



国家电网
STATE GRID

国家电网公司
生产技能人员职业能力培训通用教材

电力系统(分析)

国家电网公司人力资源部 组编

GUOJIADIANWANGGONGSI
SHENGCHANJINENG RENYUAN
ZHIYENENGLI PEIXUN
TONGYONG JIAOCAI



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



国家电网
STATE GRID

国家电网公司

生产技能人员职业能力培训通用教材

电力系统(分析)

国家电网公司人力资源部 组编

王大光 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《国家电网公司生产技能人员职业能力培训教材》是按照国家电网公司生产技能人员标准化培训课程体系的要求,依据《国家电网公司生产技能人员职业能力培训规范》(简称《培训规范》),结合生产实际编写而成。

本套教材作为《培训规范》的配套教材,共 72 册。本册为通用教材的《电力系统(分析)》,全书共十章、65 个模块,主要内容包括电力系统的基本知识、电力系统数学模型、电力系统潮流计算、电力系统正常运行方式调整、电力系统优化运行、电力系统状态估计、电力系统短路电流计算与故障分析、电力系统稳定性分析、电力系统安全分析与控制和现代大电网分析初步等。

本书是供电企业生产技能人员的培训教学用书,也可以作为电力职业院校教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统(分析)/国家电网公司人力资源部组编. —北京:
中国电力出版社, 2010

国家电网公司生产技能人员职业能力培训通用教材

ISBN 978-7-5083-9808-2

I. ①电… II. ①国… III. ①电力系统-分析-技术培训-教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 217546 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 5 月第一版 2010 年 7 月北京第三次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 22.75 印张 418 千字

印数 11001—21000 册 定价 41.00 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

《国家电网公司生产技能人员职业能力培训通用教材》

编 委 会

主 任 刘振亚

副 主 任 郑宝森 陈月明 舒印彪 曹志安 栾 军
李汝革 潘晓军

成 员 许世辉 王风雷 张启平 王相勤 孙吉昌
王益民 张智刚 王颖杰

编写组组长 许世辉

副 组 长 方国元 张辉明 陈卫中

成 员 王大光 林章岁 陈 峰 朱 菁 鞠宇平
倪 春 江振宇 李群雄 曹爱民 金昌榕
刘 华 雍志娟



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

生产技能人员职业能力培训通用教材

前 言

为大力实施“人才强企”战略，加快培养高素质技能人才队伍，国家电网公司按照“集团化运作、集约化发展、精益化管理、标准化建设”的工作要求，充分发挥集团化优势，组织公司系统一大批优秀管理、技术、技能和培训教学专家，历时两年多，按照统一标准，开发了覆盖电网企业输电、变电、配电、营销、调度等 34 个职业种类的生产技能人员系列培训教材，形成了国内首套面向供电企业一线生产人员的模块化培训教材体系。

本套培训教材以《国家电网公司生产技能人员职业能力培训规范》(Q/GDW 232—2008)为依据，在编写原则上，突出以岗位能力为核心；在内容定位上，遵循“知识够用、为技能服务”的原则，突出针对性和实用性，并涵盖了电力行业最新的政策、标准、规程、规定及新设备、新技术、新知识、新工艺；在写作方式上，做到深入浅出，避免烦琐的理论推导和论证；在编写模式上，采用模块化结构，便于灵活施教。

本套培训教材包括通用教材和专用教材两类，共 72 个分册、5018 个模块，每个培训模块均配有详细的模块描述，对该模块的培训目标、内容、方式及考核要求进行了说明。其中：通用教材涵盖了供电企业多个职业种类共同使用的基础知识、基本技能及职业素养等内容，包括《电工基础》、《电力生产安全及防护》等 38 个分册、1705 个模块，主要作为供电企业员工全面系统学习基础理论和基本技能的自学教材；专用教材涵盖了相应职业种类所有的专业知识和专业技能，按职业种类单独成册，包括《变电检修》、《继电保护》等 34 个分册、3313 个模块，根据培训规范职业能力要求，I、II、III 三个级别的模块分别作为供电企业生产一线辅助作业人员、熟练作业人员和高级作业人员的岗位技能培训教材。

本套培训教材的出版是贯彻落实国家人才队伍建设总体战略，充分发挥企业培养高技能人才主体作用的重要举措，是加快推进国家电网公司发展方式和电网发展方式转变的具体实践，也是有效开展电网企业教育培训和人才培养工作的重要基础，必将对改进生产技能人员培训模式，推进培训工作由理论灌输向能力培养转型，提高培训的针对性和有效性，全面提升员工队伍素质，保证电网安全稳定运行、支

撑和促进国家电网公司可持续发展起到积极的推动作用。

本册为通用教材部分的《电力系统（分析）》，由福建省电力有限公司具体组织编写。

全书第一章由福建省电力有限公司朱菁编写；第二章、第三章由福建省电力有限公司王大光编写；第四章至第六章由福建省电力有限公司陈峰编写；第七章至第十章由福建省电力有限公司林章岁编写。全书由王大光担任主编。湖北省电力公司张家安担任主审、湖北省电力公司雷庆生、陶伶俐参审。

由于编写时间仓促，难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见，使之不断完善。

常用符号表

电气量

U 、 u

电压

I 、 i

电流

R 、 r

电阻

L 、 l

电感

C 、 c

电容

X 、 x

电抗

Z

阻抗

Y

导纳

G

电导

B

电纳

S 、 P 、 Q

视在功率、有功功率、无功功率

f

频率

电机相关变量

n_p

同步发电机的极对数

L_{xx}

绕组 X 的自感系数

L_d

同步电机纵轴同步电感

L_{ad}

同步电机纵轴电枢反应电感

$L_{\sigma d}$

定子绕组漏电感

M_{xy} 、 m_{xy}

绕组 X、Y 间的互感系数

N

绕组匝数

T'_d

纵轴暂态短路时间常数

T'_{d0}

纵轴暂态开路时间常数

T''_d

纵轴次暂态短路时间常数

T''_{d0}

纵轴次暂态开路时间常数

T'_q

交轴暂态短路时间常数

T'_{q0}

交轴暂态开路时间常数

T''_q

交轴次暂态短路时间常数

T''_{q0}

交轴次暂态开路时间常数

X_d	纵轴同步电抗
X'_d	纵轴暂态电抗
X''_d	纵轴次暂态电抗
X_q	交轴同步电抗
X'_q	交轴暂态电抗
X''_q	交轴次暂态电抗
E'_d	纵轴暂态电势
E''_d	纵轴次暂态电势
E'_q	交轴暂态电势
E''_q	交轴次暂态电势
k_{sd}	同步电机纵轴磁路饱和修正系数
k_{sq}	同步电机交轴磁路饱和修正系数
s	滑差
X_{ad}	纵轴电枢反应电抗
X_{aq}	交轴电枢反应电抗
E_{fd} 、 u_f	发电机励磁电压

调速器变量

μ	汽轮机汽门开度, 或水轮机导叶开度
T_{CH}	高压缸汽室的蒸汽容积时间常数
T_{RH}	中压缸汽室的蒸汽容积时间常数
T_{CO}	跨接管的蒸汽容积时间常数
f_1	高压缸稳态输出功率占总输出功率的百分比
f_2	中压缸稳态输出功率占总输出功率的百分比
f_3	低压缸稳态输出功率占总输出功率的百分比
L	水轮发电机组引水管道长度
H_R	上、下游水位差
h	水头增量
q	流量增量
T_w	水轮机引水系统水流惯性时间常数
ω	发电机转速
σ	配压阀行程
η	飞摆套筒的相对位移
δ	测量元件灵敏度

k_{δ}	测速环节的放大倍数
K_p 、 T_D 、 T_I	PID 调节器的放大倍数、微分、积分时间常数
直流输电系统变量	
α	直流输电系统的触发延迟角
β	直流输电系统的触发超前角
γ	直流输电系统的换相角
δ	直流输电系统的熄弧角
U_R	整流测交流母线线电压的有效值
k_R	整流变压器的变比
励磁系统变量	
U_F	励磁电压软负反馈环节的输出
U_R	直流励磁机的励磁电压
K_A	综合放大环节的增益
$u_f^{(G)}$	发电机励磁电压
$i_f^{(G)}$	发电机励磁电流
E_f	发电机励磁电动势
X_r	整流器换相电抗
S_E	气隙曲线空载电势对应的饱和系数
e_{qE}	交流励磁机的空载电势
风力发电机参数	
$\bar{v}$	基本风速
A	韦布尔分布的尺度参数
k	韦布尔分布的形状参数
$\Gamma(\bullet)$	伽马函数
v_{WG}	阵风的风速
T_G	阵风的周期
T_{IG}	阵风的启动时间
v_{WR}	渐变风速
T_{IR}	阵风的起始时间
T_{2R}	阵风的终止时间
T_R	阵风的保持时间
K_N	地表粗糙系数
F	扰动范围

μ	相对高度的平均风速
v_w	作用在风力机上的风速
v_{in} 、 v_R 、 v_{out}	风机启动风速、额定风速、切出风速
$f(\lambda, \beta)$	风力机叶片气动特性函数
λ 、 β 、 ρ 、 A	风力机叶尖速率比、桨距角、空气密度、扫风面积
P_w 、 P_R 、 T_w	风力机功率、额定功率、惯性时间常数
P_m	异步发电机转轴上的机械功率
其他变量	
P	Park 变换矩阵
Δ	增量符号
t	时间
$p = d/dt$	微分算子
s	拉氏算子
下标	
下标 *	表示相应量的标么值
下标 a、b、c	表示与发电机定子三相绕组中的对应变量
下标 f	表示发电机励磁绕组的对应参数和变量
下标 D	表示发电机纵轴阻尼绕组的对应参数和变量
下标 g	表示与交轴第一个阻尼绕组的对应参数和变量
下标 Q	表示与交轴第二个阻尼绕组的对应参数和变量
下标 t	表示发电机机端的变量
下标 α 和 β	表示 $\alpha\beta 0$ 坐标系下变量的 α 和 β 分量
下标 d 和 q	表示 dq0 坐标系下变量的 d 和 q 分量
下标 x 和 y	表示 xy0 坐标系下变量的 x 和 y 分量
下标 0	表示 $\alpha\beta 0$ 、dq0、xy0 坐标系下变量的零轴分量或变量的初值
下标 B	表示相应物理量的基准值
下标 N	表示相应物理量的额定值
下标 M、m	表示机械量
下标 E、e	表示电气量



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

生产技能人员职业能力培训通用教材

目 录

前言

常用符号表

第一章 电力系统的基本知识	1
模块 1 电力系统的组成和发展 (TYBZ01201001)	1
模块 2 电力系统的额定电压和额定频率 (TYBZ01201002)	5
模块 3 电力系统接线方式和接线图 (TYBZ01201003)	7
模块 4 电力负荷和负荷曲线 (TYBZ01201004)	12
模块 5 负荷预测 (TYBZ01201005)	16
模块 6 电力生产特点和对电力系统的基本要求 (TYBZ01201006)	18
模块 7 电力系统分析的主要内容和常用分析软件与 仿真设备简介 (TYBZ01201007)	20
模块 8 电力系统规划设计 (TYBZ01201008)	22
第二章 电力系统数学模型	25
模块 1 发电机参数和等值电路 (TYBZ01202001)	25
模块 2 输电线路的结构和参数 (TYBZ01202002)	30
模块 3 变压器的参数和等值电路 (TYBZ01202003)	37
模块 4 负荷参数和等值电路 (TYBZ01202004)	44
模块 5 发电机转子运动方程 (TYBZ01202005)	46
模块 6 电力系统标么制 (TYBZ01202006)	49
模块 7 电力网络方程 (TYBZ01202007)	56
模块 8 对称分量法和电力系统序网 (TYBZ01202008)	60
模块 9 发电机派克方程 (TYBZ01202009)	67
模块 10 发电机励磁系统数学模型 (TYBZ01202010)	81
模块 11 水轮机及其调速系统数学模型 (TYBZ01202011)	91
模块 12 汽轮机及其调速系统数学模型 (TYBZ01202012)	96

模块 13	风力发电机数学模型 (TYBZ01202013)	100
模块 14	简单电力系统模型 (TYBZ01202014)	112
模块 15	简单电力系统模型建模例析 (TYBZ01202015)	115
模块 16	复杂电力系统模型 (TYBZ01202016)	118
模块 17	复杂电力系统建模例析 (TYBZ01202017)	120
模块 18	电力系统等值 (TYBZ01202018)	125
模块 19	电力系统等值例析 (TYBZ01202019)	130
第三章	电力系统潮流计算	136
模块 1	电力系统潮流概念 (TYBZ01203001)	136
模块 2	简单电力网络潮流计算 (TYBZ01203002)	143
模块 3	复杂电力系统潮流计算 (TYBZ01203003)	149
模块 4	复杂电力系统潮流分析实例 (TYBZ01203004)	161
模块 5	电力系统特殊潮流分析介绍 (TYBZ01203005)	165
第四章	电力系统正常运行方式调整	171
模块 1	有功平衡和频率调整 (TYBZ01204001)	171
模块 2	无功平衡和电压调整 (TYBZ01204002)	177
模块 3	电力系统的电压管理 (TYBZ01204003)	179
模块 4	电力系统无功补偿设备 (TYBZ01204004)	183
模块 5	电力系统 AGC 及 AVQC (TYBZ01204005)	186
第五章	电力系统优化运行	193
模块 1	元件经济运行 (TYBZ01205001)	193
模块 2	电力系统经典经济调度 (TYBZ01205002)	196
模块 3	电力系统最优潮流 (TYBZ01205003)	201
模块 4	电力市场和节能调度 (TYBZ01205004)	207
第六章	电力系统状态估计	213
模块 1	电力系统状态估计基本概念 (TYBZ01206001)	213
模块 2	最小二乘法状态估计 (TYBZ01206002)	216
模块 3	增加 PMU 信息的状态估计 (TYBZ01206003)	218
第七章	电力系统短路电流计算与故障分析	225
模块 1	短路的基本概念 (TYBZ01207001)	225

模块 2	电力系统三相短路的实用计算 (TYBZ01207002)	229
模块 3	电力系统不对称故障分析计算 (TYBZ01207003)	236
模块 4	电力系统复杂故障计算 (TYBZ01207004)	246
模块 5	复杂电网短路电流算例 (TYBZ01207005)	249
模块 6	限制短路电流的措施 (TYBZ01207006)	251
第八章	电力系统稳定性分析	255
模块 1	电力系统稳定性基本概念 (TYBZ01208001)	255
模块 2	暂态稳定性分析的模型和算法 (TYBZ01208002)	258
模块 3	简单电力系统暂态稳定性分析 (TYBZ01208003)	266
模块 4	复杂电力系统暂态稳定性例析 (TYBZ01208004)	272
模块 5	电力系统电压稳定性 (TYBZ01208005)	277
模块 6	电力系统静态稳定性和低频振荡分析 (TYBZ01208006)	284
模块 7	电力系统次同步谐振分析 (TYBZ01208007)	292
模块 8	电力系统中长期稳定性概念 (TYBZ01208008)	297
模块 9	提高电力系统稳定性的措施 (TYBZ01208009)	301
第九章	电力系统安全分析与控制	308
模块 1	电力系统静态安全分析 (TYBZ01209001)	308
模块 2	电力系统继电保护 (TYBZ01209002)	316
模块 3	电力系统安全稳定自动控制系统 (TYBZ01209003)	321
第十章	现代大电网分析初步	329
模块 1	电网互联和大电网分析 (TYBZ01210001)	329
模块 2	含直流输电的大电网分析初步 (TYBZ01210002)	333
模块 3	含柔性输电的大电网分析初步 (TYBZ01210003)	338
参考文献		346



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

生产技能人员职业能力培训通用教材

第一章 电力系统的基本知识

模块 1 电力系统的组成和发展 (TYBZ01201001)

【模块描述】本模块介绍电力系统的组成和发展，通过对动力系统、电力系统、电力网和特高压、数字变电站、超导、智能电网基本概念以及电力系统发展的描述，了解电力系统的组成和发展。

【正文】

一、电力系统的组成

电力系统主要由发电厂、电力网以及用户三个部分组成。电力系统加上发电厂的动力部分（如锅炉、核反应堆、水库、汽轮机、水轮机等）以及热力用户，称为动力系统，如图 TYBZ01201001-1 所示。电力系统的各个组成部分简介如下。

1. 发电厂

发电厂的作用是将一次能源转变成电能。发电厂使用的一次能源有热能、水能、核能、风能、太阳能等，根据利用的能量形态的不同，可以将发电厂分为火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂、风力发电厂和其他类型的发电厂。

(1) 火力发电厂。

火力发电厂将燃料的化学能最终转换成电能，常见的燃料有煤、石油和天然气 (LNG)。由于石油短缺且价格高，我国近年几乎已经没有燃油的火力发电厂。燃煤火力发电厂的基本生产过程如下：煤被磨成粉在锅炉中燃烧（锅炉由冷态点火时要辅助燃烧廉价的低端成品油）、将水加热生成蒸汽（燃料的化学能转变成蒸汽热能），蒸汽压力推动汽轮机旋转（热能转换成机械能），汽轮机带动发电机转子旋转（将机械能转变成电能）。LNG 电厂是绿色电源，原动机是燃烧 LNG 的燃气发动机，并设有余热锅炉带动汽轮机，汽轮机与燃气发动机、发电机转子同轴，使 LNG 机组轴系较长，350MW 级达到约 40m。

燃煤火力发电厂可分为凝汽式发电厂（只发电）和热电厂（发电兼供热）。按蒸汽压力和温度的不同，可分为中低压发电厂（3.92MPa, 450℃）、高压发电厂（9.9MPa, 540℃）、超高压发电厂（13.83MPa, 540℃）、亚临界压力发电厂（16.77MPa,



540℃)、超临界压力发电厂(22.11MPa, 550℃)和超超临界压力发电厂(31MPa, 593℃)。

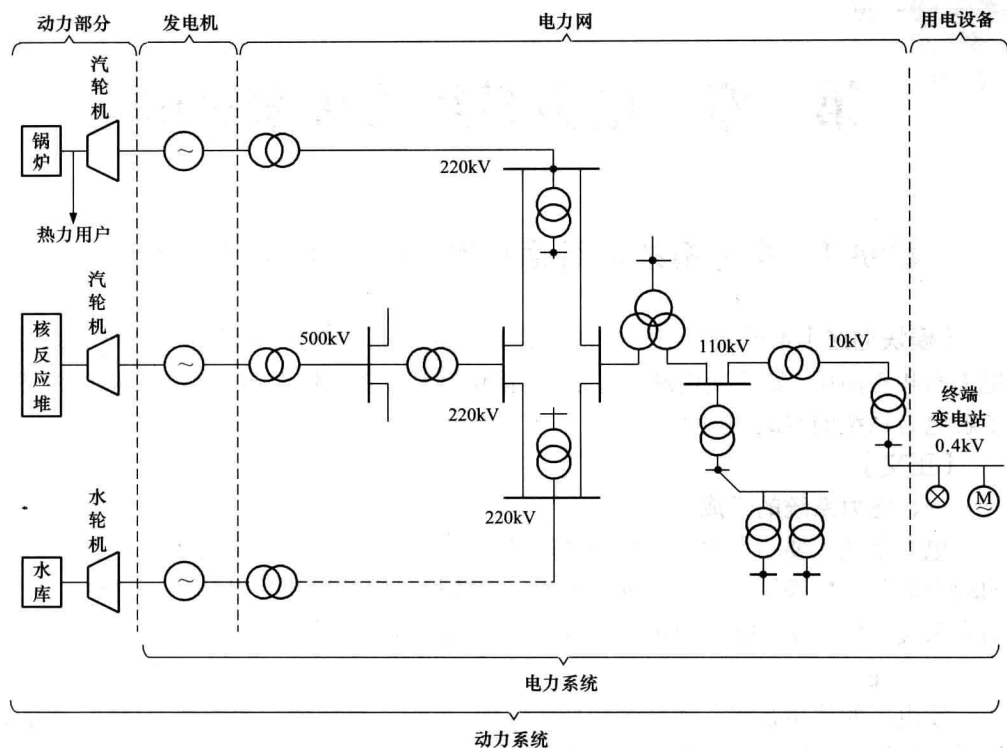


图 TYBZ01201001-1 动力系统示意图

(2) 水力发电厂。

水电厂将水库里水的水能转换为电能,水流冲击水轮机带动发电机转子旋转发电;机组出力与水的流量和落差(水头)的乘积成正比。水库按调节能力大小分为多年调节、年(季)调节和无调节能力的径流式三种。抽水蓄能水电厂是负荷高峰时段发电、负荷低谷时段抽水的水电厂,新型两机式抽水储能电站装有一台可逆式水泵水轮机和一台兼做发电机和电动机的电机。

(3) 核电厂。

核电厂是以核反应堆和蒸汽发生器代替火电厂中的锅炉设备,其汽轮机、发电机部分与火电厂基本相同。核反应堆分为利用原子核裂变形成链式反应而产生能量的裂变堆和利用原子核聚变释放出能量的聚变堆。裂变堆根据中子能量分为快中子堆和慢中子堆(又称热中子堆);慢中子堆根据冷却剂(载热剂)和慢化剂可分为轻水堆、重水堆、石墨堆、气冷堆,其中轻水堆又分为压水堆和沸水堆。核电厂采

用的是裂变堆类的压水堆、沸水堆和重水堆。核电厂造价高但燃料费用低。 1kg 铀-235 相当于 2700 吨标准煤。一个百万千瓦的电厂，普通火电厂一年约需煤炭 $3 \times 10^5\text{t}$ ，而核电厂仅需核燃料 30t 左右。

(4) 其他类型发电厂。

除了以上三种类型的发电厂外，还有利用其他能源发电的电厂（场、站），如风力发电场、太阳能发电站、沼气电站、地热电站、潮汐电站以及利用生物质能发电的电站等。

2. 电力网

电力网通常是指交流电力网（我国为 50Hz 交流），由变压器、电力线路和母线、开关等变换、输送和分配电能的设备所组成，可分为输电网和配电网。输电网用较高的电压将各个发电厂与负荷中心进行连接并形成多级较高电压的网络。配电网进行电能的分配，用较低电压的线路连接用户，也组成多级较低电压的网络。配电网按电压高低可分为：低压电网（1kV 以下）、中压电网（1~10kV）、高压电网（35~110kV）；城市电网和输电网可分为高压电网（220kV）、超高压电网（330~750kV）、特高压电网（1000kV 及以上）。

为了满足电力系统系统稳定性和远距离传输功率等的需要，也采用直流输电。

3. 负荷（用户）

电力系统的用电负荷，也称负荷或用户，包括工业、农业、交通运输等国民经济负荷和居民生活负荷。异步电动机、少数的同步电动机、电热、整流和照明等设备组成负荷，它们将电能分别转换为机械能、热能、化学能和光能等。

二、电力系统的发展

1. 电力系统初期概况

1831 年法拉第发现了电磁感应定律，接着出现了直流发电机，将其他形式的能量转变为电能，开始了电能的生产和使用。当时所采用的是低压直流，主要供给照明用电，供电范围很小。1882 年第一座发电厂在英国伦敦建成，原始的电力线路输送的是 100V 和 400V 的直流电，同年法国人德普列茨提高了直流输电电压，使之达到 1500~2000V，输送功率约 2kW，输电距离为 57km，一般认为这是世界上第一个电力系统，它包含了发电、输电和用电。

1891 年出现了三相交流输电，它由 95V、230kW 的水轮发电机，经变压器升压至 15 200V，将功率传送到 178km 以外的法兰克福，然后用两台变压器降压至 112V，分别供给照明负荷和一台异步电动机驱动的 75kW 水泵，从而形成了现代电力系统的雏形。

2. 中国电力工业的发展和成就

中国的电力工业至今已有一百多年的历史，经历了旧中国艰难曲折的发展和



新中国成立后的快速发展,目前已进入世界先进水平的行列。2008 年全国装机总容量已达到 7.92 亿 kW,发电量已达到 34 334 亿 kWh,装机容量和发电量都已位居世界第二,但我国人均用电量仍然处于发展中国家水平。我国的各种能源资源人均占有量低。

3. 中国电力工业发展的预期

全球气候变暖对人类生存和发展的严峻挑战。大气中二氧化碳(CO_2)浓度升高带来的全球气候变化也已被确认为不争的事实。为此,以低能耗、低污染、低排放为基础的经济模式被称作“低碳经济”。截至今年上半年,中国单位国内生产总值能耗比 2005 年降低 13%,相当于少排放 8 亿吨二氧化碳。近年,我国是新能源和可再生能源增长速度最快的国家。水电装机容量、核电在建规模、太阳能热水器集热面积和光伏发电容量均居世界第一位。在此基础上,我国政府又提出,到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%至 45%。电力行业是全球经济中碳排放最密集的行业,是节能减排最重要的行业,在“低碳经济”中扮演最重要的角色。

我国的电力工业已进入了大机组、大电厂、大电网、超高压、自动化、信息化、智能化和水电、火电、核电、新能源发电全面发展的新时期。西电东送、南北互供、全国联网已初步形成;1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压试验示范工程、国产 1000MW 超超临界机组已投产使用;柔性输电技术也取得了进展。以风力发电为代表的新能源发电将得到进一步的发展。特别是特高压、超导、智能电网的兴起,中国电力工业将迎来更大的预期。

特高压输电是指由 1000 千伏交流电压和正负 800 千伏直流电压输电工程和电力技术构成的高压电网。利用特高压输电技术特别是直流技术,可以实现远距离、大容量输电效率,提升电网设备运行水平,减少输电回路数,损耗低,有利于节约土地资源,保护环境,优化能源资源配置。因此,特高压电网有时也被称为“电力高速公路”。

超导电网使用超导电缆组成电网,超导电缆采用高温超导材料制作,具有输电过程中能量损耗低、输送容量大、体积小、电磁污染少四大优点,在相同截面下,输电能力是常规电缆的 3.5 倍。美国、日本、丹麦和韩国等相继开发了超导输电电缆。2004 年 7 月 10 日,由北京云电英纳超导电缆有限公司等研制的高温超导电缆在云南电力公司正式并网运行,2004 年 12 月中国科学院电工研究所与甘肃长通电缆公司等合作研制成功 75m、10.5kV / 1.5kA 交流高温超导电缆,并接入到甘肃长通电缆公司 6kV 配电网中向车间供电。