

“十一五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程与应用丛书

风力发电系统 的设计、运行与维护 (第2版)

● 叶杭冶 等编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程与应用丛书

风力发电系统 的设计、运行与维护 (第2版)

● 叶杭冶 等编著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书系统介绍了我国风能资源基本情况,风电场开发程序及相关技术要求,以及风力发电机组的基本类型、总体结构、控制系统、操作系统、运行方式与监控技术等;并以典型的双馈式风力发电机组与直驱式永磁风力发电机组为例,介绍了风力发电机组的主要部件及维护要求;对海上风电场开发的相关技术也做了介绍。

本书可以作为风电场设计、运行与维护人员的培训教材,也可作为风力发电行业工程技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电系统的设计、运行与维护 / 叶杭冶等编著. —2 版. —北京:电子工业出版社, 2014.8
(风力发电工程与应用丛书)

ISBN 978-7-121-23772-0

I. ①风… II. ①叶… III. ①风力发电系统 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 150077 号

责任编辑:张 剑

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:17 字数:353 千字

版 次:2010 年 4 月第 1 版

2014 年 8 月第 2 版

印 次:2014 年 8 月第 1 次印刷

册 数:4 000 册 定价:49.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

风力发电工程与应用丛书编委会

主任委员：叶杭冶

副主任委员：姚兴佳 王志新

委 员：(以姓氏笔画为序)

王益全 申新贺 史晓鸣

邢作霞 许国东 陈 棋

丛书策划：张 剑

丛 书 序

近十年来，风力发电在世界范围内得到了持续高速发展，为应对全球气候变化做出了重要贡献。风力发电清洁能源的兴起已成为低碳经济的重要标志之一。

虽然我国的风力发电产业起步较晚，但近年来，在政府的大力倡导下，呈现了高速增长的态势，大有后来居上的趋势。风力发电是一项新兴的综合性学科，涉及广泛的技术领域，包括气象学、空气动力学、机械电子工程、电力电子技术等，从业的工程技术人员需要通过系统的学习和培训，才能胜任相关的技术工作。目前，由于产业发展速度较快，相关技术人才十分紧缺。

电子工业出版社组织国内风力发电专家编写了“风力发电工程与应用丛书”，内容包括了风电场的开发与建设，风力发电系统的设计、运行与维护，风力发电测试技术，现代风力发电技术及工程应用等，涉及内容广泛，可作为从事风力发电工作的各类技术人员的学习、培训教材，也可作为高等院校师生和相关工程技术人员的参考用书。相信丛书的出版，能够对培养我国风力发电专业技术人才，促进我国风力发电持续健康发展发挥重要的作用。

中国工程院 院士
浙江大学 教授



序

发展新能源与可再生能源是人类应对气候变化，实现人与自然和谐发展所采取的一项长期的战略任务。风能是目前可再生能源中技术相对成熟，并具规模化开发利用前景的一种清洁能源，在完成这一全球性的历史使命中，将会起到重要的作用。

风能的开发利用是一项系统工程，涉及政策、法律、技术、经济、社会、环境和教育等方面。随着风能的迅速发展，风能教育、风能专业技术人员的培训已变得越来越重要。

我国风能专家叶杭冶研究员长期从事风力发电机组的研究和开发工作，有着丰富的实践经验。由他编著的《风力发电系统的设计、运行与维护》一书将风力发电作为一个系统，结合我国风能开发利用的特点，从风能资源评估、风力发电机组集成、风电场建设、风力发电并网运行和维护等方面做了全面介绍。书中还给出了很多实例，是一本应用性很强的专业图书，可作为风电场设计、运行和维护技术人员的培训教材，对在风电行业工作的其他工程技术人员和高等院校师生来说也是一本很好的参考书。

近年来，电子工业出版社等机构出版了不少与风能技术相关的专业图书，对推进我国风能发展起到了重要的作用，在此，我要向图书的作者和出版社表示衷心的感谢。

中国可再生能源学会副理事长



前 言

从最近几年全球风能开发利用的规模及预期目标来看，风力发电将成为未来能源的重要组成部分已成为共识。根据欧盟的发展规划，2020 年风力发电在能源中的所占份额将达到 20%。自 2005 年以来，我国的风电场建设持续高速发展，装机容量连年翻番，截至 2009 年年底，全国装机容量已经超过 20GW。有关专家预计，到 2020 年我国风力发电装机容量将达到 150GW。

目前我国从事风力发电的技术人员约为 4 万人，其中风电场规划设计与运行维护人员约 2 万人，设计制造人员约 2 万人。随着产业的迅速发展，从业的专业技术人员还在不断增加。风力发电是一门新兴的多学科、多专业综合的技术，大部分从业人员需要经过专门的技术培训方能理解、掌握相关知识。由于缺乏系统的培训教材，许多风电场业主难以对从业人员进行职业培训，其运行和维护人员的培训主要通过购买制造厂商产品附带的技术培训，以及厂家对相关产品介绍及其运行维护手册的宣传、贯彻来实现。

本书系统介绍了我国风能资源基本情况，风电场建设的相关技术要求，以及风力发电机组的基本类型、总体结构、控制系统、操作系统、运行方式、状态监测和机组的维护等内容，对海上风电场开发的相关技术也做了介绍。

本书由叶杭冶、许国东、史晓鸣、陈棋、申新贺等编写。其中，叶杭冶编写了第 1 章和第 4 章，许国东编写了第 2 章和第 3 章，陈棋编写了第 5 章和第 9 章，史晓鸣编写了第 6 章至第 8 章，申新贺编写了第 10 章。全书由叶杭冶修改、统稿。参加本书编写工作的还有余钧等。

国家风力发电工程技术中心对本书的编写提供了大力支持，并提供了直驱式永磁风力发电机组的相关资料，在此深表感谢。本书还参考了大量部件供货商的产品资料，在此一并致谢。

由于风力发电技术涉及面广，其发展日新月异，加之时间与水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 著 者

第 2 版前言

随着风力发电技术的快速发展和风电在电网中的容量的迅速扩大，风力发电与电力系统之间的相互制约问题已引起业界的高度关注。为了引导风力发电技术产业的发展，国家有关部门专门出台了一系列的相关标准和规范。为了与国家新的并网要求和技术规范保持一致，本书第 2 版对相关内容做了较大幅度的更新，同时考虑到风力发电与电力系统是相互影响的，因此将第 3 章“风力发电对电网的影响”更名为“风力发电与电力系统”。

本书第 2 版对第 6 章“双馈式风力发电机组的运行控制”也做了较大的修改，对控制系统的主要执行机构（包括变流器、变桨系统）的功能做了详细介绍；修改了安全链章节，对不同形式的安全链方式进行了阐述；对风力发电机组的控制系统和操作菜单进行了全新的介绍；更新了各类风力发电机组 SCADA 监控系统的介绍。

修改幅度较大的还有第 8 章“风力发电机组的维护”，对整机及部件的维护要求做了更加全面的阐述。

其他各章节也根据技术产业的发展做了修改和补充。

编著者
2014 年 1 月于杭州

《风力发电系统的设计、运行与维护（第2版）》读者调查表

尊敬的读者：

欢迎您参加读者调查活动，对我们的图书提出真诚的意见，您的建议将是我们创造精品的动力源泉。为方便大家，我们提供了两种填写调查表的方式：

1. 您可以登录 <http://yydz.phei.com.cn>，进入“读者调查表”栏目，下载并填好本调查表后反馈给我们。

2. 您可以填写下表后寄给我们（北京市海淀区万寿路 173 信箱电子信息出版分社 邮编：100036）。

姓名：_____ 性别：☐ 男 ☐ 女 年龄：_____ 职业：_____
电话：_____ 移动电话：_____
传真：_____ E-mail：_____
邮编：_____ 通信地址：_____

1. 影响您购买本书的因素（可多选）：

☐封面、封底 ☐价格 ☐内容简介 ☐前言和目录 ☐正文内容
☐出版物名声 ☐作者名声 ☐书评广告 ☐其他_____

2. 您对本书的满意度：

从技术角度	☐ 很满意	☐ 比较满意	☐ 一般	☐ 较不满意	☐ 不满意
从文字角度	☐ 很满意	☐ 比较满意	☐ 一般	☐ 较不满意	☐ 不满意
从版式角度	☐ 很满意	☐ 比较满意	☐ 一般	☐ 较不满意	☐ 不满意
从封面角度	☐ 很满意	☐ 比较满意	☐ 一般	☐ 较不满意	☐ 不满意

3. 您最喜欢书中的哪篇（或章、节）？请说明理由。

4. 您最不喜欢书中的哪篇（或章、节）？请说明理由。

5. 您希望本书在哪些方面进行改进？

6. 您感兴趣或希望增加的图书选题有：

邮寄地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱电子信息出版分社 张剑 收 邮编：100036
电 话：(010) 88254450 E-mail: zhang@phei.com.cn

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 我国的风能资源和开发程度	1
1.2 我国风能资源开发利用的重点区域	2
1.3 我国风电场实际运行效果	4
1.4 我国的风电装备制造业	6
第 2 章 风电场的选址技术	8
2.1 风电场选址概述	8
2.1.1 风电场选址考虑的基本因素	8
2.1.2 风电场选址步骤	9
2.2 风电场的风能资源评价	12
2.2.1 风能资源评估所需的基本资料	12
2.2.2 风电场场址风能资源评估	13
2.2.3 观测数据的分析统计	16
2.2.4 风电场年发电量的计算	18
2.2.5 风能资源评价应遵循的有关规范及要求提供的图表	19
2.2.6 风能资源评价成果在技术经济分析中的应用	19
2.3 风电场场址的选择	20
2.3.1 风电场选址的基本条件	20
2.3.2 风电场选址的基本方法	23
2.3.3 风电场选址的技术标准	23
2.4 风力发电机组现场位置排布方法	24
2.4.1 风力发电机组位置排列	24
2.4.2 风力发电机组尾流效应	25
2.4.3 风电场现场位置选择对策	25
第 3 章 风力发电与电力系统	28
3.1 概述	28
3.2 风力发电对电能质量的影响	30
3.3 风力发电对电网稳定性的影响	35
3.3.1 电压稳定性	36
3.3.2 频率稳定性	43

第 4 章 并网运行的风力发电机组	47
4.1 风力发电机组的主要形式	47
4.2 风力发电机组的结构	49
4.3 风力发电机组的特性	50
4.4 风力发电机组的控制技术	58
第 5 章 双馈式变速恒频风力发电机组	62
5.1 综述	62
5.2 风轮	64
5.3 机舱	66
5.4 塔架	77
5.5 基础	78
5.6 变流器	79
5.7 控制系统	82
第 6 章 双馈式风力发电机组的运行控制	87
6.1 交流励磁变速恒频技术	87
6.2 双馈式风力发电机组的控制	89
6.3 双馈式风力发电机组的运行过程	95
6.4 风力发电机组的启动与关机程序	99
6.5 安全链	108
6.6 控制系统硬件	112
6.7 系统操作	126
6.8 SCADA 监控系统	145
第 7 章 直驱式永磁同步风力发电机组	167
7.1 低速永磁同步风力发电机	167
7.2 直驱式永磁风力发电机组系统参数	170
7.3 直驱式永磁风力发电机组并网运行特性	173
7.4 全功率变流系统	179
第 8 章 风力发电机组的维护	187
8.1 维护项目分类和要求	187
8.2 风力发电机组各部件的维护工作	189
第 9 章 安全预防	213
9.1 安全防护装备	213
9.2 风力发电机组安装现场安全总则	216
9.3 常规安全事项	216

9.4 安全用电	217
9.5 事故急救	217
第 10 章 海上风力发电技术	219
10.1 海上风力发电发展现状	219
10.2 海上风力发电资源	221
10.3 海上风力发电的发展历程	223
10.4 海上风力发电技术的应用	228
10.5 海上风力发电的前景展望	243
附录 A 风力发电机组运行维护检修项目表	245
附录 B 润滑说明表	249
附录 C 主要螺栓紧固扭矩表	250
附录 D ABB 变频器维护表	251
参考文献	252

第 1 章 绪 论

1.1 我国的风能资源和开发程度

我国幅员辽阔，海岸线长，风能资源丰富。根据第三次风能资源普查结果，我国技术可开发（风能功率密度在 $150\text{W}/\text{m}^2$ 以上）的陆地面积约为 $24 \times 10^4 \text{km}^2$ 。考虑风电场中风力发电机组的实际布置能力，按照 $5\text{MW}/\text{km}^2$ 计算，陆上技术可开发量为 $120 \times 10^4 \text{MW}$ 。这一结论与联合国环境规划署组织国际研究机构，采用数值模拟方法开展的风能资源评价研究，得出的陆地上离地面 50m 高度层风能资源技术可开发量可以达到 $140 \times 10^4 \text{MW}$ 的结论大体相当。

根据《全国海岸带和海涂资源综合调查报告》，海岸带宽度按从海岸线向内陆扩展 10km，向外海延伸到 15~20m 水深计算，全国海岸带面积约 $250 \times 10^4 \text{km}^2$ 。2002 年我国颁布了《全国海洋功能区划》，对港口航运、渔业开发、旅游及工程用海区等做了详细规划。如果避开上述这些区域，考虑其总量 10% 的海岸带面积可以利用，风力发电机组的实际布置按照 $8\text{MW}/\text{km}^2$ 计算，则近海风电装机容量约为 $200 \times 10^4 \text{MW}$ 。而事实上，海上风能资源可利用面积远大于此，从目前欧洲海上风电示范项目来看，海上风力发电机组安装在水深 50m 以内在技术上并没有障碍，因此我国海上可开发的风能潜力巨大，风电具有构成未来能源重要组成部分的资源基础。

我国的风能资源分布广泛，其中较为丰富的地区主要集中在北部（东北、华北、西北）地区和东南沿海地区及其附近岛屿，近海风能资源也非常丰富。此外，内陆也有个别风能资源丰富点。

北部地区风能资源丰富带包括东北三省、河北、内蒙古、甘肃、宁夏和新疆等省（区）近 200km 宽的地带，风功率密度在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上，有的可达 $500\text{W}/\text{m}^2$ 以上，如阿拉山口、达坂城、辉腾锡勒、锡林郭勒灰腾梁、承德围场等。

沿海及其岛屿地区风能资源丰富带包括山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西和海南等省（市、区）沿海近 10km 宽的地带，风功率密度在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上，风功率密度线平行于海岸线。

近海风能资源丰富区包括东南沿海水深 5~50m 的海域，面积辽阔，风功率密度为 $250 \sim 400\text{W}/\text{m}^2$ ，虽然受到航线、港口、养殖等海洋功能区划的限制，仍然有巨大的开发潜力，特别是在江苏、浙江、福建、山东和广东等地，近海风能资源丰富，距离电力负荷中心很近，近海风电可以成为这些地区未来发展的一项重要的清洁能源。

除在两个风能资源丰富带外，内陆风功率密度一般在 $100\text{W}/\text{m}^2$ 以下，但是在某

些地区由于湖泊和特殊地形的影响，风能资源也较丰富。

我国的风能资源有以下两个特点。

1) 风能资源季节分布与水能资源互补 我国风能资源丰富，但季节分布不均匀，一般春季、秋季和冬季丰富，夏季贫乏。我国的水能资源丰富，雨季在南方大致是3~6月（或4~7月），在此期间的降水量约占全年的50%~60%；在北方，不仅降水量小于南方，而且分布更不均匀，冬季是枯水季节，夏季为丰水季节。丰富的风能资源与水能资源季节分布恰好互补，大规模发展风力发电可以在一定程度上弥补我国水电冬春两季枯水期发电电力和电量之不足。

2) 风能资源地理分布与电力负荷不匹配 沿海地区电力负荷大，但是风能资源丰富的陆地面积小；北部地区风能资源很丰富，电力负荷却很小，给风电的经济开发带来困难。

由于大多数风能资源丰富区远离电力负荷中心，电网建设薄弱，大规模开发需要电网延伸的支撑。我国风电开发程度还很低，截至2012年年底，风电装机总量为 $7.5 \times 10^4 \text{ MW}$ ，不到可开发量的6%。虽然目前各大电力公司及风电投资商在风能资源较好的地区跑马圈地，所占容量也不过 $12 \times 10^4 \text{ MW}$ ，约占风能资源量低限的10%。未被开发的风能资源潜力还十分巨大。

1.2 我国风能资源开发利用的重点区域

我国的风能资源分布不平衡，主要的资源分布在北部和沿海地区，各省、市、自治区之间资源也不平衡，风能资源比较丰富的省、自治区主要有内蒙古、新疆、河北、吉林、辽宁、黑龙江、山东、江苏、福建和广东等，有望大规模开发的省、自治区主要有内蒙古、辽宁、河北、吉林、甘肃、新疆和江苏等。

1. 内蒙古自治区

10m 高度风功率密度大于 150 W/m^2 的面积约 $10.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，技术可开发量约 $50 \times 10^4 \text{ MW}$ 。风能资源丰富的地区主要分布在东起呼伦贝尔西到巴彦淖尔广袤的草原和台地上。最早的风电场建在苏尼特右旗的朱日和，1989 年安装了从美国引进的单机 100kW 的变桨距下风式风力发电机组。20 世纪 90 年代中期，重点开发了察右中旗的辉腾锡勒风电场，主要是从丹麦、德国和美国进口的风力发电机组，到 2004 年年底装机约 69MW。2004 年以后，内蒙古东部加快风电发展，相继建成多个超过 100MW 的风电场，如克什克腾旗的赛罕坝和翁牛特旗的孙家营。2012 年年底，内蒙古自治区风电装机容量达到了 $1.86 \times 10^4 \text{ MW}$ ，形成了赛罕坝、辉腾梁和辉腾锡勒三大风电基地，三者均有可能在 2020 年成为超过 $1 \times 10^4 \text{ MW}$ 的特大型风电基地。

2. 辽宁省

陆地 10m 高度风功率密度大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 的风能资源储量约为 $5.4 \times 10^4\text{MW}$, 渤海、黄海海域的风能资源储量约为 $10 \times 10^4\text{MW}$ 以上, 技术上具有开发价值的风能资源丰富区和较丰富区占全省面积的 40% 以上。辽宁省沿海六市是我国为数不多的临海强压型风能资源丰富区。另外, 与风能资源最丰富的内蒙古自治区接壤的辽西北一带, 由于两侧被丘陵束缚, 天然形成了强大的风力收缩区。2012 年年底, 辽宁省装机容量达到 6118MW。

3. 河北省

陆地 10m 高度风功率密度大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 的面积约 7378km^2 , 技术可开发量约 $4 \times 10^4\text{MW}$ 。风能资源丰富的地区主要分布在河北省北部的张家口市坝上地区和承德市的围场县和丰宁县, 沿海岸线的黄骅港附近风能资源也较为丰富。1996 年, 在张北县的“坝头”苗条梁村附近建设了第一个风电场, 安装了从丹麦、德国和美国进口的风力发电机组, 装机容量约 10MW。2001 年起, 承德市围场县开始建设风电场, 到 2006 年年底, 围场县红松洼风电场装机容量达到 106MW。2012 年年底, 河北省风电装机容量达到 7979MW, 主要分布在张家口和承德两地。其张北和坝上地区, 规划到 2020 年建成 $1 \times 10^4\text{MW}$ 的特大型风电基地。

4. 吉林省

陆地 10m 高度风功率密度大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 的面积约 2000km^2 , 技术可开发量 $1 \times 10^4\text{MW}$ 。风能资源丰富的地区主要分布在西部的白城、通榆、长岭和双辽等地。1999 年, 在通榆的更生屯建设第一个风电场, 引进了西班牙和德国的风力发电机组。5 年后, 才在白城建设第二个风电场, 以后发展迅速。到 2012 年年底, 吉林风电装机容量已经达到 3997MW。

5. 甘肃省

甘肃省地处河西走廊, 陆地 10m 高度风功率密度大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 的面积约 $3 \times 10^4\text{km}^2$, 技术可开发量可达 $15 \times 10^4\text{MW}$ 。风能资源丰富的地区主要分布在安西、酒泉等与新疆和内蒙古接壤的具有加大风速地形条件的地域。

虽然甘肃省发展风电起步较晚, 却大有后来居上之势。2012 年年底, 甘肃省风电装机容量已经达到 6479MW。甘肃省率先启动了全国第一个千万千瓦级风电项目, 并且在第 5 次风电特许权招标中, 一次性确定了 21 个风电场工程项目, 总装机容量达到了 $4 \times 10^3\text{MW}$ 。甘肃省有望成为继内蒙古自治区之后我国最大的风电开发区。