

风力发电用 感应发电机

Induction Generators for
Wind Power

Vladislav Akhmatov

本书翻译组 译



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

风力发电用 感应发电机

Induction Generators for
Wind Power

Vladislav Akhmatov

本书翻译组 译



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

**INDUCTION GENERATORS FOR WIND POWER/by Vladislav Akhmatov/
ISBN: 0-906522-40-4**

Copyright© 2005 by Multi-Science Publishing Company

Authorized translation from English language edition published by Multi-Science Publishing Company; All rights reserved; 本书原版由 Multi-Science 出版公司出版, 并经其授权翻译出版. 版权所有, 侵权必究。

China Electric Power Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版权由中国电力出版社独家出版, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电用感应发电机/弗拉基斯拉夫·阿赫玛托夫 (Akhmatov, V.) 著;《风力发电用感应发电机》翻译组译. —北京: 中国电力出版社, 2009

书名原文: Induction Generators for Wind Power

ISBN 978-7-5083-8848-9

I. 风… II. ①弗…②风… III. 感应电机-风力发电机
IV. TM346

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 075578 号

北京市版权局版权登记号: 图字: 01-2009-0214

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷
710 毫米×980 毫米 16 开本 20.25 印张 251 千字
印数 0001—3000 册 定价 40.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

随着风力发电的大规模开发，风电对电网规划、运行和控制等带来巨大挑战，研究和解决风电接入电网的有关问题已经成为国内外电力行业的热点。从电力系统的角度看，风电的挑战主要缘于两个方面：一是风能固有的波动性、随机性；二是风电机组通常采用感应发电机，其特性不同于常规发电机组中通常采用的同步发电机。

随着风电机组容量的增加，以及电力电子技术和控制技术的发展，风电机组采用的感应发电机也不断变化。现代风电机组普遍采用的感应发电机包括笼型感应发电机、带有动态转子电阻的绕线转子感应发电机和带有转子交流励磁的双馈感应发电机。不同类型风电机组的特性，主要取决于其采用的齿轮箱、桨距角控制、电力电子变频器和感应发电机组，其中感应发电机是核心部件。因此，了解和掌握感应发电机的特性是分析风电对电网规划、运行和控制等影响的基础。

近年来，国内出版了不少有关风力发电的书籍，但是在论述有关风力发电中的感应发电机方面，无论在广度和深度方面，现有的书籍都无法与本书相比。为此，我们组织翻译和出版了本书。本书作者弗拉基斯拉夫·阿赫玛托夫（Vladislav Akhmatov）是风电机组建模和并网领域的著名专家，1969年生于俄罗斯，2003年毕业于丹麦技术大学，获得博士学位，2003~2007年在丹麦输电系统运行机构 Eltra/Energinet.dk 工作。

本书以风力发电用感应发电机为主线，介绍基于不同感应发电机的风电机组，包括结构、模型和特性分析等。另外，本书还论述了风电机组故障穿越能力和系统辅助控制的解决方法、大型风电场集结模型等问题。

本书适合于从事风电接入电网规划、运行和控制的工程技术人员，

风电机组研发人员使用，同时也可作为高等院校电力系统和风力发电等专业师生的参考书。

限于译者水平，书中难免有错误和不妥之处，请读者批评指正。

中国电力科学研究院 王伟胜

2009年7月

翻译者名单及分工

刘长浔：前言、第1章、第2章和第4章翻译；全书统稿

王伟胜：第10章和第11章翻译

赵海翔：第5章和第6章翻译

迟永宁、刘燕华：第7章和第8章翻译

王晓蓉：第3章翻译

范高峰：第9章翻译

本书的主要内容是介绍带感应发电机的风电机组、它的建模、并网及故障穿越能力。故障穿越指风电机组在电网扰动时不间断地运行而无并发切机。风电机组可以是定速的或用变频器控制的变速发电机组。本书的出版非常及时，因为风电快速并网已经是一个全球性问题，而且与电力系统保持可靠运行息息相关。

供电技术是人们熟知的技术，它以常规电厂和它的同步发电机发电及它的可控性为基础。这类常规电厂提供工频和电压控制。这种人们熟知的集中供电技术正在让位给一种人们一知半解的供电技术，即风电技术。风电强力进入电网还是一个比较新的问题。从20世纪90年代后期开始，在丹麦，人们开展了一项雄心勃勃的政府项目，投产了多个大型海上风电场，对当地风电和热电联产机组给予补贴，随之而来的是风电在很多国家呈指数增长，例如丹麦、很多欧洲国家、美国、加拿大、澳大利亚、印度和巴西。

很多国家都有含数百台风电机组的大型（海上）风电场投运。由于大型风电场的额定容量很大，要求风电场直接联入电网。在北海的一些经过选择的风电厂址，人们在规划建设30GW风电装机，并通过海上电网接入丹麦、德国和荷兰的电网。风电这样接入电网可能需要常规电厂减少它在混合发电方式中的份额，以便于风电接入。但这样会带来保持电力系统稳定方面的挑战。这类电力系统稳定的课题多种多样，包括由于风的波动本性带来的有功功率平衡和控制问题，确认把电力从风电场输送到负荷中心的薄弱环节，风电机组产生的闪变带来的电能质量问题，短时电压稳定和可减少直接备用的风电机组故障穿越能力。因此，其重点是开发各类概念的风电机组的动态模型及理解风电机组和输电网的相互作用。

人们经常提出的一个问题是：“带并网风电机组的电网发生短路故障会出现什么问题？”本书将回答这一问题并使读者理解用于短时电压稳定研究用的动态模型。因为风电机组市场中约 85% 的风电机组带定速或变速、变频器控制的感应发电机，所以本书将集中讨论基于感应发电机的风电机组。由于风电机组功率额定值快速增长，电力电子变频器成为发电机控制的常见角色，本书将详细介绍用于短时电压稳定、控制、保护和故障穿越能力的电力电子变频器建模。

本书的对象主要是对风电机组供电和并网感兴趣的大学生和研究生，在风电场并网和风电机组建模领域工作的电力工程师和咨询专家，关注大型风电场投运的电力公司和输电系统运营机构，关注风电机组建模和风电机组故障穿越运行文献的风电机组制造商，以及其他对电力技术有兴趣的人士。

作者感谢美国风机制造商 GE Wind Energy、丹麦风机制造商 Vestas Wind Systems 和德国 Siemens 公司，感谢它们提供了相关照片和技术信息。同时，感谢西班牙的电网运营机构 Red Eléctrica de España 提供了西班牙电网的风电调试和运营的信息，Vestas Wind Systems 的 Sigrid M. Bolik 博士让我们共享她博士论文的工作成果，Glamorgan 大学技术学院的 Trevor J. Price 教授进行了编审，《风电工程》的主编 John Twidell 教授鼓励我撰写了本书。

最后也感谢本书原著者以前的雇主丹麦天然气与电力传输系统运营机构 Energinet. dk 的支持。

Vladislav Akhmatov

丹麦 Fredericia



待发运的风电机组机舱

照片版权属 Vestas Wind Systems, 复制得到 Vestas Wind Systems 许可

http://www.vestas.com/



吊装风轮

版权属 GE Wind Energy，复制得到 GE Wind Energy 许可

译者序

翻译者名单及分工

前言

第1章 引言	1
1.1 本书概要	2
1.2 风力发电展望	3
1.3 电力系统的稳定	9
1.4 风电场并网法规	11
第2章 基于感应发电机的风电机组概念	15
2.1 常规定速概念	18
2.2 动态转子电阻概念	21
2.3 双馈感应发电机	23
2.4 带全额变频器的感应发电机	27
2.5 稳定性研究的表示方法	31
2.5.1 定速风电机组	32
2.5.2 带转子动态电阻器的风电机组	33
2.5.3 带双馈感应发电机的风电机组	35
2.5.4 带感应发电机和全额变频器的风电机组	37
2.6 小结	40
第3章 风电机组结构	42
3.1 风轮气动特性基础	44

3.1.1	功率系数	46
3.1.2	定速运行	49
3.1.3	变速运行	51
3.1.4	叶片角控制	56
3.1.5	动态入流现象	62
3.1.6	风速与功率特性的关系	68
3.1.7	近似的风轮建模	71
3.1.8	风轮模型的初始化和应用	74
3.2	轴系	76
3.2.1	标么值系统	77
3.2.2	两质块模型	78
3.3	小结	87
第4章	感应发电机模型	90
4.1	标么值系统	91
4.2	感应发电机的状态方程	92
4.2.1	磁链方程	93
4.2.2	三阶简化模型	94
4.2.3	相关的发电机模型参数	95
4.2.4	感应发电机的功率	96
4.2.5	电气转矩	96
4.2.6	稳态方程	96
4.2.7	饱和的表示方法	100
4.2.8	典型发电机数据	101
4.3	稳定性研究用的模型	102
4.3.1	电网故障类型	102
4.3.2	电流暂态量的重要性	103
4.3.3	发电机转子惯量的重要性	109

4.3.4	机轴表示方式的重要性	112
4.3.5	风轮的空气动力学模型	114
4.3.6	继电保护建模	115
4.4	模型验证	115
4.4.1	用于验证的工况	115
4.4.2	试验工作	117
4.4.3	选择仿真工具	119
4.4.4	计算工作	120
4.4.5	验证工作小结	124
4.5	小结	125
第5章	定速风电机组的电压稳定	128
5.1	电气转矩与速度的关系特性	128
5.2	感应发电机的静态稳定极限	131
5.3	感应发电机的动态稳定极限	133
5.3.1	临界速度作为动态稳定极限	134
5.3.2	与发电机参数的关系	136
5.4	风电机组的动态稳定极限	136
5.5	转轴的松弛过程	138
5.6	动态稳定极限的应用	140
5.7	大型风电场的故障穿越能力	142
5.7.1	大型风电场建模	144
5.7.2	为何选择详细模型	146
5.7.3	电压失稳的情况	146
5.7.4	动态无功补偿	148
5.7.5	风电机组结构及控制的影响	153
5.7.6	互作用	164
5.7.7	电压控制原则的鲁棒性	166

5.8	继电保护系统	168
5.9	小结	172
第6章	含转子动态电阻的感应发电机	174
6.1	Vestas 的最优滑差 (OptiSlip [®]) 概念	174
6.1.1	变滑差发电机	175
6.1.2	功率和转速控制	177
6.2	一般表示方法	178
6.2.1	仿真算例	179
6.2.2	转子动态电阻控制	179
6.2.3	控制系统参数	182
6.2.4	互作用	184
6.3	无功补偿	186
6.4	故障穿越能力	186
6.4.1	继电保护系统	187
6.4.2	变频器闭锁和重启	188
6.5	小结	189
第7章	基于双馈感应发电机的变速风电机组	191
7.1	静态模型	194
7.1.1	发电机模型初始化	196
7.1.2	模型符号规定	200
7.1.3	发电机模型初始化解算例	201
7.1.4	变频器模型初始化	205
7.1.5	DFIG 系统模型初始化解验证	207
7.2	双馈感应发电机的状态方程	210
7.2.1	简化三阶模型	210
7.2.2	电流暂态量的意义	211

7.2.3	磁路饱和的影响	214
7.3	机械系统模型	215
7.4	变频器系统模型	216
7.4.1	锁相环	216
7.4.2	转子侧变换器控制	219
7.4.3	直流环节以及电网侧变换器控制	220
7.5	电网模型接口	225
7.6	模型的数值稳定性	225
7.7	电力电子变频器的保护系统	228
7.7.1	变频器闭锁	229
7.7.2	风电机组保护性解列	234
7.8	故障穿越能力	236
7.8.1	短路棒保护	237
7.8.2	电流控制和限制	247
7.8.3	轴系扭振的阻尼	255
7.8.4	风机制造商的解决方案	257
7.9	总结	260
第8章	带全额变频器的感应发电机	264
8.1	感应发电机的模型与控制	266
8.2	直流环节和电网侧变换器的表示	267
8.3	机械结构模型	268
8.4	故障穿越能力	268
8.5	仿真算例	270
8.5.1	发电机侧变换器的闭锁和重启	270
8.5.2	频率控制	272
8.6	总结	273

第 9 章 大型风电场的综合模型	275
9.1 一般关系	277
9.2 定速风电机组	278
9.3 变速风电机组	281
9.4 小结	283
第 10 章 用暂态增压器进行改造	284
10.1 发生短路故障时的操作	285
10.2 仿真示例	286
10.3 小结	288
第 11 章 建模及稳定性问题综述	289
参考文献	297

引言

各工业化国家现代电力系统的特征之一就是大规模接入风电机组。这一发展的共同推动力量是风电技术成功开发、政府目标、对进一步开发可再生能源的补贴和利用以及对降低污染和改善环境的强烈要求。

风电机组如今是环境友好型发电的最大来源，因为与其他对自然界没有损害的能源，如潮汐、波浪和阳光相比，风电的效率最高。风电机组的最高效率可达到 50%，具有与常规发电方式可比的竞争力 [Hansen 等, 2004 (a)]。

现代工业化电力系统的基础是常规发电厂，它控制电网电压并维持发电与用电之间的平衡。这些电力系统的安全可靠运行又基于人们熟知和成熟的常规电厂的运行与控制技术 (Kundur, 1994)。

常规发电厂传统上以同步发电机为基础。电网发生短路故障时，常规发电厂的励磁控制参与重建电网电压，而其频率控制则在此事件期间确保电网频率。

风电机组是一种大有前途的替代技术，但在它们对馈入电网的运行及稳定性影响方面，人们通常还是一知半解。此外，大部分风