

可再生能源 发电技术与 应用瓶颈

主 编 王子琦 张水喜 苏高峰
副主编 拜克明 申成鑫 王新铭
拜 林 朱宁辉
主 审 赵来红 鲍力巍 史辛琳

KEZAISHENG NENGYUAN

FADIAN JISHU YU

YINGYONG PINGJING



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

014013075

TM61
23

可再生能源 发电技术与 应用瓶颈

主 编	王子琦	张水喜	苏高峰
副主编	拜克明	申成鑫	王新铭
	拜 林	朱宁辉	
主 审	赵来红	鲍力巍	史辛琳

参 编	孙淑敏	赵 虹	赵军亮
	李 莉	徐林海	贾 佳
	赵 洁	周 琨	周 倩
	苏晨飞	朱 斌	张峰源



TM 61
23



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



北航

C1699913

内 容 提 要

本书主要介绍了可再生能源发电技术的基本概念、工程应用以及相关的应用瓶颈,全书共分7章,分别为可再生能源概述、风能发电、光伏能发电、生物质能发电、海洋能发电、地热能发电和可再生能源发电前景。每章都对相应可再生能源发电技术的基本概念、基本原理、国内外工程使用情况,并在此基础上阐述了这些发电技术在工程实施的应用瓶颈;最后在可再生能源发展现状的基础上,总结了可再生能源能否发展的趋势和发展经验。

本书可供电网公司以及发电厂电气工程、电力系统运行管理人员及相关技术人员阅读,同时也可以供高等院校电气工程专业和电力系统专业的本科生以及教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

可再生能源发电技术与应用瓶颈 / 王子琦, 张水喜,
苏高峰主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-5170-1639-7

I. ①可… II. ①王… ②张… ③苏… III. ①再生能
源—发电—研究 IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第319687号

书 名	可再生能源发电技术与应用瓶颈
作 者	主 编 王子琦 张水喜 苏高峰 副主编 拜克明 申成鑫 王新铭 拜林 朱宁辉 主 审 赵来红 鲍力巍 史辛琳
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	175mm×245mm 16开本 14印张 162千字
版 次	2013年12月第1版 2013年12月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

电力作为人类最为便利的能源，对经济发展和社会进步起着举足轻重的作用。在获取电力能源的方式上，受到社会生产力、科学技术、地理原因及世界经济、政治等多方面因素的影响与制约，一直以来主要使用煤、石油、天然气以及大中型水力资源产生电能。

随着经济的快速发展和人们生活水平的不断提高，对能源的需求不断扩大，给现实社会带来两大难题：一是煤和石油的有限储藏量所产生的能源危机；二是以煤、石油的大量燃烧而排放的废气（ CO_2 和 SO_2 ）所产生的环境污染和温室效应使人类的生存环境不断恶化。这两大问题迫使人类不得不开发和利用新的可再生能源进行发电。

本书汇总了几种常见的可再生能源发电方式：风能发电、光伏能发电、生物质能发电、海洋能发电和地热能发电，对每种发电方式分别从基本原理、国内外相关工程实施情况等方面进行了介绍，在此基础上重点介绍了上述发电技术在实际工程应用中遇到的问题和瓶颈。使读者在学习和了解可再生能源发电技术诸多优点的基础上，同时能够清楚地认识到这些发电技术所存在的问题，希望能够引起读者产生解决现有工程瓶颈的兴趣。

本书在介绍几种常见可再生能源发电方式后，对可再生能源发

电的现状进行了汇总；在此基础上，结合国内外相关研究结果，分析了可再生能源发展趋势和发展的经验。

本书在编写过程中，借鉴了国内外可再生能源发电相关领域的研究成果，在此表示衷心的感谢。在本书的编撰过程中，智能电网研究院朱宁辉博士提供大量的素材，并参与了本书的编排和校正，在此一并感谢。

由于编者水平有限，因此本书不完善、不正确的地方在所难免，如有缺点和不足之处，敬请读者见谅，并恳请读者给予批评指正。

编者

2013年10月

| 目录 |

前言

第 1 章 可再生能源概述 /1

1.1 可再生能源概念 /1

1.2 可再生能源发展 /2

第 2 章 风能发电 /5

2.1 风能发电原理 /5

2.2 并网运行风力发电工程应用瓶颈 /33

2.3 独立运行风力发电工程应用瓶颈 /48

第 3 章 光伏能发电 /58

3.1 光伏能发电技术概述 /60

3.2 光伏能发电系统的工程应用 /69

3.3 光伏能发电工程应用瓶颈 /76

第 4 章 生物质能发电 /85

4.1 生物质能发电基本形式 /85

4.2 生物质能发电现状与工程瓶颈 /91

第 5 章 海洋能发电 /105

5.1 海洋能发电原理 /106

5.2 海洋能发电工程应用瓶颈 /127

第6章 地热能发电 /176

6.1 地热能发电技术 /177

6.2 地热能发电的应用 /191

6.3 地热能发电的工程应用瓶颈 /204

第7章 可再生能源发展前景 /208

7.1 可再生能源发展状况 /208

7.2 可再生能源发展趋势 /210

7.3 可再生能源发展经验 /214

参考文献 /217

1 可再生能源发展现状 /1

1.1 全球可再生能源 /1.1

1.2 我国可再生能源 /1.2

2 风能发电 /2

2.1 风能发电概述 /2.1

2.2 风能发电工程应用 /2.2

2.3 风能发电工程应用案例 /2.3

3 太阳能发电 /3

3.1 太阳能发电概述 /3.1

3.2 太阳能发电工程应用 /3.2

3.3 太阳能发电工程应用案例 /3.3

4 生物质能发电 /4

4.1 生物质能发电概述 /4.1

4.2 生物质能发电工程应用 /4.2

5 海洋能发电 /5

5.1 海洋能发电概述 /5.1

第 1 章 可再生能源概述

1.1 可再生能源概念

可再生能源是指在自然界中能够再生、连续使用的能源资源，它清洁且对环境无害或危害很小。可再生能源资源的另一特性是分布广泛，适宜就地开发利用，主要包括太阳能、风能、水能、生物质能、地热能和海洋能等非化石能源。

近几年，全世界可再生能源消费量相当于全球一次性能源消费总量的 18% 左右，并呈现逐年快速增长态势。世界各国都把推动可再生能源的发展当做 21 世纪能源发展的基本选择。从国家来看，非水可再生能源发电装机容量最多的国家依次为中国、美国、德国、西班牙、意大利、印度、日本，这 7 个国家合计非水可再生能源发电装机容量超过世界的 70%。欧盟规定到 2050 年，可再生能源在一次能源中比例达到 59%；美国则提出到 2025 年可再生能源生产达到 2000 年的两倍，印度提出在 2012 年可再生能源发电装机容量达到总装机容量的 10%，东南亚、拉美等国家都提出了宏伟的可再生能源



发展规划。目前，水能、生物质能的应用技术相对成熟；风能、太阳能、地热能得益于政策的支持，近年来发展也比较迅速；对海洋能的利用尚处于研发和试验阶段，距大规模商业化应用还有一段距离。此外，由于研发能力和政策原因，当前世界各国的可再生能源发展速度不尽相同。总体而言，世界可再生能源虽然资源潜力巨大，但受成本和技术因素限制，其综合利用率还很低。

当前，我国可再生能源产业正处于从起步阶段，步入大规模发展的关键时期。各类可再生能源产业受其发电技术成熟度、市场规模化程度、产业链完善程度和政策体系支持力度等因素的影响，呈现不同的发展态势。因此，有必要研究国际上可再生能源发展的成功经验，在此基础之上，阐释我国各类可再生能源资源开发利用现状及趋势，认清发展中存在的问题，切实推进我国可再生能源产业发展。

1.2 可再生能源发展

1981年8月联合国在内罗毕召开了新能源和可再生能源会议，会上首次提出了可再生能源的概念，并通过了《促进新能源和可再生能源发展与利用的内罗毕行动纲领》。可再生能源即新的可再生的能源资源，通过采用新技术和新材料加以开发利用，不同于常规化石能源，它既能可持续利用、可循环再生，且不产生或很少产生污染物，对环境损害小，有利于生态良性循环，其主要能源类型包括风能、太阳能、地热能、生物质能、海洋能等。水力发电虽然属于可再生能源利用，但其通常被列入常规发电技术，业界仅把小水电归入可再生能源产业。

目前全球主要消耗化石能源资源,一方面,其不可再生的性质制约了常规能源利用的无限膨胀;另一方面,化石能源的使用与全球出现的温室效应等生态威胁有着密切的联系;加上全球人口的不断增加,能源需求大幅度增长,尤其是发展中国家工业化进程加快,对能源的需求越来越大。20世纪80年代以来,全球各国都在积极探求补充能源或替代能源,因此可再生能源逐渐为人们所重视。目前,许多国家已制定了有利于可再生能源产业发展的激励政策。世界能源大会资料表明,20世纪七八十年代可再生能源发电产业主要以研究和示范开发为主,20世纪90年代以后则逐步向产业化发展,开发利用规模日益增大,经济效益也明显上升。

从可持续发展方面来看,可再生能源具有以下几点共性:

(1) 资源丰富,可供人类持续利用。太阳能、生物质能、风能、地热能等可再生能源资源非常丰富,消耗后可再生,取之不尽、用之不竭,可供人类持续利用。虽然目前世界1/5的电力供应来自水力发电,但水资源与风能资源相比是相形见绌的。例如,美国的南达科他、北达科他和得克萨斯州的可开发风能资源可满足其全国电力需求。中国如能充分开发利用风能则可使目前的发电量增加一倍。

(2) 分布广泛,可就地开发利用。可再生能源遍布世界各个角落,凡有人类活动的地域均有一至数种可再生能源资源。

(3) 初始投资较高,但运行成本较低,一次性投资,长期受益。

(4) 对环境无影响或影响小。如风能、水能、太阳能、地热能等可再生能源开发利用过程中无污染物排放,不对环境造成任何不利影响,甚至能为可持续发展带来额外效益。以生物质能为例,生物质在生长过程中所吸收的二氧化碳基本等于带来额外效益。以生物质能为例,生物质在生长过程中所吸收的二氧化碳基本等于燃烧



时排放的二氧化碳，实现了二氧化碳的零排放。

另外，生物质能资源丰富、分布广泛，若能应用先进的转换技术，使它由“穷人的燃料”变成洁净、高效的能源，则有可能成为未来能源开发利用的新宠。联合国粮农组织从坚持可持续发展战略出发，提出了生物质能开发利用的新要领和发展战略。

(1) 生物质能有可能成为未来可持续发展能源系统的主角。到2050年，以生物质能为主的可再生能源将以等于或低于化石燃料的价格，提供世界60%的电力和40%的燃料。

(2) 生物质能从低效利用的“穷人燃料”变成高品位的现代能源。减排CO₂的重要途径之一是扩大生物质能的利用。到2025年，利用农、林、工业残余物以及种植和利用能源作物，能使全球CO₂排放量减少54亿t碳（目前全球化石燃料每年排放约60亿t碳）。

(3) 大规模植树造林和种植能源作物，有效利用农业、工业和城镇有机废弃物，可以促进生态良性循环，减轻土壤侵蚀和水土流失，保护生物多样性。

(4) 大力发展生物质燃料，可加快促进世界粮食生产，增加粮食产量，增加农村就业机会和农民收入，发展农村经济。

(5) 产业劳动密集程度高，有利于扩大就业机会，尤其可以提高当地农民收入，发展农村经济。

第 2 章 风能发电

风能源于太阳辐射使地球表面受热不均、导致大气层中压力分布不均而使空气沿水平方向运动所获得的动能。据估计，地球上可开发利用的风能约为 2×10^7 MW，是水能的 10 倍。近年来发电成本大幅下降，与传统化石能源发电的竞争力显著增强，逐渐成为可持续能源发展战略中重要的选择之一。

2.1 风能发电原理

风能发电是将风能转换为机械能进而将机械能转换为电能的过程。风能发电的基本工作原理为：风以一定的速度和角度吹动风力机叶片旋转，使风轮获得旋转力矩而转动，此时转速通常较低；风轮通过主轴连接齿轮箱，经齿轮箱增速后，将高速转轴连接到发电机转子并带动发电机发电，发电机输出端经过升压变压器后连接到电网中。

典型的风能发电系统结构如图 2-1 所示，其中包括风力机（叶片、轮毂等部分）及其控制器、转轴、换流器、发电机及其控制器

等，图中阴影部分表示某些机型没有该部件。风速作为风力机及其控制器的输入信号，风力机控制器将风速 v 与参考值进行比较，向风力机输出桨距角信号，调整输出机械转矩 T 和机械功率 P_w 。转轴输出的机械功率 P_w 输入到发电机中，发电机的输出功率 P_G 经过变频器输送到变压器中，最终输送至电网。

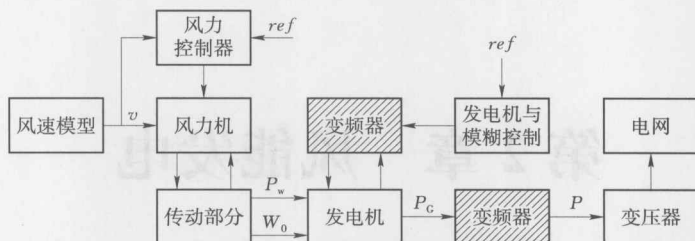


图 2-1 风力发电系统结构图

风力发电系统根据是否并网运行分为独立运行风力发电系统与并网运行风力发电系统，独立运行风力发电系统也称为离网型风力发电系统。离网型风力发电系统的单机容量较小（约为 $0.1 \sim 5\text{kW}$ ，一般不超过 10kW ），主要采用直流发电系统并配合蓄电池储能装置独立运行；并网型风力发电系统的单机容量较大（可达兆瓦级），且由多台风电机组构成风力发电机群（风电场）集中向电网输送电能。另外，中型风力发电机组（几十千瓦到几百千瓦）可并网运行，也可与其他能源发电方式相结合（如风电—水电互补、风电—柴油机组发电联合）形成微电网。

2.1.1 风能的计算

由流体力学可知，气流的动能计算公式为

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2-1)$$

式中 m ——气体的质量；

v ——气体的速度。

假设单位时间内气流流过截面积为 A 的气体的体积为 V ，则 $V = Av$ 。如以 ρ 表示空气密度，该体积的气流所具有的动能为

$$E = \frac{1}{2} \rho V v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2-2)$$

式 (2-2) 即为风能表达式。式中， ρ 、 V 、 v 均采用国际单位制，即各单位分别为 kg/m^3 、 m^3 和 m/s ； E 的单位是 W 。从风能公式可以看出，风能的大小与气流密度和通过的面积成正比，与气流速度的立方成正比。其中 ρ 和 v 随地理位置、海拔、地形等因素而变。 ρ 的标准值是 $1.225 \text{kg}/\text{m}^3$ ，在不同的地理位置需要进行校正。

2.1.2 风能的转化效率

贝兹理论是风力发电中关于风能利用效率的一条基本的理论，它由德国物理学家 Albert Betz 于 1919 年提出。贝兹理论假定风轮是理想的，气流通过风轮时没有阻力，气流通过整个风轮时其掠面是均匀的，并且气流通过风轮前后的速度为轴向方向。

风机吸收的能量并不能完全转化为驱动电机并最终转化为电能的机械能，其最大转换效率由贝兹理论推导得出。理论上，理想风轮在流动的大气中，将自然风转化成机械能的转换最大效率，即理论风能利用系数。

$$\eta_{\max} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (2-3)$$

转换效率随所采用的风力机和发电机的型式而异，风力机的实际风能利用系数 $C_p < 0.593$ (C_p 又称功率系数)，实际的功率输出为

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (2-4)$$

式中 ρ ——空气密度；



A ——扫略面积, $A = \pi R^2$;

R ——风轮半径;

v ——风速。

2.1.3 风力机功率输出特性

风能利用系数 C_p 和风轮机的叶尖速比 λ 是风力发电的重要参数。风能利用系数 C_p 表示风轮机从风中获得的有用能量的比例, 即风轮的实际输出功率与输入风轮面内的全部功率的比值。水平轴风轮机的 $C_p = 0.2 \sim 0.5$, 垂直轴风轮机的 $C_p = 0.3 \sim 0.4$ 。

$$C_p = P / 0.5 \rho A v^3 \quad (2-5)$$

风轮机叶片的风轮叶片尖端的线速度 ωR ($\text{rad} \cdot \text{m/s}$) 与风速 v (m/s) 之比称为叶尖速比 λ , 可用来描述风轮在不同风速中的状态。其表达式为

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{2\pi n R}{v} \quad (2-6)$$

式中 λ ——叶尖速比;

ω ——风轮在风速 v 时的旋转角速度, $\omega = 2\pi n$, rad/s ;

n ——风轮转速, r/s ;

R ——风轮半径, m 。

风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 和桨叶节距角 α 的函数。在 α 一定时, 风力机的 $C_p - \lambda$ 曲线如图 2-2 所示, 该曲线可通过计算或者实验得到。由图知, 对于一台特定的风力机, 在 α 不变时存在最佳叶尖速比 λ_{opt} , 并有最大功率系数 $C_{p\text{max}}$ 与之相对应, 此时风力机的转换效率最高。即对于一个特定的风速 v , 风力机只有运行在一个特定的转速 ω_m 下才会有最高的风能转换效率。

在不同风速 ($v_1 > v_2 > v_3$) 下风力机的输出功率特性如图 2-3

所示, P_{opt} 曲线是各风速下最大输出功率点的连线, 即最佳功率曲线。

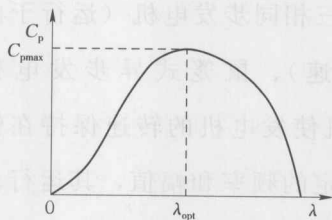


图 2-2 风力机的 $C_p-\lambda$ 曲线

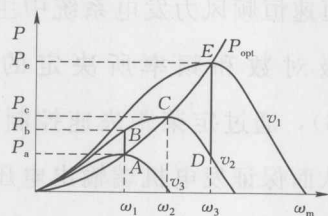


图 2-3 风力机的输出功率特性曲线

可以看出, 在同一风速下, 不同转速风力机输出不同的功率, 要想追踪 P_{opt} 曲线, 即使风能的转化效率最高, 必须在风速变化时及时调整转速 ω_m , 保持最佳叶尖速比。实际仿真分析时, 可假设 α 不变, 且各种风速下的功率系数都保持为 C_{pmax} , 即实现理想情况下的最大风能捕获。

$$P_{opt} = K\omega_m^3 \quad (2-7)$$

$$K = 0.5\rho(R/\lambda_{opt})^3 C_{pmax}$$

式中 ω_m ——风力机的角速度;

λ_{opt} ——最佳叶尖速比;

C_{pmax} ——与最佳叶尖速比对应的最大功率系数。

2.1.4 并网运行风力发电系统

并网型风力发电系统的基本原理可描述为: 风力发电机利用叶轮旋转, 从风中吸收能量, 将风能转化为机械能, 叶轮通过增速齿轮箱带动发电机旋转(直驱式风电系统无此环节), 发电机再将机械能转化为电能, 并入电网供用户使用。

并网型风力发电的频率应保持恒等于电网频率, 按其发电机运行方式可分为恒速恒频(Constant Speed Constant Frequency, CSCF)风



力发电系统和变速恒频 (Variable Speed Constant Frequency, VSCF) 风力发电系统两大类。

恒速恒频风力发电系统中主要采用三相同步发电机 (运行于由电机极对数和频率所决定的同步转速)、鼠笼式异步发电机 (SCIG), 通过定桨距失速控制的风轮机使发电机的转速保持在恒定, 从而保证发电机端输出电压具有恒定的频率和幅值, 其运行范围一般比较窄, 只能在一定风速下捕获风能, 发电效率较低。恒速恒频方式保持发电机的转速不变, 从而得到恒频的电能。恒速风力发电机的一个显著的缺点就是风速变化时, 风能利用系数 C_p 不可能保持在最佳值, 不能最大限度地捕获风能, 风能利用率不高。另外, 对恒速风机来说, 当风速跃升时风能将通过风力机传递给主轴、齿轮箱和发电机等部件, 在这些部件上产生很大的机械应力, 如果上述过程频繁出现会引起这些部件的疲劳损坏, 因此设计时不得不加大安全系数, 从而导致机组重量加大, 制造成本增加。

变速恒频风力发电系统, 是目前世界风力发电技术的发展方向。在这种系统中, 发电机一般采用永磁同步电机或者是双馈电机。通过变桨距来进行风轮的控制操作, 使整个系统在很大的速度范围内能够按照最佳的效率运行, 以达到最佳风能捕捉。可用于风力发电的变速恒频系统有多种类型, 例如交—直—交变频系统等。其中具有较强优势的主流机型有 4 种: 笼型异步风力发电系统、无刷双馈风力发电机系统、变速恒频双馈感应风力发电机系统和直驱型永磁同步风力发电系统。变速恒频风力发电是 20 世纪 70 年代中后期逐渐发展起来的一种新型风力发电技术, 其主要优点在于发电机以变速运行。由于工业控制领域交流电动机的调速技术在很多设备中已经得到了成熟的应用, 通过调节发电机转子电流的大小、频率和相