

新能源科技译丛 |

风力发电系统手册

(上册)

(美) 帕诺斯M. 帕达洛斯 (美) 斯蒂芬·瑞本纳克 (巴) 马里奥V. F. 佩雷拉
(希) 尼科A. 伊利亚迪斯 (美) 维贾伊·帕普 编
郭书仁 译



中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

新能源科技译丛

风力发电系统手册

(上册)

(美) 帕诺斯 M. 帕达洛斯 (美) 斯蒂芬·瑞本纳克 (巴) 马里奥 V.F. 佩雷拉

(希) 尼科 A. 伊利亚迪斯 (美) 维贾伊·帕普 编

郭书仁 译

常州大学图书馆
藏书章

中国三峡出版传媒

中國三聯出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电系统手册: 全2册/ (美) 帕诺斯 M. 帕达洛斯等编;
郭书仁译. — 北京: 中国三峡出版社, 2017. 10

书名原文: Handbook of Wind Power Systems

ISBN 978-7-5206-0000-2

I. ①风… II. ①帕… ②郭… III. ①风力发电系统-手册 IV. ①TM614-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 217794 号

Translation from the English language edition:

Handbook of Wind Power Systems

edited by Panos M. Pardalos, Steffen Rebennack, Mario V. F. Pereira,

Niko A. Iliadis, Vijay Pappu

Copyright© Springer-Velag Berlin Heidelberg 2013

Springer is part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2017-7287 号

责任编辑: 彭新岸

中国三峡出版社出版发行

(北京市西城区西廊下胡同 51 号 100034)

电话: (010) 57082645 57082566

<http://www.zgsxcbs.cn>

E-mail: sanxiaz@sina.com

北京环球画中画印刷有限公司印刷 新华书店经销

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24.75

字数: 464 千字

ISBN 978-7-5206-0000-2 定价: 168.00 元 (上、下册)

序 言

2000 年至 2006 年, 全球风电装机容量翻了两番还多, 平均每三年翻一番。截至 2012 年底, 全球风电装机容量达 282GW, 比上年增长 44GW。因此, 风能被视为当前发展最快的能源。过去十年, 一些因素推动了风力发电的发展, 尤其是技术进步。此外, 美国等国家对风力发电实施补贴, 增加了风力发电技术的吸引力。

《风力发电系统手册》分为四部分: 风力发电优化问题, 风力发电系统并网, 风力发电设施的建模、控制和维护, 以及创新型风力发电。

本书涉及风力发电系统中出现的一些优化问题。Wang 等人处理了考虑风电不确定性的可靠性评估机组组合相关问题; Samorani 等人探讨了风场布局优化问题; 此外, Yamada 等人提出了风电交易中使用的几种风险管理工具; 最后, Sen 等人提出了创新型风能模型和预测方法。

风力发电系统并网是一个非常重要的问题, 许多文献均有所涉及。Vespucci 等人探讨了将风力发电系统并入传统发电系统所用的随机模型; Santoso 等人探讨了风电场建模; Carpinelli 等人探讨了风电场配电系统稳态分析所用的确定性方法和概率性方法; 此外, Resende 等人解决了大型风电并网先进控制功能相关问题; Tsikalakis 等人探讨了高风电穿透率引起的电网稳定性问题, 而 Denny 等人探讨了高风电穿透率下电力系统的运行, 并评估了电力系统中风电波动条件下的运行储备问题。

本手册部分章节侧重于风力发电设施的建模、控制和维护。Namak 等人对漂浮式风电机控制器进行了综述, Ramírez 等人详细探讨了风电机组和风电场建模, Michalke 等人分析了风电机的电网支持能力, Castronuovo 等人探讨了风电场和储能装置的协调, Rahman 等人探讨了海上风电与潮汐能混合发电系统, Ding 等人 and Milan 等人探讨了风力发电设施的

维护和监测。

Hasager 等人研究了海上风能卫星遥感测量，Ramos 等人探讨了海上风电场交流发电系统的优化问题，Bratcu 等人探讨了低功率风能转换系统，Ahmed 等人对小型风力驱动设备进行了研究。

本手册各章节由风力发电和风能转换领域不同专业的专家共同编写。我们特此向本手册所有作者、审稿人员以及 Springer 致以最诚挚的谢意，感谢其提出的建设性意见及对本项目提供的大力支持。

帕诺斯 M. 帕达洛斯
斯蒂芬·瑞本纳克
马里奥 V. F. 佩雷拉
尼科 A. 伊利亚迪斯
维贾伊·帕普

目 录

上 册

第一篇 风力发电优化

第一章 考虑风电不确定性的可靠性评估机组组合	3
术语	3
1.1 概述	5
1.2 机组组合与调度公式	7
1.3 市场模拟	10
1.4 案例研究	12
1.5 结论	18
第二章 风电场布局优化问题	21
2.1 概述	21
2.2 风电场建设	22
2.3 风电机与尾流效应	23
2.4 风电场布局优化相关专著	27
2.5 结论	33
第三章 风电交易风险管理工具：天气衍生品	38
3.1 概述	38
3.2 衍生品的基本结构	40
3.3 有关预测误差和对冲问题的风况衍生品	43
3.4 经验性分析和数值实验	50

3.5 进一步讨论 60

3.6 总结 60

第四章 创新风力发电模型与预测方法..... 64

4.1 概述 64

4.2 全球环流 65

4.3 气象与动力 67

4.4 风速随高度的变化而变化 70

4.5 幂定律动态演示 74

4.6 随机性风能计算公式 76

4.7 时空风能和动力学的理论公式 81

4.8 新风能计算公式与 Betz 极限比较 85

4.9 风功率摄动 89

4.10 风能可靠性统计研究及其应用 93

4.11 风速与地势的区域评估 100

4.12 以风速时序为基础的风能评估 110

第二篇 风力发电系统并网

第五章 风力发电系统与传统发电系统并网：随机模型和性能测量 119

5.1 简介..... 119

5.2 随机模型..... 120

5.3 创建场景..... 126

5.4 性能测量..... 131

5.5 数值结果..... 134

5.6 结论..... 138

第六章 风电系统并网：风电场建模 141

6.1 概述..... 141

6.2 建模概念和相关理论..... 144

6.3 风电机组模型开发与应用..... 155

6.4 结论..... 187

第七章 含风电场的配电系统稳态分析的确定性方法 193

7.1 概述	193
7.2 不含风电场的配电系统的潮流方程	194
7.3 含风电场的配电系统的潮流方程	201
7.4 数值应用	211
7.5 结论	222
第八章 含风电场的配电系统稳态分析的概率性方法	226
8.1 概述	226
8.2 不含风电场的配电系统的概率潮流	227
8.3 含风电场的配电系统的概率潮流	231
8.4 数值应用	241
8.5 结论	254
附录 8. A	255
附录 8. B	256
第九章 大规模风电并网中的先进控制功能	261
9.1 概述	261
9.2 DFIG 动态建模和运行	263
9.3 通过模糊控制提升 DFIG 故障穿越能力	275
9.4 DFIG 参与系统频率调整	279
9.5 DFIG 内置 PSS 的鲁棒整定	285
9.6 配备 FSIG 的风电场采用的外部故障穿越解决方案	294
9.7 结论	301
第十章 高风电穿透率下的电网稳定性	307
10.1 概述	307
10.2 电网稳定性的定义和分类	309
10.3 高风电穿透率相关技术问题	310
10.4 独立电力系统案例	313
10.5 结论	323
第十一章 高风电穿透率下的电力系统运行	329
11.1 概述	329
11.2 高风电穿透率下电力系统运行面临的挑战	332
11.3 调度工具	337

11.4 系统规划：灵活性 342

第十二章 虑及电力系统风电功率波动的运行备用评估 350

12.1 概述 350

12.2 备用需求测定方法 351

12.3 电力系统概率评估 352

12.4 运行备用的长期评估 357

12.5 应用结果 361

12.6 总结 377

下 册

第三篇 风力发电设施的建模、控制和维护

第十三章 漂浮式风电机控制器 385

13.1 概述 385

13.2 模拟工具和模型 387

13.3 组合和独立叶片变桨距控制 390

13.4 漂浮式风电机控制器 393

13.5 结论 405

第十四章 风电机的建模和控制 410

术语 410

14.1 概述 413

14.2 电力系统动态模拟 414

14.3 风电机动态模型 415

14.4 风电机：机械系统的建模和控制 415

14.5 风电机：电气和控制系统建模 420

14.6 结论 465

第十五章 风电场的建模和控制 469

15.1 概述 469

15.2 风电场建模 471

15.3	风电场控制系统	486
15.4	增强对电网的影响所需的风电场特殊装置	499
15.5	结论	513
第十六章	风电机的电网支持能力	525
16.1	概述	525
16.2	风电并网	526
16.3	风电机设计理念	530
16.4	电网直连风电机的电网支持能力	534
16.5	DFIG 风电机的电网支持能力	536
16.6	完整规模变流器风电机的电网支持能力	539
16.7	结论	542
第十七章	风电场和储能装置的协调运行——技术和经济性分析	546
17.1	概述	546
17.2	风力发电和储能装置协调运行的备选方案	547
17.3	用于补偿风电场发电偏差的蓄能电站的最优调度	558
17.4	风电及其与备用电力市场的关系	561
17.5	结论	568
第十八章	HOTT 发电系统原型	575
18.1	概述	575
18.2	拟建 PHGS 模型系统	576
18.3	改变电压频率: 50—46—50Hz	582
18.4	实验结果	583
18.5	讨论	587
18.6	结论	587
第十九章	风力发电设施的可靠性和维修	590
19.1	概述	590
19.2	了解风电机运行现状	593
19.3	评估风电机可靠性和寻求最佳运维策略的模型	597
19.4	风电场运行模拟研究	607
19.5	发电容量充裕度评估模型	608
19.6	总结	613

第二十章 风电机功率性能与监测应用 625

20.1 概述 625

20.2 功率性能理论 626

20.3 在运行状态风电机中的应用 634

20.4 功率性能监测的应用 646

20.5 结论 651

附录 20. A 风轮叶片的气体力学 652

附录 20. B 功率输出松弛模型 654

第四篇 创新型风力发电

第二十一章 海上风能卫星遥感测量 661

缩写词 661

21.1 概述 663

21.2 SSM/I 670

21.3 QuikSCAT 674

21.4 合成孔径雷达 (SAR) 681

21.5 总结与讨论 687

21.6 未来展望 688

第二十二章 海上风电场交流电力系统的优化 697

22.1 概述 697

22.2 海上风电场交流电力系统 698

22.3 海上风电场交流电力系统评估 703

22.4 海上风电场交流电力系统的优化 706

22.5 应用实例 710

22.6 结论 716

第二十三章 低功率风能转换系统：发电配置与控制目标 721

缩写词与符号 721

23.1 概述：基本概念 722

23.2 低功率风电机的控制原则 727

23.3 并网低功率风能转换系统 731

23.4 独立发电配置中的低功率风能转换系统	738
23.5 结论	747
第二十四章 实现环保电力生产和消费所用的小型风力驱动设备	751
符号	751
24.1 概述	753
24.2 小型风电机	756
24.3 用于降低家庭用电量的小型屋顶风力驱动通风器	768
24.4 未来可能性：流量控制技术整合	774
24.5 结论	777

风力发电优化

第一章

考虑风电不确定性的可靠性评估机组组合

Jianhui Wang, Jorga Valenzuela, Audun Botterud, Huseyin Kaya,
Ricardo Bessa 和 Vladimiro Miranda

第一篇

风力发电优化

摘要：本章介绍了一些关于可靠性评估组合发电中风电不确定性的方法。该研究从经济成本和可靠性性能方面比较了风力发电系统两种方法：随机方法和随机方法。报告中概述了两种方法，并给出了相应的性能结果。可以得出如下结论：风电的不确定性对电力系统的影响可以通过适当的容量配置来缓解，从而减少系统的不确定性。

术语

符号

风电机组数量， $i=1, 2, \dots, I$

热电机组数量， $j=1, 2, \dots, J$

时间间隔数量， $k=1, \dots, 24$

发电成本系数，热电机组， $i=1, \dots, I$

© J. Wang (JW), J. Valenzuela, A. Botterud

挪威科技大学电力系统与信息科学系，奥斯陆，挪威

e-mail: jianhui.wang@ntnu.no

J. Valenzuela

日本大学，多摩校区，日本，东京

H. Kaya, R. Bessa, V. Miranda

葡萄牙电力系统与信息科学系，里斯本，葡萄牙

H. Kaya, R. Bessa, V. Miranda

葡萄牙里斯本大学工程学校

第一章

考虑风电不确定性的可靠性评估机组组合

Jianhui Wang, Jorge Valenzuela, Audun Botterud, Hrvoje Keko,
Ricardo Bessa 和 Vladimiro Miranda^①

摘要：本章论述了一项关于可靠性评估组合流程中风电不确定性建模的研究报告。该研究从经济效益和可靠性效益方面比较了风力发电建模的两种方法——确定性方法和随机性方法。报告中描述了两方法的数学公式，并基于 10 机组测试系统得出了相应的数值结果。可得出如下结论：风电不确定性的场景描述及基于风电不确定性的电力系统备用容量可为市场参与者带来更高的效益。

术语

指数

i	风电机组指数, $i = 1, \dots, I$
j	热电机组指数, $j = 1, \dots, J$
k	时间周期指数, $k = 1, \dots, 24$
l	发电模块指数, 热电机组, $l = 1, \dots, L$

① J. Wang (✉) · J. Valenzuela · A. Botterud

阿贡国家实验室决策与信息科学部, 美国阿贡 IL60439

e-mail: jianhui.wang@anl.gov

J. Valenzuela

奥本大学工业与系统工程系, 美国阿拉巴马州

H. Keko · R. Bessa · V. Miranda

葡萄牙计算机与系统工程研究所, 葡萄牙波尔图

H. Keko · R. Bessa · V. Miranda

葡萄牙波尔图大学工程学院

m 备用需求模块指数, $m = 1, \dots, M$
 s 情况指数, $s = 1, \dots, S$

常量

a, b, c 机组生产成本函数系数
 $\alpha(s)$ 运行备用率, 情况 s
 $WR(k)$ 额外风能储备, 周期 k
 $D(k)$ 负荷, 周期 k
 C_{ens} 电量不足成本
 $CR_{rns,m}$ 备用不足成本, 模块 m
 A_j 最低负荷下的运行成本, 热电机组 j
 $MC_{l,j}$ 边际成本 (或竞价), 模块 l , 热电机组 j
 $\overline{PT_j}$ 容量, 热电机组 j
 $\underline{PT_j}$ 最低出力, 热电机组 j
 $\overline{\Delta_{l,j}}$ 容量, 模块 l , 热电机组 j
 CC_j 冷启动成本, 热电机组 j
 HC_j 热启动成本, 热电机组 j
 $G(\cdot)$ 通用网络约束
 T_j^{cold} 冷启动成本时间 (去除最低停机时间), 热电机组 j
 T_j^{up} 最低正常运行时间, 热电机组 j
 $T_j^{up,0}$ 最低正常运行时间, 初始时间步, 热电机组 j
 T_j^{dn} 最低故障停机时间, 热电机组 j
 $T_j^{dn,0}$ 最低故障停机时间, 初始时间步, 热电机组 j
 SU_j 启动爬坡限制, 热电机组 j
 SD_j 停机爬坡限制, 热电机组 j
 RL_j 机组出力变化速率 (升/降), 热电机组 j
 $W_i(k)$ 实际最大风力发电量, 风电机组 i , 周期 k
 $PW_i^{f,s}(k)$ 预测最大风力发电量, 风电机组 i , 周期 k , 场景 s
 $prob_s$ 事件概率, 风力场景 s

变量

$c_j^p(k)$ 生产成本, 热电机组 j , 周期 k

$c_j^u(k)$	启动成本, 热发电机组 j , 周期 k
$pt_j(k)$	发电, 热发电机组 j , 周期 k
$\delta_{lj}(k)$	发电, 模块 l , 热发电机组 j , 周期 k
$\overline{pt}_j(k)$	最大可能发电量, 热发电机组 j , 周期 k
$v_j(k)$	二元开/关变量, 热发电机组 j , 周期 k
$pw_i^s(k)$	发电, 风电机组 i , 周期 k , 场景 s
$cw_i^s(k)$	受限风力发电量, 风电机组 i , 周期 k , 场景 s
$ens^s(k)$	电量不足, 周期 k , 场景 s
$rs_m^s(k)$	受限备用容量, 周期 k , 场景 s
$r^s(k)$	备用要求 (旋转), 场景 s , 周期 k

1.1 概述

在很多电力市场中, 发电商和电力购买者向独立电力系统营运商 (ISO/RTO) 提交报价, 说明其愿意给出或支付的能源数量和价格^[1]。电力市场通常分为日前 (DA) 市场和实时 (RT) 市场。在日前市场中, 发电商提交卖电报价, 消费者提交购电报价。ISO/RTO 使用最低成本的安全约束机组组合 (SCUC) 和安全约束经济调度 (SCED) 优化模型计算未来 24 小时的出清电价。ISO/RTO 的目标是在确保系统可靠性的同时, 以最低成本满足要求。

但是, 由于风力发电的不确定性和可变性, 尤其是在机组组合阶段, 风力发电的高穿透率使电力系统营运商在保持系统稳定运行方面面临着巨大挑战。因此, 如何以最优方法使用发电机组克服风力发电的波动性变得至关重要。为解释负荷波动、电力中断和风电出力不确定性的原因, 机组组合算法综合优化了能源和辅助服务。目前大部分研究主要关注如何在无需模拟完整市场程序的情况下将风力发电预测并入日前市场 SCUC。Barth 等人^[2]介绍了 WILMAR (开放电力市场中的风电并网) 模型的前期阶段, 见文献 [3]。最近, WILMAR 引入了一项更具综合性的机组组合算法, 该算法以混合整数线性规划 (MILP) 为基础。但是, WILMAR 模型主要用作一种规划工具。Tuohy 等人^[4]扩展了前述研究, 采用 WILMAR 模型评估了随机风力和负荷对机组组合以及含大规模风电电力系统调度的影响, 见文献 [5] 和 [6]。WILMAR 模型的构建基于时前或日前系统调度所需的假设。分析中仅比较了调度阶段的几项备选调度方案。应通过分析实时市场的运作影响进一步审查这些方法的有效性, 在实时市场中, 实际风力发电可能会与预测值有所偏差。Ummels 等人^[7]分析