

北京建筑大学教材建设专项基金资助出版

# 配电网综合自动化技术

第3版

龚静 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

北京建筑大学教材建设专项基金资助出版

# 配电网综合自动化技术

第3版

主 编 龚 静

参 编 朱 琛 彭红海

主 审 周有庆

机械工业出版社

本书是按照配电自动化系统的构成从底层往上层来编写的。在介绍配电自动化一些基本概念的基础上,首先介绍了配电终端 FTU、TTU、DTU、RTU 等,然后介绍通信系统,最后介绍配电自动化主站系统。在章节安排上同时穿插馈线自动化、配电网的故障选线、SCADA 系统、电能计费、AM/FM/GIS、LM、工程实例等内容。

本书理论结合实际,同时融入一些相关专业基础知识,使内容前后贯通,并辅以思考题和自测题,使读者易于掌握,因为技术较新,配套实验的开设正处于积极探索发展阶段,本书也给出了配套实验。

本书可作为本科电气工程类专业的教材,同时也可作为配电领域工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

配电网综合自动化技术/龚静主编. —3 版. —北京:机械工业出版社, 2019. 1

北京建筑大学教材建设专项基金资助出版

ISBN 978-7-111-61383-1

I. ①配… II. ①龚… III. ①配电系统—自动化技术 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 260083 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王欢 责任编辑:王欢

责任校对:王明欣 樊钟英 封面设计:陈沛

责任印制:李昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.75 印张 · 507 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61383-1

定价:59.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

# 第3版前言

目前，配电自动化是智能配电网建设的重要内容之一，是实现配电网调度、监视、控制的重要手段。其成功实施，对于提高供电可靠性和供电能力，降低线损和减轻劳动强度，有着重要意义。在智能电网的大势下，我国配电网也开展了大规模的建设改造和配电自动化系统建设工作，从2009年国家电网公司开始第一批4座城市配电自动化建设工程试点，到2011年第二批试点建设扩大到19座城市，再到2017年我国已经有近百座城市实施了各具特色的配电自动化系统，这些表明我国配电自动化建设已经由试点探索走入实用。这也是在践行着国家能源局发布的《配电网建设改造行动计划（2015—2020年）》的要求：“到2020年，中心城市（区）智能化建设和应用水平大幅提高，供电可靠率达到99.99%，用户年均停电时间不超过1小时，供电质量达到国际先进水平”“配电自动化覆盖率达到90%。”

配电自动化是一个涉及多学科的综合技术，正处于快速发展中。本书在《配电网综合自动化技术 第2版》的基础上进行了修订，内容上仍然按照配电自动化系统的体系构成来安排，按照终端、通信、主站的顺序进行介绍，同时引入了一些前沿的先进技术和案例。全书首先介绍了配电自动化的体系构成、现状、热点、配电网的一次设备和拓扑形式，接着介绍了终端FTU、DTU、TTU、通信系统，然后对馈线自动化、故障选线做了阐述，最后对抄表系统、主站、SCADA系统、GIS、负荷控制等进行了介绍。本书给出的大量工程实例是以理论联系实际为宗旨的，便于读者更好地掌握和运用所学的知识。

本书由北京建筑大学龚静任主编，并负责全书的构思、组织和统稿工作。本书共14章，其中第1~12章由龚静编写，第13章由湖南省电力公司长沙电业局朱琛编写，第14章由湖南大学彭红海编写。湖南大学周有庆教授对全书进行了审阅，给出了很多宝贵意见，在此表示衷心感谢！在本书编写的过程中，得到河南思达公司、长沙同庆公司、北京四方华能公司的大力支持。本书的出版得到北京建筑大学教材建设专项基金的资助，在此一并表示感谢！

本书在编写过程中，查阅了大量的参考资料，在此向所有参考文献的作者表示感谢！由于编者水平有限，不妥之处恳请读者和同行专家批评指正。

编者

2018年10月

## 第2版前言

目前，智能电网建设已经上升到国家层面，发展智能电网已正式纳入到了国家“十二五”规划纲要，成为国家能源发展的战略重点。智能电网的建设离不开坚强输电网的建设，更离不开智能配电网的建设，国家已将建设智能配电网上升到战略高度，2013年7月召开的国务院常务会议上，将“加强城市配电网建设，推进电网智能化”确定为城市基础建设六项重点任务之一。配电自动化是智能配电网建设的关键支撑内容，智能电网的兴起，更进一步地推动了配电自动化的发展，配电自动化系统又迎来了新一轮的建设高潮，国家电网公司以持续提升供电可靠性和优质服务水平为目标，不断加大配电网规划、建设与改造力度，“十二五”期间，国家电网公司将在200个地市级单位、42个县级单位开展配电自动化建设工作。

本书为修订的第2版，总体章节安排与第1版相同，仍然按照配电自动化系统的体系构成按终端、通信、主站的顺序进行介绍。本次修订删除了部分陈旧内容，压缩篇幅以便更好地作为学生教材使用，同时增加了各种新能源发电形式以及低碳建筑应用、有源配电网、配电网的拓扑形式、自愈、智能用电小区等新知识、新内容。

本书由北京建筑大学龚静任主编，负责全书的构思、编写、组织和统稿工作。本书共14章，其中第1~12章主要由龚静编写，第13章由湖南省电力公司长沙电业局朱琛编写，第14章由湖南大学彭红海编写。湖南大学周有庆教授对全书进行了审阅，推出了很多宝贵意见，在此表示衷心的感谢！本书在编写过程中，得到河南思达公司、长沙同庆公司、北京四方华能公司的大力支持。本书的出版也得到北京建筑大学重点教材建设项目基金的资助。另外，参加本书编写工作的还有任云芬、刘菊英、徐忠利、路玉珍、黄道平、路平、周先奎、胡依秀、段庆凤、许宏江、沈海昌、胡忠舒、王燕、何敏、刘娜、张娟娟、宋邦傲。

本书在编写过程中，查阅了大量的参考资料，在此向所有参考文献的作者表示感谢！由于编者水平有限，不妥之处恳请读者和同行专家批评指正，本书提供免费课件，联系E-mail: gongjingdq@163.com。

编者  
2014年5月

# 第 1 版前言

配电网综合自动化技术是近年来随着通信、计算机技术的发展而发展起来的一门新型学科，它对于提高供电可靠性、扩大供电能力、降低线路损耗和减轻劳动强度具有重要意义。日本早在 20 世纪 80 年代已经实现了配电自动化，而我国 20 世纪 90 年代才开始起步，近年来发展非常迅速，随着对供电可靠性要求的不断提高，实施配电自动化的呼声越来越高。我国国家电力公司从 1998 年起对全国城乡电网开始进行大规模的建设和改造，主要建设改造从低压 380V 到高压 110kV 的配电网，以便提高配电网的供电能力和安全经济运行水平，改善人民生活，为国民经济持续发展提供强大的动力。

本书介绍了配电网自动化新技术，并将相关专业基础知识融入，使内容前后贯通，便于读者理解和每章最后都按照“了解、掌握、重点”三个层次给出相应的知识要点，并辅以思考题和自测题。本书理论联系实际，既有由浅入深的理论分析，又结合大量实例进一步说明，讲究实用。因为技术新，配套实验的开设正处于积极探索阶段，本书首次给出了配套实验。

本书由北京建筑工程学院龚静任主编，负责全书的构思、编写组织和统稿工作。本书共 14 章，其中第 1~12 章、自测题及答案、附录均由龚静编写，第 13 章由湖南省电力公司长沙电业局朱琛编写，第 14 章由湖南大学彭红海编写。湖南大学周有庆教授对全书进行了审阅，提出了很多宝贵的意见。本书在编写过程中，得到河南思达公司、长沙同庆公司、北京四方华能公司的大力支持，本书的出版得到北京建筑工程学院教材建设项目基金的资助，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，不妥之处恳请读者和同行专家批评指正，联系 E-mail: gongjing5@yahoo.com.cn。

编 者

# 目 录

第3版前言

第2版前言

第1版前言

第1章 绪论	1
1.1 电力系统的基本概念	1
1.1.1 电力系统的组成	1
1.1.2 各种新能源发电形式	2
1.1.3 节能减排形势下的绿色低碳建筑应用	6
1.2 配电管理系统	7
1.3 配电网自动化系统的总体构成	9
1.3.1 小型配电自动化系统的构成	9
1.3.2 中型配电自动化系统的构成	10
1.3.3 大型配电自动化系统的构成	11
1.3.4 配电自动化系统的基本功能	12
1.4 实现配电自动化的意义	12
1.5 配电自动化的现状与发展情况	17
1.5.1 国外配电自动化发展及现状	17
1.5.2 我国配电自动化的发展现状	18
1.6 配电自动化的难点	19
1.7 智能电网形势下的配电网建设	21
1.7.1 坚强智能电网概念的提出及规划	21
1.7.2 基于配电自动化的智能配电网建设	21
1.7.3 智能电网形势下的配电自动化建设目标和建设标准	22
1.8 配电自动化建设经验教训及当前研究热点	22
1.8.1 配电自动化建设经验教训	22
1.8.2 配电自动化建设当前研究热点和重点	23
1.9 配电自动化系统的规划	24
1.9.1 配电自动化系统规划的总体要求和原则	24

1.9.2 配电自动化系统规划的技术导则和设计规范	24
1.9.3 配电自动化系统规划的年限和内容	25
1.10 要点掌握	26
思考题	26

第2章 配电网	27
2.1 我国配电网的特点和历史建设情况	27
2.1.1 配电网的特点	27
2.1.2 我国配电网建设情况及发展战略目标	28
2.2 有源配电网	28
2.2.1 概述	28
2.2.2 分布式电源接入配电网的好处	29
2.2.3 分布式电源接入配电网后需要注意的问题	30
2.2.4 分布式电源接入配电网的要求	30
2.3 配电网的中性点运行方式	31
2.3.1 中性点接地方式分类及比较	31
2.3.2 经消弧线圈接地系统的3种补偿方式	32
2.4 配电网涉及的一次设备——开关	32
2.4.1 开关设备的灭弧介质无油化历程	33
2.4.2 典型开关设备介绍	33
2.5 配电网涉及的一次设备——环网柜	35
2.5.1 环网柜	35
2.5.2 电缆分接箱	36
2.6 配电网涉及的一次设备——开闭所	39
2.6.1 概述	39
2.6.2 开闭所设置原则	39
2.6.3 开闭所的功能和作用	40

2.6.4 开闭所常见主接线形式 .....	41	3.5.2 交流采样 .....	69
2.6.5 开闭所所用电源 .....	42	3.6 开关量输入电路 .....	69
2.7 配电网涉及的一次设备—— 变压器 .....	43	3.6.1 隔离电路 .....	69
2.7.1 变压器的分类 .....	43	3.6.2 去抖电路 .....	70
2.7.2 新型节能变压器 .....	44	3.7 开关量输出电路 .....	71
2.8 配电线路 .....	44	3.8 模拟量输入电路 .....	72
2.8.1 架空线路 .....	44	3.8.1 基于逐次逼近型 A-D 转换的模 拟量输入电路 .....	72
2.8.2 电缆线路 .....	45	3.8.2 2×4 通道 14 位高速 A-D 转换芯片 MAX125 及其应用 .....	74
2.8.3 配电线路的节能 .....	46	3.8.3 电压-频率转换电路 .....	81
2.9 配电网拓扑形式及馈线故障 处理 .....	47	3.9 模拟量输出电路 .....	83
2.9.1 配电网的拓扑形式及实际应用 案例 .....	47	3.10 傅里叶算法 .....	84
2.9.2 馈线故障的处理 .....	52	3.11 要点掌握 .....	85
2.10 要点掌握 .....	54	思考题 .....	85
思考题 .....	54	<b>第 4 章 其他配电终端</b> .....	86
<b>第 3 章 配电终端——FTU</b> .....	55	4.1 DTU .....	86
3.1 终端建设原则和终端电源的 配置 .....	55	4.1.1 DTU 的概念及功能 .....	86
3.1.1 终端建设原则 .....	55	4.1.2 DTU 各自投的实现 .....	86
3.1.2 终端电源的配置 .....	56	4.1.3 开闭所 DTU 与馈线终端 FTU 的 比较 .....	87
3.2 FTU 的基本概念和功能 .....	59	4.1.4 环网柜 DTU 与开闭所 DTU 的 比较 .....	88
3.2.1 FTU 的基本概念 .....	59	4.1.5 开闭所 DTU 与变电站 RTU 的 比较 .....	88
3.2.2 FTU 的功能 .....	59	4.2 TTU .....	88
3.3 SD-2210 型 FTU 的总体结构及 特点 .....	61	4.2.1 TTU 的概念及功能 .....	88
3.3.1 SD-2210 型 FTU 的原理框图 .....	61	4.2.2 TTU 的无功补偿功能 .....	89
3.3.2 SD-2210 型 FTU 的总体特点 .....	62	4.3 站控终端 .....	90
3.4 SD-2210 型 FTU 的 TMS320F206 DSP 硬件介绍 .....	62	4.3.1 站控终端的概念及功能 .....	90
3.4.1 TMS320F206 DSP 的主要特点 .....	62	4.3.2 子站的设置 .....	91
3.4.2 TMS320F206 存储器映射 .....	63	4.3.3 站控终端与 FTU、TTU、DTU 的 比较 .....	91
3.4.3 TMS320F206 DSP 片上外设 .....	65	4.4 要点掌握 .....	92
3.4.4 TMS320F206 DSP 外部中断 .....	65	思考题 .....	92
3.4.5 TMS320F206 DSP 命令寄存器 .....	66	<b>第 5 章 通信系统</b> .....	93
3.4.6 TMS320F206 DSP 复位 .....	66	5.1 引言 .....	93
3.4.7 SD-2210 型 FTU 模拟信号输入 .....	66	5.1.1 远动的基本概念 .....	93
3.4.8 SD-2210 型 FTU 数字量输入输出 .....	66	5.1.2 典型数据通信系统的组成 .....	93
3.4.9 SD-2210 型 FTU 异步串行通信 .....	66	5.1.3 数据传输的同步 .....	95
3.5 直流采样和交流采样 .....	68	5.1.4 通信工作方式 .....	96
3.5.1 直流采样 .....	68		



5.2 调制解调 .....	96	6.3 重合器 .....	133
5.3 差错控制 .....	99	6.3.1 重合器的概念 .....	133
5.3.1 产生差错的原因 .....	99	6.3.2 重合器的分类 .....	133
5.3.2 抗干扰编码 .....	100	6.3.3 重合器与普通断路器的比较 .....	134
5.3.3 差错控制的几种方式 .....	100	6.3.4 重合器的应用场合 .....	135
5.3.4 几种常用的抗干扰编码 .....	103	6.3.5 重合器实例 .....	135
5.4 通信规约 .....	107	6.4 分段器 .....	137
5.4.1 通信规约的概念 .....	107	6.4.1 概念 .....	137
5.4.2 循环式通信规约 .....	108	6.4.2 电压—时间型分段器原理接线 .....	137
5.4.3 问答式通信规约 .....	108	6.4.3 电压—时间型分段器的参数 .....	138
5.5 常用通信方式 .....	109	6.4.4 电流—时间型分段器 .....	139
5.5.1 概述 .....	109	6.5 重合器与电压—时间型分段器 配合 .....	139
5.5.2 配电线载波通信 .....	110	6.5.1 辐射状网的故障处理 .....	139
5.5.3 光纤通信 .....	114	6.5.2 环状网的故障处理 .....	143
5.5.4 脉动控制 .....	117	6.5.3 分段开关和联络开关的时限 整定 .....	146
5.5.5 工频控制 .....	117	6.6 重合器与过电流脉冲计数型分 段器配合 .....	148
5.5.6 电话专线 .....	118	6.6.1 永久性故障的处理 .....	148
5.5.7 现场总线 .....	118	6.6.2 瞬时性故障的处理 .....	149
5.5.8 RS485 串行总线 .....	119	6.7 基于 FTU 的馈线自动化 .....	150
5.5.9 无线扩频 .....	119	6.7.1 基于 FTU 的馈线自动化系统 构成 .....	150
5.5.10 甚高频通信 (数传电台通信) .....	120	6.7.2 基于 FTU 的馈线自动化系统的 功能 .....	151
5.5.11 特高频通信 .....	120	6.8 两种馈线自动化的比较 .....	152
5.5.12 微波通信 .....	121	6.8.1 基于重合器—分段器的就地控 制方案 .....	152
5.5.13 卫星通信 .....	122	6.8.2 基于 FTU 和通信网络的远方 控制方案 .....	152
5.5.14 调幅广播 .....	122	6.9 要点掌握 .....	153
5.5.15 调频辅助通信业务 .....	123	思考题 .....	154
5.6 要点掌握 .....	123		
思考题 .....	124		
<b>第6章 馈线自动化</b> .....	<b>125</b>	<b>第7章 配电网单相接地故障选线</b> .....	<b>155</b>
6.1 智能配电网的自愈与馈线 自动化 .....	125	7.1 概述 .....	155
6.1.1 自愈的概念 .....	125	7.1.1 NUGS 单相接地故障选线的国外、 国内研究现状 .....	155
6.1.2 自愈控制 .....	125	7.1.2 利用电网稳态电气量特征提供的 故障信息构成的选线方法 .....	156
6.1.3 实现自愈的条件和关键技术 .....	126	7.1.3 利用电网暂态电气量特征提供的 故障信息构成的选线方法 .....	158
6.1.4 馈线自动化的功能与类型 .....	126	7.1.4 其他方法 .....	158
6.2 馈线自动化的发展历程 .....	127		
6.2.1 第一阶段——不分段、不拉手 (传统模式) 阶段 .....	127		
6.2.2 第二阶段——馈线分段、拉手、 无自动化阶段 .....	129		
6.2.3 第三阶段——自动分段、馈线 自动化阶段 .....	131		

7.1.5 意义 .....	159	8.5 自动抄表技术——远程自动抄表 .....	208
7.2 NUGS 单相接地故障理论分析 .....	160	8.5.1 远程自动抄表的含义及发展 .....	208
7.2.1 NUGS 单相接地故障的稳态基波分析 .....	160	8.5.2 远程自动抄表系统的组成 .....	208
7.2.2 NUGS 单相接地故障的稳态谐波分析 .....	164	8.5.3 远程自动抄表系统典型案例 .....	211
7.2.3 NUGS 单相接地故障的暂态分析 .....	165	8.5.4 利用远程自动抄表技术实现防窃电 .....	213
7.2.4 NUGS 单相接地故障选段研究 .....	166	8.5.5 自动抄表与预付费的比较 .....	214
7.3 NUGS 单相接地故障实验研究——选线方案确定 .....	167	8.6 要点掌握 .....	214
7.3.1 动态模型的建立 .....	167	思考题 .....	215
7.3.2 稳态实验记录及分析 .....	168	<b>第9章 主站系统</b> .....	216
7.3.3 暂态实验记录及分析 .....	171	9.1 主站系统的设计原则 .....	216
7.3.4 NUS 选线方案的确定 .....	173	9.2 主站系统的硬件构成 .....	217
7.3.5 NES 选线方案的确定 .....	174	9.2.1 较小规模主站系统配置 .....	217
7.4 软件设计 .....	176	9.2.2 较大规模主站系统配置 .....	219
7.4.1 开发语言和工具介绍 .....	176	9.3 主站系统的软件构成 .....	221
7.4.2 NUS 系统选线下位机软件设计 .....	181	9.3.1 操作系统软件 .....	221
7.4.3 NUS 系统选线上位机软件设计 .....	183	9.3.2 支撑软件 .....	222
7.4.4 NES 系统选线下位机软件设计 .....	186	9.3.3 高级应用软件 .....	223
7.4.5 NES 系统选线上位机软件设计 .....	187	9.4 要点掌握 .....	227
7.5 NUGS 选线方案验证实验 .....	190	思考题 .....	227
7.5.1 优化模型 .....	190	<b>第10章 配电网 SCADA 系统</b> .....	228
7.5.2 NUS 的选线验证实验 .....	190	10.1 配电网 SCADA 系统的特点 .....	228
7.5.3 NES 的选线验证实验 .....	194	10.2 配电网 SCADA 系统组织的基本方式 .....	229
7.6 要点掌握 .....	198	10.2.1 配电网 SCADA 系统测控对象 .....	229
思考题 .....	200	10.2.2 区域站的设置方法 .....	229
<b>第8章 远方抄表与电能计费系统</b> .....	201	10.2.3 体系结构 .....	230
8.1 电能表的发展和现状 .....	201	10.3 配电网 SCADA 系统的功能 .....	231
8.2 抄表计费的几种方式 .....	202	10.4 智能用电小区 .....	236
8.3 预付费电能计费方式 .....	203	10.4.1 智能小区概述 .....	236
8.3.1 预付费电能表的种类及特点 .....	203	10.4.2 智能用电的发展目标 .....	237
8.3.2 采用 IC 卡电能表的预付费电能计费系统 .....	204	10.4.3 系统构成 .....	237
8.4 自动抄表技术——本地自动抄表 .....	206	10.4.4 智能小区应用实例 .....	238
8.4.1 本地自动抄表的两种数据采集方式 .....	206	10.5 要点掌握 .....	239
8.4.2 抄表机简介 .....	207	思考题 .....	239
8.4.3 国内主流抄表机型实例——振中 TP900 系列抄表机 .....	207	<b>第11章 配电图资地理信息系统</b> .....	240
		11.1 概述 .....	240

11.2 GIS的发展	240	第13章 配电自动化的实际案例	267
11.3 GIS在电力行业的应用现状及难点	242	13.1 概述	267
11.4 GIS的组成	243	13.2 配电自动化的主要功能	268
11.5 GIS功能的实现方法	245	13.3 配电自动化系统体系结构	268
11.6 AM/FM/GIS的离线、在线实际应用	245	13.4 配电自动化SCADA系统	270
11.6.1 AM/FM/GIS在配电网中离线方面的应用	246	13.4.1 网络安全方案	270
11.6.2 AM/FM/GIS在配电网中在线方面的应用	247	13.4.2 系统硬件配置	270
11.7 GIS的功能演示案例	247	13.4.3 软件系统结构	271
11.8 要点掌握	252	13.4.4 配电SCADA功能	272
思考题	252	13.5 配电自动化通信系统	273
第12章 负荷控制和管理系统	253	13.6 馈线自动化解决方案	275
12.1 负荷控制和管理的概念及经济效益	253	13.7 配电地理信息管理功能	278
12.2 负荷特性优化的主要措施	254	13.8 配电自动化高级应用软件	281
12.2.1 经济措施	254	第14章 实验部分	283
12.2.2 行政措施	255	14.1 电力系统综合实验方案一	283
12.2.3 宣传措施	256	14.1.1 实验系统简介	283
12.2.4 技术措施	256	14.1.2 多台实验系统联网的实验	284
12.3 负荷控制系统的基本结构和功能	258	14.1.3 设备清单	290
12.3.1 负荷控制终端	258	14.2 电力系统综合实验方案二(供电部分)	292
12.3.2 负荷控制中心	260	14.2.1 实验系统简介	292
12.4 各种负荷控制系统原理及比较	261	14.2.2 实验系统外观	292
12.4.1 负荷控制系统的分类	261	14.2.3 多台实验系统联网的实验	294
12.4.2 GSM/GPRS公用通信电力负荷控制系统	262	14.2.4 设备清单	297
12.4.3 无线电电力负荷控制系统	263	14.3 应用实例——TQGD-II工厂供电及配电自动化实验培训系统	299
12.4.4 音频电力负荷控制系统	265	14.3.1 概述	299
12.4.5 配电线载波电力负荷控制系统	265	14.3.2 系统组成	300
12.4.6 工频电力负荷控制系统	266	14.3.3 实验模式	302
12.4.7 有线电话电力负荷控制系统	266	14.3.4 实验项目	304
12.5 要点掌握	266	14.3.5 实验系统中主要设备的技术指标	306
思考题	266	14.3.6 设备实物图	307
		测试题	309
		测试题1	309
		测试题1答案	310
		测试题2	313
		测试题2答案	314
		参考文献	319

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电力系统的基本概念

### 1.1.1 电力系统的组成

电能是现代社会的主要能源，它在国民经济和日常生活中起着极其重要的作用。一个完整的电力系统由各种不同类型的发电厂、变电站、输电线路及电力用户组成。在发电机中机械能转化为电能，变压器、电力线路输送分配电能，电动机、电炉、电灯等用电设备消费电能，在这些用电设备中电能转化为机械能、热能、光能等。这些生产、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、电力线路、各种用电设备联系在一起组成的统一整体，就是电力系统。

#### 1. 发电厂

发电厂将一次能源转换成电能，根据一次能源的不同，有火力发电厂、水力发电厂和核能发电厂。此外，还有风力发电厂、地热发电厂和潮汐发电厂等。另外，还有各种新能源发电形式，详见本章 1.1.2 节的叙述。

火力发电厂将煤、天然气、石油的化学能转换为电能。我国火力发电厂燃料以煤炭为主，随着西气东输，将逐步扩大天然气燃料的比例。火力发电的原理是，燃料在锅炉中充分燃烧，将锅炉中的水转换为高温高压蒸汽，蒸汽推动汽轮机转动，带动发电机旋转发出电能，如图 1-1 所示。

水力发电厂将水的位能转换成电能。其原理是水流驱动水轮机转动，带动发电机旋转发电。按提高水位的方法，水力发电厂有堤坝式水电厂、引水式水电厂和混合式水电厂 3 类。堤坝式水电厂是在河流上落差较大的适宜地段拦河建坝，形成水库，抬高

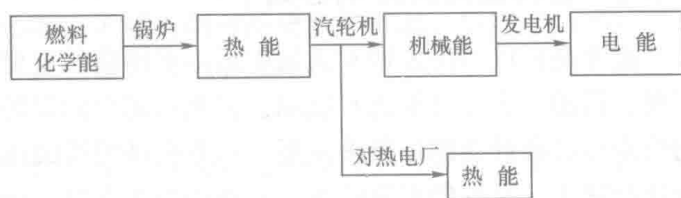


图 1-1 火力发电原理示意

上游的水位，利用上、下游形成水位差进行发电。引水式水电厂则是由引水系统将天然河道的落差集中进行发电，一般不需修坝或者只需要修低堰。水电厂建设的初期投资较大，但发电成本低，仅为火力发电成本的 1/4 ~ 1/3，并且水电属于清洁、可再生能源，利于环保，还兼有防洪、灌溉、水产养殖功能，因此，综合效益好。

核能发电厂利用原子核的核能生产电能。核燃料在原子反应堆裂变释放核能，将水转换成高温高压的蒸汽，其生产过程与火电厂基本相同。

风力发电的原理是风的动能作用在叶片上，转化为机械能推动风机风轮转动。

太阳能发电分为太阳光能发电和太阳热能发电。太阳光能发电是利用光电转换元件，如光电池直接将太阳光能转换成电能。太阳热能发电分直接转换和间接转换两种。直接转换有

温差发电、热离子发电等,间接转换原理与火力发电相似。

## 2. 变电站

变电站的功能是接受电能、变换电压和分配电能。为了实现电能的远距离输送和将电能分配到用户,需将发电机电压进行多次电压变换,这个任务由变电站完成。变电站由电力变压器、配电装置和二次装置等构成。按变电站的性质和任务不同,可分为升压变电站和降压变电站。按变电站的地位和作用不同,又分为枢纽变电站、区域变电站和用户变电站。枢纽变电站在整个电力系统中起纽带连接作用;区域变电站将枢纽变电站来的电能进行再次降压处理;用户变电站接受区域变电站的电能,进行再次降压,合理分配给各个用户设备。

## 3. 电力线路

电力线路将发电厂、变电站和电能用户连接起来,完成输送电能和分配电能的任务。电力线路有各种不同的电压等级,通常将220kV及以上的电力线路称为输电线路,110kV及以下的电力线路称为配电线路。配电线路又分为高压配电线路(110kV)、中压配电线路(35~6kV)和低压配电线路(380V/220V),前者一般作为城市配电网骨架和特大型企业供电线路,中者为城市主要配网和大中型工厂供电线路,后者一般为城市和企业的低压配网。

## 4. 电能用户

所有消耗电能的用电设备或用电单位称为电能用户。电能用户按行业可分为工业用户、农业用户、市政商业用户和居民用户等。

在上述介绍的电力系统中,属于配电电压等级的电力线路及相应的变电站组成的统一整体,就称为配电网(Distribution Network),也即电力系统中二次变电站低压侧直接或降压后向用户供电的网络,配电网由架空配电线路、电缆配电线路、变电站、开闭所、降压变压器等构成。配电网也正是本书的研究对象。

### 1.1.2 各种新能源发电形式

能源是国民经济发展和人民生活水平提高的重要物质基础,当前我国能源供应主要依赖煤炭、石油、天然气等化石能源,但化石能源的资源有限性和开发利用带来的环境问题严重制约着经济和社会的可持续发展。随着全球经济的快速发展,煤炭、石油等不可再生能源供应日趋紧张,开发使用新能源已经成为当务之急,而全球气候变暖所导致的灾难性后果更为可再生能源的发展提供了动力。世界各国都把支持可再生能源发展作为实现经济可持续发展的重要手段,美欧等国普遍加大对可再生能源技术开发和应用的投入。我国早在2008年制定的《可再生能源发展“十一五”规划》中提出“到2010年,可再生能源在能源消费中的比重达到10%”。

下面举例说明常见的几种新能源发电形式。

#### 1. 太阳能

太阳能发电分为太阳光能发电和太阳热能发电。太阳光能发电是利用光电转换器件,如光电池直接将太阳光能转换成电能,即光伏发电。太阳热能发电分直接转换和间接转换两种。直接转换有温差发电、热离子发电等。间接转换原理与火力发电相似。

光伏建筑一体化(Building Intergrated Photovoltaic, BIPV)是指在建筑上安装光伏系统,并通过专门设计,实现光伏系统与建筑的良好结合。这样可以加快推进太阳能光伏发电技术

在建筑领域中的应用,是降低建筑能耗、调整建筑用能结构的有效措施之一。下面列举一些典型的 BIPV 应用工程案例。

1) 仰天岗自然科学博物馆。该建筑位于江西新余市,总装机容量约为 3.05MW<sub>p</sub>,建筑安装面积约 36 455m<sup>2</sup>,系统没有储能装置,太阳能电池将日光转换成直流电,通过逆变器转换成 380V 交流电,建筑物用电通过 10kV 市电供给。

2) 威海市民文化中心。该建筑位于青岛路东,海滨南路西,总建筑面积 63 314m<sup>2</sup>,地下 1 层,地上 4 层,主体高 32m,锥体高 50m。其总装机容量为 480kW<sub>p</sub>,建筑安装面积为 5 556m<sup>2</sup>,屋顶全部使用内嵌薄膜电池的玻璃,是世界上最大的非晶硅光伏屋面工程,该工程也打破了“玻璃电池”全部是平面的常规,是世界上首个采取波浪形设计的“玻璃电池”屋顶。

3) 广州珠江城。该建筑属于超高层国际写字楼,在珠江城 31~70 层东西立面遮阳板(安装面积各约为 650.5m<sup>2</sup>)和塔楼屋顶位置(安装面积约为 360m<sup>2</sup>)建设太阳能光伏发电系统,总装机容量为 184.96kW<sub>p</sub>,于 2011 年初竣工。

4) 日新科技光伏工业园。日新工业园位于武汉东湖新技术开发区汽车电子工业园内,建筑类型包括工业建筑、公共建筑和民用建筑三种形式。整个光伏安装面积为 9 823m<sup>2</sup>,主要在建筑屋面、天窗、幕墙及园区照明安装光伏并网发电系统,总装机容量达 1.2MW<sub>p</sub>,年发电量可达  $1.5 \times 10^6$  kW·h,发出的电能通过光伏专用逆变器并入用户侧电网。该项目 2008 年 11 月被国家财政部和建设部批准为可再生能源建筑应用示范项目,已经于 2010 年 6 月竣工验收。

另外,还有如深圳园博园总装机容量为 1MW<sub>p</sub>、北京土地技术开发区软件园为 50kW<sub>p</sub>、住建部主楼为 75.6kW<sub>p</sub>、淮安清河文展中心为 40.32 kW<sub>p</sub>、广东金刚玻璃公司园区内厂房为 400kW<sub>p</sub>、湖北黄金山科技园为 3MW<sub>p</sub>、青岛火车站为 103kW<sub>p</sub>、珠海东澳岛文化中心为 1 004.4 kW<sub>p</sub>、深圳拓日光伏工业园办公大楼为 70.4 kW<sub>p</sub> 等诸多的光伏建筑一体化的示范工程。这些光伏建筑一体化工程的建设充分考虑了城市的可持续发展需求,贯彻了节能减排政策,充分利用可再生能源,很好地发挥公共建筑的节能示范作用。

## 2. 生物质能

生物质发电是利用生物质所具有的生物质能进行发电,是可再生能源发电中的一种,包括农林废弃物直接燃烧发电、农林废弃物气化发电、垃圾焚烧发电、垃圾填埋气发电、沼气发电等多种形式,生物质能源中的有害物质(硫和灰分等)含量仅为中质烟煤的 10% 左右,可实现二氧化碳零排放。

生物质发电在许多欧美国家自 20 世纪 90 年代开始大发展。我国已公布的《可再生能源中长期发展规划》也确定了“到 2020 年,生物质发电总装机容量达到 3000 万千瓦”的发展目标。截至 2007 年年底,国家和各省发改委已核准项目 87 个,总装机规模为 2 200MW。全国已建成投产的生物质直燃发电项目超过 15 个,在建项目 30 多个。下面列举一些典型的生物质发电案例。

1) 粤电湛江生物质发电厂。拥有 2 台 50MW 生物质发电机组,系目前世界单机容量及总装机容量最大的生物质电厂,采用农林作物废弃物等生物质作为燃料,已于 2011 年 11 月正式投入商业运营。电厂选址在雷州半岛,当地日照充沛、农林作物生长较快,在有限的收集半径内,燃料来源充足稳定,地理优势明显。该生物质发电项目每年可替代约



100 000tec<sup>⊖</sup>, 减少二氧化碳排放约 300 000t, 减少二氧化硫排放近 2 000t, 这对于改善当地农村村容村貌、减少城乡大气污染将发挥重要作用。

2) 北京德清源沼气发电。坐落在北京延庆县张山营镇的德青源蛋鸡场曾是亚洲最大的蛋鸡场, 每天要面对 220t 鸡粪和 270t 废水的困扰。为解决循环发展、减少污染, 德清源利用鸡粪、废液发酵产生的沼气发电, 兴建 12 000m<sup>3</sup> 的沼气池, 年产沼气 7 000 000m<sup>3</sup>, 年发电 14GW·h, 实现了从“鸡粪”到“能源”的华丽转身。

### 3. 海洋能

海洋能作为一种特殊的能源, 它的能量主要来自潮汐、涌流和波涛的冲击力、温度差及海水中溶解的化学成分。

1) 潮汐能发电。潮汐发电与普通水力发电原理类似, 在涨潮时将海水储存在水库内, 以势能的形式保存, 然后, 在落潮时放出海水, 利用高、低潮位之间的落差, 推动水轮机旋转, 带动发电机发电。潮汐发电在国外发展很快, 欧洲各国拥有漫长海岸线, 因而有大量、稳定、廉价的潮汐资源, 在开发利用潮汐方面一直走在世界前列。中国海岸线曲折漫长, 相关电站主要集中在福建、浙江、江苏等省的沿海地区。其中, 1980 年投产发电的浙江温岭江夏潮汐试验电站是我国第一座双向潮汐电站, 也是世界上仅次于法国朗斯潮汐电站和加拿大安纳波利斯潮汐电站的第三大潮汐电站, 它当时的总装机容量为 3200kW, 设计年发电量为 10.7GW·h。

2) 波浪能发电。波浪能发电是以波浪的能量为动力生产电能, 通过某种装置可将波浪的能量转换为机械的、气压的或液压的能量, 然后通过传动机构、汽轮机、水轮机或液压马达驱动发电机发电。日本当前发电容量最大的设备是 1996 年 9 月投运的由日本东北电力公司在原町火力发电厂南部防波堤上装设的 130kW 的波浪发电设备。中国科学院广州能源研究所于 1989 年在广东珠海建成了第一座示范实验波浪电站, 1996 年又建成了一座新的波浪实验电站。我国首座波浪独立发电系统, 汕尾 100kW 岸式波浪电站, 于 1996 年 12 月开工, 2001 年进入试发电和实海况试验阶段, 2005 年第一次实海况试验获得成功。根据规划, 到 2020 年, 我国将在山东、海南、广东各建 1 座 1000kW 级的岸式波浪发电站。

3) 温差能发电。由于太阳光照射, 海洋表层水温可达 25~30℃, 而水下 400~700m 深层冷水温度则为 5~10℃, 温差为 20~24℃, 这就为发电提供了一个总量巨大且比较稳定的能源。海洋温差发电的基本原理是利用海洋表面的温海水 (26~28℃) 加热某些低沸点工质并使之汽化, 或通过降压使海水汽化以驱动汽轮机发电, 同时利用从海底提取的冷海水 (4~6℃) 将做功后的乏气冷凝, 使之重新变为液体。

4) 盐差能发电。当两种不同盐度的海水被一层只能通过水分而不能通过盐分的半透膜相分割时, 两边的海水就会产生渗透压, 促使水从浓度低的一侧向另一侧渗透, 使浓度高的一侧水位升高, 直至膜两侧的含盐量相等为止。盐差能发电利用的是海水中的盐分浓度和淡水间的化学电势差。

在上述海洋能能源中, 目前仅有潮汐能被大规模利用, 潮汐是一项取之不尽的电力能源。

⊖ tec: 吨标准煤, 1tec = 29.307 6GJ。

#### 4. 地热能

地球的地热能蕴量巨大,地热能是来自地球深处的可再生热能。地热发电是利用地下4km左右的岩浆产生200~350℃的蒸汽带动汽轮机发电。地热发电非常清洁,基本上不产生CO<sub>2</sub>。我国地热资源丰富,著名的羊八井地热电站年发电量超过 $1 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,在解决拉萨供电方面起着很大的作用。近10年,我国的地热开发以每年12%的速率增长,高于世界平均增长率。

地热在建筑中也有着广泛的应用,最典型的的就是地源热泵。地源热泵,是利用地球表面浅层水源(如地下水、河流和湖泊)和土壤源中吸收的太阳能和地热能,并采用热泵原理,既可供热又可制冷的高效节能空调系统。下面介绍一些地源热泵的典型应用。

1) 杭州朗诗国际街区高层住宅地源热泵项目。该小区位于浙江省杭州市下沙区,总建筑面积约为220 000m<sup>2</sup>,地上建筑面积约为180 000m<sup>2</sup>,地上高为100m。本工程末端为“天棚辐射+置换新风”系统。其中X户型为风机盘管+地板采暖系统,利用地埋管作为冷热源,采用四台地源热泵机组为末端天棚系统和新风系统提供冷热量。

2) 北京第一个高温多功能地源热泵工程。该项目位于北京市大兴区工业开发区,即雨昕阳光太阳能公司综合办公楼,是北京地区第一个采用高温多功能热泵新技术和新产品集成与配套的,第一个真正实现了一机功能的大型地源热泵建筑节能应用示范工程。该项目的建成和使用,对投资者可带来良好的经济效益,每年可节省至少70%以上的空调冷暖费用和生活用热水加热费用。

3) 天津市首座零碳建筑——中新天津生态城公屋展示中心项目。该项目于2012年11月正式投入使用,采用了地源热泵等13项节能环保技术,创立了绿色生态建筑标杆。

4) 浙江海盐县客运中心地源热泵项目于2011年9月全面开工,将建成浙江省第一个使用地源热泵系统的汽车站。

地源热泵利用地能一年四季温度稳定的特点,冬季把地热能作为热泵供暖的热源,即把高于环境温度的地热能中的热能取出来供给室内采暖,夏季把地热能作为空调的冷源,即把室内的热能取出来释放到低于环境温度的地源中,从而达到节能的目的,并且整个系统在运行过程中,不产生任何有害物质,实现了环保。

#### 5. 可燃冰

可燃冰的学名是天然气水合物(Natural Gas Hydrate/Gas Hydrate),因其外观像冰一样,所以又被称作“可燃冰”(Combustible Ice)或者“固体瓦斯”和“气冰”。它极易燃烧,燃烧产生的能量比同等条件下的煤、石油、天然气都要多,而且在燃烧以后几乎不产生任何残渣和废弃物。天然气水合物在自然界广泛分布在大陆永久冻土、岛屿的斜坡地带、活动和被动大陆边缘的隆起处、极地大陆架以及海洋和一些内陆湖的深水环境中。中国从1999年起才开始对可燃冰开展实质性的调查和研究,于2007年5月1日凌晨,在南海北部首次成功钻获天然气水合物实物样品“可燃冰”,从而成为继美国、日本、印度之后第4个通过国家级研发计划采到水合物实物样品的国家。

#### 6. 化学电池

这是一种将化学能转换成电能的装置。自1800年意大利科学家伏打(Volta)发明伏打电堆算起,化学电池已经有200余年的历史。目前,全世界共有1 000多种不同系列和型号规格的电池产品,常见的有金属氢化物镍电池、锂离子二次电池、燃料电池、铝电池、储能



电池等。化学电池能量转换率高,方便并且安全可靠。

## 7. 氢能

二次能源是联系一次能源和用户的纽带,二次能源又可分为“过程性能源”和“含能体能源”。电能是当前应用最广泛的“过程性能源”。由于目前“过程性能源”尚不能大量地直接存储,因此汽车等交通工具只能采用汽油、柴油这一类“含能体能源”。随着常规能源危机的出现,在开发新的一次能源(如可燃冰)的同时,人们将目光也投向寻求新的“含能体能源”,氢能正是一种值得期待的新型二次能源。氢能具有以下一些优点。

- 1) 来源广。地球上的水储量为  $13.38 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,是氢取之不尽、用之不竭的重要源泉。
- 2) 燃烧热值高。氢的热值高于所有化石燃料和生物质燃料。
- 3) 清洁。氢本身无色、无味、无毒。
- 4) 燃烧稳定性好。容易做到比较完善的燃烧,燃烧效率很高。
- 5) 存在形式多。氢可以以气态、液态或固态金属氢化物出现,能适应贮运及各种应用环境的不同要求。

### 1.1.3 节能减排形势下的绿色低碳建筑应用

目前全球气候变暖,温室效应正在不断威胁着地球的生态环境。在温室气体中,二氧化碳不是最有害的,但却是排放量最高的。而又有资料显示,建筑物产生了全球约40%的二氧化碳排放,是温室气体的主要排放源。因此,在所有减少温室效应气体排放的立法规划中,建筑都处于核心地位。目前,建筑能耗约占我国社会总能耗的30%左右,而这30%还仅仅是建筑物在建造和使用过程中消耗的能源比例,如果再加上建材生产过程中耗掉的能源(约占社会总能耗的16.7%),建筑相关的能耗将占到社会总能耗的46.7%。因此,“建设绿色低碳建筑、大力推进节能减排”已经刻不容缓。绿色建筑并不是一般意义上的立体绿化屋顶花园,而是指在建筑全生命周期内,最大限度地节约资源、保护环境和减少污染,为人类提供健康适用和高效的使用空间的同时,与周围自然环境和谐共生的建筑。零碳是指要实现建筑碳排放量为零。要实现建筑的绿色低碳,可以从两种途径来实施:一是通过增加可再生能源的使用量、提升化石能源的生产效率、采用低碳化的材料资源等来减少碳排放;二是通过发展海洋、湿地、土壤及林木等增加碳吸收。

世界上第一个二氧化碳零排放社区是英国伦敦贝丁顿社区(Beddington Zero Energy Development, BedZED)。该社区建成于2002年,拥有包括公寓、复式住宅和独立洋房在内的82套住房,另有大约2500m<sup>2</sup>的工作空间。整个社区只使用可再生资源产生满足居民生活所需能源,强调对阳光、废水、空气和木材的循环利用,如利用废木头发电并制造热水,妥善利用水资源和先进的通风系统,使用氢气作为能源的零碳排放汽车等,旨在不向大气释放二氧化碳。该社区的建成为可持续建筑创造了新的标准。

我国第一个零碳建筑是上海世博会伦敦零碳馆。上海世博中心是按中国和国际标准建成的“绿色低碳”建筑,作为中国公共建筑节能科技的典范。世博中心在其设计过程中,围绕科技创新和可持续发展的理念,按照减量化(Reduce)、再利用(Reuse)、再循环(Recycle)的3R设计原则,从节能、节电、节水、节材、节地等环节入手,统筹安排资源和能源的节约、回收和再使用,减少污染物的排放量,减少建筑对环境的影响。下面重点阐述一下世博中心在电气节能方面的一些措施。