

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材（电气工程及其自动化、自动化专业）

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

新能源发电 与控制技术

第3版

主编 惠晶 颜文旭 / 副主编 许德智 樊启高

Renewable Energy Generation
and Control Technology



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材（电气工程及其自动化、自动化专业）

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

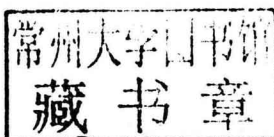
新能源发电与控制技术

第3版

主 编 惠 晶 颜文旭

副主编 许德智 樊启高

参 编 朱一昕 石晨曦



机械工业出版社

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本书第1版《新能源转换与控制技术》于2008年2月问世。于2012年对本书进行修订时，考虑到能源转换涉及面极为广泛，而本书的重点是介绍新能源发电及其控制技术，故第2版更名为《新能源发电与控制技术》。本书第2版出版至今，新能源的利用与开发取得了巨大成就，社会与经济价值在国际上获得广泛认可。为了反映最新研究成果、体现技术更新，本书在第2版的基础上再次修订与完善。

本书共分为8章，主要内容包括：新能源发电与控制技术导论，电源变换和控制技术基础知识，风能、风力发电与控制技术，太阳能、光伏发电与控制技术，生物质能发电与控制技术，分布式电源与微电网组网技术，核能发电与应用技术，其他形式新能源的发电与应用技术。

本书可作为电气工程及其自动化、新能源科学与工程、自动化、能源动力等专业的本科生教材。对相关学科的研究生和从事新能源利用与发电的广大工程技术人员也是一本较为系统、完整的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源发电与控制技术/惠晶，颜文旭主编.—3版.—北京：机械工业出版社，2018.8

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材. 电气工程及其自动化、自动化专业 “十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-60076-3

I. ①新… II. ①惠… ②颜… III. ①新能源-发电-高等学校-教材
IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第116298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：于苏华 责任编辑：于苏华 王雅新

责任校对：肖琳 封面设计：鞠杨

责任印制：孙炜

北京玥实印刷有限公司印刷

2018年7月第3版第1次印刷

184mm×260mm·21印张·512千字

标准书号：ISBN 978-7-111-60076-3

定价：49.00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：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

序

应对气候变化是 21 世纪人类面临的共同挑战，新能源是人类解决能源与环境问题的钥匙。当前我们正面临新能源技术革命和产业发展的大好时机，为了推动我国新能源技术和产业的发展，促进新能源技术的知识普及和相关人才的培养，近年来国内高校先后开设新能源技术有关课程，这是一个很好的开端。

新能源技术是一个涉及电气、动力、机械、材料、控制、电子、计算机、信息与网络等多个学科的交叉高新技术。惠晶教授等人较早地在江南大学进行新能源发电与控制技术课程的尝试，在总结教学经验的基础上，编写了《新能源发电与控制技术》一书。该书自 2008 年出版以来，得到了读者的好评，并被国内 50 多所学校采用。本次出版的是《新能源发电与控制技术》第 3 版，对原有内容做了进一步补充和完善。该书的特色是将新能源变换、电力电子技术和控制技术有机结合，从系统的角度加以阐述。以具有电气工程或自动化方面的基础知识的读者为对象，介绍了新能源的形式、新能源发电及其控制技术，包括风力发电、光伏发电、水能发电、生物质发电、核能发电以及分布式电源与微电网等知识。书中深入浅出地介绍了新能源的存在形式，新能源的获取方法，电能转换技术及其综合利用前景；还分析了各种新能源发电的主要制约因素，并对书中介绍的新能源发电与利用做了经济技术性评价。该书是一本系统了解新能源发电技术的基础入门书。

感谢《新能源发电与控制技术》（第 3 版）一书的全体作者付出的辛勤劳动，能够面向我国产业发展的需求，克服编写过程中由于涉及多学科交叉所遇到的困难，不断完善内容，为大家奉献一本很好的书籍。



浙江大学

前 言

本书第1版于2008年2月出版,书名是《新能源转换与控制技术》,由于能源转换涉及面极其广泛,而本书内容主要涉及如何将一次能源转换成电能,即能—电转换形式,重点介绍利用新能源的发电及其控制技术,因此,第2版更名为《新能源发电与控制技术》。本书第2版出版至今,新能源的利用与开发已取得巨大成就,社会与经济价值在国际上获得广泛认可。为了反映最新研究成果、体现技术更新,本书在第2版的基础上再次修订与完善。本书修订与增补的主要依据是:①随着科学技术的进步,环境保护意识的加强,世界各国对新能源的开发与利用已达到前所未有的高度;以风能、太阳能、生物质能为代表的可再生能源发电与运行成本均大幅度降低,社会和经济效益显著,本书各章中使用的技术、经济数据需要更新。②近5年,物联网技术已渗透到生产与消费的各个领域,传统的发电—输电—用电系统开始受到更加灵活、可靠、多样性并举的智能电网、分布式发电与微电网的挑战,本书增加了“分布式电源与微电网组网技术”一章。③尽管水能是可再生能源的重要表现形式,然而水力发电技术是相对传统和成熟的发电方式之一,水力及水轮机的控制相对简单,已有许多文献介绍,因此,本书将其压缩为一节,并入第8章“其他形式新能源的发电与应用技术”。④作者在近10年选择本书前两版作为江南大学电气工程及其自动化本科专业的教材,切身体会到原书有些内容和结构还不够科学,对于相关新研究成果和新应用水平,需要与时俱进,力求能比较客观、全面地反映在本教材中;在第2版中引用的一些经济、技术数据已经过时,还发现个别错误需要勘正。基于上述四点,认为有必要对第2版的结构进行调整、对内容进行修订与补充。本书第3版传承了前两版的体系和特色,将新能源发电与控制技术有机地结合起来,重点介绍了以可再生能源为主的各类新能源的表现形式、主要利用方式及其发电原理、电源变换与控制技术。

新能源发电作为一门涉及多学科的新兴技术,已日益受到国际社会的青睐。“21世纪可再生能源政策网(REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century)”2017年发布的可再生能源全球现状报告(GSR2017)称:2016年全球可再生能源继续保持增长,年度总投资规模达2416亿美元。在2004~2016年的12年间,可再生能源投资增长了4.4倍,可再生能源的发电总量(不含大水电)自2004年起增长了10.84倍,达到921GW(1GW=10亿W),约占全球总发电容量的7.9%,其中风电场占4.0%、生物质发电占2.0%、光伏发电占1.5%、海洋与太阳能聚热发电等占0.4%。可再生能源产业为全球提供了约830万个就业岗位(我国364.3万个);2016年,全球风电场装机容量达487GW,增长55GW,其中装机量与发电量最多的是我国,占全球总量的25.1%;2016年,全球光伏发电装机容量达303GW,增加了75GW,相当于每小时安装31000块光伏板。目前,全球已有约120个国家制定了促进使用可再生能源的国家目标。此外,在我国,随着《中华人民共和国可再生能源法》《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》等法规和纲领性文献的相继执行,对我国在新能源综合利用方面起到了巨大作用,使我国近10年持续保持着世界第一的增长率,新能源发电无论是装机容量还是发电量均处于世界领先地位。

目前,国内外虽已有多种版本可再生能源利用的著作面世,但鉴于新能源利用涉及的能源种类繁多,应用规模和水平日新月异,主要技术不断成熟的特点,急需一本能够兼顾各类新能源发电与控制技术的综合性教材。随着高等教育课程体系改革的不断深入,在增加新技术课程、专业课时大幅度压缩的情况下,作者在长期的教学实践中也切身感到十分需要一本结构合理、选材科学、较为系统全面、综合性和专业性强的相关教材。这些因素也是继2012年9月本书第2版问世以来,对本书再一次修订、增补的社会需求。

为了保证教学的延续性,提高本书的合理性与科学性,第3版保留了第1版经教学实践检验过的多数内容,对原书结构和章节做了适当调整与增补。首先,按可再生能源开发利用的成熟度、重要性和发展前景,对第3章~第8章的内容按风力发电、光伏发电、生物质能发电、分布式电源与微电网、核能发电和其他新能源发电的顺序重新编排;其次,考虑到第2版中第5章介绍的“水能、小水力发电与控制技术”虽然属于可再生能源利用及发电范畴,但技术成熟,与大型水电站的发电与控制重合度较高,因此删除原章节,将其并到第8章“其他形式新能源的发电与应用技术”的第一节,重点突出“小水力及小水电发电机组”的特点;近几年随着IT技术的发展,智能电网快速发展,分布式电源与微电网是智能电网的重要组成与补充,因此,在第6章中增加了相关内容;因核能发电属于清洁能源利用的重要形式,核电装置在新能源利用中占据重要的地位,在本书的第7章保留了主要内容;适当增加了新技术与实用范例。修订后的第3版力求编排更加合理、内容更加科学。

本书在总体结构和主要内容上仍与前2版基本一致,共分为8章。第1章新能源发电与控制技术导论,由于本章内容涉及大量国内外新能源发展状况的技术和经济数据,有较强的时效性,对本章的修编主要是:①更新过期的技术与经济数据,使本章具有科学性和实效性;②优化内容,删除1.3.3节(与后续内容重复)和“本章小结”。为方便非电气类学生和广大专业爱好者阅读本书,保留第2章电源变换和控制技术基础知识,重点介绍了不可控、半控和全控型三类电力电子器件及其驱动与保护电路,常用脉宽调制(PWM)控制技术,归纳介绍了AC—DC、DC—DC、DC—AC、AC—AC等四种典型变换电路,本章作为预备知识在教学中选用。第3章风能、风力发电与控制技术,重点介绍风的特性,风力发电机组及工作原理,风电机组的控制策略和并网技术,风电的经济技术性评价。第4章太阳能、光伏发电与控制技术,主要介绍太阳的辐射与太阳能利用,光伏发电原理、独立型与并网型的光伏发电系统,光伏发电系统的控制策略和光伏发电的发展前景与经济技术评价。第5章生物质能发电与控制技术,介绍生物质的形式及开发利用,生物质能的制取与发电技术,生物质能燃烧发电技术及燃料电池发电和生物质发电的经济技术评价。第6章分布式电源与微电网组网技术,重点介绍分布式能源的特征及其应用、分布式供电与储能技术、电能质量与控制技术、微电网与多单元混合组网技术、分布式能源的综合利用及经济技术评价。第7章介绍核能的形式及其利用、核反应原理与反应装置、核能发电技术与发电设备、核电站的运行监控系统和技术经济性评价。第8章其他形式的新能源载体简介,分别介绍水能与小水力发电技术、海洋能的利用与发电技术、地热能发电与应用技术等。

为便于部分读者的学习,在开始两章介绍新能源发电与控制技术导论,电力电子技术基础知识,在后续各章首先简介相关新能源的表现形式、理化特性和利用方式,这些内容可以在课堂教学中根据不同对象取舍。本书对于先修了“电力电子技术”课程的电气工程及其

自动化、自动化等专业的本科生，建议32学时，对于能源动力、机械电子等其他专业学生可适当放宽学时至40学时。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化、能源动力等专业“新能源发电与控制技术”课程及相近课程的教材或参考书。同时，本书也可作为从事新能源发电、电力工程及运行维护的专业技术和管理人员获得所需专业知识的读本。

本书由惠晶担任第一主编，编写第1章和第2章，并负责全书的校对与审核；颜文旭担任第二主编，编写第3章和第5章，并负责全书的统稿工作；许德智担任第一副主编，编写第4章；樊启高担任第二副主编，编写第8章；朱一听编写第6章；石晨曦编写第7章。本书在编写过程中还得到方光辉副教授的帮助，研究生徐倩倩、徐久益、黄芳诚等人也参加了部分资料的收集和制图工作，在此对所有参编人员和审稿专家表示衷心感谢。同时，还要向书中所附参考文献的作者致以衷心感谢。

最后，特别感谢浙江大学徐德鸿教授在本书编写过程中提出的宝贵意见，徐教授还在百忙之中为本书审稿和作序，在此谨致深切的感谢！

由于时间仓促及水平所限，编者虽在修编过程花了不少精力，但仍难免存在疏漏、错误，殷切期望广大读者批评指正。

作者

2018年2月于江南大学

本书常用变量及符号说明

- P 有功功率, 发电机输出功率
- Q 无功功率, 存储于蓄电池内的电荷量, 流量
- S 视在功率, 基本建设投资, 截面积, 叶片面积
- H 谐波产生的功率, 波高, 水头高度
- U 电压有效值
- I 电流有效值
- φ 功率因数角
- p 瞬时有功分量, 极对数, 微分算子
- q 瞬时无功分量, 电子电荷
- p_0 瞬时零序功率
- θ 同步旋转角
- u_a, u_b, u_c 三相电压瞬时值
- i_a, i_b, i_c 三相电流瞬时值
- i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 三相负载电流
- i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc} 三相电源电流
- i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc} 三相补偿电流
- \bar{v}_N N 级风的平均风速
- N 风的级数, 氢的原子数
- v 风速
- v_0 高度为 h_0 处的风速
- k 修正指数
- α 地面粗糙度, 攻角, 迎角, 蓄电池的充电电流接受比, 触发控制角
- E 风能密度, 扣除厂用电后的净发电量
- ρ 空气质量密度, 海水密度
- C 空气动力系数, 核电成本
- C_L 翼型的升力, 旁路电容
- APF 有源电力滤波器
- SSPC 无触点固态功率控制器
- CSCF 恒速恒频
- VSCF 变速恒频
- PFC 功率因数校正
- TRU 变压整流器单元
- DVR 动态电压恢复器
- STATCOM 静止无功补偿器
- UPQC 统一电能质量管理器
- FFT 快速傅立叶变换
- NFT 中点形成变压器
- THD 总谐波含量
- LVRT 低电压穿越
- FIRR 财务内部收益率
- FNPV 财务净现值
- P_i 投资回收期
- K_{iy} 变压器 i 、 y 次绕组的匝比
- T_{on} 开关器件 VT 的导通时间
- U_{RBO} 反向击穿电压
- $I_{F(AV)}$ 正向平均电流
- U_F 正向通态压降
- I_F 正向通态电流
- I_{RP} 反向恢复电流
- t_r 反向恢复时间
- U_{TO} 阈值电压
- di_F/dt 电流下降率
- I_H 维持电流

C_D 翼型的阻力系数
 ω_a 叶尖速度
 B 摩擦转矩系数
 J 电磁转矩, 系统转动惯量
 T_e 电磁转矩
 P_{cu} 定子铜耗
 I_f 励磁电流
 u 叶片线速度
 ω 叶片角速度
 r_i 叶片计算速度点到转动中心的距离
 n 叶片转速
 P_a 风力机的机械输出功率
 A 风力机的扫风面积
 C_p 风力机的利用系数
 r 风轮半径
 λ_m 叶尖速比
 n_1 同步转速
 s 转差率
 P_{em} 电磁功率
 T_a 风力机的机械转矩
 β 桨距角
 R_{bar} 旁路电阻
 I_{PEK} 电源最大峰值电流
 P_{drive} 电源平均功率
 $t_{d(on)}$ 导通延迟时间
 $t_{d(off)}$ 关断延迟时间
 t_r 电流上升时间
 t_f 电流下降时间
 I_{pk} 峰值输出电流
 f_{max} 最高工作频率
 C_H 自举电容
 L_m 直流母线的线路电感, 互感
 R_s 限流电阻, 发电机的定子电阻
 U_{cesp} 集射极间峰值电压
 P_{LM} 分布电感储能

U_T 晶闸管额定电压
 U_{DRM} 正向重复峰值电压
 U_{RRM} 反向重复峰值电压
 U_{DSM} 正向不重复峰值电压
 U_{RSM} 反向不重复峰值电压
 U_{bo} 转折电压
 $I_{T(AV)}$ 通态平均电流
 U_{GS} 栅源电压
 I_D 漏极电流
 U_{DS} 漏源极电压
 I_{DM} 漏极脉冲电流峰值
 $R_{DS(on)}$ 漏源通态电阻
 C_{iss} 漏源极短路输入电容
 C_{oss} 共源极输出电容
 C_{rss} 反向转移电容
 C_{GS} 栅源极电容
 C_{GD} 漏源极电容
 C_{DS} 栅漏极电容
 MOSFET 电力场效应晶体管
 IGBT 绝缘栅双极型晶体管
 GTR 大功率晶体管
 I_c 集电极电流
 U_{GE} 发射极正向控制电压
 U_{CE} 集射极间电压
 I_{CM} 最大集电极电流
 P_{CM} 最大集电极功耗
 $U_{CE(sat)}$ 集射极间饱和压降
 SIT 静电感应晶体管
 SCR 半控型电流触发晶闸管
 I_G 正向脉冲电流
 C_{ie} 动态有效输入电容
 Q_G 栅极总电荷
 ΔU_{CE} 正负偏置电压的差值
 f 工作频率, 开关频率
 δ_i i 个脉冲宽度

- P_{Cs} 缓冲电路吸收的能量
 P_{Rs} 限流电阻功耗
 U_i Buck 变换器输入电压
 U_o Buck 变换器输出电压
 t_{off} 关断时间
 D_y PWM 的占空比
 PWM 脉冲宽度调制
 SPWM 正弦波脉宽调制
 CCM 输出电流保持连续, 电流连续模式
 Z_L 感性负载
 $\Delta\Phi$ 磁通增量
 DCM 电流断续模式
 VD 整流二极管
 I_p 一次侧电流
 I_s 二次电流
 Inverter 逆变器
 R 气体常数, 电路的等效输入阻抗, 负载
 C_1 滤波电容
 U_d 逆变器输入电压
 C_d 直流母线电容
 ZCS 零电流关断
 ZVS 零电压导通
 ω_0 谐振频率
 U_c 谐振电容 C 上电压
 VT 主开关器件
 T_s 变换器的开关工作周期
 I_d 负载电流幅值, 逆变器输入电流
 R_o 谐振负载等效为电阻
 Z 阻抗
 DG 分布式发电
 MU 管理和利用
 SOFC 固体氧化物燃料电池
 PAFC 磷酸型燃料电池
 SMES 超导磁储能系统
 θ_1 中心位置相位角
 u_r 调制波电压
 u_c 载波电压
 Ψ_s 三相交流电动机的定子磁链
 U_u 三相逆变器输出 u 相电压矢量
 U_v 三相逆变器输出 v 相电压矢量
 U_w 三相逆变器输出 w 相电压矢量
 U_{out} 输出端的空间电压合成矢量
 i_a^* 电流控制器给定电流
 i_a 电流控制器实际输出电流
 h 滞环比较器环宽, 太阳高度角
 N_3 复位绕组
 U_{tg} 栅极驱动信号
 U_1 变压器一次电压
 U_2 变压器二次电压
 N_2 二次绕组
 U_s 电网正弦电压
 i_i i 相正弦输入电流
 VVVF 变压变频器
 i 输入电流
 L_d 平波电抗器
 N_1 一次绕组
 SVPWM 空间矢量脉宽调制
 CHBPWM 电流滞环跟踪 PWM
 HBC 滞环比较器
 SMR 开关模式整流器
 VSR 电压源整流器
 DC Chopper 直流斩波器
 DC-DC Converter 直流-直流变换器
 Flyback Converter 单端反激式变换器
 Forward Converter 单端正激式变换器
 DER 分布式能源
 EUE 电能有效利用
 MCFC 熔融碳酸盐燃料电池

- SC 超级电容器
- DLC 双电层电容器
- MEMS 微网能量管理系统
- SCADA 数据采集与监视控制
- FOR 强迫停运率
- EENS 电量不足期望值
- SAIFI 系统平均停电频率指标
- CAIFI 用户平均停电频率指标
- PV 太阳能光伏发电
- PCC 公共连接点
- APFC 有源功率因数校正器
- PPF 无源电力滤波器
- HAPF 混合型有源电力滤波器
- SVG 静止无功发生器
- I_{rms} 输入电流有效值
- γ 输入电流失真系数
- PF 功率因数
- T 热力学温度, 交流信号波形的周期, 年利用小时数
- a_0 氧化体的活性
- E_0 a_0 、 a_R 为 1 时的标准平衡电压
- V_1, V_2 并联电压幅值
- i_1, i_2 流过模块 1 与模块 2 的电流
- NI 核岛
- RRA 余热排出系统
- I&C 核电站监控系统
- O 运行维修费
- P_u 风力机输出功率
- $C_T(\lambda, \beta)$ 优化转矩系数
- T_n 转矩观测值
- $u_{d1}, u_{q1}, u_{d2}, u_{q2}$ 定、转子上 d、q 轴的电压分量
- R_1 定子电阻
- $\Psi_{d1}, \Psi_{q1}, \Psi_{d2}, \Psi_{q2}$ 定、转子上 d、q 轴的磁链分量
- ω_1 同步角速度
- PEMFC 质子膜燃料电池
- AFC 碱性燃料电池
- BESS 蓄电池储能系统
- EC 电化学电容器
- MPPT 最大功率跟踪
- CHP 热电联供系统
- MGCC 微网中央控制器
- LOLP 电力不足概率
- SAIDI 系统平均停电持续时间指标
- CAIDI 用户平均停电持续时间指标
- WTG 风力发电机
- FMEA 故障模式与影响分析法
- SVC 静止无功补偿器
- I_1 输入基波电流有效值
- $\cos\Phi$ 相移因数
- F 法拉第常数, 核燃料费
- a_r 还原体的活性
- Z_1, Z_2 线路阻抗
- V_{dc} 模块连接处的母线电压
- CI 常规岛系统, 现金流入量
- RCV 化学和容积控制系统
- BOP 电厂辅助设施
- f_1 电网频率, 定子电流频率
- f_2 转子电流频率
- K_{opt} 具有最佳 C_p 值的比例系数
- $i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}$ 定、转子上 d、q 轴的电流分量
- R_2 转子电阻
- ω_s 转差角速度, 同步电角速度
- L_2 转子自感
- θ_u 定子电压矢量位置给定
- $u_{sd}, u_{sq}, i_{sd}, i_{sq}$ d、q 轴定子电压、电流分量
- ψ 转子永磁体磁链
- P_e 电磁功率

- L_1 定子自感
 u_1 定子电压
 θ_s 定子磁链矢量位置
 L_s 发电机的定子电感
 P_s 发电机输出的有功功率
 P_{cu} 定子铜耗
 \dot{I}_{rot} 转子侧相电流
 \dot{I}_{cov} 变流器支路相电流
 \dot{U}_{cov} 变流器端电压
 I_C 项目所属行业的基准收益率
 m 太阳辐射穿过地球大气的路径与太阳在天顶方向垂直入射时的路径之比
 U_D 等效二极管的端电压
 k 玻尔兹曼常量
 A PN 结的曲线常数
 i_o 负载电流
 δ_c 相角差
 g 重力加速度
 \bar{P} 平均出力
 X_d'' 待并网同步发电机的纵轴次暂态电抗
 I_0 光伏电池内部等效二极管 PN 结的反向饱和电流
 X_q'' 待并网同步发电机的交轴次暂态电抗
 δ 同步发电机的功率角
 \dot{I}_{bar} 旁路支路相电流
 \dot{U}_{bar} 旁路线电压
 R_{bar} 旁路电阻
 CO 现金流出量
 U_{DC} 直流电源电压
 I_{SC} 短路电流
 T 绝对温度
 i_L 电感上的电流
 D 开关的占空比
 I_0 蓄电池可接受的初始充电电流
 I_{dis} 放电电流
 Q_S 蓄电池释放出的全部电量
 U_{dc} 光伏阵列将太阳能转换后产生的直流电
 压源
 R_L 负载阻抗
 I_S 总的可接受充电电流
 α_s 总充电电流接受比
 P_w 正弦波单位波峰宽度的波浪功率
 η 效率
 I_{0max} 并网时冲击电流最大值

目 录

| | |
|--|----|
| 序 | |
| 前言 | |
| 本书常用变量及符号说明 | |
| 第1章 新能源发电与控制技术导论 | 1 |
| 1.1 能源储备与可持续发展战略 | 1 |
| 1.1.1 我国的能源结构与储备 | 1 |
| 1.1.2 我国的可持续发展战略 | 3 |
| 1.2 能源的分类与基本特征 | 4 |
| 1.2.1 能源的分类 | 4 |
| 1.2.2 能源的基本特征 | 4 |
| 1.2.3 新能源及主要特征 | 5 |
| 1.2.4 分布式能源及主要特征 | 6 |
| 1.3 新能源发电——能源转换的重要形式 | 9 |
| 1.3.1 新能源发电技术的应用 | 9 |
| 1.3.2 我国新能源发电的现状 | 10 |
| 1.4 新能源发电与控制技术的经济意义 | 12 |
| 1.4.1 能源是经济发展的引擎 | 12 |
| 1.4.2 新能源发电的经济意义 | 14 |
| 第2章 电源变换和控制技术基础知识 | 18 |
| 2.1 常用电力电子器件及其分类 | 18 |
| 2.1.1 电力电子器件的特征和分类 | 18 |
| 2.1.2 不可控型器件——电力二极管 | 19 |
| 2.1.3 半控型器件——晶闸管 | 20 |
| 2.1.4 全控型器件——电力 MOSFET 和绝缘栅双极型晶体管 IGBT | 21 |
| 2.2 半导体功率器件的驱动与保护电路 | 24 |
| 2.2.1 晶闸管触发驱动器 | 24 |
| 2.2.2 IGBT 和 MOSFET 驱动器 | 25 |
| 2.2.3 功率器件的保护电路 | 30 |
| 2.3 常用脉宽调制 (PWM) 控制技术 | 33 |
| 2.3.1 直流 PWM 控制技术 | 33 |
| 2.3.2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 控制技术 | 35 |
| 2.3.3 SVPWM 与 CHB PWM 控制技术 | 38 |
| 2.4 AC—DC 变换电路 | 40 |
| 2.4.1 二极管整流器——不控整流 | 40 |
| 2.4.2 晶闸管整流器——相控整流 | 41 |
| 2.4.3 PWM 整流器——斩波整流 | 42 |
| 2.5 DC—DC 变换电路 | 44 |
| 2.5.1 单管非隔离式 DC—DC 变换器 | 45 |
| 2.5.2 隔离式 DC—DC 变换器 | 46 |
| 2.6 DC—AC 变换电路 | 49 |
| 2.6.1 常用 DC—AC 变换电路 | 49 |
| 2.6.2 DC—AC 逆变器的分类 | 50 |
| 2.7 AC—AC 变换电路 | 51 |
| 2.7.1 AC—AC 交流斩波 (降压) 调压器 | 51 |
| 2.7.2 典型 AC—AC 变换电路 | 52 |
| 本章小结 | 54 |
| 第3章 风能、风力发电与控制技术 | 55 |
| 3.1 风的特性及风能利用 | 55 |
| 3.1.1 风的产生 | 55 |
| 3.1.2 风的特性与风能 | 56 |
| 3.1.3 风能的利用 | 59 |
| 3.2 风力发电及其工作原理 | 60 |
| 3.2.1 风力发电机组的分类及结构 | 60 |
| 3.2.2 风力机及风能转换原理 | 61 |
| 3.2.3 风力发电机及工作原理 | 64 |
| 3.3 风力机的调节与控制 | 72 |
| 3.3.1 风力机的定桨距调节与控制 | 73 |
| 3.3.2 风力机的变桨距调节与控制 | 73 |
| 3.3.3 风力机偏航系统的调节与控制 | 76 |
| 3.4 风力发电机组的控制 | 77 |
| 3.4.1 风力发电机组的恒速恒频控制 | 77 |
| 3.4.2 风力发电机组的变速恒频控制 | 78 |
| 3.5 风力发电机组的并网与安全运行 | 90 |
| 3.5.1 同步风力发电机组的并网技术 | 90 |
| 3.5.2 异步风力发电机组的并网技术 | 93 |
| 3.5.3 双馈异步风力发电机的并网运行系统 | 98 |
| 3.5.4 风力发电机组的并网安全运行与防护措施 | 99 |

| | | | |
|---|-----|---|-----|
| 3.6 风力发电的经济技术性评价 | 105 | 5.1.3 生物质能的开发利用与 发展状况 | 159 |
| 3.6.1 风力发电的经济性指标 | 105 | 5.2 生物质能的制取与发电技术 | 165 |
| 3.6.2 影响风力发电经济性的主要 因素 | 107 | 5.2.1 生物质能的制取与发电分类 | 165 |
| 本章小结 | 108 | 5.2.2 沼气发电技术与控制策略 | 170 |
| 第4章 太阳能、光伏发电与 控制技术 | 110 | 5.2.3 垃圾焚烧发电技术与 控制策略 | 181 |
| 4.1 太阳的辐射及太阳能利用 | 110 | 5.2.4 生物质燃料电池的发电技术 | 189 |
| 4.1.1 太阳的辐射 | 110 | 5.2.5 生物质直接液化制燃料油的 发电技术 | 194 |
| 4.1.2 太阳能的转换与利用 | 114 | 5.3 生物质能的并网发电及对电网的 影响 | 198 |
| 4.2 光伏发电原理与太阳电池 | 121 | 5.4 生物质能发电的经济技术性评价 | 200 |
| 4.2.1 太阳能光伏发电的原理 | 121 | 本章小结 | 202 |
| 4.2.2 太阳电池的发展与分类 | 123 | 第6章 分布式电源与微电网组网 技术 | 204 |
| 4.2.3 光伏阵列与输出特性 | 125 | 6.1 分布式能源的特征及其应用 | 204 |
| 4.2.4 光伏发电系统的构成与 分类 | 128 | 6.1.1 分布式能源的特征 | 205 |
| 4.3 光伏发电系统的 MPPT 控制技术 | 133 | 6.1.2 分布式能源的应用 | 206 |
| 4.3.1 光伏电池的最大功率点及 环境特性影响 | 133 | 6.2 分布式供电与储能技术 | 208 |
| 4.3.2 光伏电池最大功率点跟踪与 控制策略 | 134 | 6.2.1 天然气、燃气发电与控制 技术 | 209 |
| 4.3.3 光伏电池最大功率点的仿真与 实现 | 138 | 6.2.2 氢能、氢燃料电池发电与 控制技术 | 215 |
| 4.4 独立式光伏发电系统 | 141 | 6.2.3 分布式供电与混合储能技术 | 220 |
| 4.4.1 独立式光伏发电系统的结构及 工作原理 | 141 | 6.3 微电网与多单元混合组网技术 | 225 |
| 4.4.2 独立式光伏供电系统的储能与 充放电控制技术 | 142 | 6.3.1 基于直流母线并网的微电网 技术 | 227 |
| 4.5 并网式光伏发电系统 | 145 | 6.3.2 基于交流与直流混合组网的 微电网技术 | 233 |
| 4.5.1 并网式光伏发电系统的结构及 工作原理 | 145 | 6.3.3 微电网的调度与可靠性分析 | 236 |
| 4.5.2 并网光伏逆变器的频率跟踪与 锁相控制技术 | 149 | 6.4 电能质量与控制技术 | 243 |
| 4.5.3 光伏发电系统的并网安全运行与 防护措施 | 151 | 6.4.1 功率因数校正 | 244 |
| 4.6 光伏发电的发展前景与经济技术 评价 | 153 | 6.4.2 谐波治理与补偿技术 | 245 |
| 本章小结 | 155 | 6.4.3 三相电压技术 | 248 |
| 第5章 生物质能发电与控制技术 | 156 | 6.5 分布式能源的综合利用及经济技术 评价 | 249 |
| 5.1 生物质能的形式及其利用 | 156 | 6.5.1 分布式能源的综合利用 | 249 |
| 5.1.1 生物质能的概念 | 156 | 6.5.2 分布式能源的经济技术与 可行性评价 | 250 |
| 5.1.2 生物质能存在的形式 | 158 | 本章小结 | 255 |

| | | | |
|---|-----|--------------------------|-----|
| 第7章 核能发电与应用技术 | 256 | 8.1.1 水能简介 | 274 |
| 7.1 核能的形式及其利用 | 256 | 8.1.2 海洋能简介 | 275 |
| 7.1.1 核能的主要形式 | 256 | 8.1.3 地热能简介 | 276 |
| 7.1.2 核能的和平利用 | 259 | 8.2 水能与小水力发电技术 | 276 |
| 7.2 核反应原理及反应装置 | 259 | 8.2.1 水力资源与水能的利用 | 276 |
| 7.2.1 核反应堆工作原理 | 259 | 8.2.2 水轮机及其工作原理 | 277 |
| 7.2.2 核反应堆装置 | 260 | 8.2.3 水力发电及其控制技术 | 282 |
| 7.3 核能发电技术与发电设备 | 261 | 8.3 海洋能的利用与发电技术 | 295 |
| 7.4 核电站的运行与监控系统 | 263 | 8.3.1 海洋能的分类与应用 | 295 |
| 7.4.1 核电站的运行 | 263 | 8.3.2 海洋能发电原理与应用技术 | 299 |
| 7.4.2 核电站的监控系统 | 266 | 8.3.3 海洋能发电的综合评价 | 312 |
| 7.5 核能发电的经济技术性评价 | 271 | 8.4 地热能发电与应用技术 | 314 |
| 本章小结 | 272 | 8.4.1 地热能概述 | 314 |
| 第8章 其他形式新能源的发电与 应用技术 | 274 | 8.4.2 地热能发电原理与应用技术 | 316 |
| 8.1 其他形式的新能源载体简介 | 274 | 本章小结 | 318 |
| | | 参考文献 | 320 |

第 1 章 新能源发电与控制技术导论

新能源利用包括可再生能源（风能、太阳能、生物质能、水能、海洋能）和地热能、氢能、核能转换及其利用新技术（高效利用能源、资源综合利用、替代能源、节能等新技术）。可再生能源是重要的新能源组成形式，是自然界中可以不断再生、永续利用、取之不尽、用之不竭的初级资源。科学、高效地利用可再生能源，提高能源的综合利用效率，是保障人类社会可持续发展的可靠途径。新能源发电与控制技术涉及：①利用可再生能源和清洁能源发电，以便持续获得二次清洁能源——电能；②对电能通过变换与控制，满足高质量的终端能源消费需求和电力的高效管理。

1.1 能源储备与可持续发展战略

1.1.1 我国的能源结构与储备

近二三百年来由于人类对化石能源的过度依赖，致使化石类能源面临日益枯竭的危机。为保证未来能源可持续供应，必须重新进入利用新能源和节约能源的时代。我国是一个拥有 13.7 亿人口的国家（截至 2015 年），是世界第二大经济体，但人均各种资源的占有率都远远低于世界平均水平。随着我国经济的高速发展和对外开放的进一步深入，在政治和经济各个领域的发展与变化都会成为全世界关注的焦点。自上世纪 90 年代以来，我国的能源改革与发展，特别是能源的可持续供应问题，能源对环境的影响，以及可能给世界能源形势带来的影响，一直是世界各国关注的议题。深入研究和解决利用新能源带来的一系列科学技术问题和经济性问题，已成为我国当前能源储备与可持续发展战略的当务之急。

1. 我国的能源结构

我国是一个能源大国，在能源结构中煤炭储量最为丰富，已探明的煤炭保有储量超过 1 万亿吨，可采储量在 1800 亿吨以上，仅次于俄罗斯和美国，位居世界第三。再加上地下 1500m 以内的深层资源，总量估计可达 5 万亿吨。因此，煤炭是我国分布最广、最为丰富的矿物资源。但是，我国又是一个能源贫国，我国的人均能源资源占有量为全世界人均水平的 1/2，仅为美国人均水平的 1/10。而且，在总能源结构的组成中 75% 以上是煤，在常规化石能源中煤炭资源占 90% 以上。

从传统的一次能源消费与开采情况看，我国是世界上最大的煤炭生产和消费国，占世界煤炭产量的 1/4。2015 年我国一次能源生产总量为 36.2 亿吨标准煤，是 2011 年 31.8 亿吨标准煤的 1.14 倍；同期一次能源消费总量从 34.8 亿吨标准煤增加到 43.0 亿吨标准煤，年均增长 3.6%。2011~2015 年，虽然我国能源生产持续增长，且其增长速度大于能源消费的增长速度，但仍存在能源缺口。

我国是世界上少数几个以煤为主的能源消费国。2015 年，在我国一次能源构成中，煤炭消费量占能源消费总量的 63.7%，比 2010 年下降 6.8 个百分点；石油占 18.6%，比 2010 年上

升1.0个百分点；天然气占5.9%，比2010年上升1.9个百分点；非化石能源消费比重达到12.0%，比2010年上升4.0个百分点。

从常规能源消费来看，我国的人均消费水平也逐年增长。2015年我国人均消费2.20吨油当量，构成情况分别为：石油0.40吨、天然气0.13吨、煤炭1.40吨、核能0.03吨、水电0.19吨、可再生能源0.05吨油当量。由此可见，我国人均煤炭消费显著偏高，是世界平均水平的2.18倍，非经合组织的1.7倍、经合组织的3.6倍、欧盟的4倍。

从以上数据可以看出，我国的能源结构仍是以煤为主，煤多，油、气少是我国能源储存结构的基本特点，这种结构到今后20年，甚至到本世纪中叶，我国以煤为主的能源结构将不会改变，煤炭仍将是当前和今后我国能源供给及消费的最重要组成部分。

另一方面，由于传统的燃煤方式和煤炭加工过程不可避免的会产生大量的污染物，必将导致严重的大气污染、酸雨和雾霾，还会直接破坏生态环境与自然植被。此外，以煤为主要能源的动力燃料的消耗，仅火力发电与其他工业耗煤就占煤炭总消耗量的2/3左右，而用于民用生活仅占1/10左右，用于城市供热的煤炭不足1/20。因此，长期以来我国在能源生产与消费中，是以煤炭为主要能源且直接进行燃烧，因燃烧不充分、燃烧工艺落后，造成环境污染严重、效率低下、浪费惊人。

2. 我国的资源和能源储备

我国有13.7亿人口，是世界人口最多的国家，人口密度高于世界平均水平。无论是土地面积、土地资源、林木资源、水力资源，还是矿藏资源，我国的资源基础储量都比较丰富，但如果按人均占有量计算，我国大多数资源都低于世界平均水平。我国人口约占世界总人口的21%，国土面积占世界面积的7.1%，耕地占世界7.1%，草地占世界9.3%，水资源占世界7%，森林面积占世界3.3%，石油占世界2.3%，天然气占世界1.2%，煤炭占世界煤炭总量的12%。

实际上，我国对能源的开发利用已达到相当高的强度，与能源高强度开发和大规模消费相对应的则是能源利用效率的低下。目前，我国能源利用效率仅为30%左右，比发达国家低近10个百分点。我国主要用能产品的单位产品能耗比发达国家高25%~90%，加权平均高40%左右。以电力为例（我国电力供应主要依靠燃煤火电），我国火电厂供电煤耗为每千瓦时用404g标准煤，国际先进水平为317g标准煤，我国多耗煤27.4%。现在，我国已经成为继美国之后的世界第二大能源消费国。依靠大量消费能源，推动了中国经济的高速增长，但也使中国经济增长越来越接近资源和环境条件的约束边缘，煤电油供需矛盾相当突出。

随着国际石油紧缺状况的影响和我国能源资源约束的日益突出，能源资源情况不容乐观。自1993年我国成为石油净进口国之后，我国石油对外依存度从1995年的7.6%增加到2005年的42.9%。目前我国石油消费保持中低速增长，2015年对外依存度首次突破60%，达到60.6%。当前，我国石油消费超过了GDP增速，预计到2020年，石油消费总量将达到6亿吨左右。预计到2030年，我国石油消耗量的80%需要依靠进口，这使得我国的石油安全问题变得十分突出。与世界发达国家相比，我国的能源储备体系建设还相对滞后。以石油储备为例，为了应对石油供应危机，美国1975年12月开始建立战略石油储备，目前储备水平约为7.02亿桶，其存储上限为7.27亿桶，美国的石油储备可供使用150多天。目前我国的石油战略储备工程进行至二期和三期之间，使用规模仅相当于60天左右的石油净进口量