



国际电气工程先进技术译丛

风力发电系统 优化控制

**Optimal Control of Wind
Energy Systems**

(罗马尼亚)

Iulian Munteanu

Antoneta Iuliana Bratcu

(丹麦) Nicolaos—Antonio Cutululis

(罗马尼亚) Emil Ceangă

著

李建林 周京华 等译

5
8



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气



风力发电系统优化控制⁻²⁹

Optimal Control of Wind Energy Systems

(罗马尼亚) Iulian Munteanu
Antoneta Iuliana Bratcu

(丹麦) Nicolaos-Antonio Cutululis 著

(罗马尼亚) Emil Ceangă

李建林 周京华

梁亮 肖志东 胡春松 译

7m315

m568



机械工业出版社

本书涵盖了风力发电系统所涉及的几个关键技术领域：风力资源、风电场微观选址、风力机类型、风能转换系统、风电场数学建模、风电机组控制系统、风电机组优化控制器、风能转换系统优化设计准则、变流器控制、变桨距控制系统以及风电系统实验设计等诸多方面。书中详细给出了风电系统控制部分的技术细节和具体实现方法，并通过仿真、实验双重手段，对不同控制策略下所得到的详实波形进行了对比分析，有一定的工程理论价值和工程借鉴、示范作用。本书适用于从事风力发电行业、电力电子与电力系统行业、风电控制系统、风电场运行与维护的工程师参考，亦可作为风电控制系统工具手册使用，尤其适合高等院校的本科生和研究生阅读。

Translation from the English language edition: "Optimal Control of Wind Energy Systems"
by I. Munteanu, A. I. Bratcu, N.-A. Cutululis, E. Ceangă.

Copyright © 2008 Springer, London.

as a part of Springer Science+Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。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，翻版必究。

本书版权登记号：图字 01-2009-3817 号

图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电系统优化控制/ (罗) 蒙特安努 (Munteanu, I.) 等著;
李建林等译. —北京: 机械工业出版社, 2010. 8

(国际电气工程先进技术译丛)

Optimal Control of Wind Energy Systems

ISBN 978-7-111-31025-9

I. ①风… II. ①蒙…②李… III. ①风力发电机—系统最优化
IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 115417 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: 付承桂

版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英

封面设计: 马精明 责任印制: 乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.5 印张 · 301 千字

0001 - 3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-31025-9

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

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

译 者 的 话

由罗马尼亚著名学者 Iulian Munteanu 等人撰写的《Optimal Control of Wind Energy Systems》(《风力发电系统优化控制》)一书由 Springer 出版社于 2008 年 1 月出版。此书是 Springer 出版社“Advances in Industrial Control”(工业控制优化)系列丛书中的一本。

本书涵盖了风力发电所涉及的几个关键技术领域:风能、风能转换系统、风电场数学建模、风电机组控制系统、风电机组优化控制器、风能转换系统优化设计准则、变流器控制、变桨距控制系统以及风电系统实验设计等诸多方面。书中给出了风能优化控制系统的具体实现方法,并通过仿真、实验双重验证,提供了不同控制策略下所得到的详实波形,便于对比分析,加深读者印象。本书适合从事风力发电行业、电力电子与电力系统行业、风电控制系统、风电场运行与维护的工程师参考,尤其适合高等院校的本科生和研究生阅读。

本书第 1、2、6 章由北方工业大学周京华副教授翻译;第 3 章由中国电力科学研究院梁亮翻译;第 4 章部分内容以及附录 A 由哈尔滨工业大学风电研究所肖志东翻译;第 5 章由浙江华仪电器集团胡春松助理研究员翻译;第 7、8 章和附录 B、C 以及部分第 4 章内容由中国电力科学研究院李建林副研究员翻译;全书最后由李建林统一校对、统稿。除以上所列译者外,我的学生中国科学院电工研究所的霍现旭、朱琼峰、张雷,北京科诺伟业科技有限公司的王宇龙、谷海涛、邵桂萍等,对本书做了校对和部分录入、翻译工作,在此一并感谢!

另外,本书的翻译得到了国家自然科学基金项目(50907067)“直接驱动型风力发电系统低电压穿越控制策略研究”、北京市电气工程优秀教学团队(PHR201007206)、北京市科技新星计划的资助,在此表示感谢。由于译者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

李建林

2010 年 1 月 1 日

于中国电力科学研究院

译者简介

李建林 1976年生，博士，博士后，中国电力科学研究院副研究员，硕士生导师。中国可再生能源风能协会委员，全国风力机械标准化技术委员会委员，中国电气工程大典可再生能源发电工程编委，电工技术学会、动力工程学会新能源专委会委员，《电网技术》、《电工技术学报》、《电力系统自动化》、《中国电机工程学报》等期刊特约审稿人，IEEE会员。2005年获浙江大学电力电子与电气传动专业博士学位，2005~2007年在中国科学院电工研究所从事博士后科研工作，研究方向为可再生能源发电技术、风力发电技术、电力电子技术、大规模储能技术。2009年11月调入中国电力科学研究院工作，从事风光储方面的研究工作。主要承担了国家自然科学基金项目1项，全国博士后基金项目1项，中国科学院所长基金项目1项。近年来发表文章100余篇，其中60余篇被EI检索，发明专利10项。著有《风力发电中的电力电子变流技术》、《风力发电系统低电压运行技术》，参与编写了《中国电气工程大典》（可再生能源卷：风力发电技术）。



周京华 1974年生，博士，北方工业大学副教授，硕士生导师。2005年获西安交通大学电气工程专业博士学位。北京市中青年骨干教师，2009年入选北京市科技新星计划，2006年获中国有色金属工业协会颁发的中国有色金属工业科学技术奖（三等）一项。研究方向为多电平变换技术在大功率变频器、PWM整流器、有源电力滤波器及清洁能源中的应用。近年来，以第一作者发表论文34篇，其中中文核心期刊10篇，EI检索14篇，已申请发明专利1项，编著教材1部。科研方面，承担北京市教委面上项目1项，参与完成北京市自然科学基金项目1项，参与国家自然科学基金项目2项，承担企业委托项目5项。目前，已经成功为企业开发出1140V/400kW三电平大功率变频器、380V/400kW能量回馈型电磁搅拌机、6kV/600kW多单元串联型能量回馈高压变频器，并已实现产品化，推向市场。



原系列丛书编辑前言

“工业控制优化”系列丛书旨在报道和促进控制工程中的技术发展。控制技术的快速发展对控制所有领域均产生了深远的影响。近年来,出现了一批新的控制理论、控制器、执行器、传感器、工业处理过程、计算方法,以及新的应用、新的控制原理等,同时也带来了新的挑战。大部分新技术新方法都是在行业报告、可行性研究报告和协作完成的工程报告中总结出来的。该系列丛书为广大技术人员提供了一个良好的平台,可以更全面、快捷地展示新型控制技术。

风电在欧盟及全世界都发展很快。欧盟各国的目标是到2020年风电的市场份额占到12%,但是正如本系列丛书的作者观察到的:不依靠自动控制这一必要途径,风能转化的参数和技术标准达到电力市场的要求是不可能的。为了证实这一点,Iulian Munteanu、Antoneta Iuliana Bratcu、Nicolaos-Antonio Cutululis和Emil Ceangă对控制工程技术在各种风力发电系统控制中的应用做了概述。本书从风能作为可再生能源的基本特性说起,以控制环概念和评估控制器的实验平台介绍作为结尾,形成了较为全面的权威著作。

本书作者所做的研究经历了深入调查所必需的一般历程,针对繁杂、非线性的工业控制系统提供了系统的解决方案。本书前三章分别介绍了风能的形成过程、风力模型和风能特性。接下来的三章介绍了为满足不同程度的控制性能目标而进行的控制设计的演变过程。最后,得出了一种有效的控制策略,并以硬件在环的手段进行了性能测试。

因此,《风力发电系统优化控制》一书中所阐述的各种优化控制策略的全面评估为风电控制做出了很大的贡献。本书很好地对“工业控制优化”系列丛书中的另一本《风力机控制系统:原理、建模及增益调度设计》(《Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design》^①)进行了补充,后者的作者是Fernando Bianchi等,于2006年7月

① 该书的中文译本于2009年3月由机械工业出版社出版。

VI 风力发电系统优化控制

出版。该丛书中的系列书目为风能转换系统控制的研究提供了一个完整的架构。

M. J. Grimble

M. A. Johnson

英国，苏格兰

格拉斯哥

工业控制中心

前 言

可持续能源战略提倡以新能源逐步取代化石燃料能源,是一种优先发展的战略。在各种新能源中,风能目前在很多发达国家中都占有很重要的地位。随着国际合作研究的不断进行,各种成熟的风能转换技术可以逐步满足各个相关投资项目的快速发展。

风电系统的主要问题是风能的随机性和间歇性(风速是随机的,具有很强的不稳定性,有时会出现湍流和极端的情况),以及电能质量的苛刻要求,例如无功功率要求、谐波要求和闪变要求等。因此,若没有自动控制,风能转换系统达到由电力市场和技术指标所要求的参数性能几乎是不可能的。

风能的随机特性对机械结构的承受能力提出了很大的挑战。在考虑到全球经济效率的大前提下,大部分相关文献都强调可靠性标准的重要性,有时甚至超过了对能量转换效率的要求(例如,在海上风电场的情况下)。所以,在控制策略中必须考虑到这方面的因素。

许多研究工作都致力于风能转换系统的控制,其目的在于优化能量转换效率,实现风力发电机与电网的连接,减轻机械结构的疲劳载荷。同时,还要考虑先进控制算法和它们在实际工程领域的应用之间的差距。现在很多研究机构都已经进行或正在进行这项研究工作,以缩小这种差距,成功实现向控制工程领域的技术转移。

本书的目的在于阐述一系列风力发电优化控制方面的观点,涵盖了风力发电工业应用的大部分领域。其主要思想是提出一系列优化准则并实现其应用,包括能量转换效率、机械可靠性以及提供的电能的质量。这种思想为多目标整体控制提供了一个全新的视角。

本书对一系列的控制技术进行了分析、评估和比较。这些控制技术包括经典的控制技术,如PI控制、最大功率点策略和LQG(线性二次型高斯)优化控制技术,也包括一些现代的控制技术,如滑模控制、反馈线性化控制和鲁棒控制。这些技术的讨论旨在确定动态优化方案在风能系统中的优点。由各种技术得到的结论都通过各种案例研究和MATLAB/Simulink仿真进行了验证。相关的软件方案和控制框图都在书后的软件资料部分^①给出,并且给出了其中的某些案例研究的实时仿真结果。

① 原书书后并没有软件资料部分,但读者可从网址

<http://www.springer.com/978-1-84800-079-7> 下载。——编辑注

本书所用的物理量汇总

风能系统

空气动力学子系统和传动链

v, v_s, v_t	总风速, 稳态风速和湍流风速 [m/s]
w	相对于叶片的风速 [m/s]
ρ	空气密度 [kg/m ³]
I_t, L_t	湍流密度 [-] 和长度 [m]
Ω_l, Ω_h	风轮角速度 (低速轴角速度) 和高速轴角速度 [rad/s]
R	风力机叶片长度 [m]
β	桨距角
N_b	风力机的叶片数目
$A = \pi R^2$	风轮扫掠面积 [m ²]
σ_p	Prandtl 的系数 [-]
λ, λ_{opt}	风力机的叶尖速度比及其最优值 [-]
v_s, v_n, v_M	风力机的切入风速、额定风速和切出风速
P_{air}	固定质量流动空气的总功率 [W]
P, P_{em}	生产的有功功率和发电机的机械功率 [W]
P_{wt}, P_n	风力机的捕获功率和额定功率 [W]
$C_p, C_{p_{max}} \equiv C_{p_{out}}$	风力机的功率系数及其最大值 [-]
Γ_{wt}, Γ_h	风力机风轮 (低速轴) 输出转矩和高速轴转矩 [N · m]
P_{opt}	从风能中得到的最大捕获功率 [W]
$\Gamma_{opt} = \Gamma_{wt}(\lambda_{opt}, v)$	对应于最优叶尖速度比的风转矩 [N · m]
$C_\Gamma, C_{\Gamma_{max}}$	风力机的转矩系数及其最大值 [-]
$C_{\Gamma_{opt}} = C_\Gamma(\lambda_{opt})$	对应于 λ_{opt} 的转矩系数 [-]
J_{wt}	风轮转动惯量 [kg · m ²]
i	齿轮箱 [传动链] 传动比 [-]
K_s, B_s	传动链硬度和阻尼系数 [N · m · s]
η	效率 [-]

Γ	传动链扭矩 $[\text{N} \cdot \text{m}]$
发电机	
J_g	发电机轴转动惯量 $[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
Γ_G	发电机转矩 $[\text{N} \cdot \text{m}]$
p	极对数
ω_s, ω_R	定子（同步发电机）和转子频率 $[\text{rad/s}]$
感应发电机	
V_s, V_R	定子和转子的电压有效值 $[\text{V}]$
i_s, i_R	定子电流和转子电流 $[\text{A}]$
Φ_s, Φ_R	定子磁通和转子磁通 $[\text{Wb}]$
R_s, R_R	定子和转子的绕线电阻 $[\Omega]$
L_s, L_R, L_m	定子电感, 转子电感和互感 $[\text{H}]$
ω	角速度 $[\text{rad/s}]$
θ_s, θ_R	定子和转子的磁通矢量角 $[\circ]$
σ	漏磁因数 $[-]$
同步发电机	
R_l	负荷阻抗 $[\Omega]$
u, i	定子电压 $[\text{V}]$ 和定子电流 $[\text{A}]$
L	定子电感

建模

s	拉普拉斯算子
j	$\sqrt{-1}$
$\dot{x}$	x 对时间的导数
x^*	x 变量的参考值
$\bar{x}$	在给定的稳态工作点下 x 的变量值
$\Delta x = \bar{x} - x$	在稳态工作点 $\bar{x}$ 附近的变化量
$\Delta \bar{x} = \Delta x / \bar{x}$	在稳态工作点 $\bar{x}$ 附近变化量的标准化 $[-]$
$\sigma(x)$	x 的标准差
$S_{xx}(\omega)$	x 的频谱功率密度
$e(t)$	白噪声
$E\{x\}$	x 的期望值
T_w	低通滤波器的时间常数
γ	风力机的转矩参数 $[-]$

J_l	低速轴的等效转动惯量 $[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
J_h	高速轴的等效转动惯量 $[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
J_T, J_G	风力机线性化模型的时间常数 $[\text{s}]$
x_d, x_q	发电机 (d, q) 轴上的 x 变量值
x_a, x_b, x_c	发电机 (a, b, c) 三相坐标轴上的 x 变量值
T_G	电磁子系统等效动态模型的时间常数 $[\text{s}]$

本书所用的首字母缩略词汇总

2LFSP	Two-loop control structure based on the frequency separation principle	基于频率分离原则的双环控制结构
AS	Aerodynamic subsystem	空气动力学子系统
BET	Blade element theory	叶素理论
BPS	Basic physical system	基本物理系统
CS	Control subsystem	控制子系统
DFIG	Doubly-fed induction generator	双馈感应发电机
DFT	Discrete Fourier Transform	离散傅里叶变换
DT	Drive train	传动链
EFT	Effector (part of the HIL simulator)	效应器 (HIL 仿真器的组成部分)
EMS	Electromagnetic subsystem	电磁子系统
EPS	Emulated physical system	仿真物理系统
EPSM	Model of the EPS	EPS 模型
FFT	Fast Fourier Transform	快速傅里叶变换
H/V AWT	Horizontal-/vertical-axis wind turbine	水平轴/垂直轴风力机
HFL	High-frequency loop	高频环
HIL	Hardware-in-the-loop	硬件在环
HILS	Hardware-in-the-loop simulation	硬件在环仿真
HPF	High-pass filter	高通滤波器
HSS	High-speed shaft	高速轴
IPS	Investigated physical system	研究物理系统
LFL	Low-frequency loop	低频环
LPF	Low-pass filter	低通滤波器
LSS	Low-speed shaft	低速轴
OP	Operating point	工作点
OOP	Optimal operating point	最优工作点
ORC	Optimal regimes characteristic	最优控制特性
PMSG	Permanent-magnet synchronous generator	永磁同步发电机
PWM	Pulse-width modulation	脉宽调制
RTPS	Real-time physical simulator	实时物理仿真器
RTSS	Real-time software simulator	实时软件仿真器
SCIG	Squirrel-cage induction generator	笼型感应发电机
TSC	Tip speed controller	叶尖速度控制器

TSR	Tip speed ratio	叶尖速度比
(V/C S)	(Variable-/constant-speed) wind energy	(变速/恒速) 风能转换系统/风能
WECS/WPS	conversion system/wind power system	系统
WRIG	Wound-rotor induction generator	绕线转子感应发电机
WRSG	Wound-rotor synchronous generator	绕线转子同步发电机

目 录

译者的话

译者简介

原系列丛书编辑前言

前言

本书所用的物理量汇总

本书所用的首字母缩略词汇总

第 1 章 风能 1

1.1 简介 1

1.2 风能转换系统的现状与发展趋势 1

1.2.1 风能转换系统技术上的问题 1

1.2.2 风力机 3

1.2.3 小功率风能转换系统 4

1.2.4 风能转换系统的控制 4

1.3 本书概要 5

第 2 章 风能转换系统 7

2.1 风能 7

2.2 风能转换系统技术 10

2.3 风力机的空气动力特性 11

2.3.1 致动盘的概念 11

2.3.2 风力机的性能 13

2.4 传动链 14

2.5 发电系统 15

2.5.1 恒速 WECS 15

2.5.2 变速 WECS 17

2.6 混合发电系统中的风力发电机 19

2.7 控制目标 21

第 3 章 WECS 的模型	23
3.1 简介和问题陈述	23
3.2 风力机的空气动力模型	24
3.2.1 固定点风速模型	24
3.2.2 风力机的特性	29
3.2.3 基于风轮风速的转矩计算	34
3.3 发电机模型	37
3.3.1 感应发电机	38
3.3.2 同步发电机	42
3.4 传动装置模型	44
3.4.1 刚性传动链	44
3.4.2 柔性传动链	46
3.5 电力电子变流器和电网模型	46
3.6 线性化和特征值分析	49
3.6.1 基于感应发电机的 WECS	49
3.6.2 基于同步发电机的 WECS	53
3.7 案例研究 (1): 基于 SCIG 的 WECS 的降阶线性模型	56
第 4 章 风力机控制系统	58
4.1 控制目标	58
4.2 主控制目标的物理基础	58
4.2.1 主动变桨控制	59
4.2.2 主动失速控制	60
4.2.3 被动变桨控制	60
4.2.4 被动失速控制	61
4.3 WECS 优化控制原则	61
4.3.1 变速定桨距 WECS 实例	61
4.3.2 定速变桨距 WECS 实例	64
4.4 WECS 的主工作策略	65
4.4.1 变速定桨距 WECS 的控制	65
4.4.2 变桨距 WECS 的控制	70
4.5 混合标准的优化控制: 能量效率-疲劳载荷	74
4.6 整体运行的增益调度控制	76
4.7 WECS 中的发电机控制	78
4.7.1 感应发电机的矢量控制	78
4.7.2 永磁同步发电机的控制	82

4.8 并网运行和电能质量评估控制系统	83
4.8.1 电力系统稳定性	83
4.8.2 电能质量	87
第5章 基于能量效率准则的 WECS 优化控制设计方法	90
5.1 问题陈述和现状	90
5.1.1 非线性模型下的优化控制方法	90
5.1.2 采用线性化模型的最优控制策略	93
5.1.3 小结	95
5.2 最大功率点跟踪 (MPPT) 策略	96
5.2.1 问题陈述及文献回顾	96
5.2.2 风速湍流在 MPPT 中的应用	99
5.2.3 案例研究 (2): 经典 MPPT 与风速湍流作为搜索信号的 MPPT	103
5.2.4 小结	106
5.3 PI 控制	107
5.3.1 问题陈述	107
5.3.2 控制器设计	108
5.3.3 案例研究 (3): 2MW WECS 优化控制中 PI 速度控制的应用	110
5.3.4 案例研究 (4): 6kV WECS 优化控制中 PI 功率控制的应用	112
5.4 开关控制	113
5.4.1 控制器设计	113
5.4.2 案例研究 (5)	117
5.5 滑模控制	118
5.5.1 建模	119
5.5.2 基于减轻机械负荷的能量优化	119
5.5.3 案例研究 (6)	121
5.5.4 实时仿真结果	122
5.5.5 小结	124
5.6 反馈线性化控制	125
5.6.1 WECS 建模	125
5.6.2 控制器设计	127
5.6.3 案例研究 (7)	130
5.7 QFT 鲁棒控制	131
5.7.1 WECS 建模	132
5.7.2 基于 QFT 的控制设计	132
5.7.3 案例研究 (8)	133
5.8 小结	138

第 6 章 WECS 多目标优化控制	141
6.1 简介	141
6.2 WECS 的 LQ 控制	141
6.2.1 问题陈述	141
6.2.2 输入-输出方法	142
6.2.3 案例研究 (9): R-S-T 控制器在柔性耦合发电机 WECS LQ 控制中的应用	144
6.3 WECS 最优控制的频率分离原理	146
6.3.1 WECS 动态性能的频率分离原则	146
6.3.2 优化控制结构和设计程序 (2LFSP)	147
6.3.3 滤波和风速估计的推算	150
6.4 2LFSP 在刚性耦合发电机 WECS 中的应用	152
6.4.1 建模	152
6.4.2 低频环稳态优化	154
6.4.3 高频环 LQG 动态优化	154
6.4.4 高频环 LQ 动态优化	156
6.4.5 案例研究 (10)	158
6.4.6 整体实时仿真结果	161
6.5 2LFPS 在柔性耦合发电机 WECS 中的应用	165
6.5.1 建模	165
6.5.2 低频环稳态优化	166
6.5.3 高频环动态优化	167
6.5.4 案例研究 (11)	168
6.6 2LFSP 有效性的小结	170
6.7 多目标整体控制方案	171
6.7.1 大功率风力发电机的控制目标	171
6.7.2 多目标控制的整体最优化和频率分离原则	172
6.7.3 WECS 频率范围模型	174
6.7.4 风速湍流部分的频谱特性	175
6.7.5 WECS 控制系统的开环带宽限制	177
6.7.6 WECS 的频率分离控制	179
第 7 章 WECS 控制结构的实验研究设备系统	183
7.1 简介	183
7.2 WECS 的机电仿真器	184
7.2.1 硬件在环 (HIL) 系统的原理	184
7.2.2 设计 HIL 系统的具体过程	186
7.2.3 WECS 物理仿真器的构建	187