



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

风能与太阳能发电系统 ——设计、分析与运行(原书第2版)

**Wind and Solar
Power Systems
Design, Analysis,
and Operation
(Second Edition)**

(印) Mukund R. Patel 著
姜齐荣 张春朋 李虹 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

风能与太阳能发电系统

——设计、分析与运行

(原书第2版)

(印) Mukund R. Patel 著

姜齐荣 张春朋 李虹 译



机械工业出版社

本书主要包括风力发电技术、太阳光伏发电技术、与风力发电及太阳光伏发电相关的系统集成技术以及其他新能源发电技术四部分。书中对风力发电技术与太阳光伏发电技术做了全面深入的介绍,在本书的最后介绍了其他新能源发电技术,如太阳能热发电、潮汐发电、海浪发电、洋流发电等技术。本书理论与实践紧密结合,书中采用了丰富的实际工程图表并提供了大量的工程实例。本书不仅可以作为从事新能源发电科技人员阅读,也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

Authorized translation from the English language edition, entitled Wind and Solar Power Systems Design, Analysis and Operation, ISBN: 0 - 8493 - 1570 - 0, edited by Mukund R. Patel, published by CRC press, part of Taylor & Francis Group LLC.

Copyright © CRC Press. All Rights Reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有, 翻印必究。

本书版权登记号: 图字 01 - 2007 - 3009 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

风能太阳能发电系统: 设计、分析与运行 / (印) 派特 (Patel, M. R.) 著. 姜齐荣, 张春朋等译. —北京: 机械工业出版社, 2008. 8
(国际电气工程先进技术译丛)
ISBN 978-7-111-24937-5

I. 风… II. ①派…②姜…③张… III. ①风力发电 - 研究②太阳能发电 - 研究 IV. TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 127314 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 张俊红 版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣
封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇
北京机工印刷厂印刷 (兴文装订厂装订)
2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
169mm × 239mm · 23 印张 · 439 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-24937-5
定价: 50.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 88379178
封面无防伪标均为盗版

译者序

近年来,国际上风能与太阳能等可再生能源发电技术发展迅速,风能发电装机容量占电力需求的比例在不断上升,丹麦、德国、英国与美国等发达国家都制定了雄心勃勃的风力发电规划。我国风力发电与太阳能发电也取得了长足的进展:风力发电已经成为国家新能源发展的优先目标,在内蒙古、新疆等内陆地区与山东、福建等沿海地区已经建立了很多几十兆伏安级的风力发电场;太阳能发电也已经在偏远地区(如新疆、四川的部分地区)获得了广泛的应用。可再生能源发电技术已经成为国内高等院校、科研院所及高新技术企业的重点研究开发方向,而目前国内关于风力与太阳能发电的书籍要么过于科普化,要么过于专业化,而该领域的科研人员与工程技术人员急需既具有宽泛的科普知识,又具有丰富的工程实践及深入理论分析的书籍。为了解决目前国内缺乏相关书籍的问题,机械工业出版社与国外出版公司联系,决定引进本书,希望将本书翻译成中文后出版,以满足国内可再生能源发电技术发展的需求。本书译者多年来从事电力系统相关领域的研发工作,对可再生能源发电技术非常感兴趣,希望与国内同行分享该领域的最新进展与技术,因此非常愉快地承担了本书的翻译工作。由于本书内容全面广泛、深入浅出,是可再生能源发电技术方面不可多得的好书,因此希望本书的中文版能够为国内可再生能源技术的发展做出应有的贡献。

本书第1~10章由张春朋翻译,第11~19章由姜齐荣翻译。另外,李虹、戚庆茹、林飞、马莉、魏应冬、田旭、皮俊波、刘诗哲、刘世宇、王淑慧、夏祖华、张秀娟、陈杰、莫昕、刘博超、姜石成、瞿伯东等,也参与了修改整理与部分翻译工作,在此一并表示感谢。为了尽量保持原书的风格,书中部分文字符号和图形符号并未完全按照国家标准统一,这点请广大读者注意。同时,需要特别指出的是,译者严格遵照原书展开翻译工作,书中内容并不代表译者及其所在单位的观点。

由于作者水平有限,翻译中错误之处在所难免,希望读者批评指正。

译者

原 书 前 言

由于在风力与太阳发电技术领域取得了新的巨大的发展与进步,因此有必要出版本书的第2版。这反映在短短的5年间,就需要对本书的第1版进行扩充、修改与更新。在这段时间内,风力发电的投资与能量成本下降了20%。今天,与电网相连的风力发电场的发电成本低于4美分/kWh,光伏电站的发电成本低于20美分/kWh。由美国能源部(DOE)与国家可再生能源实验室(NREL)资助的在研项目的目的是,到2010年将风力发电的成本降低到3美分/kWh,将光伏发电的成本降低到15美分/kWh。在投资与能源成本方面,风力发电现在可以以其优点与传统的发电技术竞争,在世界上的许多地方,它已经成为传统及新的能源中最便宜的电源。风力发电还具有资源丰富且环保清洁的优点,因而带来了许多间接的没有完全在市场经济中反映的社会效益。由于这些原因,现在风力发电已经在所有国家的能源规划中具有重要的地位。根据美国能源部的估计,世界上主要风场的风能有潜力提供全球能量需求10倍以上的能源。在美国,能源部已经与公共及私人团体建立了21个合作伙伴,以在低风速地区开发风力机产生经济的电能,这将在该国为风力发电的快速发展开拓大得多的风力发电区域。美国电力科学研究院(EPRI)估计,到2020年风力发电将从现在的低于美国电力需求的1%增加到10%。

在1993~2003年这段时间内,全世界的风力发电容量每年平均增长速度为30%。2003年全球有超过8000MW的新风力发电容量增量,投资达到90亿美元。这使得全球总的风电容量达到40000MW,其中最为爆炸性的增长发生在德国。海上风电场正带来能源市场的新发展。现在已经建立了许多海上风力发电场,有更多的单个容量超过300MW的海上风力发电场正在建设中或正在计划阶段。许多海上风力发电场离海岸不到10km,海水深度小于10m。丹麦计划在2008年建设750MW的新风力发电容量,使这个国家总的风电容量达到4000MW,为丹麦提供25%的电力,其中就包括其雄心勃勃的海上风电计划。美国风电容量计划到2015年达到12000MW。电力公司与风力发电开发商已经宣布,2006年时要在15个州新增超过5000MW的风电容量。加拿大魁北克水电公司计划在2006~2012年之间新增风电容量1000MW。在许多国家这些新建的风力发电场中,3MW的风力机正在变成常用的安装容量,对于大型的海上风场现在已经可以采用5MW的风力机,7MW的风力机正处于样机测试阶段。

在光伏发电方面,其产生电能的成本还相当高:在15~25美分/kWh之间。

由于电力公司用户的用电成本范围为 10~15 美分/kWh, 所以光伏发电产生的电能直接与电力公司的电能竞争还不够经济, 除非在偏远的还没有电力公司供电且输电线的成本还不允许的市场。许多发展中国家有大片的区域属于这类地区, 这些地方的光伏发电增长最快, 如在印度与中国的偏远地区。全世界范围的太阳能光伏发电每年市场约为 70 亿美元, 主要由德国推动。

从 2000~2004 年期间, 全世界光伏发电增长的年平均速率为 25%~30% 之间。到 2004 年底, 累计的光伏发电容量达到 2030MW, 其中有 1000MW 在美国。2004 年年产光伏发电组件为 530MW, 计划到 2010 年年产将达 1600MW。现在的组件价格为: 对于 1kW 的组件, 6~7 美元/W; 对于 1MW 的电厂, 3~4 美元/W。新出现的薄膜与聚光型光伏电池单元, 预期能够在不久的将来大幅降低组件的价格。

在美国电力公司按照 1992 年的能源政策法案 (EPAAct) 的要求重组后, 工业领导们希望发电业务 (包括传统的发电业务与可再生能源发电业务) 在长期运转中能够获得更多的利润。他们的理由是发电业务已经摆脱了价格管制, 且放开了电力生产者与中间商之间的竞争, 而另一方面输电业务与配电业务还处于管制之下。美国的经验表明, 自由竞争的产业能够产生比管制的行业更多的利润。这也是在英国与智利获得的经验, 在这两个国家电力工业已经长期按照类似美国 1992 年的 EPAAct 组织。更进一步, 随着技术的进步, 可再生能源的价格将下降, 而传统发电的价格将随着通货膨胀而上升, 使得风力与光伏发电在将来更加有利可图。

2003 年, 北美大停电估计损失 100 亿美元, 使得人们对分布式发电有新的更加强烈的关注。因为输电线过负荷引起了这次大停电, 而要能够规划并建设新的线路还要等几十年, 所以大停电已经为风力与光伏发电的分布式发电创造了一个机会。由于许多大规模风力发电场与电网的输电线相连, 所以人们期望光伏发电系统在分布式发电增长中获得更多的青睐。

关于本书

本书的第2版是在第1版的基础上进行扩展、修改与更新之后形成的,是在我被邀请到德卢斯明尼苏达大学作为最新电力技术的访问教授授课时准备好的。为了对好奇的学生教授整个课程及对职业工程师教授短期课程,本书在许多方面增加了内容。本书是为大学电气与机械工程领域高年级学生一学期课程的教材编写的。对于从事实践工作的工程师,书中详细介绍了电力工业中快速发展的风力发电与太阳能发电部分的内容。政府政策制定者通读本书的所有4部分共19章的内容能够从中获益。

第1篇介绍了风力发电技术及其在美国与全世界目前的发展情况。它包括工程基础、风速的概率分布、一个地点每年的风能潜力、几个国家的风速与风能分布图以及对风力发电系统的运行与控制的要求。由于大部分的风力发电场采用异步发电机将风力机的功率转化为电能,因此本部分对异步发电机的性能与运行的理论进行了回顾。本部分还介绍了在一年之内风波动的情况下为获取最大风能如何控制发电机速度。随着海上风力发电场的快速发展及其工程应用,本部分详细介绍了海上风电场运行与法律方面的内容。

第2篇介绍了太阳光伏(PV)发电技术以及全世界当前的发展情况。该部分开始介绍光伏电池的能量转化特性,然后讨论了光伏发电阵列的设计、环境变量的影响、用于产生最大功率的阳光跟踪方法、控制以及发展的趋势。

第3篇开始介绍了不断增加的不可调度能源,如风能、光伏发电等常常需要的大规模能量储存技术以提高用户电能的可用性。该部分包括了各种电池的特性、采用针对它们的能量平衡分析的设计方法以及影响其运行的因素与电池管理的方法。首先介绍了各种电池如铅酸蓄电池、镍镉蓄电池、镍氢蓄电池以及锂离子电池的能量密度、寿命以及转化每千瓦时的运行成本,接着回顾了飞轮、压缩空气以及超导线圈等能量储存技术及其相对于蓄电池的一些优点,然后给出了在风力发电、太阳能发电系统中应用的电力电子变流器与逆变器的基本原理及其运行。全世界超过20亿人口的用电还没有与公用电网相连,这是采用风力发电与光伏发电系统与柴油发电机或燃料电池混合的独立发电系统的最大潜在市场。因此该部分的后面对独立的混合发电系统进行了详细的讨论,介绍了与电网连接的可再生能源发电系统(包含为保证发电机与电网同步运行所需的电压与频率控制方法),这部分内容包括了互连传输线路的理论与运行特性、电压调节、最大功率传输能力以及静态与动态稳定性。

接下来,第3篇介绍了整个电力系统的性能,设计系统各元件运行在最大可能效率的方法,静态与动态节点性能,谐波以及不断增加的可用于可再生能源发电系统的重要电能质量问题,给出了整个发电厂的经济性以及给付费用户传输电能的成本。该部分也给出了提高投资者信心水平的灵敏度分析的重要性,给出了用于初步扫描潜在厂址的收益率图。还回顾了风力与光伏发电过去与现在的发展趋势,基于学习曲线的价格降低模型,基于有关类似技术的历史数据用于预测风力与光伏发电未来市场成长的 Fisher - Pry 代替模型。讨论了1992年美国能源政策法案要求的公用电力公司重组的影响以及对可再生能源的好处。

第4篇包括辅助的利用地球上最终的能源——太阳能的电力系统。首先介绍采用集热日光反射装置与熔化盐蒸汽轮机的可大规模应用的太阳热发电厂;然后介绍了太阳诱导风能发电、洋流发电、海洋波浪发电以及水压电发电机;最后,详细测试了一种新的能够在给定风电场区域上提高风电转换效率达25%~40%的反向旋转风力机。因为无论陆地上还是海洋上,能够获得的风电场的面积正由于各种原因变得越来越受限制,所以上述反向旋转风力机的概念在未来具有良好的潜力。最后一章介绍了详细的实验样机结构以及可指导该领域年青研究工作者的测试方法。

最后,附录列出了缩略语以及单位的前缀与换算。

目 录

译者序

原书前言

关于本书

第 1 篇 风力发电系统

第 1 章 绪论	3
1.1 工业概览	3
1.2 对可再生能源的鼓励措施	5
1.3 电力部门的愿景	6
1.3.1 模块化增长方式	6
1.3.2 排放效益	7
1.3.3 用户的选择	8
参考文献	9
第 2 章 风力发电	10
2.1 全球风力发电的发展	12
2.2 美国风力发电的发展	14
2.3 欧洲与英国风力发电的发展	18
2.4 印度风力发电的发展	20
参考文献	22
第 3 章 风速与能量	23
3.1 风速与功率的关系	24
3.2 从风中获得能量	24
3.3 风轮扫掠面积	26
3.4 空气密度	27
3.5 全球风模式	27
3.6 风速分布	29
3.6.1 威布尔概率分布	30
3.6.2 众数风速和平均风速	32
3.6.3 立方均根速度	34
3.6.4 众数风速、平均风速和 RMC 风速	34
3.6.5 能量分布	36
3.6.6 数字化数据处理	37

3.6.7 轮毂高度效应	39
3.6.8 可靠性数据的重要性	40
3.7 风速预测	41
3.8 风力资源图	42
3.8.1 美国风力资源图	43
3.8.2 英国和欧洲的风力资源	46
3.8.3 墨西哥风力资源图	46
3.8.4 其他国家的风力资源图	48
参考文献	50
第4章 风力发电系统	52
4.1 系统元件	52
4.1.1 塔架	53
4.1.2 风力机	57
4.1.3 叶片	57
4.1.4 速度控制	58
4.2 风力机的额定容量	59
4.3 功率与风速和 TSR 的关系	61
4.4 最大风能捕获	63
4.5 最大功率运行	64
4.5.1 固定 TSR 方案	64
4.5.2 峰值功率点跟踪方案	65
4.6 系统设计的折衷	66
4.6.1 风力机塔架和间距	66
4.6.2 叶片的数量	67
4.6.3 风轮的上风向或下风向	68
4.6.4 水平轴和垂直轴	68
4.7 系统控制要求	69
4.7.1 速度控制	69
4.7.2 速率控制	70
4.8 环境影响方面	70
4.8.1 可闻噪声	70
4.8.2 电磁干扰	71
4.8.3 对鸟类的影响	72
4.8.4 其他影响	73
4.9 潜在的灾难	73
4.9.1 火灾	73
4.9.2 地震	74
4.10 系统设计趋势	74

参考文献	74
第5章 发电机	76
5.1 直流发电机	77
5.2 同步发电机	77
5.3 异步发电机	78
5.3.1 结构	78
5.3.2 工作原理	79
5.3.3 转子速度与转差	80
5.3.4 等效电路	81
5.3.5 效率与冷却	83
5.3.6 自励电容	84
5.3.7 转矩—速度特性	85
5.3.8 暂态过程	86
5.4 双馈异步发电机	88
5.5 直驱发电机	88
参考文献	89
第6章 发电机传动系统	91
6.1 速度控制区域	92
6.2 发电机的传动	95
6.2.1 单定速传动	95
6.2.2 双定速传动	96
6.2.3 变速齿轮传动	97
6.2.4 变速电力电子技术	97
6.2.5 歇尔皮斯变速传动	98
6.2.6 变速直接传动	99
6.3 传动的选择	100
6.4 切出速度的选择	100
参考文献	101
第7章 海上风电场	103
7.1 海上项目	105
7.2 美国的法律问题	106
7.3 对环境的影响	108
7.4 离岸成本	109
7.5 向岸上输送功率	110
7.5.1 交流电缆	111
7.5.2 直流电缆	111
7.6 海水的成分	112
7.7 海浪的能量与功率	113

7.8 海上建筑物设计	115
7.8.1 海上建筑物的受力	115
7.9 腐蚀	116
7.10 地基	117
7.10.1 单桩式	117
7.10.2 压重式	117
7.10.3 三角桩式	118
7.11 建场材料	119
7.12 风电场的维护	120
参考文献	121

第2篇 光伏发电系统

第8章 光伏发电	125
8.1 光伏发电项目	130
8.2 光伏发电系统的集成化构建	132
8.3 光伏电池技术	134
8.3.1 单晶硅	134
8.3.2 多晶硅和半晶硅	134
8.3.3 薄膜电池	135
8.3.4 非晶硅	136
8.3.5 球形电池	136
8.3.6 聚光电池	136
8.3.7 多结电池	137
8.4 太阳能分布图	137
8.5 技术发展趋势	139
参考文献	141
第9章 光伏电力系统	142
9.1 光伏电池	142
9.2 组件与阵列	143
9.3 等效电路	145
9.4 开路电压与短路电流	146
9.5 $I-V$ 曲线和 $P-V$ 曲线	146
9.6 阵列设计	149
9.6.1 阳光强度	149
9.6.2 阳光入射角	150
9.6.3 遮蔽效应	150
9.6.4 温度效应	151
9.6.5 气候效应	153

9.6.6 电气负荷匹配	153
9.6.7 阳光循迹	154
9.7 峰值功率运行	156
9.8 系统部件	157
参考文献	158

第3篇 系统集成

第10章 储能	161
10.1 蓄电池	161
10.2 蓄电池的种类	162
10.2.1 铅—酸蓄电池	163
10.2.2 镍—镉蓄电池	163
10.2.3 镍—金属氢化物蓄电池	164
10.2.4 锂离子蓄电池	164
10.2.5 锂聚合物蓄电池	164
10.2.6 锌—空气蓄电池	164
10.3 等效电路	164
10.4 性能特点	166
10.4.1 充/放电电压	166
10.4.2 充/放电比率	166
10.4.3 能效	166
10.4.4 内阻	167
10.4.5 充电效率	168
10.4.6 自放电与涓流充电	168
10.4.7 记忆效应	169
10.4.8 温度效应	169
10.4.9 内部损耗与温升	170
10.4.10 随机失效	172
10.4.11 耗损失效	173
10.4.12 蓄电池类型对比	173
10.5 关于铅—酸蓄电池的更多内容	174
10.6 蓄电池设计	176
10.7 蓄电池充电	177
10.8 充电调节器	178
10.8.1 多充电速率	178
10.8.2 单充电速率	178
10.8.3 无调节的充电	179

10.9 蓄电池的管理	179
10.9.1 监测与控制	179
10.9.2 安全性	180
10.10 飞轮	181
10.10.1 能量关系	181
10.10.2 飞轮系统的元件	182
10.10.3 飞轮比蓄电池的优点	185
10.11 超导磁场	186
10.12 压缩空气	188
10.13 各种储能技术的对比	190
参考文献	191
第 11 章 电力电子技术	192
11.1 基本的开关器件	192
11.2 AC—DC 整流器	195
11.3 DC—AC 逆变器	196
11.4 频率变换电路	198
11.5 电网接口控制	198
11.5.1 电压控制	199
11.5.2 频率控制	199
11.6 电池充电/放电变换电路	200
11.6.1 电池充电变换电路	200
11.6.2 电池放电变换电路	202
11.7 功率分流	203
参考文献	204
第 12 章 独立电力系统	205
12.1 独立的光伏发电系统	205
12.2 电力车辆	206
12.3 独立的风力发电系统	208
12.4 混合系统	210
12.4.1 与柴油机发电混合的系统	210
12.4.2 与燃料电池发电混合的系统	210
12.4.3 模式控制器	216
12.4.4 负荷分配	217
12.5 系统容量计算	219
12.5.1 功率与能量估计	219
12.5.2 电池容量计算	220
12.5.3 光伏发电阵列容量计算	221
12.6 风力发电场的容量计算	222

参考文献	224
第 13 章 连网的系统	225
13.1 连网的要求	228
13.2 与电网同步	228
13.2.1 涌流	229
13.2.2 同步运行	230
13.2.3 负荷暂态	231
13.2.4 安全性	231
13.3 运行极限	232
13.3.1 电压调节	232
13.3.2 稳定极限	233
13.4 能量存储与负荷计划	234
13.5 电源规划工具	235
13.6 风力发电场与电网的集成	236
13.7 电网稳定问题	237
13.7.1 低电压的克服	237
13.7.2 用于提高稳定性的能量储存技术	238
13.8 分布式发电	239
参考文献	240
第 14 章 电气性能	242
14.1 电压、电流与功率的关系	242
14.2 最大效率的元件设计	243
14.3 电气系统模型	244
14.4 静态节点阻抗与电压调节	245
14.5 动态节点阻抗与纹波	247
14.6 谐波	247
14.7 电能质量	249
14.7.1 谐波畸变因子	249
14.7.2 电压瞬态与暂降	250
14.7.3 电压闪变	251
14.8 可再生能源发电系统容量限制	252
14.8.1 系统强度	253
14.8.2 连网标准	254
14.9 雷击保护	256
14.10 美国电气标准	258
参考文献	258
第 15 章 电厂经济	259
15.1 能量传递因子	259

15.2	初始投资成本	260
15.3	可用性与维护	261
15.4	能量成本估计	263
15.5	灵敏度分析	264
15.5.1	风速的影响	264
15.5.2	塔高的影响	265
15.6	收益率指标	266
15.6.1	风力发电厂扫描图	267
15.6.2	太阳光伏发电扫描图	268
15.6.3	独立的太阳光伏发电厂供电及与电网线路相连供电的比较	270
15.7	混合经济性	272
15.8	工程财务	272
	参考文献	275
第 16 章 未来展望		276
16.1	到 2015 年全世界的电力需求	276
16.2	京都议定书	278
16.3	风力发电的未来	279
16.4	太阳光伏发电的未来	285
16.5	风力发电与光伏发电的成长	286
16.6	生产成本的下降	288
16.7	市场的占有率	289
16.8	电力公司重组的影响	292
16.8.1	1992 年的能源政策法案	293
16.8.2	对绿色电能的影响	294
16.8.3	绿色电力市场	295
16.9	紧张的电力网络	296
	参考文献	297

第 4 篇 辅助发电技术

第 17 章 太阳能热发电系统		301
17.1	能量收集	302
17.1.1	抛物槽型	302
17.1.2	中央接收器型	303
17.1.3	抛物形碟型	303
17.2	太阳 II 电厂	303
17.3	同步发电机	306
17.3.1	等效电路	307
17.3.2	励磁方法	307
17.3.3	电力的输出	308
17.3.4	暂态稳定极限	309

17.4 商业发电厂	310
17.5 近来的发展趋势	311
参考文献	313
第 18 章 辅助发电技术	314
18.1 热致风力发电	314
18.2 洋流发电	315
18.3 海洋波浪发电	317
18.4 压电发电机	318
18.5 喷气辅助风力机	319
18.6 太阳热微型透平机	320
18.7 热光伏系统	321
参考文献	322
第 19 章 相向旋转的风力机	323
19.1 引言	323
19.2 潜在的应用	324
19.3 数学模型	325
19.3.1 速度分量	325
19.3.2 力分量	326
19.4 试验样机设计	328
19.4.1 设计方法	329
19.4.2 传感器的选择	331
19.5 试验样机测试	334
19.5.1 发电机性能测试	334
19.5.2 风力机性能测试	335
19.5.3 现场测试仪器	335
19.5.4 现场测试数据讨论	337
19.5.5 扰流抖振	343
19.6 风电场功率密度	344
19.7 设备更新及其回收	344
19.7.1 双风力机背靠背前后安装	344
19.7.2 单个发电机上的相向旋转转子	345
19.7.3 设备升级成本及其回收期	345
19.8 结论	346
致谢	346
参考文献	346
附录	348
附录 A 缩略语	348
附录 B 单位的前缀与换算	349