国际电气工程先进技术译丛

风电场并网稳定性技术

Stability Augmentation of a Grid-connected Wind Farm

（孟加拉） S M Muyeen
（日本） Junji Tamura 著
Toshiaki Murata
李 艳 王立鹏 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书特色

本书介绍了一种稳定风电场功率输出的通用方法，这其中包括了恒速和变速两种风力发电机组构成的系统。本书提供了一个适用于风电场建模和控制策略分析的工具，具体提出了一种采用储能装置减小风电场输出功率和输出端电压波动的新方法，同时讨论了该系统瞬态稳定性的提高方法。本书还提供了进行系统建模和控制器设计的先进仿真工具，同时给出了仿真结果。

国际电气工程先进技术译丛

风电场并网稳定性技术

（孟加拉） S M Muyeen
（日本） Junji Tamura
Toshiaki Murata
著
李 艳 王立鹏 等译

机 械 工 业 出 版 社

本书提出了提高风电场并网稳定性的方法，它从机械和电气两方面入手，对风力发电机组进行了深入细致的研究：机械方面，重点体现在传动链的模型和桨距控制等方面的改进；电气方面，主要介绍了适用于风电场的各种控制方法。本书对恒速风力发电机组、变速风力发电机组、桨距控制器和氢能发生器等进行了详细的介绍，并且对超导储能、电容器储能、飞轮储能、静止同步补偿器/蓄电池等储能装置在风电场中的应用进行了深入探讨。

本书适用于在风力发电技术领域工作的工程技术人员、科研人员、在校学生，也适用于具有良好的数学和物理基础的、任何想成为风电专家的人。

Translation from the English language edition:"Stability Augmentation of a Grid-connected Wind Farm" by S M Muyeen, J Tamura and T Murata; ISBN 978-1-84800-315-6.

Copyright © 2009 Springer-Verlag London Limited, as a part of Springer Science+Business Media. All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 出版社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：01-2009-4155 号

图书在版编目（CIP）数据

风电场并网稳定性技术/（孟加拉）幕延（Muyeen，S M）等著；李艳等译．—北京：机械工业出版社，2010.10

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Stability Augmentation of a Grid-connected Wind Farm

ISBN 978-7-111-31775-3

Ⅰ.①风… Ⅱ.①幕…②李… Ⅲ.①风力发电—研究 Ⅳ.①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 173234 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：牛新国 顾 谦 责任编辑：顾 谦

版式设计：霍永明 责任校对：刘怡丹

封面设计：马精明 责任印制：杨 曦

北京双青印刷厂印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 12.5 印张 · 239 千字

0001— 3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-31775-3

定价：58.00 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

社服务中心：(010)88361066

销 售 一 部：(010)68326294

销 售 二 部：(010)88379649

读者服务部：(010)68993821

网络服务

门户网：http：//www.cmpbook.com

教材网：http：//www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

译 者 序

随着《可再生能源法》以及相关配套法规的制定、颁布和实施，我国风电行业迎来了发展的春天。6年来，我国风电装机容量每年都增加100％左右，已经提前3年并超额完成了“十一五”规划的风力发电装机目标。2008年我国新增风力发电装机容量为6153.7MW，2009年新增风力发电装机容量为13803.2MW。截止到2009年底，我国总风力发电装机容量为25805.3MW，仅次于美国，居世界第二。

风能是不可控、间断、随机的，大规模风电并入电网后，必须解决电量消纳问题。当风电场满发时，当地电网不能完全消纳，多余的电力如何处理。当风电场出力很小、甚至为零时，当地电网是否有足够的备用机组能保证负荷用电需要。这里带来的电力调度、电力调峰、电力储存等问题，是全新的问题。

风电场多处偏远地区，一般接于电网末端，使系统潮流发生了改变，影响了电网的稳定性。现有电网在规划之初没有考虑风电的接入，接入风电后，风电场附近的电压和功率可能超出安全范围。

风能的不确定性和风力发电机组并网运行特性会影响电网电能质量，主要表现为电压波动、电压闪变、电压偏差及谐波。当风力发电机组切入和切出时，会对电网造成一些冲击；风速变化和风力机的塔影效应都会导致风力发电机组输出功率的波动，其波动正好处于能够产生电压闪变的频率范围之内。风力发电机组本身配备的电力电子装置，可能给电网带来谐波污染。

从现阶段的情况来看，风电有功功率即负荷调节问题是制约风电接入电网的主要因素，是首先面临并必须解决的主要问题。本书介绍的电能储存如氢气储能、电容器储能等是解决负荷调节问题的有效手段，利用储能技术可以解决电力调度、电力调峰等问题。本书的第5章～第7章详细介绍了这些储能装置及其控制策略。

本书的第3章介绍的桨距控制器可以平滑风力发电机组的输出功率，第4章介绍的静止无功补偿装置和第8章介绍的变速风力机驱动的永磁同步风力发电机组可以改善风电场的电能质量，并提高电网系统稳定性。这些技术可以解决由于风电并网引起的诸多问题，如电网的无功功率调节、动态与静态稳定性、谐波干扰、闪变等。

风电大规模接入电网，必然会引起大量的技术问题。不少电网公司已经把风电接入问题提上重要议程，开始研究、部署并展开行动，实现风电场与电网和谐

发展、互利共赢，但是目前国内这方面的参考文献很少，本书正好填补了这个空白。本书的研究内容，无论在理论上还是在实践上，对风电的发展都有重要的意义，因此翻译本书是非常必要的。

除此之外，我国的风力发电行业正处在快速发展时期，翻译本书旨在将国外先进的风力发电技术介绍给国内读者，为在风力发电技术领域工作的工程技术人员、科研人员、在校学生提供一本有价值的参考书。虽然，在现有的风电方面的书籍中，也有部分章节中介绍了并网稳定性技术，但只是泛泛的论述，到现在为止还没有一本专门的关于风电场并网稳定性技术的书籍。从论述的视角来看，本书采用理论和仿真相结合的方法，具有方便读者理解的特点。

本书的翻译工作是由北京交通大学电力电子研究所联合南车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部完成的。具体承担翻译工作的人员如下：第1章由巫发明翻译，第2章由王靛翻译，第3章由阮向艳翻译，第4章由刘红文翻译，第5章、第6章由李艳翻译，第7章由王立鹏翻译，第8章由唐建平翻译。全书由李艳统稿，王立鹏校核。

由于时间仓促以及个人能力有限，翻译中必然存在疏漏之处，请读者指正。

译　者

原　书　序

今天，风电不再是“可替代的”。这是因为近年来风电显现出了明显的优势，因此在世界范围内，风力发电已经成为电力系统主流的发电方式。

例如，在丹麦，风电占总发电量的份额已经超过了20%，丹麦政府预计2025年底将此份额增长至50%。欧盟将此目标定在2020年达到20%。因此，许多国家认为发展可再生能源是一种必然趋势，特别是风电。

但这些目标在实现过程中充满着挑战，特别是在风电接入电力系统方面。就现今设计的电力系统而言，大量类似风电等的电源的波动不是问题。但是，为了进一步提高风力发电场穿透功率水平，需要对现有电力系统逐步进行重新设计和改进运行方法。这主要包括具有风电对电力系统影响的详细建模及仿真在内的新的规划方法。有些国家已经提出了一些解决此类问题的方法，这些方法与电力系统拓扑结构、国家以及国际的规范以及风力发电场穿透功率水平等因素有关。例如，在丹麦西部有一个实例，由于当地电网是与邻近国家相互连接的，风力发电超过本地消费的100%是可能的。

电力系统必须适合风能的特点，例如具有更为柔性，同时风能也需要适应电网的要求。风电场并网协议的制定推进了这两者的配合。风力机/风电场的故障穿越能力是风电场一个重要的技术指标。并网协议的必要性也随着风电场并网规模的增加而越发显得重要。并网协议的另一个重要特点是平滑性的限制和动态电压支持。现有的并网协议要求风电场像常规发电厂一样，满足电网标准，因此风电场应该称为风电厂。

下一步发展重要步骤是含风电厂的电力系统状态估计以及风电机组的远程控制，主要包括风电场斜率控制、功率因数控制以及频率控制。另外，一些国家也讨论了风力发电机组的惯性问题，这可以通过类似于常规发电厂增加转动惯量的方法，设计特定的风力机控制系统来实现。

总之，为了适应电力系统的用电需求，风力发电厂的并网规模也将继续增加。因此，本书所讨论的“风电场并网稳定性技术”将为日本乃至全世界范围内风电厂的大规模并网提供非常及时的帮助。

Thomas Ackermann
德国　郎根　Energynautics公司
瑞典　斯德哥尔摩　皇家理工技术学院

前　言

本书适用于风能专业的学生和工程技术人员，也适合于具有良好的数学和物理基础的、想成为风能领域专家的任何人。

本书提出了提高风电场（包括恒速和变速风力发电机组）并网稳定性的全面方法，它从机械和电气两方面入手，对风力发电机组进行了深入细致地研究：机械方面，重点介绍了风力机传动链的建模和桨距控制；电气方面，主要介绍了适用于风电场的各种控制器。

本书的大部分章节都在集中介绍可用于风电场的各种装置。除了对这些装置的一般性介绍之外，还详细介绍了它们的建模和控制策略，并给出了仿真结果，以便于读者理解。仿真分析采用常用于电力系统分析的 PSCAD/EMTDC 数字仿真软件。

第 1 章首先介绍了全球风能利用现状以及有关风力发电技术的研究现状。第 2 章介绍了包括传动链的恒速和变速风力机的建模。第 3 章主要分析了不同类型的桨距控制器的设计和控制，桨距控制器平滑风力发电机组的输出功率是本章的一大亮点。第 4 章重点介绍了用于恒速风电场的静止同步补偿器。本书的核心内容在第 5 章，介绍了应用于风电场的各种储能装置。在第 6 章中，介绍了由风能供电的氢能发生器。第 7 章是将第 5 章和第 6 章内容相结合，介绍了一种新的带储能装置和氢气发生器的风电场的运行策略，包括系统建模和控制策略，着重介绍了风电场的输出功率与端电压的平滑控制。第 8 章对变速风力机驱动的永磁同步发电系统进行了稳定性分析。本书还提供了附录和参考文献。

本书对恒速和变速风力发电机组、桨距控制器和氢能发生器等进行了详细介绍，并且对超导储能装置（SMES）、电容器储能装置（ECS）、飞轮储能装置（FESS）、静止同步补偿器（STATOM）/蓄电池储能装置（BESS）等储能装置在风电场中的应用进行了深入探讨。

致　　谢

本书得到了很多个人和单位的大力支持。特别需要指出的是，我们想感谢 Naoto Kakimoto 教授、Hiroshi Tanimoto 教授、Takao Ueda 博士以及 Mohd Hasan Ali 博士的支持，他们对每一章节都进行了仔细审读。

我们还大量使用了欧洲风能协会（European Wind Energy Association，EWEA）、全球风能理事会（Global Wind Energy Council，GWEC）、美国风能协会（American Wind Energy Association，AWEA）、美国圣地亚国家实验室（Sandia National Laboratories）和美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory，NREL）等科研机构所提供的期刊以及记录。这里为这些机构免费提供的参考文献以及允许任意使用这些资料深表谢意。

我们还要感谢 ENERCON 公司、REpower Systems AG 公司、ABB 公司和 Beacon 电力公司为本书提供的精美图片。

我们同样要感谢 Rion Takahashi 博士和曾经以及现今仍在本实验室工作的为本书做出过贡献的学生们。

特别要感谢的是 Vassilios G Agelidis，他曾经多次建议本书的第一作者撰写一本关于风能的书。同样感谢 Frede Blaabjerg 教授、Stavros Papathanassiou 博士、Vladislav Akhmatov 博士、Zhe Chen 博士、Gary L Johnson 博士、Mohammad Abdul Mannan 博士和 Dharshana Muthumuni 博士为本书提供这么多非常有用的资料及支持。

我们还要感谢 John Wiley & Sons 出版社、Taylor & Francis 出版社、Praise Worthy Prize 出版社以及日本工程与技术研究所和电气工程师学会允许使用其早期在著名学术期刊发表的技术资料。

本书的第一作者特别感谢 Monbukagakusho（日本文部省）在其硕士、博士学习期间提供的奖学金支持。最后，作者感谢在本书创作过程中给与合作的 Kitami 研究所。

目　　录

译者序
原书序
前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　可再生能源 …… 1
1.2　全球风力发电的现状和发展趋势 …… 1
1.2.1　美国 …… 2
1.2.2　亚洲 …… 3
1.2.3　欧洲 …… 3
1.2.4　中东和北非地区 …… 4
1.2.5　太平洋地区 …… 4
1.2.6　拉丁美洲和加勒比海地区 …… 5
1.3　风力机技术综述 …… 7
1.4　风电场的并网 …… 10
1.5　本书背景 …… 10
1.6　本书的研究目标和范围 …… 14
1.7　本书概要 …… 17

第 2 章　风力机建模 …… 19

2.1　风能输出 …… 19
2.1.1　理想风力机的功率输出 …… 19
2.1.2　实际风力机的功率输出 …… 21
2.2　风力发电机组系统 …… 22
2.3　恒速风力发电机组系统 …… 22
2.3.1　恒速风力发电机组系统结构 …… 23
2.3.2　恒速风力发电机组系统特性 …… 26
2.3.3　驱动链模型 …… 27
2.3.4　不同驱动链模型的比较 …… 31
2.4　变速风力发电机组系统 …… 44
2.4.1　变速风力发电机组系统结构 …… 44

2.4.2 变速风力发电机组系统特性 …… 45
2.4.3 变速风力发电机组对驱动链模型的影响 …… 46
2.5 本章小结 …… 46

第 3 章 桨距控制器 …… 47

3.1 传统桨距控制器 …… 47
3.2 基于模糊逻辑桨距控制器的功率和转速控制 …… 48
3.2.1 控制器设计 …… 49
3.2.2 系统模型 …… 51
3.2.3 模糊逻辑桨距控制器的仿真结果 …… 53
3.3 平滑风力发电机输出功率的新型桨距控制器 …… 62
3.3.1 控制器功率输入指令的计算 …… 62
3.3.2 桨距控制器的设计 …… 64
3.3.3 能量损失和平滑估算 …… 65
3.3.4 系统模型 …… 65
3.3.5 新型桨距控制器的仿真结果 …… 66
3.4 本章小结 …… 74

第 4 章 静止同步补偿器 …… 76

4.1 静止同步补偿器的基本原理 …… 76
4.2 系统模型 …… 78
4.3 静止同步补偿器的建模及控制策略 …… 78
4.4 连接于恒速发电机的静止同步补偿器的仿真与分析 …… 81
4.4.1 用静止同步补偿器提高风力发电机组的暂态稳定性 …… 81
4.4.2 用静止同步补偿器改善风力发电机组的电能质量 …… 89
4.4.3 在静止同步补偿器补偿下风力发电机组叶片—轴系的扭振阻尼 …… 90
4.5 本章小结 …… 103

第 5 章 风电场中的储能装置 …… 104

5.1 电力系统中的储能装置 …… 104
5.1.1 储能装置的应用 …… 104
5.1.2 装置简介 …… 106
5.2 储能装置中电力电子技术的应用 …… 107
5.3 风力发电用储能装置 …… 108
5.3.1 静止同步补偿器/电池储能装置 …… 109
5.3.2 超导储能装置 …… 112
5.3.3 飞轮储能装置 …… 115

5.3.4 电容器储能装置 …… 117
5.4 性价比分析 …… 120
5.5 本章小结 …… 121

第 6 章 风能制氢 …… 122

6.1 氢能简介 …… 122
6.2 氢气发生器的建模 …… 123
6.3 系统结构 …… 124
6.3.1 模型Ⅰ(整流器、直流斩波器和电解器) …… 124
6.3.2 模型Ⅱ(整流器和电解器) …… 125
6.3.3 氢气产量的计算方法 …… 125
6.4 采用风能供电的氢气发生器的应用现状 …… 126
6.5 在风力机塔架中的氢气储存 …… 126
6.5.1 压力储氢罐 …… 127
6.5.2 塔架 …… 127
6.5.3 储氢塔架 …… 127
6.6 本章小结 …… 130

第 7 章 带储能电容器和氢气发生器的风电场运行策略 …… 131

7.1 储能电容器系统的模型和控制策略 …… 132
7.1.1 双电层电容器的模型 …… 132
7.1.2 电压源变流器的建模和控制策略 …… 133
7.1.3 Buck/boost DC-DC 变换器的建模 …… 134
7.2 氢气发生器的模型 …… 134
7.3 风电场输出功率的平滑和端电压的控制 …… 135
7.3.1 系统模型 …… 135
7.3.2 输出功率的参考值 …… 136
7.3.3 全系统仿真研究 …… 137
7.4 电容器储能提高风力发电机组的瞬态稳定性 …… 145
7.4.1 瞬态分析的系统模型 …… 145
7.4.2 瞬态分析的仿真结果 …… 148
7.5 本章小结 …… 156

第 8 章 变速永磁同步风力发电机组稳定性的提高 …… 158

8.1 最大功率点跟踪 …… 158
8.2 永磁同步发电机的建模 …… 159
8.3 整流器＋直流环节＋逆变器拓扑结构的变速永磁同步风力

发电机组 …… 159
8.3.1 发电机侧整流器的建模与控制策略 …… 160
8.3.2 电网侧逆变器的建模与控制策略 …… 160
8.3.3 系统模型 …… 161
8.3.4 仿真分析 …… 161
8.4 整流器＋直流斩波环节＋直流环节＋逆变器拓扑结构的变速永磁同步风力发电机组 …… 169
8.4.1 整流器拓扑结构 …… 169
8.4.2 直流斩波控制策略 …… 169
8.4.3 电网侧逆变器模型与控制策略 …… 169
8.4.4 系统模型 …… 170
8.4.5 仿真分析 …… 170
8.5 本章小结 …… 177

附录 …… 178

A.1 式（4-1）的推导 …… 178
A.2 电解器参数 …… 178

参考文献 …… 180

第1章 绪 论

1.1 可再生能源

电能是人们最熟悉的能源载体。所谓的能源载体就是把能源以可利用的形式，从一个地方传输到另一个地方的物质或者系统。

在发电厂，一次能源被转化为电能。广泛利用的一次能源有化石燃料、水能和核燃料等。

目前世界上普遍采用化石燃料和核燃料来发电，但它们都对环境有不利的影响，比如排出 CO_2 而导致的大气温室效应和核废料问题。

另外，化石燃料和铀的储量是有限的。一些能源短缺的国家会对能源资源输出国形成一种依赖，这是用化石燃料和核燃料发电又一个不利的因素。

在20世纪70年代，人们已经认识到了化石能源的有限及其对环境的影响，随着这种认识的加深，人们开始意识到利用可再生能源来满足世界不断增长的电力需求。

1973～1979年的石油危机，促使一些国家认识到需要减少石油的进口，以减少对石油输出国的依赖，而海湾战争（1990～1991年）又加深了这种认识。环境问题和化石燃料消耗问题促使人们去寻找可持续利用的能源。

风力机就是把可再生的风能转化为电能，风能是全球的巨大的、可再生的能源。人类很早就开始利用风作为动力，最早的利用是驱动帆船。早在公元前5000年，人们利用风力驱动航船沿尼罗河逆流而上。到公元1000年时，斯堪的纳维亚人（即维京人）就利用风能来开发和征服北大西洋。

在1602～1799年间，风能是航海的主要动力。在过去的几千年里，主要是利用风车来提供可用的机械能，1888年开始利用风力机来发电。

比起其他的可再生能源，如光伏、波浪能和潮汐能，风电是一种相对廉价的可再生能源。一些政府提倡利用可再生能源，所以风能资源的利用得到了大幅度增加。

1.2 全球风力发电的现状和发展趋势

到2007底风能已经成为主要能源资源之一，在世界能源市场上占有了重要的位置。在后面的内容里，将提供一个到2007年为止的全球风能状况的概括，以及2020年前风能增长趋势的预测。

全球风能协会（Global Wind Energy Council，GWEC）报道，到2007年全

球风力发电新增装机容量为 20000MW，全球总装机容量达 94112MW[⊖]。与 2006 年的市场容量相比，增加了 31%，装机容量增加了 27%[1]。

1.2.1　美国

美国报道，2007 年新增装机容量为 5244MW，是 2006 年的两倍，其中有 30%来自农村的新能源发电。美国 2007 年风力发电装机容量增长 45%，总装机容量达 16.8GW，美国的风力发电总装机容量有望在 2009 年底超过德国[1]。

图 1-1 展示了美国各州截止到 2008 年 1 月中旬为止的装机容量[2]。

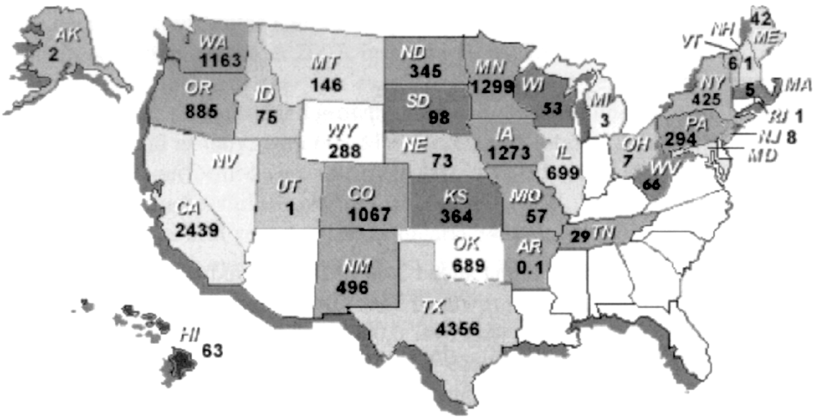


图 1-1　美国风能协会 2007 年第 4 季度市场报告［资料来源：美国风能协会（AWEA[⊖]）］

Horse Hollow 风能中心是世界上最大的风电场，装机容量达 735.5MW。它拥有 291 台 GE 公司 1.5MW 风力机和 130 台 Siemens 公司 2.3MW 风力机，分布在美国德克萨斯州 Taylor 和 Nolan 郡，总占地面积达 47000acre（190km^2）。表 1-1[2]列出了风力发电容量前 10 名的州。截止到 2007 年底已建风力发电装机容量和在建风力发电装机容量见表 1-2[2]。

美国能源部已经公布了到 2020 年风力发电量要占美国总电量的 6%的目标，这个目标和近来美国风力发电的增长率是一致的[2]。

表 1-1　前 10 名州的风力发电容量　（单位：MW）

州　名	已　建	在　建	排　名
德克萨斯州	4356.35	1238.28	1
加利福尼亚州	2438.83	165	2
明尼苏达州	1299.75	46.4	3

⊖ 若想获得 GWEC 每日更新信息，请访问网址：http://www.gwec.net/。

⊖ 若想获得最新美国风能数据，请访问 AWEA 网址：http://www.awea.org/。

（续）

州　　名	已　　建	在　　建	排　　名
爱荷华州	1273.08	116.7	4
华盛顿州	1163.18	126.2	5
科罗拉多州	1066.75	0	6
俄勒冈州	885.39	15	7
伊利诺斯州	699.36	108.3	8
俄克拉荷马州	689	0	9
新墨西哥州	495.98	0	10

注：资料来源：AWEA。

表 1-2　美国风能总装机容量　　（单位：MW）

已　　建	在　　建
16818.78	3506.38

注：资料来源：AWEA。

1.2.2　亚洲

全球风能协会报道，中国 2007 年新增风力发电装机容量为 3449MW，与 2006 年相比，市场增长超过了 156%。中国到 2007 年底风力发电总装机容量超过了 6000MW，世界排名第五。中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会（CREIA）预计，以这种速度发展，到 2015 年中国总装机容量将达到 50000MW。

中国不断增长的风力发电市场促进了中国的风力机的制造业，目前中国已经拥有超过 40 家风力机整机制造商。2007 年中国国内产能占据了 56%的市场份额，而 2006 年仅为 41%，在未来几年国内产能的市场占有率还会提高。

全球风能协会主席 Arthouros Zervos 教授说，“中国现在的年产能力为 5GW，预计 2010 年将会达到 10～12GW”。

印度的风力发电也是稳步增长的，目前的总装机容量约为 8GW，而 2006 年仅为 6.2GW。

日本在亚洲排名第三，2007 年风力发电装机容量为 1.538GW。

1.2.3　欧洲

欧洲风能协会（EWEA）出版的一份报告详细介绍了截止到 2007 年底欧洲风力发电的装机容量情况。2007 年欧盟新增风力机总容量为 8554MW，比 2006 年增加了 935MW[㊀][3]。到 2007 年年底欧盟的风力发电每年减排 CO_2 为 9000 万 t，年平

㊀ 若想获得欧洲风能更多信息，请访问 EWEA 网站，网址：http://www.ewea.org/。