



“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

风力发电机组 控制

FENGLI FADIAN JIZU
KONGZHI

霍志红 郑源 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

风力发电工程技术丛书

风力发电机组 控制

霍志红 郑源 左潞 张德虎 张志学 胡鹤轩 冯晓琼 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,风力发电是一门新兴的综合性学科,包括机械工程、控制工程、电机学、电力电子、流体力学、气象学、材料力学等。目前,风力发电发展十分迅速,相关技术人才十分紧缺。本书介绍了风力机的基本理论、风力发电机组的控制思想及典型风力发电机组控制系统的结构及基本控制策略、风力发电机组的主流控制系统、风力发电机组的变桨距控制系统、偏航系统、液压与制动系统,同时还介绍了变速恒频风力发电技术、风力发电机组的并网技术、风力机组的数据采集系统及监控系统、海上风电、故障诊断技术的基本原理、风力机组常见故障以及风力发电机组的故障诊断技术。

本书既可作为从事风力发电工作的各类技术人员的学习、培训教材,也可作为高等院校师生和相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组控制 / 霍志红等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 1
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-1565-9

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第311555号

书 名	风力发电工程技术丛书 风力发电机组控制
作 者	霍志红 郑源 左潞 张德虎 张志学 胡鹤轩 冯晓琼 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 16.25印张 425千字
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	50.00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 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

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团西北勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团中南勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问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

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主 任 胡昌支

副 主 任 王春学 李 莉

成 员 殷海军 丁 琪 高丽霄 王 梅 单 芳

白 杨 汤何美子



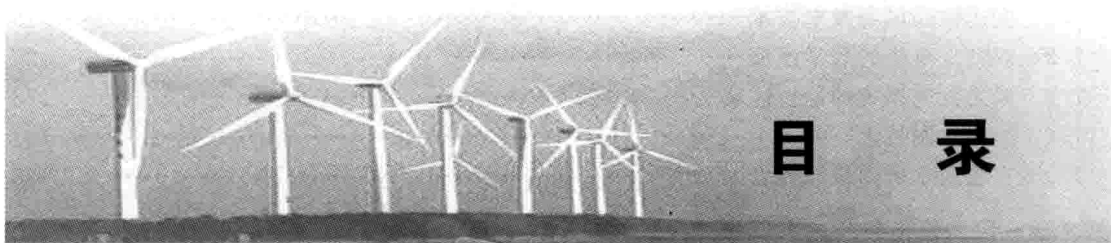
能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。利用风能作为未来重要的清洁替代能源之一，对于缓解能源匮乏具有非同寻常的意义。随着风电大型机组的技术成熟和产品商品化，发电成本随之降低，风力发电已经具备了和其他发电方式竞争的能力。伴随风电事业日益蓬勃的发展，社会需要更多的从事风力发电方面的技术人员，以满足该学科领域的工程技术、科研、经营管理等各方面的人才需求。

本书共分十一章：第1章绪论，对风力发电以及风力发电机组控制系统的发展情况做了简单的介绍；第2章介绍了风力机的基本理论，包括风力机的空气动力学基础、桨叶受力分析及风轮气动功率调节；第3章介绍了风力机组控制系统的组成、基本工作原理、基本控制要求以及风力机控制技术的发展趋势；第4章介绍了变桨距控制技术，其中包括电动变桨和液压变桨技术；第5章着重介绍了偏航系统的结构组成、工作原理及偏航系统的技术要求及维护；第6章介绍了风力机组液压系统的组成结构及工作原理、基本液压元件风力机组的制动与安全保护技术；第7章介绍了变速恒频风力发电技术、交流励磁双馈发电机的矢量控制技术以及直驱式永磁同步风力发电技术；第8章介绍了风力机组的并网控制技术、双PWM变频器原理以及低压穿越技术；第9章介绍了数据通信的基础知识、SCADA系统、风电场SCADA系统、风力机组的数据采集与监控系统、海上风力发电现状及海上风电关键技术；第10章主要介绍了风力发电存在的问题、风力机组常见故障、风力机组控制系统故障诊断技术；第11章介绍了风电机组维护工作的主要内容及机组各部件的日常维护工作。

感谢河海大学能源与电气工程学院的各位领导和老师的支持与帮助！本书的编著参阅了大量参考文献和网上资料，在此对各位作者一并表示感谢！

霍志红

2013年11月22日



目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风力发电发展概况.....	1
1.2 风力发电机组控制技术.....	2
第 2 章 风力机	9
2.1 风力机的基本结构.....	9
2.2 风力机的空气动力特性.....	17
2.3 叶片受力分析.....	21
2.4 风轮气动功率调节.....	22
第 3 章 风力发电机组的基本控制理论	25
3.1 控制系统的基本组成.....	25
3.2 基本控制要求.....	27
3.3 定桨距机组的控制系统.....	32
3.4 变桨距机组的控制系统.....	44
3.5 变速机组的控制系统.....	54
第 4 章 变桨距控制系统	64
4.1 变桨距控制技术.....	64
4.2 电动变桨距系统.....	65
4.3 液压变桨距系统.....	72
第 5 章 偏航系统	75
5.1 主要作用.....	75
5.2 系统结构.....	76
5.3 工作原理.....	80
5.4 技术要求.....	82
第 6 章 液压与制动系统	85
6.1 基本液压元件.....	85

6.2	风电机组的液压系统	91
6.3	制动与安全保护系统	104
第 7 章	变速恒频风力发电技术	119
7.1	变速恒频风力发电技术	119
7.2	双馈发电机的数学模型	124
7.3	风力发电系统的运行区域	128
7.4	矢量控制技术	131
7.5	直驱式永磁同步风力发电系统	135
第 8 章	风力发电机组的并网技术	140
8.1	风力机组并网概述	140
8.2	风电并网对电网的影响	140
8.3	异步发电机并网	142
8.4	双馈异步发电机并网	145
8.5	同步发电机并网	147
8.6	双 PWM 变换器工作原理	148
8.7	低电压穿越技术	152
第 9 章	风力发电机组的监控系统	157
9.1	数据通信的基础知识	157
9.2	SCADA 系统	164
9.3	风电场 SCADA 系统	166
9.4	风力机组的数据采集系统	173
9.5	风力机组的监控系统	176
9.6	风力发电机组的主流控制系统	184
9.7	海上风电	193
第 10 章	风力发电机组的故障诊断技术	197
10.1	故障诊断技术概述	197
10.2	故障诊断的基本方法	200
10.3	风力机组控制系统故障诊断技术	205
10.4	风力机组常见故障	207
第 11 章	风力发电机组的维护	216
11.1	维护工作的主要内容	216
11.2	机组各部件的维护工作	218
附录	风力发电词汇	231
	参考文献	249

第 1 章 绪 论

1.1 风力发电发展概况

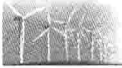
随着经济的快速发展,能源消费的逐年增加,常规能源资源面临日益枯竭的窘境,人类迫切需要一些清洁、无污染、可再生的新能源。在目前众多可再生能源与新能源技术开发中,风力发电有着自身独特的优势,在可再生绿色能源开发领域中占有突出的地位,具有重要的开发利用价值,受到世界各国的普遍重视。

充足的能源、洁净的环境是经济持续发展的基础条件。人类早在远古时代便开始利用风能,最初是将风能转换成机械能,19世纪末,丹麦建成全球第一台风力发电装置,随后美国、苏联也相继开始各种风力发电机的研制和开发。二战前后,由于能源需求量增大,不少国家相继开始注意风力发电,风力发电的理论逐渐系统化。美国于1941年建造了一台1.25MW的大型风力发电机组。20世纪70年代,世界范围内连续出现的两次石油危机极大地刺激了风力发电的发展。此时,丹麦已研制出55~630kW的系列化风力发电机组。80年代,以美国为首的西方各国开始着手实施以风力发电为中心的节能计划,各国都为风力发电提供了许多优惠政策,这些都促使了风力发电高速发展。90年代,随着世界环境的不断恶化,环保呼声日益高涨,各国更加注重发展风力发电技术,在科学技术的强有力推动下,风力发电技术的发展令人瞩目。

风能的开发和利用在欧美发达国家发展非常迅速,风力发电的技术也日趋成熟。我国对现代风力机的研制可以追溯到20世纪50年代,但有系统地研究还是从70年代开始的。从80年代中期开始,我国从国外引进了一些大、中型风力发电机组并入电网。1986年山东荣城市建成中国第一个风电场,年均发电量33万kWh,以后相继在福建平潭、广东南澳岛、新疆达坂城及内蒙古朱日和等地建立风电场。我国在风电场的建设、运行、管理等方面都取得了许多成功经验,初步具备了规模性开发建设风电的能力和条件。

进入20世纪90年代以来,我国风电发展势头强劲,年平均增长速度在20%以上,成为我国发展速度最快的能源工业。我国历年风电装机容量及预测如图1-1所示。但是,我国安装的大部分大型风力发电机组是从国外进口的,这种状况严重地制约了我国民族风电产业的健康发展,成为影响我国风电规模化持续发展的潜在障碍,改变这种状况的根本途径就是要实现我国大型风力发电机组的国产化。国家计划委员会于1996年3月制定了“乘风计划”,以风力发电机的国产化来带动风电场建设的产业化,该计划旨在采取技贸结合的形式,引进国外先进技术,通过消化吸收,达到具备自主开发、自行设计和制造大型风力发电机的能力。

我国对现代并网型风力发电机的研究工作始于20世纪80年代。从第六个五年计划开始,国家将风能的开发利用列入科技攻关计划。在“六五”、“七五”、“八五”、“九五”和



“十五”计划期间，国家计划委员会和国家科学技术委员会分别组织了综合性风能科技攻关，内容涉及风力资源、风力机空气动力学、结构动力学、电机、控制和材料等。在风电机组的开发研究中，我国自行研制出 20kW，30kW，75kW，120kW，200kW，600kW 和 1MW 风力发电机组。

目前世界上有几十种型号的大型风力发电机组处于商业运行中，大体可分为四种类型：第一种为双绕组定桨距恒速机型，以 Bounsl, Bouns2, Nordex60 和 Nordex66 为代表；第二种为变滑差变速机型，主要代表机型有 Vestas V63, Vestas V66, Vestas V80；第三种是采用双馈发电机转差励磁方案，实现变速变距运行的机型，主要代表机型有 DeWind 公司的 DeWind D6、D9, Tacke 公司的 TW—1.5, TW—2.0 和 Nordex80；第四种是采用直接驱动的永磁发电机，直接采用交—直—交功率变换系统送电，如德国 Enercon E66, 意大利 Gamma 60 型等。当前国外大型风电机组的发展趋势是单机容量越来越大，机组运行越来越可靠，而维护量越来越小。

从国内外近几年风电产业发展看，随着风电产业的不断发展，风力发电机组控制技术也在不断进步，以满足其自身对风速变化、成本、环境及稳定运行等各方面的要求。

风力发电机组主要发展趋势见表 1-1，箭头方向代表了目前主流机型的技术路线。主要包括以下方面：

(1) 变桨距调节方式迅速取代失速调节方式。从目前市场情况看，变桨距调节方式能充分克服失速调节不能充分利用风能的缺陷，得到了迅速的应用。

(2) 变速运行方式迅速取代恒速运行方式。由于变速运行方式能够最大限度地利用风能，提高风力发电机的运行效率，因而被广泛采用。

表 1-1 风力发电机组的发展趋势

	20 世纪 70 年代 → 进入 21 世纪						
失速调节	✓						
主动失速调节			✓		✓		
恒速运转	✓	✓	✓				
有限变速					✓		
齿轮箱增速	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
变桨距调节					✓	✓	✓
变速运转						✓	✓
无齿轮箱直驱							✓

1.2 风力发电机组控制技术

风力资源丰富的地区通常都位于边远地区或海岛甚至是海上，这些地方自然环境较恶劣，需要做到无人职守和远程监控，这对机组控制系统的可靠性和安全性要求较高。作为风力资源丰富的国家之一，我国在风力发电机组的国产化方面也取得了较快进展。但是我国风力发电事业还处于起步阶段，机组控制技术与国外先进技术有较大差距，风力发电机



组控制系统是机组正常运行的核心，其控制技术是风力发电机组的关键技术之一，与风力发电机组的其他部分关系密切，其控制的精确性、功能的完善性将直接影响机组的安全与效率。因此，控制系统是风力发电机组可靠运行以及最佳运行的重要保证。

与一般工业控制过程不同，风力发电机组的控制系统是综合性控制系统。它不仅要监视电网、风况和机组的运行参数，对机组进行并网与脱网控制，以确保运行的安全性与可靠性，还要根据风速与风向的变化，对机组进行转速和转向的实时控制，以提高机组的运行效率和发电量。

20 世纪 80 年代中期，定桨距风力发电机组开始进入风力发电市场，主要采用了软并网技术、空气动力刹车技术、偏航与自动解缆技术等，解决了风力发电机组的并网问题和运行的安全性与可靠性问题。这些都是并网运行的风力发电机组需要解决的基本的问题。由于功率输出被桨叶自身的性能限制，桨叶的节距角在安装时已经固定而发电机的转速由电网频率限制。因此，只要在允许的风速范围内，定桨距风力发电机组的控制系统在运行过程中对由于风速变化而引起的输出能量的变化不需要控制。这就大大简化了控制技术和相应的伺服传动技术，使得定桨距风力发电机组能够在较短时间内实现并网，投入商业化运行。

恒速定桨距风力发电机组在低风速运行时风能转换效率比较低。在整个运行风速范围内由于气流的速度不断变化，如果风力发电机的转速不能随风速而调整，必然导致风轮在低风速时的效率降低。同时风力发电机本身也存在低负荷时的效率问题，尽管目前用于风力发电机组的发电机已能设计得较为理想，它们在功率大于 30% 额定功率范围内，均有高于 90% 的效率，但当功率小于 25% 额定功率时，效率仍然会急剧下降。为了解决上述问题，引入了双速风力发电机组的概念，将发电机分别设计成 4 极和 6 极，提高了风力发电机组的效率。

经过十多年的实践，设计人员对风力发电机组的运行工况和各种受力状态已有了深入的了解，不再满足于仅仅提高风力发电机组运行的可靠性，而开始追求不断优化的输出功率曲线，同时采用变桨距机构的风力发电机组可使桨叶和整机的受力状况大为改善，这对大型风力发电机组的总体设计十分有利。因此，进入 20 世纪 90 年代以后，变桨距控制系统又重新受到了设计人员的重视。

变桨距控制主要是通过改变翼型迎角，使翼型升力变化来进行调节的。变桨距控制多用于大型风力发电机组。变桨距风力发电机组又分为主动变桨距控制与被动变桨距控制。主动变桨距控制可以在大于额定风速时限制功率，这种控制的实现是通过将每个叶片的部分或全部相对于叶片轴方向进行旋转以减小攻角，同时也减小了升力系数。被动变桨距控制是一种令人关注的可替代主动变桨距限制功率的方式，其思路是将叶片或叶片的轮毂设计成在叶片载荷的作用下扭转，以便在高风速下获得所需的桨距角。但是，看似简单的理论实践起来却有一定难度，因为所必须的叶片随风速变换而扭转的变化量一般并不与叶片相应的载荷变化相匹配。对于独立运行的风力发电机组来说，发电量的最大化不是主要目标，被动变桨距控制方案有时候被采用，但是这一概念在并网运行的风力发电机组中尚未应用。

变桨变距风力发电机组并网后可对功率进行控制，使风力机的启动性能和功率输出特



性都有显著的改善。风力发电机组的液压系统不再是简单的执行机构。作为变距系统，它自身已组成闭环控制系统，采用了电液比例阀或电液伺服阀，使控制系统的水平提高到一个新的阶段。

由于变桨距风力发电机组在额定风速以下运行时的效果仍不理想，到了 20 世纪 90 年代末期，基于变速恒频技术的各种变速风力发电机组开始进入风电场。变速风力发电机组的控制系统与定速风力发电机组的系统的根本区别在于，变速风力发电机组是把风速信号作为控制系统的输入变量来进行转速和功率控制的。变速风力发电机组的主要特点是低于额定风速时，它能跟踪最佳功率曲线，使风力发电机组具有最高的风能转换效率；高于额定风速时，它增加了传动系统的柔性，使功率输出更加稳定，特别是解决了高次谐波、无功补偿等问题后，达到了高效率，高质量地向电网提供电力的目的。可以说，风力发电机组的控制技术从机组的定桨距恒速运行发展到基于变速恒频技术的变速运行，已经基本实现了风力发电机组从能够向电网提供电力到理想地向电网提供电力的“最终目标”。

变速恒频风力发电技术目前的控制方法是：当风速变化时通过调节风力发电机电磁力矩或风力机桨距角使叶尖速比保持最佳值，实现风能的最大捕获。控制方法基于线性化模型实现最佳叶尖速比的跟踪，利用风速测量值进行反馈控制，或电功率反馈控制。但在随机扰动大、不确定因素多、非线性严重的风电系统，传统的控制方法会产生较大误差。因此近些年国内外都开展了这方面的研究。一些新的控制理论开始应用于风电机组控制系统，如模糊逻辑控制、神经网络智能控制、鲁棒控制等，这使风机控制向更加智能化的方向发展。对于大型风力发电机系统来说，关键部分是风轮和控制系统。随着对风力机技术的不断研究与开发，风力发电机系统逐渐大型化和商品化，反过来，这也使得对风力发电关键技术的研究也越来越深入。

1. 风力机组控制系统的类型

(1) 定桨距失速调节型风力发电机组。定桨距是指桨叶与轮毂的连接是固定的，即当风速变化时，桨叶的迎风角度不能随之变化。失速是指桨叶本身所具有的失速特性，当风速高于额定风速时，气流将在桨叶的表面产生涡流，使效率降低，产生失速，来限制发电机的功率输出。为了提高风电机组在低风速时的效率，通常采用双速发电机（即大/小发电机）。在低风速段运行时，采用小电机使桨叶具有较高的气动效率，提高一些发电机的运行效率。

定桨距失速调节型的优点是失速调节由桨叶本身完成，简单可靠，当风速变化引起的输出功率的变化只通过桨叶的被动失速调节而控制系统不作任何控制，使控制系统大为简化。但是在输入变化的情况下，风力发电机组只有很小的机会能运行在最佳状态下，因此机组的整体效率较低。通常很少应用在兆瓦级以上的大型风力机上。

(2) 变桨距调节型风力发电机组。变桨距是指安装在轮毂上的叶片通过控制可以改变其桨距角的大小。在运行过程中，当输出功率小于额定功率时，桨距角保持在 0° 位置不变，不作任何调节；当发电机输出功率达到额定功率以后，调节系统根据输出功率的变化调整桨距角的大小，使发电机的输出功率保持在额定功率。此时控制系统参与调节，形成闭环控制。

(3) 主动失速调节型风力发电机组。将定桨距失速调节型与变桨距调节型两种风力发



电机相结合，充分吸取了被动失速和桨距调节的优点，桨叶采用失速特性，调节系统采用变桨距调节。在低风速时，将桨叶节距调节到可获取最大功率位置，桨距角调整优化机组功率的输出；当风力机发出的功率超过额定功率后，桨叶节距主动向失速方向调节，将功率调整在额定值上。由于功率曲线在失速范围的变化率比失速前要低得多，控制相对容易，输出功率也更加平稳。

2. 变速恒频发电机的类型

根据风机转速风力发电机组分为恒速恒频和变速恒频两种，恒速恒频机组的整体效率较低，而变速恒频这种调节方式是目前公认的最优化调节方式，也是未来风电技术发展的主要方向。变速恒频的优点是可大范围内调节运行转速，来适应因风速变化而引起的风力机功率的变化，可以最大限度的吸收风能，因而效率较高。控制上也很灵活，可以较好的调节系统的有功功率、无功功率，但控制系统较为复杂。变速恒频又根据发电机的不同分为以下几种：

(1) 异步感应发电机。异步感应发电机工作原理图如图 1-1 所示，通过晶闸管控制的软并网装置接入电网，并网冲击电流较大。另外需要电容无功补偿装置。控制电路简单。各大风力发电制造商如 Vestas, NEG, Micon, Nordex 等都有此类产品。

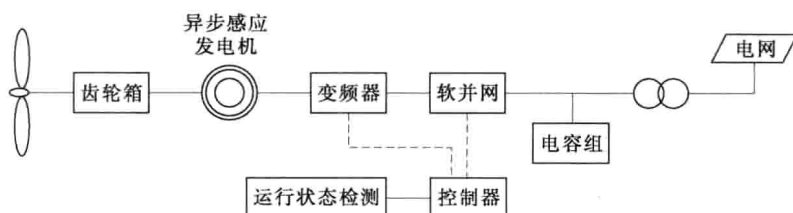


图 1-1 异步感应发电机工作原理图

(2) 绕线转子异步发电机。绕线转子异步发电机工作原理图如图 1-2 所示，绕线转子异步发电机可以采用功率辅助调节方式，即转子电流控制 (Rotor Current control, RCC) 方式来配合变桨距机构，共同完成发电机输出功率的调节。在绕线转子输入由电力电子装置控制的发电机转子电流，可以加大异步发电机转差率 (可到 10%)，使得发电机在较大的转速范围内向电网送电。以提高异步发电机的风能利用率。



图 1-2 绕线转子异步发电机工作原理图

(3) 双馈发电机。双馈电机的结构类似于绕线式感应电机，定子绕组也由具有固定频率的对称三根电源激励，所不同的是转子绕组具有可调节频率的三相电源激励，一般采用交—交变频器或交—直—交变频器供以低频电流，如图 1-3 所示。

双馈电机励磁可测量有：①励磁电流的幅值；②励磁电流的频率；③励磁电流的相位。通过改变励磁频率，可调节转速。这样在负荷突然变化时，迅速改变电机的转速，充

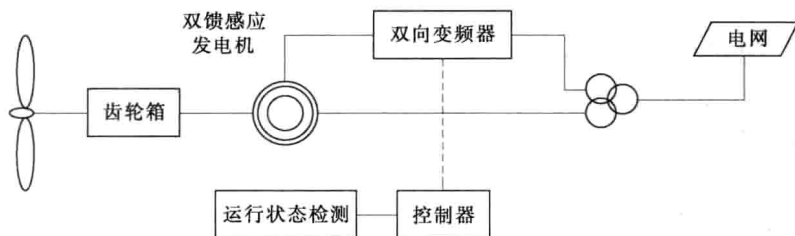


图 1-3 双馈感应发电机工作原理图

分利用转子的动能，释放和吸收负荷，对电网的扰动远比常规电机小。另外，通过调节转子励磁电流的幅值和相位，来调节有功功率和无功功率。

双馈电机控制系统通过变频器控制器对逆变电路小功率器件的控制，可以改变双馈发电机转子励磁电流的幅值、频率及相位角，达到调节其转速、有功功率和无功功率的目的。这样既提高了机组的效率，又对电网起到稳频、稳压的作用。双馈电机控制简要框图如图 1-4 所示。

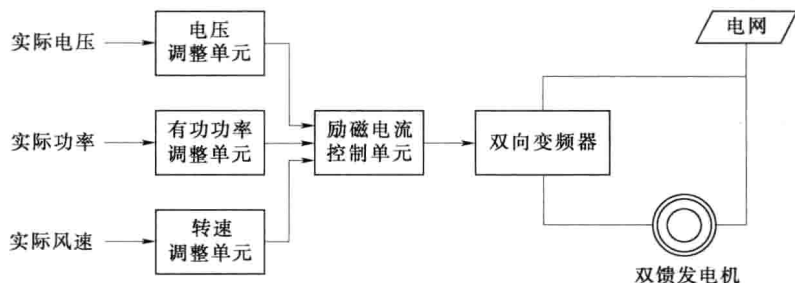


图 1-4 双馈电机控制简要框图

整个控制系统可分为转速调整单元、有功功率调整单元和电压调整单元（无功功率调整）。它们分别接受风速和转速、有功功率、无功功率指令，并产生一个综合信号，送给励磁控制装置，改变励磁电流的幅值、频率与相位角，以满足系统的要求。由于双馈电机既可调节有功功率，又可调节无功功率，有风时，机组并网发电；无风时，也可作抑制电网频率和电压波动的补偿装置。

双馈电机应用于风力发电中，可以解决风力机转速不可调、机组效率低等问题。同时，由于双馈电机对无功功率、有功功率均可调，对电网可起到稳压、稳频的作用，提高了发电质量。与同步机交一直一交系统相比，它还具有变频装置容量小（一般为发电机额定容量的 10%~20%左右）、重量轻的优点。但这种结构也还存在一些问题，如控制电路复杂一些，不同的控制方法效果有一定差异。另外该结构比其他结构更容易受到电网故障的影响。

目前国内有多家单位成功开发双馈电机控制系统，如国产的兆瓦级变速恒频双馈异步风力发电系统控制设备，采用全数字化矢量控制方法。兆瓦级变速恒频风电机组电控系统采用 IGBT 技术、双 PWM 双向可逆交流控制。

(4) 永磁直驱同步发电机。永磁直驱同步发电机组工作原理图如图 1-5 所示。

此种结构由变桨距风轮机直接驱动永磁同步发电机，省去了增速用齿轮箱。发电机输出先经整流器变为直流，再经 IGBT（绝缘栅双极晶体管）逆变器将电能送到电网。对风

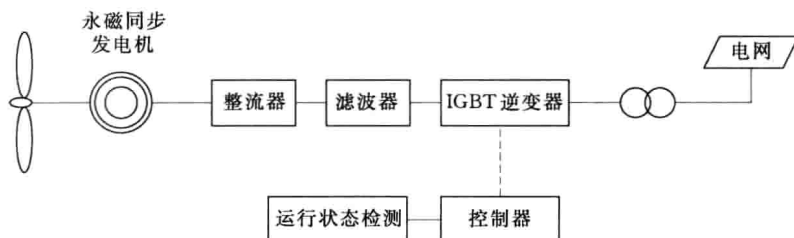


图 1-5 永磁直驱同步风力发电机组工作原理图

力发电机工作点的控制是通过控制逆变器送到电网的电流实现对直流环节电压的控制，从而控制风轮机的转速。发电机发出电能的频率、电压、电功率都是随着风速的变化而变化的，这样有利于最大限度地利用风能资源，而恒频恒压并网的任务则由整流逆变系统完成。永磁直驱同步发电机除了可以直接并网外，还可以构成风力发电机（群），例如国外引进的“Windformer”采用的是高压永磁直驱同步发电机（群），工作原理如图 1-6 所示。

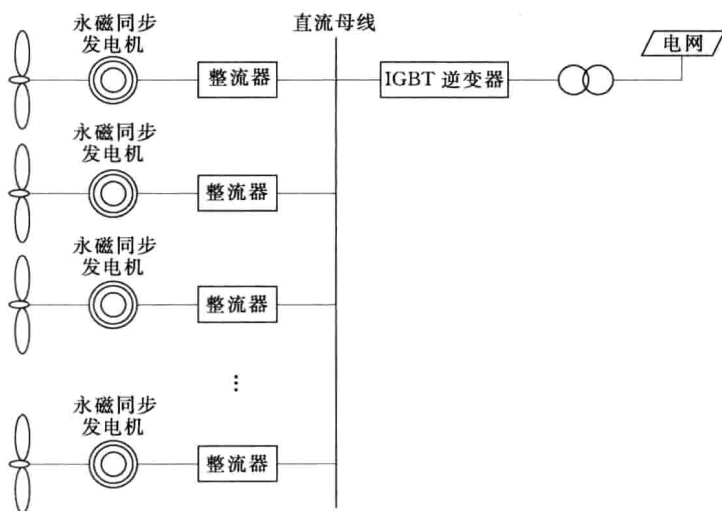


图 1-6 高压永磁直驱同步发电机（群）工作原理图

单机容量为 3~5MW，输出额定电压高达 20kV，频率为 5~10Hz，每一台发电机机端配置有整流器，把交流变换为直流，通过直流母线实现与风电场其他机组（群）的并联运行，既提高了可靠性，又改进了效率。风电场由一台大容量公用逆变器把直流母线的直流电转换成 50Hz 的交流电，电压为 12kV，可直接并入当地电网使用，也可经变压器升压至更高电压后并入更高电压电网传输到远处。

永磁直驱同步发电机系统存在的缺点是：对永磁材料的性能稳定性要求高，电机重量增加。另外，IGBT 逆变器的容量较大，一般要选发电机额定功率的 120% 以上。但使用 IGBT 逆变器也带来一些好处：

(1) 使用脉宽调制 (PWM) 获得正弦形转子电流，电机内不会产生低次谐波，改善了谐波性能。

(2) 有功功率和无功功率的控制更为方便。

(3) 大功率 IGBT 很容易驱动。



(4) IGBT 有很好的电流共享特性,这对于要达到风力发电机所需的功率水平,进行并联使用是非常必要的。

(5) 开关时间短,导通时间不到 1ms,关断时间小于 6ms,使得管子功耗小。

(6) 单管容量较大,如 FZ600R65KF1 等器件,可以在 6kV 电压下控制 1.2kA 电流, FZ3600R12KE3 等低电压器件,可以在 1.2kV 电压下开关 3.6kA 电流。

发电机控制系统除了控制发电机“获取最大能量”外,还要使发电机向电网提供高品质的电能。因此要求发电机控制系统做到:

- (1) 尽可能产生较低的谐波电流。
- (2) 能够控制功率因数。
- (3) 使发电机输出电压适应电网电压的变化。
- (4) 向电网提供稳定的功率。

目前国内外兆瓦级以上技术较先进的、有发展前景的风力发电机组主要是双馈型风力发电机组和永磁直驱风力发电机组,两者各有优缺点。单从控制系统本身来讲,永磁直驱风力发电机组控制回路少,控制简单,但要求逆变器容量大。而双馈型风力发电机组控制回路多,控制复杂些,但控制灵活,尤其是对有功、无功的控制,而且逆变器容量小得多。双馈型风力发电机组与永磁直驱风力发电机组的综合比较见表 1-2。

表 1-2 双馈型风力发电机组与永磁直驱风力发电机组性能的综合比较表

项目	双馈型风力发电机组	永磁直驱同步发电机组
电控系统价格	中	高
电控系统体积	中	大
电控系统维护成本	较高	低
电控系统平均效率	较高	高
变流单元	IGBT, 单管额定电流小, 技术难度大	IGBT, 单管额定电流大, 技术难度小
变流容量	仅需要全功率的 1/4	全功率逆变
变流系统稳定性	中	高
电网电压突然降低的影响	电机端电流迅速升高, 电机扭矩迅速增大	电流维持稳定, 扭矩保持不变
电机滑环	需每半年更换碳刷, 2 年更换滑环	无碳刷、滑环
电压变化率	电压变化率高时需要进行电压过滤	无高电压变化
电机电缆的电磁释放	有, 需要屏蔽线	无电磁释放
电机造价	低	高
电机尺寸	小	大
电机重量	轻	重
塔架内电缆工作电流类型	高频非正弦波, 具有较大谐波分量, 必须使用屏蔽电缆	正弦波
可承受瞬间电压范围	±10%	+10%, -85%
谐波畸变	难以控制, 因为要随着电机转速的变化进行变频	容易控制, 因为谐波频率稳定
50Hz/60Hz 之间的配置变化	变流滤波参数要调整, 齿轮箱要改变变比	变流滤波参数要调整