



国家电网公司
电力科技著作出版项目

可再生能源 与电网

【英】Godfrey Boyle 编译
中国电力科学研究院新能源研究所 译



中国电力出版社
www.cepp.com.cn





国家电网公司
电力科技著作出版项目

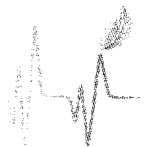
可再生能源 与电网

【英】Godfrey Boyle 编
中国电力科学研究院新能源研究所 译



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书翻译组成员名单



翻译人员 刘长浥 (原版前言及作者简介)

王伟胜 (第1章)

迟永宁 (第2章)

何国庆 (第3章)

石文辉 (第4章)

王晓蓉 (第5章)

刘 纯 (第6章)

秦世耀 (第7章)

李 琰 (第8章)

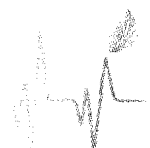
王 真 (第9章)

李 庆 (第10章)

赵海翔 (第11章)

审校人员 刘长浥 王伟胜

作者简介



Dennis Anderson 教授是伦敦帝国学院 (Imperial College, London) 从事能源及环境研究的名誉教授。他曾任世界银行能源顾问、壳牌石油公司总经济师及发电行业工程师。

David Andrews 是皇家特许工程师, 任 Wessex Water 能源经理达 10 年之久。他职业生涯的大部分时间从事能源专业工作, 专业特长是小型柴油机发电。

Mark Barrett 博士 2006 年起供职于伦敦帝国学院, 专业特长是建立能源、运输系统及大气排放的技术及经济模型。他曾为很多大学、产业及政府部门和环境组织做过工作, 并有自己经营的环境咨询机构——可持续环境咨询公司 (Sustainable Environment Consultants, SENCO)。

Ümit Cali 是获得 Kassel 大学理科硕士学位的电气/通信工程师。他于 2000 年在 Yildiz-Istanbul 技术大学完成了电气工程学士课程。现在他正在撰写风电预测系统的博士学位论文。他曾供职于位于伊斯坦布尔的 IBM 国际及 Sabanci 公司的通信部门。从 2002 年起, 他在德国 ISET (太阳能技术研究所) 开发部从事科研工作。他的主要研究方向是风电预测系统、测量数据分析和人工智能技术。

Bob Everett 是 Milton Keynes 电视大学可再生能源专业的讲师。他拥有剑桥大学机械与电气工程硕士学位, 并自学攻读电视大学的被动式太阳能博士学位。他具有电气和计算机建模的工作经验, 对不同容量的热电联产有较深研究。

Gregor Giebel 博士 11 年前就开始在 Risø 从事风电领域的工作, 现在是一名高级科技人员。他在 Oldenburg 大学获得博士学位, 论文方向是风电大规模并网和短期预测。此后他的主要工作领域是风电场功率短期预测及状态监测。他曾任欧盟资助的 CleverFarm 项目的协调员。在风电大规模并网领域, 他以自己在短期预测方面的知识参加了 WILMAR 及 TradeWind 项目。他现在主要在几个国内和国际项目中从事基于商业模式的短期预测工作。目前, 他担任欧盟资助的 POW' WOW (波浪、尾流和海上风电预测) 协调行动的协调员。

Tim Green 教授分别于 1986 年和 1990 年获得电气工程学士 (帝国学院) 和博士 (Heriot-Watt 大学) 学位。他从 1994 年起任职于伦敦帝国学院, 现在是电力工程专业的教授, 并任控制及电力研究组的副组长。他的专业研究方向是可再生能源评估及并网、分布式发电、用分布式发电改进电能质量及供电质量、灵活交流输电系统控制和 FACTS 元件开发。他是 IEE 会员、IEEE 高级会员和国际大电网会议第 14 工作组 (电压降落及电能质量) 成员。

Robert Gross 是伦敦帝国学院环境政策中心 (ICEPT) 的讲师, 英国能源研究中心技术及政策评估部的负责人。他是能源政策选项环境技术部帝国学院 MSc 的共同召集人之一, 曾承担各类组织和公司 [英国石油公司 (BP) 及几个电力机构, 联合国开发

计划署（UNDP）、世界银行、英国风能协会（BWEA）和绿色和平组织] 委托的研究和咨询项目。

Philip Heptonstall 的第一个学位是经济学。在伦敦集体保险市场担任 15 年商务分析师及项目经理后，他获得了帝国学院环境技术硕士学位，专业方向为能源政策。他现在是英国能源研究中心和 ICEPT 的助理研究员，UKERC 技术及政策评估部的首席研究员。

Paul Hughes 现在从事金融服务部门的数学建模工作。他先前几年曾供职于 Airtricity，任风能分析师。他最早毕业于 Maynooth 的爱尔兰国立大学，获实验物理及生物学学士学位。此后，他获得都柏林大学学院计算天体物理学的理学硕士学位。

Brian Hurley 从 20 世纪 70 年代早期起就从事风电技术的工作，同时还在都柏林技术学院教授工程专业课程。他是未来风能伙伴协会的 4 个创始成员之一。该协会后来改组为 Airtricity，是一个绿色电力企业。他现任 Airtricity 的首席科学家。

David Infield 是 Loughborough 大学电子与电气工程系可再生能源系统的教授。他 1978 年获博士学位，此后一直在可再生能源领域工作。在此期间，他的研究兴趣包括太阳热能系统设计、能源系统和光伏发电，其中的共同课题是可再生能源发电并网，特别是并入供电系统。

René Jursa 是一名物理学家，获有德国不来梅大学的理学硕士学位，从 2002 年起在 ISET（德国 Kassel 太阳能技术研究所）信息及能源经济开发部工作，专业领域是风电功率预测。大学毕业后，他在不来梅大学从事理论物理方面的工作，随后又在一家公司从事生物无机化学领域的工作。他的主要研究方向是神经网络、优化计算方法和信号处理方法。

Bernhard Lange 博士是 ISET 信息及能源经济开发部风电信息及预测系统负责人。他是一名物理学家，获有德国 Oldenburg 大学理学硕士学位，毕业后供职于丹麦 Risø 国家实验室和 Wind World 公司。1998 ~ 2002 年，他在 Risø 国家实验室和 Oldenburg 大学攻读海上风电气象学博士学位。最近 10 年他的主要研究方向是风电气象学、风电场建模和风电功率预测。

Michael Laughton 是伦敦大学电力工程名誉教授，他对电力系统分析有特别兴趣。他是《电力工程师参考手册》第 14 ~ 16 版（Newnes）的编辑之一，曾任英国议会上院和下院替代能源、可再生能源技术及节能委员会的专业顾问。他现任欧洲工程院能源委员会的英国代表，是皇家工程院能源及环境政策顾问组、皇家学会及机械工程学会电力工业分委会成员。

Matthew Leach 博士是 ICEPT 的高级讲师和副主任。他领导分散能源系统及城市可持续性方面的研究，并指导能源及环境方面的理学硕士研究生。Matthew 起初靠第一学位获得了工程师职称，他的研究包括公共基金和产业基金资助的能源及城市系统研究，内容包含技术、经济、环境科学及政策分析。作为 2003 年能源白皮书编撰工作进程的一部分，他曾为 DTI（英国贸易工业部）在 AEA（原子能管理局）技术部进行过低碳能源前景建模工作，并领导了后续 DTI 研究，总结了低碳技术成本的国际前景。他领导了为首相战略部进行的低碳技术总结工作及 DTI 可再生能源创新回顾的

热电联产方面的工作。此后，他连续担任了英国能源经济协会的主席和能源学会的副主席。

David Milborrow 是从事可再生能源工作近 30 年的独立咨询师。他曾在英国中央电力局供职，管理一项早期并网研究，并密切参与了英国一些早期风电场的开发进程。他从 1992 年起成为一位自由咨询师，现在的工作领域是与可再生能源（特别是风电）有关的经济技术问题。他担任过很多机构的技术顾问，为《风电月报》杂志撰写文章，为一些大学授课，专业领域是并网问题、海上风电和风电经济学。

Kurt Rohrig 博士是 ISET 信息及能源经济开发部负责人。他从 1991 年起在 ISET 工作，曾与大型输电企业合作，任大范围供电的风电在线监测及预测项目学术专责人。在他组织下开发的计算机模型和方法现在仍在风电占很大比重的德国各输电系统运营机构中运行。此外，Rohrig 博士还任“能源与通信”专题网的负责人。该网有来自企业、大学和研究机构的 12 个伙伴单位。

Florian Schlögl 是毕业于 Kassel 大学软件工程的机械工程师。在瑞典工作两年后，他从 2002 年起在 ISET 信息及能源经济开发部工作，主要开发用于输电系统运行中心的风电在线监测及功率预测的软件工具。

Graham Sinden 从事可再生能源（如风电、波浪、潮汐发电）的长期特性研究，以及资源可用性与电力需求的关系，可再生能源风电并入大型电网等。他曾在澳大利亚环境保护管理局进行过环境政策及环境科学研究工作。他现就职于牛津大学环境变化研究院，职位是英国贸易工业部可再生能源顾问局的顾问。

Jim Skea 教授是英国能源研究中心（UKERC）的研究主任。2004 年 UKERC 建立之前，他曾任政策研究所所长 6 年之久。他是启动低碳汽车伙伴（LowCVP）计划的重要人物。这是一个把产业界、学术界、非政府组织和政府部门聚拢到一起的一项行动和顾问团。他以前曾任经济社会研究会全球环境变化项目的主席和 Sussex 大学科技政策研究会（SPRU）的高级会员。他的主要研究领域有：能源/环境政策、可持续发展、气候变化、环境控制和技术变化，以及商务及环境的一般性问题。他也是苏格兰绿色能源联合会主席。

Fred Starr 博士现在是荷兰 Petten DG-JRC 能源研究院的访问学者。该研究院是欧洲委员会的研究基地之一。他现任该院煤炭制氢和发电工厂的设计顾问及欧盟热电联产导则的顾问。先前，他曾在英国燃气公司供职 30 年之久。在那里他曾启动斯特林机微型热电联产项目。最近他在专门从事高温材料研究的 ETD 公司工作。他的工作是总结蒸汽与联合循环燃气电厂循环问题。

Simon Watson 博士拥有伦敦帝国学院的物理学学位和爱丁堡大学博士学位。他的研究工作始于 Rutherford Appleton 实验室，工作内容是资源评估、风速预测和风电并网。1999 年，他转到绿色供电公司优质能源（Good Energy）工作。2001 年，他加入 Loughborough 大学可再生能源系统技术中心（CREST），现任 CREST 代理主任。他目前的研究方向是陆上风电、海上风电、城市风速预测、风电机组状态监测及气候变化对供电行业的影响。



译者前言

《可再生能源与电网》(Renewable Electricity and the Grid)原书为英文版,由 Earthscan 出版社于 2007 年在英国和美国同时出版,是一本论述可再生能源特性、给电网带来的挑战及其应对措施著作。我们决定将此书翻译出版的背景和意义在于:

(1) 大力开发利用可再生能源是落实科学发展观、建设资源节约型社会、实现可持续发展的基本要求,是保障能源安全、改善能源结构和保护环境的重要举措。进入 21 世纪之后,我国将可再生能源的开发利用列为能源发展的优先领域,包括风能、太阳能、水能、生物质能、地热能 and 海洋能等非化石能源。

(2) 电网在保证安全可靠供应电力的同时,还肩负着大范围、大规模和高效率配置能源资源的重要职责。电网已经成为当今社会最为重要的战略基础设施之一,直接关系到一个国家的能源安全与国民经济。为了保障更安全、更经济、更清洁、可持续的电力供应,需要建立坚强的电网,充分发挥电网的战略性和基础性作用。

(3) 由于可再生能源的自然属性,可再生能源的输出功率具有波动性和间歇性,对电网的规划和运行带来新的挑战。可再生能源接入电网问题已经成为全世界范围的热点问题,受到各国政府有关部门、电网企业、可再生能源开发商和发电设备制造商、科研咨询机构和高等院校的广泛关注。

本书从多角度全面地论述了可再生能源与电网问题,首先概述了可再生能源变化特性和电网,在此基础上介绍了电网中的风电,可再生能源特性与并网,可再生能源间歇性带来的成本和影响,风电功率预测。然后,结合可再生能源发电的需求,分析了化石燃料电厂的灵活性,事故备用柴油发电机的潜在作用,以及需求灵活性、微型热电联产和电网信息化等。接着简要介绍了英国可再生能源电力系统,以及欧洲电力供应、风电变化性和规划的海上电网。最后,从长远角度展望了真正的可持续能源系统所面临的挑战。

原书的作者包括 23 名科学家、教授和专家,他们从事的专业领域覆盖了能源工程、电气工程、环境工程、气象学、技术经济、可再生能源与分布式发电等。本书的特点是内容丰富,通俗易懂。全书既没有深奥的理论阐述,也没有复杂的数学公式,而是主要以文字和图表的形式来揭示可再生能源与电网的相关问题。

希望本书中文简体版的出版,有助于读者更加全面地了解可再生能源与电网的关系。这里需要特别指出:本书中的案例分析和基本结论依赖于英国的具体情况,不完全适合于我国。例如,我国电网建设长期滞后于电源建设,部分地区电网仍比较薄弱;我国东北、华北和西北地区风能资源丰富,风电场开发模式是大规模、高集中,风电功率需要通过超/特高压输电线路远距离输送至负荷中心;我国电源结构以火电为主,电网调峰问题较国外突出。

本书由中国电力科学研究院新能源研究所翻译，主要翻译和审校人员有王伟胜、刘长浥、赵海翔、刘纯、迟永宁、秦世耀、王晓蓉、李庆、李琰、石文辉、王真和何国庆。此外，范高锋、冯双磊和张利等也参与了部分翻译和校对工作。

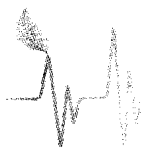
经中国科学院院士、中国电力科学研究院名誉院长周孝信先生和中国工程院院士、东北电网有限公司名誉总工程师黄其励先生的鼎力推荐，本书得到了中国电力出版社电力科技专著出版基金的资助，在此深表谢意。

最后，感谢中德风电研究与培训项目国际专家杜博斯（Andreas DuBois）先生的大力支持。杜博斯先生与本书主编 Godfrey Boyle 在多年前曾是同事，他将本书引荐给了我们，并在版权转让过程中给予了帮助。

限于译者水平，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

中国电力科学研究院 王伟胜

2010 年 10 月



原 版 前 言

很多可再生能源发电都表现出输出功率的变化性，这给工业化国家的联合电力系统保持供电安全带来一定挑战——特别是如果像人们广泛预计的那样，可再生能源的电力对电网的贡献达到很高比重时。这是一个重大的甚至不可克服的挑战，还是一个很容易解决的问题？这是本书要说明的关键问题。它还会衍生很多其他重大问题。

电力系统现在如何应对每时、每日和每季节都在变化的需求？如何应对偶尔发生的供电突然中断，例如因主力常规电厂事故导致的中断？可再生能源是间歇性的（通常描述为“变化的”）吗？

为给变化的可再生能源提供补充“备用（backup）”需要多少“可调度”发电容量（化石燃料发电容量或可再生能源发电容量）？“备用”应如何定义？最重要的是为电网频率提供短时控制的功率还是为年供电量或长期供电备用需求做出贡献的电量？风电对“可靠电力（firm power）”的贡献能达到什么程度从而符合“容量可信度”的要求？这一“容量可信度”如何随可再生能源占系统的比重变化？

常规电力系统中备用容量现在是多少？可再生能源比例加大时，它需要增加多少？这些备用电源的成本大概怎样？

将来可再生能源比例很高的系统需要什么类型的备用电源？对于可再生能源贡献增大，现有备用电源能在何种程度上适应这种情况？需要新的更灵活的发电形式吗？各类储能形式，包括现有的和正在产生的，将会起什么样的作用？

在帮助电力系统运营商调节其他电源与风电变化相配合方面，风电功率预测（短时和长期）会起什么样的潜在作用？在将来，通过其他可再生能源的贡献（如波浪和潮汐发电），风电变化性会在多大程度上得到缓解？在英国和欧洲其他国家，地理分布的分散性会在何种程度上降低可再生能源（如风电）的总体变化性？

在将来的“信息化”电网中，电力需求管理是否会起更重要的作用？我们能看到将来的电力系统中极高比例的电量，也许高达 95%，来自可再生能源吗？

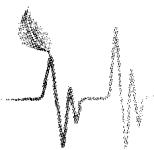
这些问题，当然还有很多其他问题，起初是本书的作者们在 2006 年电视大学一次重要会议上提出的。他们都把自己的会议演讲做了扩充，进行了深思熟虑的详细分析。可以预期，各位作者之间的观点和重点偶尔会有一定差别，有些方面还存在需要解决的分歧。但他们存在广泛共识，即在目前的电网穿透水平下，可再生能源的变化性还不是非常大的问题；但将来随着可再生能源发电比例的增加，这个问题必须得到

解决，因为电网、风电技术和负荷管理技术正在进化到更灵活、更复杂和更加可持续发展的模式。

电视大学

Godfrey Boyle

2007 年 7 月

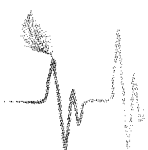


致 谢

感谢我在电视大学的同事 Claire Emburey, Angie Swain, Toni Thomas, Bob Everett 和 David Elliott, 他们帮助我组织了导致这本书产生的会议。感谢 Sally Boyle 重新设计了一些插图, 并感谢她多年的帮助和支持。

术 语 及 缩 写

AC 交流电	MAE 平均误差
AEY 年发电量	mb 毫巴
AGR 改进型气冷反应堆	ME 混合专家组
AI 人工智能	MOS 模型输出统计
ANN 人工神经网络	MSL 平均海平面
BETTA 英国电力交易及输电协议	MSW 城市固态垃圾
CCGT 联合循环燃气轮机	Mt 兆吨
℃ 摄氏度	MWkm 兆瓦千米
CF 容量系数	National Grid 国家电网上市输电公司
CEGB (英国) 中央电力局	NETA (英国) 电力交易新协议
CHP 热电联产	NGC 国家电网公司
CH ₄ 甲烷, 沼气	NGT 英国国家电网输电公司
CO 一氧化碳	NNS 最近邻搜索
CO ₂ 二氧化碳	NWP 数值天气预报
DC 直流电	OCGT 开环燃气轮机
DDC 动态需求控制	OPEC 石油输出国组织
DTI (英国) 贸易工业部	PIU 英国内阁办公厅绩效及创新组
DWD 德国气象服务局	PJ 拍焦 (10 ¹⁵ J)
EETS 能效交易规划	PSO 粒子群优化
EU 欧盟	PV 光伏发电
EU-15 欧盟 15 个成员国	PWR 压水反应堆
EWEA 欧洲风能协会	r 相关系数
GBSO 英国系统运营机构	REISI 互联网可再生能源信息系统
GJ 吉焦 (10 ⁹ J)	ROC 可再生义务证书
GW 吉瓦 (10 ⁹ W)	RMSE 均方根误差
GWe 吉瓦 (10 ⁹ W) 电功率	rpm 转每分
GWh 吉瓦·时 (10 ⁹ Wh)	SCAR report 可再生能源附加系统成本报告
H ₂ S 硫化氢	SNG 天然气替代品
HRSG 余热回收汽轮发电机	SPLD 系统尖峰负荷需求
HVDC 高压直流	SVM 支持向量机
Hz 赫兹	TSO 输电系统运营机构
IGCC 整体煤气化联合循环机组	TWh 太瓦·时 (10 ¹² Wh)
ISET (德国) 太阳能技术研究所	TWh/a 太瓦·时/年 (10 ¹² Wh/a)
LAM 局部区域模型	UKERC 英国能源研究中心
LNG 液态天然气	UTC 协调世界时
LOLE 电力不足期望值	WPD (英国) 西部配电公司
LOLP 电力不足概率	WPMS 风电管理系统



目 录

作者简介

译者前言

原版前言

致谢

术语及缩写

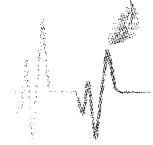
	1 可再生能源与电网：综述	1
1.1	引言	1
1.2	可再生能源的变化性	1
1.3	电网运行要求	8
1.4	风电穿透率增加时的基荷容量转移	10
1.5	结论	19
	参考文献	20
	2 风电对电网的影响	22
2.1	引言	22
2.2	电力系统运行	22
2.3	风的特性	25
2.4	管理含风电的电网	27
2.5	容量可信度	29
2.6	风能的总额外成本	31
2.7	风能占电源比重 20% 以上水平	33
2.8	国家和地区差别的影响	34
2.9	结论	36
	参考文献	36
	3 可再生能源的特性及其并网	39
3.1	引言	39
3.2	英国的可再生能源发电	39
3.3	可再生能源发电特性	41
3.4	可再生能源发电与负荷特性	44
3.5	风电在提高电网可用容量中的作用	47
3.6	结论	49
	参考文献	49

	4 英国能源研究中心：对间歇性的成本和影响研究的概述	51
	4.1 引言	51
	4.2 电力系统可靠性和运行	51
	4.3 误解和争论的来源	54
	4.4 影响和成本的定量结论	56
	4.5 研究结论总结	62
	参考文献	64
	5 风电功率预测	67
	5.1 引言	67
	5.2 风电功率预测的应用	68
	5.3 风电功率预测步骤	68
	5.4 数值天气预报	69
	5.5 功率输出预测的不同方法	70
	5.6 预测时间尺度	71
	5.7 区域外推	73
	5.8 平滑效应	76
	5.9 预测精度	76
	5.10 范例：风电管理系统（WPMS）	78
	5.11 预测精度“学习曲线”	80
	5.12 当前研究实例	80
	5.13 未来的挑战	83
	参考文献	83
	6 化石燃料电厂在可再生能源情景下的灵活性：对英国的可能意义	86
	6.1 引言	86
	6.2 英国现在的电厂系统	87
	6.3 先进的发电厂、节能和气候变化问题	88
	6.4 燃煤和燃气蒸汽发电厂的设计和运行	88
	6.5 现代电厂的伪间歇性	92
	6.6 对电厂元件与可靠性的影响	93
	6.7 间歇性与未来电厂	96
	6.8 结论	99
	参考文献	99
	7 紧急备用柴油发电机在应对可再生能源变化性方面的潜在贡献	101
	7.1 引言：Wessex 供水公司	101
	7.2 国家电网输电公司的频率服务	101

7.3	国家电网输电公司的备用服务	101
7.4	英国国家电网的备用发电容量	102
7.5	“三元组”：一个创收机会	103
7.6	其他效益：空载情况下测试柴油机组	104
7.7	结论	105
 8	需求弹性、微型热电联产与信息化电网	106
8.1	引言	106
8.2	需求	106
8.3	供给	107
8.4	计量和展望	109
	参考文献	109
 9	英国可再生能源发电系统	110
9.1	引言	110
9.2	情景分析	111
9.3	可持续电力系统	113
9.4	系统集成与优化	117
9.5	结论	124
	参考文献	128
 10	可靠电力、风的变化性和欧洲海上电网	129
10.1	风能资源分布	129
10.2	无风情况	130
10.3	海上分散式风电的可靠性	133
10.4	风电场输出功率预测的影响	135
10.5	新电网和风电场的输送成本估计	136
10.6	欧洲的结果	138
10.7	一个欧洲项目：全欧范围的超级电网	138
10.8	结论	142
	参考文献	142
 11	长期变化性规划：真正可持续能源系统的挑战	144
11.1	引言	144
11.2	可再生能源占主导地位的电源系统	144
11.3	储能和需求侧管理	146
11.4	结论和展望	149
	参考文献	150



可再生能源与电网：综述



Michael Laughton

1.1 引言

在所有国家的供电系统中，电力需求每天都在变化，并且每天 24h 内的电力需求也都有波动，通常夜间需求最小而白天需求最大。为评估可再生能源或其他能源对供电的贡献，必须明确区分电量和功率。在英国，尽管评价各发电厂商业化运营的指标是其总发电量，但作为英国电力系统运营商（GBSO）的国家输电公共股份有限公司（国家电网）负责中央电网的运行，其必须确保发出的功率（供电速度）与电力需求实时平衡，否则系统会发生故障。

为确保供电安全，需要对电网相关问题比对能源供应可用性问题有更深刻的理解。例如考虑在 1 年的时间里，自然变化的可再生能源当然能提供一定量的电量，但它们并不能保证在需要时一定能提供功率。为此，需要区分提供电量和提供功率的要求（能源领域的许多评论员和倡导者似乎很少提及），其意义在于提出与供电相关的问题，如电厂容量、发电负荷率、系统容量规划裕度、系统供电安全概率性指标和备用电厂要求等。

本章将从保证电网供电安全的角度进一步阐述上述问题。尽管强调可再生能源的困难和局限，但可再生能源肯定将成为未来电力行业中能源供应的重要角色。对于英国而言，随着对进口天然气依赖性的增加和将来火力发电厂及核电站的退役，情况更是如此。因此，出现的问题亟待解决——某些情况下需要进行更多研究，而其他情况下则靠技术开发。

1.2 可再生能源的变化性

1.2.1 可再生能源

表 1.1 根据能量转换和利用的不同方式，列出了用于发电的主要可再生能源。除了供热或制造化学品之外，发电是它们的主要用途。

表 1.1 用于发电的可再生能源

可再生能源
城市固体垃圾（MSW）
水电站：
• 大型
• 小型

续表

可再生资源
风力： • 陆上 • 海上
生物燃料： • 能源作物 • 林业废弃物 • 农业废弃物
波浪： • 海岸线 • 近海 • 海上
潮汐： • 河流 • 拦河闸
太阳能： • 光伏

来源：Tyndall 中心（2003）。

从电力系统运营商的角度看，可再生能源的变化性会影响供电，与之相关的问题如下：

- 虽然可用功率预测的不确定度随预测范围而变化，但在任意给定时刻可用功率预测的不确定度还是会导致调度困难。
- 输出功率波动幅度，其中小波动容易调节而较大波动需要特殊应对措施。
- 波动速度，其中资源可用性变化慢的输出功率通常可以预测，反之变化快的输出功率就难以预测。

此外，还要考虑电厂性能，如功率转换范围，即发电厂只能在一定的能量可用性范围内高效运行。

1.2.2 发电功率的变化性

从这些资源中分别获取的电气输出功率的变化特征之间差异明显。

（1）潮汐。潮汐能取自潮汐流或堤坝内的蓄水和放水，是最可预测的可再生能源形式。潮汐周期每天持续时间小于 12.5h，可以在落潮时发电，或在涨潮和落潮时都发电。另一种方式是在大潮时带抽水功能，供落潮时发电，如图 1.1 所示。对 Severn 河口潜在堤坝的研究表明，大潮时可以发电 5 ~ 6h，小潮时可以发电 3h 左右。这样，堤坝每天可进行两次总体上可预测但间歇的能量蓄积，其大小和时间遵循月运周期。

目前，波浪能技术尚不发达而且尚未采用，因此，在没有确切数据的情况下，只能推测波浪电站输出功率的变化性。不过，人们知道其变化性取决于当地和远方的天气条