万kW。2012年,全国基建新增220kV及以上输电线路长度和变电设备容量分别为3.2万km和1.8亿kVA,分别同比减少0.4万km和0.3亿kVA。全国电网220kV及以上输电线路回路长度、公用变压器设备容量分别为50.7万km、22.8亿kVA,分别同比增长6.7%和8.3%。

2012年全国全社会用电量49591亿kWh,同比增长5.5%。增速比2011年回落6.5%。四个季度全社会用电量同比分别增长6.8%、4.3%、3.6%和7.3%。

2012年,全国6000kW以上电厂供电标准煤耗326g/kWh,同比降低3g/kWh;全国电网输电线路损失率6.62%,同比增加0.10%。

2012年,全国全口径发电量49774亿kWh,比上年增长5.22%。水电发电量8641亿kWh,同比增长29.3%,占全国发电量的17.4%,比上年提高3.2个百分点;火电发电量39108亿kWh,同比增长0.3%,占全国发电量的78.6%,比上年降低3.9%;核电、并网风电发电量为982亿kWh和1004亿kWh,同比分别增长12.6%和35.5%,占全国发电量的比重分别比上年提高0.1%和0.5%。

据国家风电信息管理中心2012年度风电产业信息统计,截至2012年底,全国风电并网

装机容量为 6266 万 kW, 比上年增加 1482 万 kW, 增长率 31%, 全年风电发电量 1008 亿 kWh, 比 2011 年增长 41%, 风电发电量约占全国总上网电量的 2.0%。

国家可再生能源信息管理中心 2014 年 1 月 2 日发布《2013 年度全国风电建设快报》。经初步统计, 截至 2013 年 12 月 31 日, 2013 年全国风电累计核准容量 13 425 万 kW。

按照中国火电有关指标折算, 2012 年的风电发电量相当于节约燃煤 3286 万 t 标准煤、用水 1.67 亿 t, 减少排放二氧化碳 8434 万 t、二氧化硫 22.8 万 t、烟尘 4 万 t、氮氧化物 24.2 万 t。

2013 年 12 月 7 日中国行业研究网, 据国家能源局资料报道: 预计到 2013 年年底, 全国发电总装机将达到 12.35 亿 kW, 其中火电装机占比将由 2012 年年底的 71.5% 下降到 69.6%, 全国水电装机将达到 2.78 亿 kW, 增长约 11.6%, 占发电总装机比重为 22.5%; 并网风电装机 7500 万 kW, 增长约 22.1%, 占 6.1%; 核电装机 1470 万 kW, 增长约 16.9%, 占 1.2%; 并网太阳能装机 1000 万 kW, 增长 200%, 占 0.8%。

1981 年 12 月河南平顶山—湖北武昌 500kV 输变电工程建成投运, 以此为标志, 我国成为世界上第 8 个拥有 500kV 输电线路的国家。500kV 超高压输电线路逐渐成为除西北地区外各省级及跨省大区电网的骨干网架。2005 年 9 月, 中国第一个 750kV 输变电示范工程(甘肃兰州东—青海官亭)正式建成投运。2010 年初, 新疆与西北主网联网 750kV 输变电工程开工建设。2009 年 1 月 6 日, 晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压交流试验示范工程建成投运并保持安全运行。

同时, 直流输电发展迅速, 中国已经成为世界上直流输电技术领先的国家。1987 年, 由我国自主设计、设备全部国产化的 ±100kV 舟山直流输电工程建成。1990 年双极 ±500kV 直流输电工程(葛洲坝—上海)建成投运。随着三峡工程开工建设和西电东送工程的推进, 我国相继建成天生桥—广州、三峡—上海、三峡—广州等 ±500kV 直流输电工程和西北—华中灵宝直流背靠背工程。2010 年, 云南—广东、向家坝—上海 ±800kV 特高压直流输电示范工程线路投入运行。2011 年, 青藏直流联网工程投入试运行, 结束了西藏电网长期孤网运行的局面, 标志着我国内地电网实现全面互联。2011 年 3 月, 世界首个 ±660kV 电压等级的直流输电工程——宁东(宁夏银川东)—山东直流输电工程双极建成投运。2011 年 12 月 31 日中俄直流联网黑河背靠背换流站工程投入试运行, 中俄直流背靠背联网工程建成投产有利于中俄两国之间的电力交流与优势互补。

中国东北、华北、华中、华东和南方电网形成 1000、500、220、110 (66)、35、10、0.38kV 交流电压等级序列, 西北电网形成 750、330 (220)、110、35、10、0.38kV 交流电压等级序列。除西北等电网外, 各省主网架基本为 500kV, 同时交直流 500kV 线路成为跨省跨区输电的重要线路。随着 1000kV 输变电工程以及直流输电工程的建设, 跨区联网逐步加强, 特高压交直流线路将承担起更大范围、更大规模的输电任务。

三、智能电网技术

1. 智能电网概念及特征

智能电网即电网的智能化, 也被称为“电网 2.0”。建立在集成的、高速双向通信网络的基础上, 通过先进的传感和测量技术、先进的设备技术、先进的控制方法以及先进的决策支持系统技术的应用, 实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全的目标, 其主要特征为清洁、坚强、自愈、优化、交互和经济。智能电网是以包括发电、输电、配电

和用电各环节的电力系统为对象,不断研发新型的电网控制技术、信息技术和管理技术,并将其有机结合,实现从发电到用电所有环节信息的智能交流,系统地优化电力生产、输送和使用,是未来电网发展的美好愿景。

2. 智能电网的主要技术

(1) 通信技术。建立高速、双向、实时、集成的通信系统是实现智能电网的基础,智能电网的数据获取、保护和控制都需要通信系统的支持,因此通信技术是迈向智能电网的第一步。

(2) 量测技术。参数量测技术是智能电网基本的组成部分,先进的参数量测技术获得数据并将其转换成数据信息,以供智能电网的各个方面使用。它们评估电网设备的健康状况和电网的完整性,进行表计的读取、电费估计、防止窃电、缓减电网阻塞及与用户进行沟通。

(3) 设备技术。智能电网广泛应用先进的设备技术,极大地提高输配电系统的性能。未来的智能电网中的设备将充分应用在材料、超导、储能、电力电子和微电子技术方面的最新研究成果,提高功率密度、供电可靠性、电能质量以及电力生产的效率。未来智能电网将主要应用三个方面的先进技术:电力电子技术、超导技术以及大容量储能技术。通过采用新技术和在电网及负荷特性之间寻求最佳的平衡点来提高电能质量;通过应用和改造各种各样的先进设备,如基于电力电子技术和新型导体技术的设备,来提高电网输送容量和可靠性;配电系统中要引进许多新的储能设备和电源,同时要利用新的网络结构,如微电网。

(4) 控制技术。先进的控制技术是指智能电网中分析、诊断和预测状态并确定和采取适当的措施以消除、减轻和防止供电中断和电能质量扰动的装置和算法。这些技术将提供对输电、配电和用户侧的控制方法并且可以管理整个电网的有功和无功功率。先进控制技术监测基本的元件(参数量测技术),提供及时和适当的响应(集成通信技术和先进设备技术)并且对任何事件进行快速诊断(先进决策技术)。先进控制技术支持市场报价技术可提高资产的管理水平。

(5) 支持技术。决策支持技术将复杂的电力系统数据转化为系统运行人员一目了然的可理解的信息,因此动画技术、动态着色技术、虚拟现实技术以及其他数据展示技术用来帮助系统运行人员认识、分析和处理紧急问题。

(6) 标准体系。目前 IEEE 致力于制定一套智能电网的标准和互通原则,主要内容在于电力工程、信息技术和互通协议等方面标准和原则。

四、微电网概念

微电网是一种新型网络结构,是一组由微电源、负荷、储能系统和控制装置等构成的系统单元,也可称为微型电力系统。微电网电源可包括光伏电池、小型风电、小型燃气轮机、电池储能等。微电网的特点是清洁、电压低、运行灵活、方便、线损小,省去输变电工程等,它将是大型电力系统的有益补充。

五、电力系统的基本要求

1. 电力系统运行的特点

电能作为一种特殊的商品,与其他商品一样,也有其生产、输送和消费。电能的生产、输送和消费具有极明显的特殊性。

(1) 电能的生产、输送、分配和使用同时进行,目前尚不能大量地、廉价地贮存电能,发电厂发出的电能还不能做到恰好等于用户所需要的电能和输送分配过程中的电能损耗之

和。当电力系统负荷变化或发生故障使平衡有所破坏时,电力系统会自动调整或经人工干预调整到新的平衡。所以电能的生产、输送、分配和使用必须同时进行,要求统一调度、协调生产,以保证整个系统运行的连续性。

(2) 电能的生产与国民经济及人民生活关系非常密切。由于电能使用和控制方便,并且能够远距离输送,当今社会电能的使用越来越广泛,各类用户无处不在。如果电能供应不足或中断将给国民经济造成巨大损失,直接影响工农业生产,给人民生活带来诸多不便。另外,电能的价格还影响产品的成本,从而影响大多数商品和服务价格。

(3) 电力系统运行的过渡过程非常短暂。电能以电磁波的形式传播,其传输速度与光速相同。电力系统中各元件的投、切和电能输送过程几乎都在一瞬间进行,即电力系统从一种运行方式过渡到另一种运行方式的过渡过程非常短暂。在电力系统中,由于雷击或开关操作引起的过电压,其暂态过程只有微秒到毫秒数量级;从发生故障到系统失去稳定通常也只有几秒的时间,因事故而使系统全面瓦解的过程一般也只以分钟计。为了使设备在故障等暂态过程中不致损坏,更为了防止电力系统失去稳定或发生崩溃,因此电力系统要求具有较高的自动化程度,需要继电保护、自动装置的投入,实施实时监控。

2. 对电力系统的基本要求

电力系统的根本任务是最大限度地为用户提供安全、可靠、优质、价廉的电能。根据电能生产的特点和电力系统的任务,对电力系统有以下基本要求。

(1) 最大限度地满足用户的需求。电力生产要满足现在各个行业及人民生活不断增长的用电需求,并且电力的发展制约国民经济的发展,所以保障供电是电力部门的首要任务,并要求电力的发展超前其他行业的发展,最大限度地满足人们对电能的需求。

(2) 安全可靠地供电。电力生产必须执行“安全第一、预防为主”的方针,没有安全,就没有生产。可靠的供电就是满足电能生产的连续性,电力系统供电的中断将使生产停顿,生活混乱,甚至危及人身和设备的安全,造成十分严重的后果。电力系统为保持高可靠性,必须具有足够的电源容量(包括一定的备用容量)和合理的布局、电网结构必须合理,使得在某一(或某些)线路、电气设备因故障或检修而退出运行时,不影响或不严重影响对用户的供电。对电力系统可靠性的最大威胁是系统失去稳定,所以必须有保护电力系统和提高稳定性的措施。

(3) 提供优质的电能。电能的优劣可用电能质量来衡量,对一般用户主要考虑电压的频率、电压和波形质量。在我国,对于频率的容许偏差、电压的容许偏差以及谐波电流电压闪变等都有相应的标准,在电力系统设计和运行中都不允许超出这些偏差标准。我国电力系统频率偏移一般不超过额定频率的 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5 \text{ Hz}$,电压偏移一般不超过用电设备额定电压的 $\pm 5\%$,频率或电压偏移过大,无论对用户、还是对电力系统本身都会产生不良后果。随着计算机技术、高新技术设备在电力系统中的广泛应用,电能的波形、电压波动和闪变、三相电压不平衡度等也应予以考虑,否则将影响这些设备的正常工作。

(4) 系统运行的经济性。电能生产的规模很大,消耗的一次能源在国民经济一次能源总消耗量中占有很大的比重,因此,提高电力系统运行的经济性具有极其重要的意义。任何产品的生产都讲究其经济性,都要最大限度地降低生产成本。电力系统的经济性应考虑合理分配各发电厂之间的负荷、降低发电厂燃料消耗率和厂用电率、降低电力网的电能损耗和管理成本等。