国际电气工程先进技术译丛

风电并网：联网与系统运行

Wind Power Integration : Connection and System Operational Aspects

（英） Brendan Fox 等著
刘长浥 冯双磊 译
王伟胜 刘长浥 校



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

作者简介

贝尔法斯特女王大学的Brendan Fox和Damian Flynn在2000年用工程及物理研究会（EPSRC）的投资建立了一个“风电大规模联网运行(BLOWING)”工作组。这个BLOWING工作组汇聚了参加本书撰写的其他专家：北爱尔兰电力公司的Leslie Bryans在风电快速发展的网络规划方面经验丰富；曼彻斯特大学的Nick Jenkins是风电开发的全面专家；David Milborrow是咨询专家，从20世纪70年代起就致力于开发大规模风电；都柏林大学的Mark O'Malley和Rick Watson十多年来一直致力于电力系统和风力发电研究；格拉斯哥Strathclyde大学的Olimpo Anaya-Lara撰写了本书中变速风电机组的发展概论。



国际电气工程先进技术译丛

风电并网：联网与系统运行

（英）Brendan Fox　等著
刘长浥　冯双磊　译
王伟胜　刘长浥　校

机 械 工 业 出 版 社

本书全面介绍了大规模风电并网方面的知识及相关的主要问题，帮助读者了解风电并网的最新研究成果及运行经验，介绍与风电并网相关的主要电气、机械知识，使机械工程师可以学习到足够的电力工程知识，使他们可以理解风电场电压控制和故障穿越问题，而电气工程师可以从介绍的风电机组空气动力学知识中获益。本书是一本综合性地全面介绍风电场并网技术的专著，在我国风电迅速发展，大规模风电并网已成为一个重大关注问题的背景下，本书有重要参考价值。

本书适用于风力发电尤其是风电并网方面的基础研究、应用等方面的有关人员，包括研究、规划、设计、建设和运行人员；本书也适用于可再生能源有关专业的大学本科生和研究生，也可用于教学培训。

Copyright© 2007 The Institution of Engineering and Technology.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means whatsoever without written permission from the publisher.

The Chinese edition Copyright© 2011 by China Machine Press

本书中文简体字版由 IET 授权机械工业出版社独家出版。版权所有，侵权必究。

本书版权登记号：图字 01-2010-6644 号

图书在版编目（CIP）数据

风电并网：联网与系统运行/（英）福克斯（Fox，B.）等著；刘长浥，冯双磊译 . —北京：机械工业出版社，2011.7

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Wind Power Integration：Connection and System Operational Aspects

ISBN 978-7-111-35016-3

Ⅰ. ①风…　Ⅱ. ①福…②刘…③冯…　Ⅲ. ①风力发电 - 研究　Ⅳ. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 110228 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：付承桂　责任编辑：韩　静

版式设计：霍永明　责任校对：张晓蓉

封面设计：马精明　责任印制：杨　曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷169mm × 239mm · 14 印张 · 280 千字

0001— 3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-35016-3

定价： 68.00 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

社 服 务 中 心：（010）88361066　　门户网：http：//www. cmpbook. com

销 售 一 部：（010）68326294

销 售 二 部：（010）88379649　　教材网：http：//www. cmpedu. com

读者购书热线：（010）88379203　　**封面无防伪标均为盗版**

译 者 的 话

由于世界范围常规化石能源日趋枯竭和出于对环境污染日益增长的关注，世界上很多国家的政府都特别重视可再生能源的发展。我国已经把发展可再生能源提到战略高度来对待。自2006年1月1日开始实施《可再生能源法》以来，我国已成为世界上风力发电增长速度最快的国家，累计风电装机容量已从2005年底的1260MW，排名世界第八[㊀]，增长到2010年底的44733MW，排名世界第一[㊁]；五年增加了34.5倍，平均每年翻一番以上。

全球风能资源丰富，取之不尽又没有污染，技术也相对成熟，似乎只要风电装机容量足够多就可以解决电力乃至能源和环境问题。其实不然，风电还有它的另一面：它的能量密度较低，开发利用成本较高，其变化性和随机性（而且不易预测）使它难以驾驭，不能像常规发电方式那样可以根据需要加以调度。换言之，它在某种意义上还不能算是“可靠容量”，必须在相当程度上依赖于常规发电方式；它对电网的支撑能力差；而且对电网的电能质量也往往有不利影响，必须采取额外的技术手段解决，这也会加大它本来就较高的发电成本。因此，随着风电容量在发电构成中比重的加大，它对以常规发电方式为基础的电力系统会构成重大挑战，会产生很多我们不熟悉的新问题。风力发电技术发展的基本方向是要使它不仅能提供电量(这是到目前为止风电在电力系统中起的主要作用)，还要使它能（至少在一定程度上）如常规电厂一样对系统起支撑作用，如电压/无功功率支持、频率调节及容量备用等。只有有效解决这些问题，风电容量才能充分利用，风电才可能大规模健康发展。

本书全面介绍了大规模风电并网方面的知识及相关的主要问题，帮助读者了解风电并网的最新研究成果及运行经验，介绍与风电并网相关的主要电气、机械知识，如电气工程师可能不太熟悉的风电机组空气动力学知识，机械工程师可能不太熟悉的电力工程学知识。本书是一本综合性地全面介绍风电场并网技术的专著，在我国风电迅速发展，大规模风电并网已成为一个重大关注问题的背景下，本书有重要参考价值。本书各章节的内容在原书前言中有全面介绍，这里不再赘述。

本书由B. Fox、D. Flynn、L. Bryans、N. Jenkins、D. Milborrow、M. O'Mal-

---

㊀ 见GWEC《Global Wind 2005 Report》。

㊁ 见中国可再生能源学会风能专业委员会《2010年中国风电装机容量统计》。

ley、R. Watson 和 O. Anaya-Lara 八位作者合作编写。他们都是供职于爱尔兰共和国（以下简称爱尔兰）和英国的大学和研究机构的风力发电方面的专家。贝尔法斯特女王大学的 B. Fox 和 D. Flynn 在 2000 年发起建立了一个“风电大规模联网运行”的工作组，他们通过这个工作组汇聚了参加本书撰写的其他专家：北爱尔兰电力公司的 L. Bryans 在风电快速发展的网络规划方面经验丰富；曼彻斯特大学的 N. Jenkins 是风电开发的全面专家；D. Milborrow 是咨询专家，从 20 世纪 70 年代起就致力于开发大规模风电；都柏林大学的 M. O'Malley 和 R. Watson 十多年来一直致力于电力系统和风力发电研究；苏格兰格拉斯哥 Strathclyde 大学的 O. Anaya-Lara 撰写了本书中变速风电机组的发展概论。

本书适用于风力发电尤其是风电并网方面的基础研究、应用等方面的有关人员，包括研究、规划、设计、建设和运行人员；本书也适用于可再生能源有关专业的大学本科生和研究生，也可用于教学培训。

需要指出的是，本书列举的实例大部分是以欧洲特别是爱尔兰为背景，而我国的电力系统和风电发展状况与欧洲有很大差别。无论是电网规模还是覆盖的地理范围，我国都远大于爱尔兰；而风电资源与负荷分布的不平衡状况则远比欧洲严重；而且我国近年来风电超常规发展，相比之下相应的电网发展则严重滞后，也就是说，我国风电并网问题的挑战要比欧洲及爱尔兰大得多。当然，书中论述的原理也适用于我国，只是解决这些问题的方案可能会更加复杂。

本书译校人员都来自中国电力科学研究院新能源研究所，具体分工为：刘长浥翻译前言、第 1～5 章、第 7 章和附录，冯双磊翻译第 6 章，王伟胜、刘长浥统稿并校对。限于译者的水平，译文中难免有不准确甚至错误的地方，请读者批评指正。

译　者

2011 年 4 月

前　言

促使我们撰写本书的推动力量是风力发电的快速发展及它对未来电力系统的规划、运行及控制的意义。它对20世纪90年代以前还是垂直组合的电力公司本来就会是一个重大的挑战。在如今的自由化电力市场条件下，它的挑战性就更加强烈。本书的目的是考察风力发电大规模并网的主要问题，然后作者们根据目前最新的风电并网研究及运行经验，以他们的知识和专业经验帮助引导读者，给出解决方法。

本书的背景是英国政府（以及大部分欧洲国家政府）承诺到2010年可再生能源发电达到10%的目标，到2020年更达到20%的“雄心勃勃”的目标。风力发电的成本一直在显著下降，从而带来能源成本的降低。在平均风速为8m/s及以上的地方，如在大不列颠和爱尔兰的大部分地区，风力发电成本的降低已经使风电几乎可以与联合循环燃汽轮机（CCGT）发电竞争，而且没有长期可用性与成本方面的问题。它的劣势在于它在电力系统运行期间的供电能力难以预测。无论如何，风电都不能提供“可靠容量”，因此从商业角度来说，它在市场上要受到像BETTA（英国电力交易及输电规定）这样的规定的限制。但另一方面，形式为可再生能源义务证书（ROC，Renewable Obligation Certificate）的绿色激励措施也给风力发电机带来可观的额外收入。它鼓励越来越多的开发商进入这一领域，这表明10%的目标是可以达到的。确实，德国、西班牙和爱尔兰的风电渗透水平已经达到5%左右，而丹麦在几年前就已经达到了20%。

本书试图为各个不同专业的工程师在风电并网的所有主要方面都提供坚实的基础知识。机械工程师可以学习到足够的电力工程知识，使他们可以理解风电场电压控制和故障穿越问题；而电气工程师可以从介绍的风电机组空气动力学知识中获益。他们都需要理解电力市场，尤其是风电如何交易。

第1章介绍20世纪90年代以来风电的重大发展，概述获取风电的各个技术选项，还说明风电大规模并网可能带来的问题，并概述可能的解决方法。第2章主要论述电力工程的基础知识，使非电力专业的工程师能理解本章和第4章说明的概念。第3章介绍风力发电机技术，重点介绍目前的变速风电机组设计。第4章介绍风电场联网及联网对电网设计的影响——这是一个应对变速发电机尚缺乏确定方法的领域。

第5章介绍在风电功率很大程度上不可预测而且控制范围有限的情况下，电力系统运行的关键问题。储能可以提供一个很诱人的解决方法：这里的问题主要是如何确定切实可行、低成本的选项并假定使用现有的抽水蓄能电站。第6章主要介绍风电功率预测的重要性，介绍了近十年来在这一领域所取得的令人鼓舞的进展。组合预测法是一种有用的运行工具，至少可以为系统运营商提供预测可靠性的指标。最后，第7章归纳电力市场的主要类型，讨论了风电交易的前景，解释并讨论了支持可再生能源的主要方案。

本书的大部分内容来自作为工程及物理研究会（EPSRC，Engineering and Physical Research Council）的一部分，“风电大规模入网情况下的系统运行”网络组织的多个工作组。这个网络后来被简称为BLOWING（Bringing Large-scale Operation of Wind power Into Networks and Grids，风电大规模入网情况下的系统运行）网络。本书反映了很多涉及作者和网络成员的活跃讨论。这些成员里我们要特别提到Graeme Bethurst、Richard Brownsword、Edward Clarke、Ruairi Costello、Lewis Dale、Michael Farrell、Colin Foote、Paul Gardner、Sean Giblin、Nick Goodall、Jim Halliday、Brian Hurley、Michael Jackson、Daniel Kirschen、Lars Landberg、Derek Lumb、Andy McCrea、Philip O'Donnell、Thales Papazoglou、Andrew Power和Jennie Weatherill。Janaka Ekanayake、Gnanasamnbandapillai Ramtharan和Nolan Caliao帮助撰写了第3章。我们还要提到Shashi Persaud博士，20世纪90年代后期他在女王大学攻读博士学位期间的研究对提出网络建议起了很大作用，而且他后来又一直帮助进行网络管理。

B. Fox，贝尔法斯特

2006年11月

缩　略　语

AC	Alternating current	交流电
AWPT	Advanced Wind Prediction Tool	高级风电功率预测工具
BETTA	British Electricity Trading and Transmission Arrangement	英国电力交易及输电协议
CCGT	Combined cycle gas turbine	联合循环燃汽轮机
DC	Direct current	直流电
DFIG	Doubly-fed induction generator	双馈感应发电机
DSO	Distribution System Operator	配电系统运营商
DTI	Department of Trading and Industry (UK)	贸易与工业部（英国）
EMS	Energy management system	能源管理系统
FACTS	Flexible alternating current transmission system	灵活交流输电系统
GTS	Global Telecommunication System	全球通信系统
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model	高分辨率有限区域模型
HV	High voltage	高电压
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor	绝缘栅双极型晶体管
ISO	Independent System Operator	独立系统运营商
LDC	Line drop compensation	线路电压降补偿
MAE	Mean absolute error	绝对平均误差
MOS	Model output statistics	模型输出统计
NETA	New Electricity Trading Arrangement (BETTA's predecessor)	电力交易新规定 (BETTA 的前身)
NFFO	Non-fossil fuel obligation	非化石燃料义务
NWP	Numerical weather prediction	数字天气预测
OCGT	Open cycle gas turbine	开环燃气轮机
OFGEM	Office of Gas and Electricity Markets (UK)	天然气及电力市场管理局 (英国)
PFCC	Power factor correction capacitance	功率因数校正电容
PI	Proportional + integral	比例积分
PWM	Pulse width modulation	脉宽调制

RAS	Remedial action scheme	补救行动方案
RMSE	Root mean square error	方均根误差
ROC	Renewable obligation Certificate	可再生能源义务证书
ROCOA	Rate of change of angle	角度变化率
ROCOF	Rate of change of frequency	频率变化率
SCADA	Supervisory, control and data acquisition (system)	监控及数据采集系统
SDE	Standard deviation of errors	误差的标准偏差
SEM	Single Electricity Market (Ireland)	单一电力市场（爱尔兰）
STATCOM	Static compensator	静态补偿器
SVC	Static var compensator	静态无功补偿器
TSO	Transmission System Operator	输电系统运营商
UTC	Co-ordinated Universal Time	协调世界时
VIU	Vertically integrated utility	垂直组合电业部门
VSC	Voltage source converter	电压源变换器
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program	风资源地图分析及应用程序
WPPT	Wind Power Prediction Tool	风电功率预测工具
WTG	Wind turbine generator	风力发电机

目　　录

译者的话
前言
缩略语
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　概论 …… 1
1.2　世界能源状况和气候变化 …… 1
1.2.1　可再生能源 …… 2
1.3　风力发电 …… 4
1.3.1　背景 …… 4
1.3.2　风电机组容量和出力的变化 …… 5
1.3.3　发电量 …… 5
1.4　设计选项 …… 6
1.4.1　叶片 …… 6
1.4.2　控制和传动系统 …… 7
1.4.3　主要设计选项小结 …… 7
1.5　风电场 …… 8
1.5.1　海上风电场 …… 9
1.6　经济性 …… 9
1.6.1　风电机组价格 …… 9
1.6.2　发电成本 …… 10
1.6.3　二氧化碳减排 …… 11
1.7　并网和变化性：关键问题 …… 12
1.7.1　风电的波动性 …… 12
1.7.2　容量可信度 …… 13
1.7.3　嵌入式发电的效益 …… 14
1.7.4　储能 …… 15
1.8　将来的发展 …… 15
1.8.1　技术方面 …… 15
1.8.2　未来价格趋势 …… 16
1.8.3　市场发展 …… 16
1.8.4　并网问题 …… 16

第 2 章 电力系统基础知识 …… 17
2.1 引言 …… 17
2.2 基本原理 …… 17
2.2.1 电磁学 …… 17
2.2.2 磁路 …… 19
2.2.3 电磁感应 …… 20
2.2.4 供电 …… 20
2.2.5 变压器 …… 21
2.3 交流供电 …… 23
2.3.1 稳态交流系统功率 …… 23
2.3.2 相量 …… 25
2.3.3 交流系统的功率 …… 27
2.4 电力系统简介 …… 28
2.4.1 三相系统 …… 28
2.4.2 单相系统与三相系统的比较 …… 28
2.4.3 三相供电 …… 30
2.4.4 平衡星形接线负载 …… 30
2.4.5 平衡三角形接线负载 …… 31
2.4.6 一些有用的惯例 …… 32
2.4.7 复功率 …… 32
2.4.8 等效单相法 …… 33
2.4.9 标幺值系统 …… 33
2.5 输电 …… 35
2.5.1 线路参数 …… 36
2.5.2 线路模型 …… 38
2.5.3 输电功率 …… 39
2.5.4 电压调节 …… 40
第 3 章 风电技术 …… 42
3.1 引言 …… 42
3.2 风电技术的历史回顾 …… 42
3.3 大型风力发电机的设计选择 …… 43
3.4 获取能量和功率控制 …… 45
3.4.1 风轮扫掠面积上获取的能量 …… 45
3.4.2 功率控制 …… 47
3.5 定速风电机组 …… 50
3.5.1 感应（异步）发电机概述 …… 50
3.5.2 基于感应发电机的定速风电机组 …… 55
3.6 变速风电机组 …… 57

3.6.1 双馈感应发电机风电机组 …… 58
3.6.2 大范围变速同步发电机风电机组 …… 61
第 4 章 风电并网 …… 69
4.1 引言 …… 69
4.2 风电场启动 …… 69
4.3 电网电压管理 …… 70
4.3.1 电压等级问题 …… 71
4.4 热效应/有功功率控制 …… 82
4.4.1 规划方法/标准 …… 82
4.4.2 风电场联网问题 …… 83
4.4.3 主干系统问题 …… 84
4.4.4 设备问题 …… 85
4.5 电网电能质量管理 …… 86
4.5.1 电压降落 …… 86
4.5.2 谐波 …… 86
4.5.3 闪变 …… 87
4.6 系统暂态性能 …… 87
4.6.1 频率性能和动态响应 …… 87
4.6.2 暂态响应 …… 89
4.7 故障水平问题 …… 93
4.7.1 设备通流能力 …… 94
4.8 信息 …… 95
4.9 保护 …… 95
4.9.1 系统保护 …… 95
4.9.2 与输电系统相连的风电场 …… 96
4.9.3 与配电系统相连的风电场 …… 98
4.9.4 风电场保护 …… 99
第 5 章 电力系统运行 …… 101
5.1 引言 …… 101
5.2 负荷-频率控制 …… 101
5.2.1 发电机组的负载-频率控制 …… 105
5.2.2 频率紧急控制 …… 107
5.3 含风电系统的运行 …… 111
5.3.1 风电的系统运行问题概述 …… 111
5.3.2 爱尔兰的风力发电 …… 114
5.3.3 系统运行和风的变化性 …… 126
5.3.4 系统运行模式 …… 134
5.3.5 容量可信度 …… 140

5.3.6 提供辅助服务 …… 142
5.3.7 风力发电机的惯性响应 …… 149
5.3.8 分布式发电的保护 …… 152
5.4 储能/负荷灵活管理 …… 154
5.4.1 常规储能 …… 155
5.4.2 需求侧管理 …… 158
5.4.3 氢气储能 …… 160
第6章 风电功率预测 …… 164
6.1 引言 …… 164
6.2 气象背景 …… 165
6.2.1 气象、天气与气候 …… 165
6.2.2 大气结构与尺度 …… 165
6.3 数值天气预报 …… 166
6.4 持续预测 …… 168
6.4.1 误差指标 …… 168
6.4.2 参考模型 …… 171
6.5 高级风电功率预测系统 …… 175
6.5.1 Predictor …… 178
6.5.2 统计模型 …… 182
6.5.3 集合预报 …… 186
6.6 结论 …… 187
第7章 风电和电力市场 …… 188
7.1 引言 …… 188
7.2 电力市场 …… 190
7.3 平衡、容量及辅助服务 …… 191
7.4 支持机制 …… 193
7.5 成本 …… 194
7.6 投资和风险 …… 196
7.7 未来展望 …… 197
附录 FACTS 技术 …… 199
参考文献 …… 204

第1章　绪　　论

1.1　概论

可再生能源发展的主要动力来自人们对全球变暖的日益增长的关注，人们采用很多政策来鼓励发展无碳技术。这里要对它们做一个简单概述。毫不奇怪，发展最迅速的地方就是补贴最慷慨的地方，如加利福尼亚（在早期）、丹麦、德国和西班牙。

本章概述了可再生能源技术的属性，包括将来可能得到商业发展的那些技术。然而，风力发电在过去10多年里保持了25%的复合增长率，目前的总装机容量已经超过60000MW。随着技术的发展，风力发电的可靠性提高了，发电成本降低了，从而取得了与其他热力能源和可再生能源并列的地位。

“如果不刮风会怎么样?”这样的问题是对风力发电的一个直觉反应，但这个问题过于单纯化。对整个电力系统而言，运营商关注的问题是风电引入的不确定性。现在一些研究已经对间歇性的成本做了定量，这一成本是适度的，而且这些研究也明确表明，风电可以替代常规的火电容量。

尽管并网发电的风电机组的直径已经接近100m，单机容量已经达到5MW，而且人们还在开发更大的风电机组，但离网的风电机组却小得多，而且它们成功的商业使用标准也不相同，因为它们需要输入燃料，所以发电成本经常很高。

在将来，海上风电可能会扮演越来越重要的角色，原因之一是它可以降低环境影响。在丹麦、德国、爱尔兰及英国等国家，人们一直积极开发海上风电，而且很可能对一直强劲增长的风电装机容量做出重要贡献。到2013年，海上风电装机容量可能达到200000MW。

1.2　世界能源状况和气候变化

全世界的一次能源需求从1971年到2003年几乎翻了一番，而且预期到2020年还要再增长40%。过去30年里，能源明显从石油向天然气转移。在2003年，全世界范围内，天然气已经占一次能源消费的21%，占发电用一次能源的19%［国际能源署（IEA，International Energy Agency），2005］。

用于取暖和发电时，天然气产生的二氧化碳少于煤炭和石油，因此过去30年

里，二氧化碳排放的增加与能源需求的增长之间并不相当，而大约只有它的70%。然而，由于对全球变暖问题日益增长的关注，世界各国政府开始讨论降低二氧化碳排放的方法。在联合国的支持下，国际气候变化谈判一直在进行，而且1997年12月在京都的一次关键会议上，各方达成了（从1990年到2008年12月的目标日期窗口）全球降低温室气体5%的总体目标，并设定了各自的国家目标。在俄罗斯于2004年11月批准了该议定书之后，2005年2月16日，京都议定书最终成为有法律约束力的文件。

欧盟承担的义务是降低排放8%，并在其成员国之间达成了目标分配协议。英国承诺在同一期间降低排放12.5%。可以指出，英国政府在1997年的一项宣告中也承诺在同一期间降低二氧化碳排放20%。

1.2.1　可再生能源

2003年，可再生能源在全世界的一次能源中占的比重为13.5%（水电占2.2%，可燃可再生能源及废弃物占10.8%，地热、太阳能和风能占0.5%）。因为有相当多的可燃可再生能源用于供热，所以它们在发电方面的贡献与以上数字有一定差别：水电贡献为15.9%，地热、太阳能、风能和可燃可再生能源的贡献为1.9%。全世界的水电装机容量已超过800GW，而发展迅猛的风力发电在2005年底装机容量约为60GW。尽管水电装机有相当数量处于发展中国家，但发达国家的多数可再生能源工作集中于风电、太阳能和生物质能技术。2003年，全世界的水力发电量为2654TWh，而其他可再生能源的发电量为310TWh。

并不存在限制继续开发水力发电的技术和经济原因，但大规模开发水电需要大量土地建设水库，而这种地点经常很难找到。因此，大规模开发水电通常不能进入大部分可再生能源支持机制的保护伞之下。而小规模开发，包括径流式方案通常会得到支持，但这样的发电成本通常较高——通常为5p/kWh[⊖]以上。拦潮闸技术的进一步开发也可能因同样的理由受到限制，尽管这一技术已为人们充分了解并得到证实。另一方面，潮汐流技术还是一项较新的技术，它要使用水下涡轮机利用潮汐流能量，在概念上与风力涡轮相似。它是欧盟进行的研究活动的重点，它的原型机目前正在试验。波浪能也处于类似的开发阶段，它的研究工作正在经济合作及发展组织（OECD，Organisation for Economic Co-operation and Development）内进行，很多原型装置目前都在试验中。

1.2.1.1　支持机制

尽管某些可再生能源能够或已经可以与化石能源进行商业竞争，但它们的新兴状态通常都要通过各种支持才能得到普遍承认。在过去10年左右，出现了各种支持体系：

⊖　p——便士，英国货币单位，1便士等于0.01英镑。——译者注

- 资本金补贴：这种机制至少部分支持了 20 世纪 80 年代早期加利福尼亚风电的飞速发展（慷慨的发电量补贴也是一项助长因素）。资本金补贴在欧洲也出现过，但现在已经很少见。
- 某些欧洲国家通过标准发电电价支付体系支持可再生能源，通常是消费电价的某个百分数。在这些机制中，德国和丹麦的机制对市场的刺激非常有效。德国的风电支持机制现在已经非常复杂，甚至适用到具体场址的风速。
- 竞争性投标：可以以英国的非化石燃料义务法（NFFO，Non-Fossil Fuel Obligation）为例。开发商以他们可以承受的电价竞标，投标电价需要低于政府设定的对于相应装机容量的限值，中标者这时可以获得长期合同。这种机制在英国经历了很多变化，并为法国和爱尔兰所仿效。
- 电价部分补贴：美国的发电税收抵免是这种方法的一个范例；成功的可再生能源项目可以享受每单位发电量 0.018 美元的补贴。
- 义务：美国的可再生能源配额制（Renewables Portfolio Standard）和英国的可再生能源义务法（Renewables Obligation）是这种方法的典型。它实质上是要求，到规定日期，电力供应商使用可再生能源发出的电量必须达到规定的百分数。不能满足这一要求的供应商受到的惩罚即所谓收购支付（buy-out payment）。

标准支付通常在鼓励发展方面比较成功，尽管它在降低电价上激励不够有力（目前德国的激励体系试图用逐年减少支付的方法克服这一缺点）。竞争性方案，如 NFFO，在鼓励发展方面有时不够成功，但英国的 NFFO 在降低电价上却非常成功。

1.2.1.2　英国的可再生能源：装机容量和目标

英国政府引入了一系列旨在降低温室气体排放的措施，包括征收气候变化税、提高能效措施，以及在其他部门（如运输和农业）的主动行动。可再生能源的目标是，到 2010 年，可再生能源发电量达到 10.4%，并规定了达到这一目标的逐年规划。欧盟推动可再生能源发电的条例草案也对英国提出了同样的（非约束性的）目标。

电力供应商可以通过以下各种手段的组合来履行他们的义务：

- 直接用可再生能源发电厂供电。
- 单独购买可再生能源义务证书（ROCs，Renewable Obligation Certificates），所含电量应等于它们应履行的份额。
- 向监管部门支付收购价（buy-out price）。英国天然气及电力市场管理局（OFGEM，Office of Gas and Electricity Markets）起初规定的收购价是 3p/kWh。

英国贸易和工业部（DTI，Department of Trade and Industry）期望收购价会成为市场价（由于它缺乏流动性），并估计这一义务的成本最终可达到约每年 10 亿英