



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

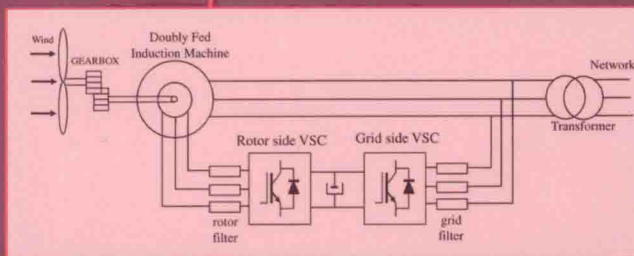
# 双馈感应电机在风力发电中的建模与控制

Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation

Gonzalo Abad  
Jesús López  
(西班牙) Miguel A. Rodríguez 著  
Luis Marroyo  
Grzegorz Iwanski  
(波兰) 胡家兵 迟永宁 汤海雁 译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



014057124

TM315

38

国际电气工程先进技术译丛

# 双馈感应电机在风力发电中的建模与控制

## Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation

Gonzalo Abad

Jesús López

(西班牙) Miguel A. Rodríguez

Luis Marroyo

著

(波兰) Grzegorz Iwanski

胡家兵 迟永宁 汤海雁 译



TM315  
38

机械工业出版社



北航

C1742084



北航

C1742084

Copyright ©2011 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Doubly Fed Induction Machine; Modeling and Control for Wind Energy Generation >, ISBN: 978-0-470-76865-5, by Gonzalo Abad, Jesús López, Miguel A. Rodríguez, Luis Marroyo, Grzegorz Iwanski, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 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, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2012-1049 号

### 图书在版编目 (CIP) 数据

双馈感应电机在风力发电中的建模与控制 / (西) 阿瓦德 (Abad, G.) 等著; 胡家兵等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 6

(国际电气工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-46964-3

I. ①双… II. ①阿…②胡… III. ①感应电机-风力发电机-研究 IV. ①TM346

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 120757 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: 王寅生

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘怡丹

封面设计: 马精明 责任印制: 李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 31.75 印张 · 695 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-46964-3

定价: 118.00 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

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

014027134

从新本外世式器丁户虫洞国

本书共 12 章，内容紧扣基于双馈感应电机 (DFIM) 的变速恒频风力发电技术，着重介绍 DFIM 励磁变换器控制策略、保护方案及相应的硬件系统。首先介绍风力机基本构造和电力电子变换器基本拓扑与数学模型；接着对 DFIM 进行稳态、动态建模和分析；在此基础上，分析和介绍了矢量控制、直接转矩控制、直接功率控制三大经典控制策略；然后分析了电网故障（包括对称和不对称故障）对 DFIM 的影响、采取各种控制方法的故障穿越技术以及低电压穿越硬件解决方案；最后还对风力发电的新趋势做了简要介绍。本书兼顾了技术的宏观和细节：风电机组启动并网过程、磁链观测，还探讨了孤网运行模式。

本书具有较好的理论深度，又兼备一定的工程实用背景和广度，既可作为从事新能源开发的广大高校师生特别是从事风电技术研究的研究生教材，也可供从事风电研发、生产制造和运行管理的工程技术人员参考。

Modeling and Control for Wind

Energy Generation



清华大学图书馆 (西单馆)  
 清华大学图书馆 (东单馆)  
 清华大学图书馆 (燕园馆)



清华大学出版社

# 译者序

大规模发展风电是世界各国应对日益紧迫的环境恶化问题和能源安全战略需求的重要手段之一，而基于双馈感应电机（DFIM）的风电机组因其成本低、效率高、技术成熟等优势已成为全球大规模并网风电的主流机型，为其在风力发电的历史中赢得了重要一席。

当前，我国风电装机已达 9141 万千瓦而跃居世界首位，但风电产业发展遇到了瓶颈，风电机组安全并网已成为制约我国实现风电发展预期目标的主要科学技术障碍。主要问题是：1) 受限于风资源与电力负荷逆向分布，我国采取了大规模风电“集中式开发、远距离输送”的运营模式，该模式下大型风电基地所联电网实际上是存在各类对称/不对称、大值/小值、瞬态/稳态等故障的弱电网，使风电机组运行在一个极易脱网的外部环境中；2) 风电机组自身技术性能不高，并网控制设计是以理想电网为背景，部分风电机组在电网出现小扰动（不平衡、谐波）或暂态故障下易自动脱网。作为大规模并网风电主流机型的 DFIM 风电机组，其发电机定子绕组与电网直接耦合等特点已面临更严峻的挑战，因此亟需从增强发电设备自身不脱网运行能力出发解决风电机组大面积脱网问题。希望本书的翻译和出版能对我国风电大规模开发、安全并网运行以及成为未来电力系统的重要电源有所帮助。

本书是近十多年来国际上不多见的系统介绍 DFIM 风电机组建模与控制方面新技术和新进展的一部专著，作者 Gonzalo Abad 博士等博学的知识、严谨的态度及缜密的思维在本书中体现得淋漓尽致。对于希望学习和了解 DFIM 风电机组基础知识的读者，本书是一本内容很充分的教材；而对于希望深入研究 DFIM 风电机组建模与控制的读者，本书将起到极好的引导作用。

本书的翻译得到了国家自然科学基金（项目编号：51277196，51322704）和教育部新世纪优秀人才支持计划（编号：NCET—12—221）的资助。全书由华中科技大学胡家兵教授和中国电力科学研究院新能源所迟永宁总工程师、汤海雁博士翻译、校对、通稿。翻译过程中，华中科技大学尚磊、王波、王硕、应杰、袁豪、路茂增、唐文明、王龙飞、叶超、李帅、汪雅静等同学做了大量工作，在此深表谢意。

限于译者水平，书中难免存在一些错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。译者联系方式：j.hu@hust.edu.cn。

译者

2014 年 5 月 4 日

# 前 言

过去的这些年，可再生能源发电占供电系统的比例已显著提高。其中，风力发电承担着一个很重要的角色并将在未来继续承担更加重要的角色。

基于双馈感应电机 (DFIM) 的风电机组因其成本低、效率及可靠性高等优势毫无疑问地成为了风电机组制造商首选的技术之一。作为风电机组的关键部分，该电机也被称作绕线转子感应电机 (WRIM)，它的很多特性与现在广泛使用的笼型感应电机 (SCIM) 相似。然而，尽管两者相似，仍需要对其专门研究才能充分地掌握 DFIM 的运行机理及相关特性。

尽管关于感应电机的经典书籍已很多，但较少涉及 DFIM 有关内容。因此，本书是目前为止唯一全面并专门致力于研究 DFIM 的书籍，内容主要包括 DFIM 的建模和控制及其在风力发电系统中的应用。

本书为读者提供了与 DFIM 风电机组相关的深入浅出的基本知识，包括市场概况和发展趋势，并用数字和图表举例说明了实际应用中存在的问题。本书还介绍了一些新型风电机组概念，以引导读者认识它们。

本书越到后面，技术层次越高，从最开始对基本背景知识的介绍到后面对 DFIM 的深入研究。本书可作为非专业读者、本科生和研究生的教材使用，对他们来说本书的前几章有助于为后续深入研究打下基础。此外，更高层次的读者，如和本书讨论的主题相关的研究或技术人员，也能从本书受益，阅读本书使他们对 DFIM 风电机组有更深入的认识并掌握相关技术。

必须提及的是，通过阅读本书，读者不仅可对风电机组或 DFIM 本身有所了解，而且还能从整体上提高对交流传动技术的认识。因为本书讨论的很多问题具有通用性，可应用到对运行于不同场合的不同类型交流电机的研究。

另一方面，作者认为 DFIM 风电机组成本较低的原因（此类电机双端口供电的特点，降低了对变换器容量的需求）也是使入门者在研究此类风电机组时面临挑战的原因。和异步电机或同步电机等单端口供电的电机相比，DFIM 通过变换器和电网协同供电，这使读者在认识该电机时面临更多问题。

此外，直接和电网相连有时会成为一个缺点，例如电机必须运行在电网发生故障或电压畸变的情况时，尤其是在这些情况下并网导则要求电机不能脱网时。脱网主要是因为电机定子绕组直接受电网扰动的影响。为了解决这个实际应用时不可避免的问题，通常采取附加硬件主动保护或增加变换器容量，并附加专门控制的手段。因此，本书自始至终都在关注 DFIM 在电网电压扰动时的分析。

坦言之，本书的目的不是为了说明 DFIM 风电机组是目前风电机组技术中最好

的一种，而是为了撰写一本尽量包括当前风电机组概念的、内容翔实全面的参考书。

无论未来何种风电机组技术成为主流，DFIM 风电机组毫无疑问已为自己在风力发电的历史中赢得了重要一席。

最后，我们首先要向 M. P. Kazmierkowski 教授表示真诚的感谢，没有他的鼓励和支持，我们无法完成此书。我们也真诚地感谢每一个对写作此书做出贡献的人。在过去的十年中，有很多学生、研究员、工业界同行和大学同事通过技术讨论形式或更直接明确的贡献帮助了我们。正是由于你们持续不断的支持，本书才得以完成。

此外，我们也要对 IEEE Press 和 John Wiley & Sons 的耐心帮助和允许出版本书表示感谢。

**Gonzalo Abad**

**Jesús López**

**Miguel A. Rodríguez**

**Luis Marroyo**

**Grzegorz Iwanski**



## 目 录

## 译者序

## 前言

第1章 风力发电系统概述 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 恒速风力机(FSWT)的基本概念 .....	1
1.2.1 风力机的基本介绍 .....	1
1.2.2 风力机的功率控制 .....	4
1.2.3 风力机空气动力学 .....	6
1.2.4 商用风力机实例 .....	8
1.3 变速风力机(VSWTs) .....	9
1.3.1 变速风力机的建模 .....	10
1.3.2 变速风力机的控制系统 .....	13
1.3.3 变速风力机的电气系统 .....	19
1.4 基于DFIM VSWT的风力发电系统 .....	22
1.4.1 DFIM VSWT的电气配置 .....	22
1.4.2 风电场的电气配置 .....	28
1.4.3 WECS控制结构 .....	30
1.5 并网导则要求 .....	34
1.5.1 频率与电压运行范围 .....	34
1.5.2 无功功率与电压控制能力 .....	35
1.5.3 有功功率控制 .....	36
1.5.4 电力系统稳定器功能 .....	39
1.5.5 低电压穿越(LVRT) .....	39
1.6 电压跌落与LVRT .....	39
1.6.1 电力系统 .....	40
1.6.2 电压跌落 .....	42
1.6.3 西班牙的验证程序 .....	46
1.7 DFIM VSWT制造商 .....	48
1.7.1 工业解决方案:风力机制造商 .....	48
1.7.2 一台2.4MW风力机的建模 .....	61
1.7.3 发电机稳态运行点与功率变换器容量 .....	67



1.8 对后续各章的介绍	71
参考文献	72
<b>第2章 背靠背电力电子变换器</b>	<b>73</b>
2.1 引言	73
2.2 基于两电平拓扑的背靠背变换器	74
2.2.1 网侧系统	74
2.2.2 转子侧变换器及 $dv/dt$ 滤波器	80
2.2.3 直流母线	83
2.2.4 可控开关驱动脉冲的产生方法	84
2.3 多电平 VSC 拓扑结构	94
2.3.1 三电平中点钳位式 VSC 拓扑结构 (3L-NPC)	96
2.4 网侧系统的控制	108
2.4.1 网侧系统的稳态模型	108
2.4.2 网侧系统的动态模型	112
2.4.3 网侧系统的矢量控制	116
2.5 总结	123
参考文献	123
<b>第3章 DFIM 稳态模型</b>	<b>125</b>
3.1 引言	125
3.2 稳态等效电路	125
3.2.1 DFIM 基本概念	125
3.2.2 稳态等效电路	126
3.2.3 相量图	130
3.3 不同运行工况下的速度和功率流向	132
3.3.1 有功功率的基本关系	132
3.3.2 转矩表达式	134
3.3.3 无功功率表达式	135
3.3.4 有功功率、转矩和速度之间的近似关系	135
3.3.5 四象限运行	136
3.4 标幺化	138
3.4.1 基准值	138
3.4.2 变量和参数标幺化	139
3.4.3 标幺制下的 DFIM 稳态方程	140
3.4.4 例 3.1: 一台 2MW DFIM 参数	141
3.4.5 例 3.2: 不同功率等级的 DFIM 参数	143

3.4.6 例 3.3: 2MW DFIM 相量图以及标幺化分析 .....	144
3.5 稳态工作曲线: 性能评估 .....	146
3.5.1 转子电压比: 频率、幅值和相位 .....	147
3.5.2 转子电压比: 电压幅值、频率比值 ( $V-F$ ) 恒定 .....	153
3.5.3 转子电压改变: 控制定子侧无功和转矩 .....	155
3.6 DFIM 应用于风力发电设备的设计要求 .....	161
3.7 总结 .....	164
参考文献 .....	165
<b>第 4 章 DFIM 动态模型</b> .....	<b>166</b>
4.1 引言 .....	166
4.2 DFIM 动态建模 .....	166
4.2.1 $\alpha\beta$ 坐标系下模型 .....	168
4.2.2 $dq$ 坐标系下模型 .....	170
4.2.3 $\alpha\beta$ 模型的状态空间表示 .....	171
4.2.4 $dq$ 模型的状态空间表示 .....	183
4.2.5 稳态模型和动态模型间的关系 .....	187
4.3 总结 .....	190
参考文献 .....	190
<b>第 5 章 DFIM 测试</b> .....	<b>192</b>
5.1 引言 .....	192
5.2 DFIM 模型参数的离线估算 .....	192
5.2.1 对 DFIM 模型参数的考虑 .....	193
5.2.2 采用 VSC 估算定转子电阻 .....	195
5.2.3 基于 VSC 的漏感估算 .....	198
5.2.4 空载条件下采用 VSC 估测励磁电感和铁损 .....	203
5.3 总结 .....	208
参考文献 .....	208
<b>第 6 章 电压跌落时 DFIM 的特性分析</b> .....	<b>210</b>
6.1 引言 .....	210
6.2 转子感应电动势 .....	210
6.3 正常工况运行特性 .....	211
6.4 三相电压跌落 .....	212
6.4.1 转子开路电压完全跌落的情况 .....	213

6.4.2	转子开路部分电压跌落的情况 .....	216
6.5	不对称电压跌落 .....	221
6.5.1	对称分量法基本原理 .....	222
6.5.2	对称分量法应用于 DFIM .....	224
6.5.3	单相电压跌落 .....	226
6.5.4	相间电压跌落 .....	230
6.6	转子电流的影响 .....	232
6.6.1	三相电压完全跌落时转子电流的影响 .....	232
6.6.2	一般情况下的转子电压 .....	235
6.7	电压跌落期间双馈感应电机的等效模型 .....	237
6.7.1	线性等效模型 .....	238
6.7.2	非线性等效模型 .....	239
6.7.3	电网模型 .....	240
6.8	小结 .....	240
	参考文献 .....	241
<b>第7章</b>	<b>并网 DFIM 风电机组的矢量控制策略 .....</b>	<b>243</b>
7.1	引言 .....	243
7.2	矢量控制 .....	243
7.2.1	电流指令值的计算 .....	244
7.2.2	电流指令值的限制 .....	246
7.2.3	电流控制环 .....	247
7.2.4	坐标定向 .....	250
7.2.5	完整控制系统 .....	251
7.3	矢量控制的小信号稳定性 .....	251
7.3.1	坐标定向的影响 .....	252
7.3.2	控制器调节的影响 .....	256
7.4	电网电压不平衡条件下矢量控制的行为 .....	262
7.4.1	坐标定向 .....	262
7.4.2	转子侧变换器的饱和 .....	262
7.4.3	定子电流和电磁转矩的振荡 .....	263
7.5	电压跌落下矢量控制的行为 .....	265
7.5.1	轻微电压跌落 .....	266
7.5.2	严重电压跌落 .....	270
7.6	电网扰动下的控制方案 .....	272
7.6.1	去磁电流 .....	272
7.6.2	双重控制策略 .....	279

7.7 总结 .....	288
参考文献 .....	289
<b>第8章 DFIM 直接控制技术 .....</b>	<b>292</b>
8.1 引言 .....	292
8.2 DFIM 直接转矩控制 (DTC) .....	293
8.2.1 基本原理 .....	293
8.2.2 控制框图 .....	295
8.2.3 例 8.1: 2MW DFIM 直接转矩控制 .....	302
8.2.4 转子电压矢量对 DFIM 影响的研究 .....	303
8.2.5 例 8.2: 采用 DTC 下 2MW DFIM 的频谱分析 .....	308
8.2.6 转子磁链幅值参考值的产生 .....	308
8.3 DFIM 直接功率控制 (DPC) .....	311
8.3.1 基本原理 .....	311
8.3.2 控制框图 .....	312
8.3.3 例 8.3: 2MW DFIM 直接功率控制 .....	316
8.3.4 转子电压矢量对 DFIM 影响的研究 .....	317
8.4 DFIM 定开关频率的预测直接转矩控制 (P-DTC) .....	320
8.4.1 基本原理 .....	321
8.4.2 控制框图 .....	322
8.4.3 例 8.4: 开关频率 800Hz 时, 15kW 和 2MW DFIM 的 P-DTC .....	330
8.4.4 例 8.5: 4kHz 开关频率下 15kW DFIM 的 P-DTC 策略 .....	333
8.5 DFIM 定开关频率的预测直接功率控制 (P-DPC) .....	333
8.5.1 基本原理 .....	334
8.5.2 控制框图 .....	335
8.5.3 例 8.6: 定开关频率 1kHz 下 15kW DFIM 的 P-DPC .....	339
8.6 基于多电平变换器的 DFIM 定开关频率 P-DPC 和 P-DTC .....	341
8.6.1 前言 .....	341
8.6.2 基于 3L-NPC VSC 的 DFIM P-DPC .....	342
8.6.3 基于 3L-NPC VSC 的 DFIM P-DTC .....	357
8.7 电网电压扰动下基于直接控制技术的控制解决方案 .....	361
8.7.1 前言 .....	361
8.7.2 不平衡电网电压下的 DPC 策略 .....	361
8.7.3 不平衡电网电压下的 DTC 策略 .....	366
8.7.4 电压跌落下的 DTC .....	372
8.8 总结 .....	377
参考文献 .....	377

<b>第 9 章 低电压穿越 (LVRT) 的硬件解决方案</b> .....	381
9.1 引言 .....	381
9.2 与 LVRT 相关的并网导则 .....	381
9.3 Crowbar .....	383
9.3.1 主动型 Crowbar 的设计 .....	384
9.3.2 三相电压跌落的响应特性 .....	386
9.3.3 不对称跌落的响应特性 .....	387
9.3.4 Crowbar 和控制算法的协调 .....	390
9.4 制动斩波器 .....	391
9.4.1 独立安装的制动斩波器性能 .....	392
9.4.2 Crowbar 和制动斩波器的配合 .....	393
9.5 其他保护技术 .....	394
9.5.1 负载代替 .....	394
9.5.2 风电场解决方案 .....	395
9.6 总结 .....	395
参考文献 .....	396
<b>第 10 章 其他控制问题: 估算器结构和并网 DFIM 的起动</b> .....	398
10.1 简介 .....	398
10.2 估算器和观测器结构 .....	398
10.2.1 一般考虑 .....	398
10.2.2 用于转子侧 DPC 的定子有功和无功功率估算 .....	399
10.2.3 转子侧矢量控制中基于定子电压的定子磁链估算器 .....	400
10.2.4 转子侧矢量控制中基于定子电压的定子磁链同步 .....	402
10.2.5 转子侧 DPC、DTC 和矢量控制所需的定转子磁链估算器 .....	403
10.2.6 定转子磁链全阶观测器 .....	403
10.3 DFIM 风电机组的起动 .....	406
10.3.1 编码器整定 .....	408
10.3.2 与电网同步 .....	412
10.3.3 DFIM 风电机组序列化起动过程 .....	416
10.4 总结 .....	425
参考文献 .....	425
<b>第 11 章 基于 DFIM 的独立发电系统</b> .....	427
11.1 引言 .....	427
11.1.1 独立运行 DFIM 系统的要求 .....	427

11.1.2	直流侧带储能装置的 DFIM 特性 .....	428
11.1.3	滤波电容的选择 .....	430
11.2	独立运行下 DFIM 系统的数学描述 .....	432
11.2.1	独立运行下 DFIM 模型 .....	432
11.2.2	基于电流源馈电的独立运行 DFIM 模型 .....	436
11.2.3	独立运行 DFIM 的极坐标模型 .....	439
11.2.4	基于电流源馈电的独立运行 DFIM 的极坐标模型 .....	443
11.3	定子电压控制 .....	445
11.3.1	基于 PLL 的幅值和频率控制 .....	445
11.3.2	不平衡负载条件下独立运行系统电压不对称校正 .....	452
11.3.3	非线性负载条件下电压谐波抑制 .....	455
11.4	并网前独立运行系统采用 PLL 控制同步 .....	458
11.5	总结 .....	461
	参考文献 .....	461
<b>第 12 章</b>	<b>风力发电的新趋势 .....</b>	<b>463</b>
12.1	引言 .....	463
12.2	风力发电未来的挑战: 什么是必须创新的 .....	463
12.2.1	风电场位置的选取 .....	464
12.2.2	能量、效率与可靠性的增加 .....	465
12.2.3	电网一体化 .....	466
12.2.4	环境问题 .....	466
12.3	技术趋势: 如何实现 .....	467
12.3.1	风电机组的机械结构 .....	467
12.3.2	功率传输技术 .....	468
12.4	总结 .....	478
	参考文献 .....	479
<b>附录</b>	<b>.....</b>	<b>482</b>
A.1	空间矢量表达 .....	482
A.1.1	空间矢量表示法 .....	482
A.1.2	不同坐标系之间的变换 .....	484
A.1.3	功率表达 .....	486
A.2	考虑铁损的 DFIM 动态建模 .....	487
A.2.1	$\alpha\beta$ 坐标系中的模型 .....	488
A.2.2	$dq$ 坐标系中的模型 .....	490
A.2.3	用状态空间表示的 $\alpha\beta$ 模型 .....	491
	参考文献 .....	493



# 第1章 风力发电系统概述

## 1.1 引言

本章的目的在于使读者建立一些基本概念,从而可以理解风力发电系统及其并入电网时的必要运行方式。

本章主要包括了风力机的基本知识,既有对其电气系统的介绍,也有对其机械系统和风力机空气动力学特性的介绍。

在第1.2节中,通过对恒速风力机(FSWT)的各个部件和基本概念进行解释,引出了现代风力机概念;此外,该节还对风能捕获原理以及风能利用系数和转矩系数进行了介绍。

在第1.3节中,给出了一个包含空气动力学模型、机械系统和变桨系统的变速风力机(VSWT)的简单模型及其控制系统。该节还列举了在不同的VSWT技术中齿轮箱、发电机和电力电子变换器的不同配置情况。

在第1.4节中,从基于双馈感应电机(DFIM)的VSWT入手,描述了风力发电系统(WECS)和风电场的电气配置情况,并给出了针对风电场和风力机的总体控制策略。

在第1.5节中,提出了风电机组并网的概念,这是由于风电并入公共电网的比例上升使得其需要更多强制的并网要求。

风力机的低电压穿越(LVRT)能力是当前最需要实现的,因此第1.6节描述了LVRT的相关问题。为了深入理解LVRT,该小节介绍了电压跌落的起因、分类和描述。最后,给出了一个实际中用于验证风力机LVRT能力的电网模型。

在第1.7节中,介绍了风力机制造商的不同解决方案,然后以一台额定容量为2.4MW的VSWT为例进行了具体分析。

最后,第1.8节概况了后续各章的内容。

## 1.2 恒速风力机(FSWT)的基本概念

### 1.2.1 风力机的基本介绍

下面通过一台基于笼型电机(异步电机)和失速-桨距功率控制技术的恒速风力机,对风力机的各个基本部件进行介绍。此项技术在20世纪70年代晚期被丹麦的先驱们发明,之后在20世纪80年代和90年代被广泛使用,曾一度成为20世纪90年代一些



国家（如西班牙、丹麦和德国等）大力发展风能的基础技术。

发展这项技术的主要制造商有丹麦的 Vestas、Bonus (Siemens)、Neg - Micon 和 Nordtank，德国的 Nordex 和 Repower，西班牙的 Ecotecnia (Alstom)、Izar - Bonus 和 Made，以及美国的 Zond (Enron - GE)。不过现在很多其他小的制造商和新的参与者也进入了这个市场，如印度的 Sulzon 和中国的金风。

最早的恒速风力机在设计和制造过程中，为了实现更低的价格和更好的鲁棒性，选择了市场中已有的电气和机械部件（如发电机、齿轮箱、变压器等）。丹麦的先驱们最初在制造容量为 25kW 的风力机样机时就是这样做的。这些样机结构简单，鲁棒性好（大部分仍在工作，而且存在一个非常繁荣的二手市场）。

风力机发展只用了十年，其功率等级就逐渐达到 600、750、1000kW，而且 20 世纪 80 年代和 90 年代世界上安装的大约 2/3 风力机是恒速的。

在介绍 FSWT 之前，我们先介绍和该技术相关的主要概念：

- 恒速：风力机中的异步电机直接连接到一个恒频的电网，因此异步电机的同步旋转角速度是一个和风速无关的基本保持不变的量。
- 失速控制和变桨距控制：这些概念会在本章的后面讲到，和风力机对捕获风能的限制或控制方式有关。

图 1.1 所示为一台恒速风力机的主要部件。

机舱内放置了风力机的关键部件，包括齿轮箱和发电机。检修人员可从风力机的塔架进入机舱。

在机舱左边是风力机的叶轮，主要包括桨叶和轮毂。桨叶从风中捕获能量并传递给轮毂。对于一台 600kW 风力机而言，其每个桨叶大约 20m 长，并被设计得类似于飞机的机翼。

桨叶最远端 2 ~ 3m 处有可活动的叶尖，它们的作用是提供空气动力制动，因此通常被称作叶尖制动器。叶尖固定在一个碳纤维螺杆上，而螺杆通过轴承安装在桨叶主体的内部。在桨叶主体内部的螺杆一端安装了一个机构，它在受到向外动作的力时转动叶尖。螺杆还固定连接着一根钢丝，钢丝安置在桨叶内的空心管道中，它的长度恰好足够连接螺杆和轮毂。

在风力机运行期间，叶尖被桨叶主体拉紧，大约 10kN 的拉力是通过轮毂内的液压系统提供并通过钢丝从轮毂传递到叶尖螺杆上的。

当风力机必须停止运行时，液压系统通过释放液压油来减小拉力，进而叶尖在离心力作用下向外飞出，之后螺杆上的机构把叶尖转动到 90° 位置（制动位置）。液压油只能通过一个很小的出口释放，因此叶尖转动很慢，需要几秒钟的时间才能完全转动到制动位置。这样可以避免在制动时出现过度的冲击载荷。

叶尖制动器可以有效地减小桨叶的驱动力。但是它们不能完全阻止桨叶的旋转，因此每个风速下风力机都有一个对应的空转速度。空转速度比正常运行时的旋转速度要低很多，因此即使机械制动器有可能失效时，风力机也可以处于安全状态。

叶轮的轮毂连接着风力机的低速主轴，低速主轴把轮毂和齿轮箱连接起来。对于一

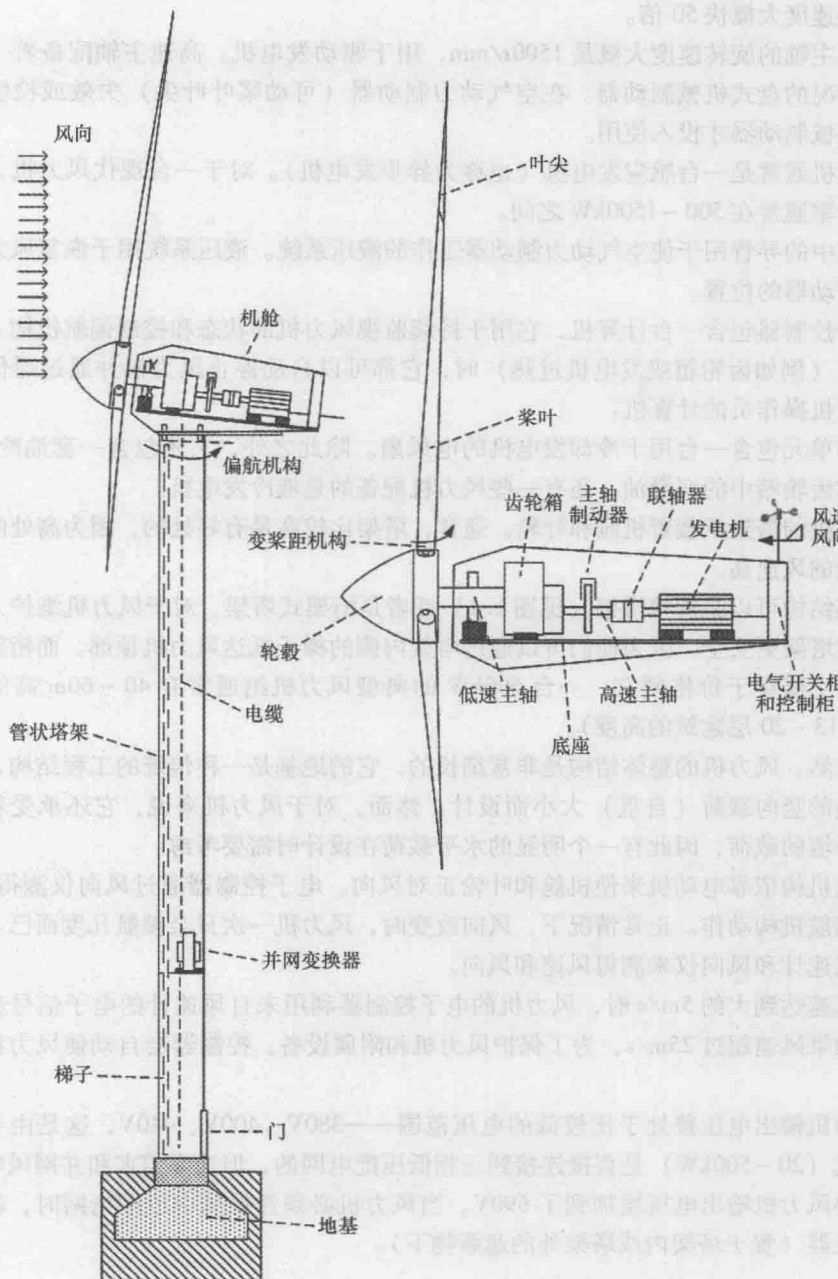


图 1.1 一台恒速风力机的主要部件

台 600kW 的风力机来说，叶轮旋转速度相对较慢，为 19 ~ 30r/min。

齿轮箱左边连接着低速主轴。齿轮箱的变速功能使得其右边连着的高速主轴比低速