



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风力发电机 及其控制

FENGLI FADIANJI
JIQI KONGZHI

马宏忠 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风力发电机 及其控制

马宏忠 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，比较系统地介绍了常用风力发电机的结构、原理、运行、控制及设计等方面的知识。

全书共分8章，主要内容包括绪论，交流电机的基本理论，双馈风力发电机，双馈风力发电机的运行与控制，无刷双馈异步风力发电机及其控制，直驱式永磁同步风力发电机，直驱式永磁同步风力发电机的运行与控制以及风力发电系统中的其他发电机。

本书可作为风力发电行业各类技术人员的培训教材，特别适合风力发电机设计、制造、运行、维护的各类技术人员阅读，也可作为高等学校有关专业师生的教学参考书。

图书在版编目（C I P）数据

风力发电机及其控制 / 马宏忠等编著. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2016. 1
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-3981-5

I. ①风… II. ①马… III. ①风力发电机—控制系统
IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321374号

书 名	风力发电工程技术丛书 风力发电机及其控制
作 者	马宏忠 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17印张 404千字
版 次	2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	49.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程技术丛书》

编委会

顾问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主任 徐辉 毕亚雄

副主任 汤鑫华 陈星莺 李靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 尹廷伟 申宽育 冯树荣

刘丰 刘玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙强

孙志禹 李炜 李莉 李同春 李承志 李健英

李睿元 杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈刚

陈党慧 陈澜 林毅峰 易跃春 周建平 郑源

赵生校 赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施蓓

洪树蒙 祝立群 袁越 黄春芳 崔新维 彭丹霖

董德兰 游赞培 蔡新 糜又晚

丛书主编 郑源 张燎军

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学
中国长江三峡集团公司
中国水利水电出版社
水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心
华北电力大学
水电水利规划设计总院
水利部水利水电规划设计总院
中国能源建设集团有限公司
上海勘测设计研究院
中国电力建设集团华东勘测设计研究院有限公司
中国电力建设集团西北勘测设计研究院有限公司
中国电力建设集团中南勘测设计研究院有限公司
中国电力建设集团北京勘测设计研究院有限公司
中国电力建设集团昆明勘测设计研究院有限公司
长江勘测规划设计研究院
中水珠江规划勘测设计有限公司
内蒙古电力勘测设计院
新疆金风科技股份有限公司
华锐风电科技股份有限公司
中国水利水电第七工程局有限公司
中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司
中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司
同济大学
华南理工大学

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主	任	胡昌支	陈东明				
副	任	王春学	李 莉				
成	员	殷海军	丁 琪	高丽霄	王 梅	白 杨	
		汤何美子					

本书编委会

主 编 马宏忠

副主编 陈湏斐 赵宏飞 徐 刚

参编人员 (按姓氏笔画排序)

汪金荣 刘宝稳 李超群 张 琳 谢小磊

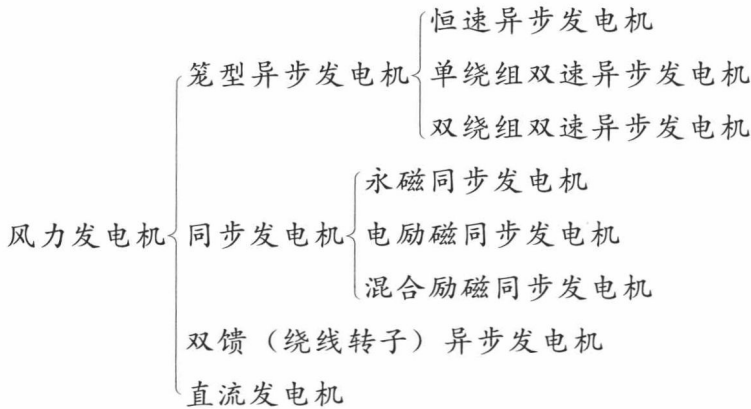
刘久付 程 俊 张正东 黄春梅 施恂山



前 言

大气污染、水环境恶化与矿物能源枯竭给人类发展提出了新的问题，从而使可再生能源的利用受到人们的高度重视，风力发电是目前最具有商业价值的可再生能源利用形式。

发电机是风力发电系统的重要环节，其任务是将风力机轴上输出的机械能通过发电机转换成电能输出。发电机的选型与风力发电机组类型以及控制系统直接相关。风力发电机的分类如下：



目前，风力发电机广泛采用笼型异步发电机（笼型感应发电机）、双馈（绕线转子）异步发电机和同步发电机，直流风力发电机已经很少应用。对于定桨距风力机，系统采用恒频恒速控制时应选用异步发电机，为提高风电转换效率，异步发电机常采用双速型。对于变桨距风力机，系统采用变速恒频控制时，应选用双馈（绕线转子）异步发电机或同步发电机。同步发电机中，一般采用永磁同步发电机，为降低控制成本，提高系统的控制性能，也可采用电励磁或混合励磁（既有电励磁又有永磁）同步发电机。对于直驱式风力

发电机组，一般采用低速（多极）永磁同步发电机。

电机学是一门传统学科，但风力发电机有其特殊性，且发展很快，往往工程先于理论。虽然工程上有大量风力发电机组投运，但缺少理论支撑，缺少核心技术，处于边摸索、边设计、边生产的状态。虽然已有一些与风力发电机相关的图书，但多数以系统或控制为主。到目前为止还没有一本适用面比较宽，专门分析各种风力发电机的图书，而风电的发展迫切需要一本分析风力发电机的专门书籍，本书正是在这种情况下得以出版。

全书分8章。第1章绪论，对风力发电系统、各种风力发电机进行简要介绍；第2章交流电机的基本理论，分析交流电机的一些共性知识，主要包括同步电机与异步电机的基本工作原理、交流电机的绕组和电动势、交流电机的磁动势等；第3章双馈风力发电机，主要包括双馈风力发电机的基本工作原理、数学模型、坐标变换、结构与设计等，最后详细介绍了两个双馈风力发电机实例；第4章双馈风力发电机的运行与控制，首先介绍双馈风力发电机运行方式，然后分别对双馈风力发电机几种主要控制方式进行分析，并介绍了双馈风力发电机低电压穿越技术；第5章介绍无刷双馈异步风力发电机及其控制，主要包括无刷双馈电机的结构与基本原理、运行区域分析及能量传递关系，最后介绍了控制策略及控制方法；第6章直驱式永磁同步风力发电机，介绍直驱式风力发电机的类型、结构、工作原理、并网与保护及设计中的若干问题，还详细介绍了几个大型直驱式永磁同步发电机设计实例；第7章讨论直驱式永磁同步风力发电机的运行与控制，主要包括最大功率跟踪、变桨距、低穿越等控制内容；第8章简要介绍风力发电系统中的其他发电机，包括笼型异步发电机和电励磁同步发电机。

本书在写作过程中得到中国长江三峡集团公司毕亚雄副总经理，中国三峡新能源公司孙强副总经理、王玉国副总工程师，东南大学胡度生教授、胡敏强教授、余海涛教授，清华大学王祥珩教授，河海大学鞠平教授、郑源教授、张燎军教授，华侨大学方瑞明教授，华锐风电科技股份有限公司杨松高级工程师，新疆金风科技股份有限公司邓建军高级工程师，南京汽轮电机股份有限公司郭磊高级工程师等专家的大力支持，在此表示诚挚的感谢。本书在写作过程中河海大学能源与电气学院部分老师、研究生协助做了大量的工作，主要有陈滇斐、赵宏飞、徐刚、刘宝稳、李超群、汪金荣、张琳、谢小

磊、刘久付、程俊、张正东、施恂山、黄春梅、崔杨柳、周宇、弓杰伟、王涛云、夏东升等，没有他们的帮助，本书很难及时推出，因此从某种意义上讲他们也是本书的作者。

本书的写作得到了中国水利水电出版社李莉主任、汤何美子编辑的大力支持与帮助，在此对她们为本书所做出的贡献表示衷心的感谢。

本书在写作过程中参考了大量文献资料，对所引用的资料已尽可能地列写在书后的参考文献中，但其中难免有些遗漏，特别是一些资料经过反复引用已难以查实原始出处，在此特向被漏列参考文献的作者表示歉意，并向所有引用文献的作者表示诚挚的感谢。

考虑到风力发电机的核心技术比较敏感，本书中所采用的各风力发电机厂家的技术资料都是从正规途径获得并已能公开的资料，无意泄漏公司机密，同时也对相关公司表示感谢。

尽管笔者试图使本书尽可能完美地呈现给读者，但由于能力与精力有限，加上目前没有专门介绍风力发电机的资料可参考，一些厂家因为技术保密等原因也难以提供最新的核心技术资料等，书中内容仍有局限与欠缺之处，有待不断充实与更新，衷心希望读者不吝赐教。

作者

2015年8月于南京

本书编辑出版人员名单

责任编辑 汤何美子 李 莉

封面设计 李 菲

版式设计 黄云燕

责任校对 张 莉 梁晓静 吴翠翠

责任印制 王 凌



前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风力发电机组的构成与分类	1
1.2 风力发电机	11
第 2 章 交流电机的基本理论	16
2.1 交流电机的工作原理	16
2.2 交流电机的绕组和电动势	18
2.3 交流电机绕组的磁动势	28
第 3 章 双馈风力发电机	39
3.1 双馈风力发电机结构与基本原理	39
3.2 双馈风力发电机在三相静止坐标系下的数学模型	50
3.3 空间坐标变换	54
3.4 两相同步旋转 dqO 坐标系下的数学模型	59
3.5 双馈风力发电机的设计	63
3.6 双馈风力发电机实例	72
第 4 章 双馈风力发电机的运行与控制	81
4.1 运行方式	81
4.2 矢量控制与谐振调节器的控制	83
4.3 模糊控制	91
4.4 无功功率特性及其调节	97
4.5 低电压穿越技术	108
4.6 不对称电网电压下的控制方法	114
4.7 并网发电投切控制	118
第 5 章 无刷双馈异步风力发电机及其控制	121
5.1 无刷双馈电机的结构与基本原理	122

5.2	无刷双馈电机的运行区域分析及能量传递关系	129
5.3	无刷双馈发电机的控制	132
第 6 章	直驱式永磁同步风力发电机	145
6.1	概述	145
6.2	永磁同步发电机的结构	150
6.3	永磁同步发电机的工作原理	156
6.4	永磁同步风力发电机的设计	164
6.5	大型永磁同步发电机实例	176
6.6	直驱式永磁同步风力发电机组并网与保护	192
第 7 章	直驱式永磁同步风力发电机的运行与控制	200
7.1	概述	200
7.2	最大功率跟踪的基本控制方法	204
7.3	变速变桨距控制	207
7.4	基于发电机输出有功功率的控制	209
7.5	低电压穿越控制	215
7.6	低电压穿越的有功和无功协调控制	223
第 8 章	风力发电系统中的其他发电机	232
8.1	笼型异步发电机	232
8.2	电励磁同步发电机	242
8.3	笼型异步发电机与电励磁同步发电机比较	255
	参考文献	257

第 1 章 绪 论

把风能转变为电能是风能利用中最基本的一种方式，这种将风能转变为电能的装置称为风力发电机组。风轮在风力的作用下旋转，把风的动能转变为风轮轴的机械能，发电机在风轮轴的带动下旋转发电。因此，发电机承担着把风力机的动能转变为电能的重要工作，是风力发电机组最核心的设备。

本章首先介绍风力发电机组的相关知识，包括风力发电机组的构成与分类，然后介绍了主要风力发电机及其特点。

1.1 风力发电机组的构成与分类

从不同角度分析，风力发电机组有多种分类方式。图 1-1 所示为风力发电机组的配置关系，可以清楚地说明风力发电机组的分类。

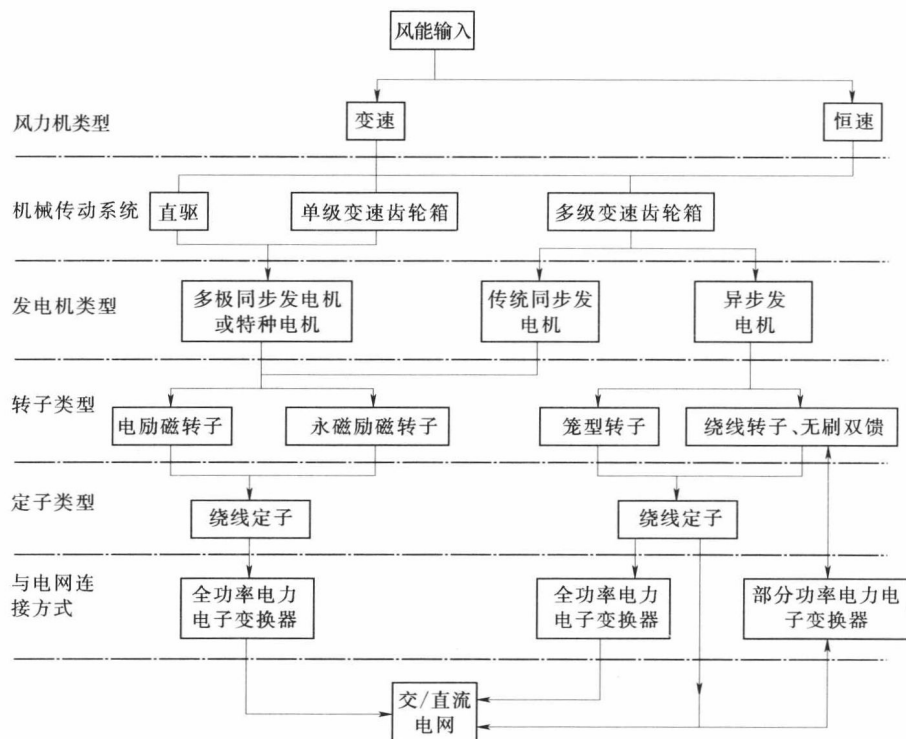


图 1-1 风力发电机组的配置关系



1.1.1 风力发电机组的构成

不同类型的风力发电机组其组成不完全相同，主要包括风轮、传动系统、发电机系统、制动系统、偏航系统、控制系统、变桨系统等，风力发电机组的主要组成部分如图 1-2 所示。

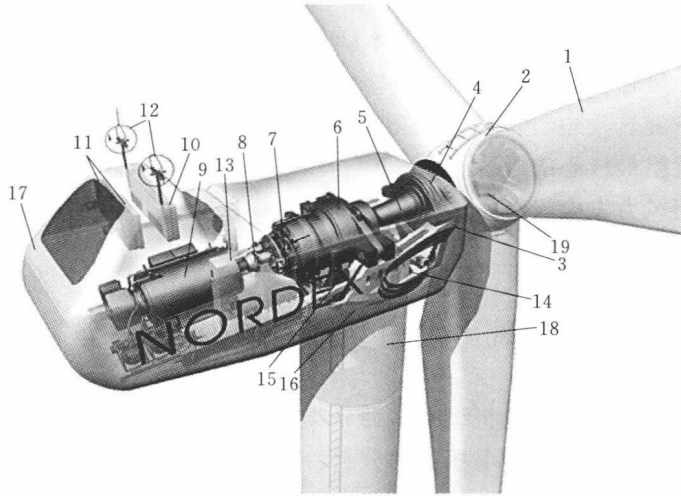


图 1-2 风力发电机组的主要组成部分

- 1—叶片；2—轮毂；3—机舱；4—叶轮轴与主轴连接；5—主轴；6—齿轮箱；7—刹车机构；
- 8—联轴器；9—发电机；10—散热器；11—冷却风扇；12—风速仪和风向标；
- 13—控制系统；14—液压系统；15—偏航驱动；16—偏航轴承；
- 17—机舱盖；18—塔架；19—变桨距部分

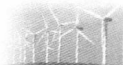
1. 风轮

风轮是将风能转化为动能的机构，风力带动风轮叶片旋转，再通过齿轮箱将转速提升，带动发电机发电。风力机通常有两片或三片叶片，叶尖速度 $50\sim 70\text{m/s}$ 。在此叶尖速度下，通常三叶片风轮效率更好，两叶片风轮效率仅降低 $2\%\sim 3\%$ 。对于外形均衡的叶片，叶片少的风轮转速更快，但会导致叶尖噪声和腐蚀等问题。三叶片风轮的受力更平衡，轮毂结构更简单。

早期的风力机叶片为钢制和铝制，随着科技的发展，目前叶片材料多采用玻璃纤维复合材料（GRP）和碳纤维复合材料（CFRP）。对于小型的风力发电机组，如风轮直径小于 5m ，在选择材料上，通常更关心效率而不是重量、硬度或叶片的其他特性。对于大型风力发电机组，对叶片特性要求较高，所以材料的选择更为重要。世界上大多数大型风力机的叶片是由 GRP 制成的。

2. 传动系统

风力机的传动机构一般包括低速轴、高速轴、齿轮箱、联轴节和制动器等，但不是所有风力机都必须具备这些环节。有些风力机的轮毂直接连接到齿轮箱上，不需要低速传动轴；也有些风力机（特别是小型风力机）设计成无齿轮箱的，风轮直接与发电机相



连接。

齿轮箱是传动装置的主要部件。它的主要功能是将风轮在风力作用下产生的动能传递给发电机并使其达到相应的转速。通常风轮的转速很低，远达不到发电机发电所要求的转速，必须通过齿轮箱齿轮副的增速作用来实现，因此也将齿轮箱称为增速箱。如 600kW 的风力机风轮转速通常为 27r/min，相应的发电机转速通常为 1500r/min。

3. 发电机系统

发电机系统主要由发电机、循环变流器、水循环装置（电机、水泵、水箱等）或空冷装置等组成。核心是发电机，也是本书的重点，关于风力发电机组的分类将在 1.2 节讨论，发电机及其控制的详细内容将在后面各章中详细分析。

4. 制动系统

风力发电机组的制动分为气动制动与机械制动两部分。风的速度很不稳定，在大风的作用下，风轮会越转越快，系统可能被吹垮，因此常常在齿轮箱的输入端或输出端设置刹车装置，配合叶尖制动（定桨距风轮）或变桨距制动装置共同对机组传动系统进行联合制动。

5. 偏航系统

偏航系统使风轮扫掠面积总是垂直于主风向。中小型风力机可用舵轮作为对风装置，其工作原理大致为：当风向变化时，位于风轮后面的两个舵轮（其旋转平面与风轮旋转平面垂直）旋转，并通过一套齿轮传动系统使风轮偏转，当风轮重新对准风向后，舵轮停止转动，对风过程结束。

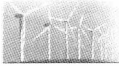
大中型风力机一般采用电动的偏航系统来调整风轮并使其对准风向。偏航系统一般包括异步风向的风向标、偏航电机、偏航行星齿轮减速器、回转体大齿轮等。其工作原理为：风向标作为异步元件将风向的变化用电信号传递到偏航电机控制回路的处理器中，经过比较后处理器给偏航电机发出顺时针或逆时针的偏航命令，为了减少偏航时的陀螺力矩，电机转速将通过同轴连接的减速器减速后，将偏航力矩作用在回转体大齿轮上，带动风轮偏航对风，当对风完成后，风向标失去电信号，电机停止工作，偏航过程结束。

6. 控制系统

控制系统是现代风力发电机组的神经中枢。现代风力发电机组无人值守，兆瓦级风力发电机组一般在风速 4m/s 左右自动启动，在 14m/s 左右发出额定功率。然后，随着风速的增加，风力发电机组一直控制在额定功率附近发电，直到风速达到 25m/s 时自动停机。现代风力发电机组的存活风速为 60~70m/s，也就是说在如此大的风速下风力发电机组也不会被吹坏。通常所说的 12 级飓风，其风速范围也仅为 32.7~36.9m/s。在这样恶劣的条件下，风力发电机组的控制系统要根据风速、风向对系统加以控制，使之在稳定的电压和频率下运行，自动地并网和脱网，并能够监视齿轮箱、发电机的运行温度，液压系统的油压等，对出现的任何异常进行报警，必要时自动停机。

7. 变桨系统

变桨距控制是根据风速的变化调整叶片的桨距角，从而控制风力发电机的输出功率。变桨系统通常由轴承、驱动装置（电机+减速器）、蓄电池、逆变器等组成，变桨速度为



16°/s 左右。

目前，国际上常见的变桨系统有两种类型：一种是液压驱动连杆机构，推动轴承，实现变桨；另一种是电机经减速驱动轴承，实现变桨。由于高压油的传递需要通过静止部件向旋转部件（轮毂）传递，难以很好地实现，易发生漏油；电信号的传递较易实现，兆瓦级风力发电机组多采用电机驱动变桨。出于安全考虑，要配置蓄电池，防止电网突然掉电或电信号突然中断，使风力发电机组能够安全平稳地实现顺桨制动。

1.1.2 风力发电机组的分类

1.1.2.1 按照风轮形式分类

1. 垂直轴风力发电机组

垂直轴风力发电机组按形成转矩的机理分为升力型和阻力型两类。

升力型风力发电机组的气动力效率远大于阻力型风力发电机组，因此当前大型并网型垂直轴风力发电机组全部为升力型。阻力型风力发电机组的风轮转矩是由叶片凹凸面阻力不同形成的，其典型代表是风杯，对大型风力发电机组不适用。

升力型风力发电机组的风轮转矩由叶片的升力提供，是垂直轴风力发电机的主流，其中打蛋形风轮应用最多，当这种风轮叶片的主导载荷是离心力时，叶片只有轴向力而没有弯矩，叶片结构最轻。

与水平轴风力发电机组相比，垂直轴风力发电机组除在风向改变时无需对风外，其优越性并不明显，因而目前使用量很小。

2. 水平轴风力发电机组

水平轴风力发电机组的风轮轴线基本与地面平行，安置在垂直地面的塔架上，是当前使用最广泛的机型。

水平轴风力发电机组还可分为上风向及下风向两种机型。上风向风力发电机组其风轮面对风向，安置在塔架前方，需要主动调向机构以保证风轮能随时对准风向。下风向风力发电机组其风轮背对风向，安置在塔架后方。当前大型并网风力发电机组几乎都是水平轴上风向型。

(1) 上风向风力发电机组。水平轴上风向三叶片风力发电机组是当代大型风力发电机组的主流，两叶片上风向风力发电机组也比较多见。

两叶片风力发电机组在同样风轮直径（扫掠面积）下其转速更快才能产出与三叶片机组相同的功率，因此，对叶片寿命（循环次数）的要求比三叶片机组要高。由于转速快叶尖速度高，风轮的噪声水平也高，因此对周围的环境影响较大。两叶片相对三叶片，其质量平衡及气动力平衡都比较困难，因此功率和载荷波动较大。其优点是叶片少、成本相对低，对于噪声要求不高的离岸型风力发电机组，两叶片是比较合适的。

(2) 下风向风力发电机组。下风向风力发电机组只在中、小功率机型中出现。其特点如下：

1) 风轮（被动）对风，不需要偏航驱动机构。因为风轮处于塔架的下风向，是静平衡状态，实际上由于偏航使电缆扭绞，仍需要解扭措施。原则上可采用滑环机构避免扭绞，但不可靠。



2) 风轮在下风向受塔影影响较大, 这一方面影响了风能利用系数, 同时使疲劳载荷的幅值增大, 叶片疲劳寿命也比上风向机型短, 因此下风向风力发电机组很少采用。

1.1.2.2 按照速度与频率的关系分类

1. 恒速恒频风力发电机组

当风力发电机与电网并联运行时, 要求风力发电机的频率与电网频率保持一致, 即恒频。恒速恒频指在风力发电过程中, 保持发电机的转速不变, 从而得到恒定的频率。

恒频恒速发电机组通常采用异步发电机和同步发电机作为并网运行的发电机, 采用定桨距失速或主动失速调节实现功率控制。

当采用同步发电机作为并网运行的发电机时, 由于风速随机变化, 作用在转子上的转矩很不稳定, 使得并网时其调速性能很难达到期望的精度, 常采用自动准同步并网和自同步并网方式, 前者由于风速的不确定性, 并网比较困难, 后者并网操作较简单, 并网在短时间内可完成, 但要克服合闸时有冲击电流的缺点。

当采用异步发电机作为并网运行的发电机时, 由于靠转差率调整负荷, 所以控制装置简单, 并网后不会产生振荡和失步, 运行稳定。其缺点是直接并网时产生的过大冲击电流会造成电压大幅度下降, 对系统安全运行构成威胁。异步发电机本身不发出无功功率, 需要无功补偿, 正常运行时需要相应采取有效措施才能保障风力发电机组安全运行。

总的来说, 恒速恒频风力发电控制技术的优点是成本低、结构简单, 不存在复杂的电路控制系统需要维护。其缺点是由于异步电机的转子始终运行于近似同步转速、同步电机始终运行于同步转速, 无法实现风力机在不同风速状态下的转速调节, 导致风力机在扫风面积上无法实现最大气动能量的捕获。由于这种风力发电机组自身不具备无功功率控制的能力, 通常在电网接入环节安装无功补偿装置, 如电容器组或 SVG, 其容量根据发电机组容量按一定的比例进行设计。

2. 变速恒频风力发电机组

变速恒频是指在风力发电过程中发电机的转速可随风速变化, 通过其他控制方式得到恒定的频率。

变速恒频发电是 20 世纪 70 年代中后期逐渐发展起来的一种新型风力发电技术, 通过调节发电机转子电流的大小、频率和相位或变桨距控制实现转速的调节, 可在很宽的风速范围内保持近乎恒定的最佳叶尖速比, 进而实现风能最大转换效率; 同时又可以采用一定的控制策略灵活调节系统的有功功率、无功功率, 抑制谐波, 减少损耗, 提高系统效率, 因此可以大大提高风电场并网的稳定性。尽管变速系统与恒速系统相比风电转换装置中的电力电子部分比较复杂和昂贵, 但成本在大型风力发电机组中所占比例并不大, 因而发展变速恒频技术将是今后风力发电的必然趋势。

变速恒频发电机组通常为“变速风力机+变速发电机”形式, 采用变桨距结构, 启动时通过调节桨距控制发电机转速。

变速恒频风力发电机有低速直驱永磁风力发电机和带多级齿轮箱的高速双馈异步发电机两种基本形式, 最近又从直驱永磁风力发电机和高速双馈异步发电机中分别派生出两种新结构, 即带一级增速齿轮箱的半直驱永磁风力发电机和无刷双馈风力发电机, 如图 1-3 所示。