



弘深 科学技术文库

◆ 风力发电自主创新技术丛书

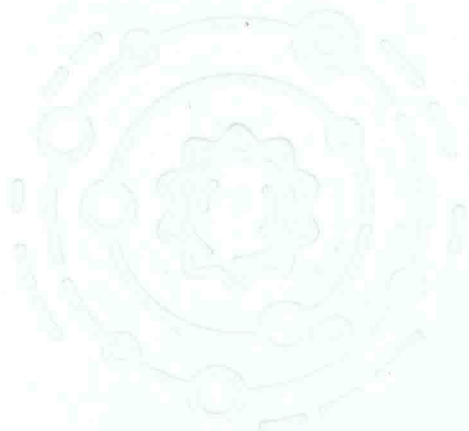
# 现代风电机组 桨距控制技术

MODERN WIND TURBINE PITCH CONTROL TECHNOLOGY

王维庆 崔双喜 庞云亭 张迪 著



重庆大学出版社



# 现代风电机组 桨距控制技术

王维庆 崔双喜 庞云亭 张迪 著

重庆大学出版社

## 内容提要

本书在空气动力学和控制理论的基础上,围绕现代风电机组桨距控制技术,系统介绍了风电机组及其载荷模型、变桨距风电机组桨距控制技术。全书内容涉及了直驱永磁风力发电机的关键控制技术,提出了优化桨距控制系统参数的具体方案,建立了完整的变桨控制动态特性,实现了三桨叶独立变桨距控制的调节,能在很大程度上降低单机载荷,提高机组发电量。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代风电机组桨距控制技术 / 王维庆等著. -- 重庆:  
重庆大学出版社, 2023. 1  
(风力发电自主创新技术丛书)  
ISBN 978-7-5689-2536-5

I. ①现… II. ①王… III. ①风力发电机—发电机组—  
控制系统 IV. ①TM315.03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 267807 号

## 现代风电机组桨距控制技术

XIANDAI FENGDIAN JIZU JIANGJU KONGZHI JISHU

王维庆 崔双喜 庞云亭 张迪 著

策划编辑:鲁黎

责任编辑:张红梅 版式设计:鲁黎

责任校对:邹忌 责任印制:张策

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

\*

开本:720mm×1020mm 1/16 印张:12 字数:251 千

2023 年 1 月第 1 版 2023 年 1 月第 1 次印刷

印数:1—1 000

ISBN 978-7-5689-2536-5 定价:88.00 元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换  
版权所有,请勿擅自翻印和用本书  
制作各类出版物及配套用书,违者必究



# 前 言

风电是当今开发速度最快的可再生能源之一,全球风电装机容量年增长率超过30%。2014年,中国、丹麦可再生能源发展项目发布的研究报告《中国可再生能源发展路线图2050》,预测了中国2020年、2030年、2050年可再生能源高比例发展情景。根据项目研究,在风电发展规划上,在基本情景下预计2030年4亿kW,2050年10亿kW;在积极情景下预计2020年风电装机3亿kW,2030年12亿kW,2050年20亿kW,风电成为中国的五大电源之一。中国风能资源丰富,潜力在30亿kW以上,在现有风电技术条件下,足够支撑20亿kW以上风电装机。

为推动这一重要领域的快速发展,本书围绕现代风电机组桨距控制技术,系统介绍了大型风电机组及其载荷模型、变桨距风电机组桨距控制技术。全书共9章,主要内容包括:

第1章为绪论,介绍了风电技术的研究意义、风电控制技术尤其是变桨距控制技术的研究现状及趋势,以及各章安排及主要内容。

第2章针对时变强耦合非线性大型风力发电系统,在风能特性分析的基础上建立了风速模型;从风力发电机组的各组成部分入手,建立了风力发电机组整体模型,并进行了模型的分析。

第3章针对大型风电机组在运行过程中所承受的载荷,阐述了载荷的来源、性质及分类,分析了大型风电机组产生空气动力载荷不平衡的原因,建立了叶片产生的空气动力载荷模型,并进行了分析。

第4章至第6章以建立的大型风电机组及载荷模型为基础,针对多变量、非线性、强耦合的风电系统,从变桨距控制技术展开,分别采用反馈线性化理论、数据驱动理论和自适应与反演控制设计相结合的方法,研究了大型风电机组的变桨距控制技术,并进行了仿真实验验证。

第7章针对大型风力机组,提出了变桨角度的变换算法,并在某大型风力机组上安装硬件设备,验证独立变桨算法在大型风机上的降载效果。

第8章至第9章通过研究变桨系统速度补偿方法和矢量控制算法提升变桨系统位置跟踪精准度,保证独立变桨降载应用。

本书由王维庆、崔双喜、庞云亭、张迪撰写。由于编者水平有限,错误及疏漏之处在所难免,敬请各位专家和广大读者批评指正。

著者

2020年2月

# 目 录

第1章 绪 论 .....	1
1.1 风电技术的研究意义 .....	1
1.1.1 能源现状概述 .....	1
1.1.2 发展风电的意义 .....	2
1.2 风电控制技术及发展趋势 .....	5
1.2.1 风电控制技术 .....	5
1.2.2 风电控制技术的发展趋势 .....	5
1.3 变桨距风电机组桨距控制技术的现状及发展趋势 .....	6
1.3.1 变桨距风电机组桨距控制技术的现状 .....	6
1.3.2 变桨距风电机组桨距控制技术的发展趋势 .....	14
1.4 各章安排及主要内容 .....	15
第2章 大型风电机组建模 .....	17
2.1 引 言 .....	17
2.2 风速模型 .....	18
2.2.1 平均风速模型 .....	20
2.2.2 湍流风速模型 .....	20
2.2.3 风剪切效应 .....	21
2.2.4 塔影效应 .....	22
2.2.5 风剪切和塔影效应共同影响下的风速模型 .....	23
2.2.6 风力发电机风速校正模型 .....	25

2.3	传动系统模型	26
2.4	空气动力学模型	29
2.5	风力发电机模型	30
2.5.1	直接耦合的鼠笼式感应发电机	31
2.5.2	控制定子的鼠笼式感应发电机	31
2.5.3	控制转子的双馈式感应发电机	32
2.6	桨距执行系统	32
2.7	风电机组整体模型	33
2.8	风电机组模型仿真分析	34
<b>第3章</b>	<b>风电机组气动载荷分析及建模</b>	<b>38</b>
3.1	引言	38
3.2	风电机组载荷分析及建模	38
3.2.1	风电机组载荷的分类	39
3.2.2	产生空气动力载荷不平衡的因素	40
3.2.3	风力发电机空气动力载荷建模	40
3.3	风力发电机气动载荷仿真分析	45
<b>第4章</b>	<b>变桨距风电机组统一桨距最优功率控制</b>	<b>53</b>
4.1	引言	53
4.2	反馈线性化基本原理	54
4.3	基于反馈线性化的统一桨距最优功率控制	55
4.3.1	风电机组仿射非线性系统状态方程	55
4.3.2	风力发电系统状态反馈精确线性化	56
4.3.3	非线性风电机组状态反馈最优控制律	58
4.3.4	非线性风电机组统一桨距最优功率跟踪控制策略	59
4.4	大型风电机组反馈线性化统一桨距最优功率控制仿真分析	59
<b>第5章</b>	<b>基于数据驱动的变桨距风电机组独立桨距控制</b>	<b>63</b>
5.1	引言	63

5.2	功率兼顾载荷平衡的独立变桨多目标控制	64
5.2.1	数据驱动控制简介	64
5.2.2	功率兼顾载荷平衡的独立变桨多目标控制	66
5.3	功率兼顾载荷平衡的独立变桨多目标控制仿真分析	69
<b>第6章</b>	<b>基于反演控制的变桨距风电机组独立桨距控制</b>	<b>73</b>
6.1	引 言	73
6.2	反演控制设计概述	74
6.2.1	反演控制简介	74
6.2.2	风电机组独立变桨鲁棒自适应反演控制设计的提出	75
6.3	风力发电机桨叶动力学建模	76
6.4	独立桨距角跟踪鲁棒自适应反演控制器设计及稳定性分析	78
6.5	独立桨距角跟踪鲁棒自适应反演控制仿真分析	81
<b>第7章</b>	<b>独立变桨算法大型风机降载应用</b>	<b>84</b>
7.1	引 言	84
7.2	载荷分析	84
7.3	分析工具介绍	85
7.4	算法简介	85
7.5	$d-q$ 变换介绍	87
7.6	LQG 控制器/PI 控制器	87
7.7	仿真结果说明	92
7.8	仿真结论	93
7.9	独立变桨系统物理器件介绍	93
7.10	独立变桨算法降低载荷	94
7.11	独立变桨对变桨执行机构的影响	95
<b>第8章</b>	<b>变桨系统补偿方法在独立变桨中的使用</b>	<b>98</b>
8.1	引 言	98
8.2	风力发电技术的发展	99

8.3	变桨技术的发展 .....	100
8.4	传统风力发电机控制研究 .....	101
8.4.1	传统风力发电机控制策略概述 .....	101
8.4.2	风力发电机模型建立 .....	101
8.4.3	风力发电机静态曲线分析 .....	105
8.4.4	转矩控制器的设计以及仿真验证 .....	108
8.4.5	变桨控制器的设计以及仿真验证 .....	113
8.4.6	结 论 .....	116
8.5	独立变桨控制研究 .....	116
8.5.1	独立变桨概述 .....	116
8.5.2	独立变桨风机模型建立 .....	117
8.5.3	风剪切和塔影效应对风力发电机气动模型输出的影响 .....	120
8.5.4	独立变桨控制策略研究 .....	124
8.5.5	总 结 .....	129
8.6	变桨系统设计和优化 .....	129
8.6.1	变桨系统分类和构成 .....	129
8.6.2	变桨系统上位机补偿 .....	130
8.6.3	变桨系统上位机补偿优化 .....	137
8.6.4	结 论 .....	139
<b>第9章</b>	<b>矢量控制算法研究 .....</b>	<b>140</b>
9.1	引 言 .....	140
9.2	永磁交流伺服系统控制理论的发展 .....	140
9.3	永磁交流伺服控制系统的发展趋势 .....	141
9.4	永磁同步电机的内部结构和种类 .....	142
9.5	永磁同步电机控制中的坐标系 .....	142
9.6	永磁同步电机控制中的数学模型 .....	144
9.6.1	三相定子坐标系( $A-B-C$ 坐标系)上的模型 .....	144
9.6.2	静止坐标系( $\alpha-\beta$ 坐标系)上的模型 .....	145
9.6.3	旋转坐标系( $d-q$ 坐标系)上的模型 .....	145

9.7 永磁同步电机控制系统 .....	146
9.7.1 永磁同步电机有传感器控制和无传感器控制 .....	146
9.7.2 矢量控制 .....	147
9.7.3 直接转矩控制 .....	149
9.8 永磁同步电机建模与仿真 .....	150
9.8.1 Matlab/Simulink 软件 .....	150
9.8.2 永磁同步电机的建模方法 .....	151
9.8.3 PI 控制模块的建模和仿真 .....	153
9.8.4 坐标变换模块的建模和仿真 .....	154
9.8.5 SVPWM 模块的建模和仿真 .....	155
9.8.6 电机与逆变器模块的建模和仿真 .....	164
9.9 总 结 .....	167
<b>附 录 .....</b>	<b>168</b>
附录 I 变速恒频变桨距风力发电机组主要参数 .....	168
附录 II 轴向诱导因子 $a$ 和周向诱导因子 $b$ 的迭代计算方法 .....	169
<b>参考文献 .....</b>	<b>170</b>



# 第1章 绪论

## 1.1 风电技术的研究意义

### 1.1.1 能源现状概述

当今,在世界经济复苏、全球气候变化及相关能源政策的影响下,世界能源结构正在发生巨大变化。未来几十年,世界将形成一个前所未有的能源体系,能源政策、创新技术和国际合作是全球能源发展的关键。

随着经济全球化的发展,能源资源已经全球配置。无论是对当下仍占主流的传统能源,还是对代表未来趋势的绿色能源,世界能源合作都将拥有无限广阔的前景。世界各国能源的产能升级和国际竞争力都在快速提升,积极参与全球能源治理、开展全方位能源国际合作、打造国际能源合作的利益共同体和命运共同体将是世界各国能源发展的新趋势。

能源短缺和环境恶化仍然是当今世界面临的两大课题,而能源更是备受关注,它是国民经济的基础和人类赖以生存的保障。如不尽快采取有效措施,切实转变依靠透支资源、环境的粗放发展方式,预计到2030年我国能源消费总量可能超过75亿tce。这将过快地消耗我国未来的资源,过早地耗尽大部分发展潜力,严重影响我国经济社会可持续发展。

随着世界经济的持续发展和工业规模的不断扩大,全球能源消耗呈现出如下几个特点:

①一次能源的消耗量不断增加,石油、煤炭等的消耗量居高不下。此类能源被大量开采,地球所蕴藏的不可再生能源逐渐枯竭。



图 1-1 2020 年我国各类能源发电装机容量占比

②能源消费格局渐趋优化,但发展中国家能源消费增长率较高。一次能源的消耗比率正趋于稳定;太阳能、风能等可再生能源比率正逐步增加。近些年,可再生能源对世界能源的贡献超过了 20%。发展中国家,尤其是中国的能源消耗量超过美国,成为世界第一大能源消耗国。在满足能源需求的情况下,节能减排和环境保护问题显得尤为突出,加快洁净能源的开发和利用,是一项重要的战略措施。

③太阳能、风能、生物质能等可再生能源的开发利用正逐步增加。加快开发可再生能源,对优化能源结构、填补能源缺口、实现可持续发展意义重大。

④能源发展呈现多元化和清洁化趋势。一次能源的大量消耗,对风能、太阳能等清洁可再生能源的迫切需求日益增强,出现了一次能源开采消耗与清洁能源开发利用并存的多元化能源格局。

石油、煤炭等一次不可再生能源逐年开采,最终将消耗殆尽。为此世界各国都在努力寻求和发展可再生清洁能源。风能作为可再生能源,在地球上的蕴藏量极其丰富,是一种安全、环保、洁净能源。相对于核电来说,风能更安全;相对于太阳能,大规模开发风能成本更低;相对于生物质能,风能开发技术更成熟。因此,风能越来越受世界各国的重视。我国地域经济存在差异,中部、西部地区虽然地广人稀,相对比较落后,但可利用的风力资源相当丰富。在当地发展分布式风电场,对提升工业基础、优化能源结构具有重要的意义,对国家能源战略规划也具有重大而深远的政治意义和经济意义。

### 1.1.2 发展风电的意义

风是没有公害的能源之一,而且取之不尽、用之不竭。对于缺水、缺燃料和交通不便的沿海岛屿、草原牧区、山区和高原地带,因地制宜地利用风力发电,非常适合,大有可为。

风电作为一种新型的可再生能源,由于具有资源丰富、洁净无污染、建设周期短、战

略意义重大、技术日趋成熟、发电成本逐渐降低等优势,在过去几十年间,在全球范围内得到了快速发展,风电装机总量迅速增长。2018年,北极星风力发电网讯:当前,风力发电已成为全球能源发电的重要来源,全球发电量达到600 GW以上。但新增发电量每年在每个地区的情况不尽相同,例如,与2017年相比,欧洲2018年的风力发电量减少了32%。全球十大风力发电国家的情况如下:

**中国:**装机容量221 GW。中国拥有世界三分之一以上的风电装机容量,中国甘肃拥有世界上最大的陆上风电场,装机容量达到7 965 MW,是世界第二大陆上风电场装机容量的5倍。

**美国:**装机容量96.4 GW,位居世界第二,在陆上风电方面尤为强劲。全球最大的10个陆上风电场中有6个位于美国,其中包括加利福尼亚的Alta风能中心——世界第二大陆上风电场,容量为1 548 MW;俄勒冈州Shepherd's Flat风电场(845 MW)和得克萨斯州Roscoe风电场(781.5 MW),仅得克萨斯州就产生了24.9 GW风电装机容量,是美国风力发电量的四分之一,提供的风力发电量超过美国其他25个州的总和。

**德国:**装机容量59.3 GW。德国的风电装机容量在欧洲最高,其最大的海上风电场是Gode Windfarms(第1阶段和第2阶段),总容量为582 MW。德国也是Nordsee One海上风电场的所在地,容量为382 MW,可为40万户家庭提供能源。根据Wind Europe的数据,欧洲在2018年安装了11.7 GW的风能,其中,德国占29%,总容量不到3.4 GW(陆上2.4 GW,海上风电不到1 GW)。

**印度:**装机容量35 GW。印度是亚洲风力发电量第二高的国家,也是除中国以外唯一一个挤入世界风电装机容量前十位的亚洲国家。印度拥有世界上第三和第四大陆上风电场,分别是印度南部泰米尔纳德邦的Muppandal风电场(1 500 MW)和印度北部拉贾斯坦邦的Jaisalmer风电场(1 064 MW)。

**西班牙:**装机容量23 GW。西班牙在风能开发方面表现强劲,占西班牙电力供应的18%。西班牙风电在世界上排名第五,尽管其陆上或海上风电场的容量都没有达到前20名。

**英国:**装机总容量略高于20.7 GW。英国在海上风电方面尤其值得注意,全球十大海上风电项目英国占6个。其中之一是位于英格兰西北部坎布里亚郡海岸的Walney项目。这是世界上最大的海上风电项目,Walney 1 & 2(367 MW)和Walney Extension(659 MW)总计1 026 MW。不过,在2020年Hornsea One海上风电装机容量全面投产后,取代了Walney海上风电场世界第一的地位。

**法国:**装机容量15.3 GW。按容量计算,法国在十大风能国家中名列第七。它目前正在远离核电,而核电此前已经满足了该国75%的能源需求,这将使其在2030年前将陆上风电容量增加两倍。

**巴西:**装机容量14.5 GW,是南美地区最大的风电国家,并且正在大幅扩大其产能。

最新数据显示,2019年2月风电量同比增长8.9%。风电在巴西的总能源结构中排名第四,占巴西总能量(162.5 GW)的8%左右。

加拿大:装机容量12.8 GW。2018年增加了566 MW的新装机容量,由299个风电场和6596个风力发电机组产生。

意大利:装机容量10.1 GW。2018年意大利风电装机容量首次突破10 GW。意大利的风能产业主要集中在南部及其岛屿上,例如,所有意大利能源公司ERG的陆上风电装置都位于罗马南部。

中国具有丰富的风能资源,风电发展前景广阔。已探明的风能储量达32.26亿kW,主要集中在西北、华北、东北(三北)地区,海上风能资源主要集中在东南沿海地区及附近岛屿。三北地区风能储量几乎占陆地储量的五分之四,且地域辽阔平坦、风速平稳,是建设风场的理想处所。同时,我国海岸线较长,海上风速高,发电利用率高;海水表面粗糙度低、海水湍流强度小,随高度增加,风速变化不明显,海上风电有利于机组减载运行,是我国风电发展的又一个方向。

2017年,中国风电新增装机容量1966万kW,累计装机容量达到1.88亿kW。2018年,全国(除港、澳、台地区外)新增装机容量2114.3万kW,同比增长7.5%,累计装机容量2.1亿kW,同比增长11.2%,保持稳定增长态势。

中投顾问产业研究中心预计,未来5年(2019—2023年)年均复合增长率约为9.02%,2023年将达到3.15亿kW,如图1-2所示。

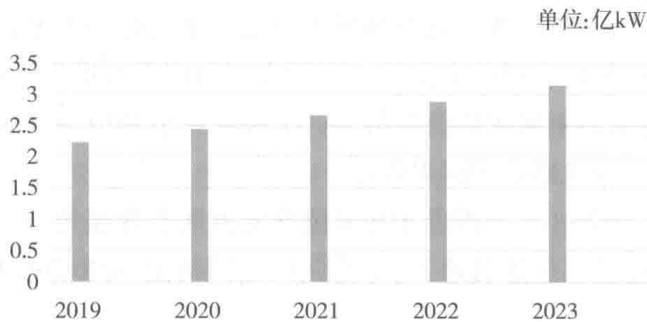


图 1-2 2019—2023 年中国风电装机容量预测

中国的风电发展经历了30多年的历程,自2003年风电场建设进入规模化及国产化以来,自主研发能力逐渐提高,风电制造技术渐趋成熟。但尚需处理好诸多矛盾与问题,比如,自主创新与国际合作;应用研究与基础研究;标准规范和因地制宜;风电机组并网与脱网;风电、其他电源与电网规划的综合协调;高效安全运行与先进控制策略;等等。风电技术的创新源于理论的发展,理论的发展会进一步促进技术的创新,风力发电系统尚有很多有待研究和深入探讨的理论问题。因此,深入研究风力发电机组的各项关键技术与理论问题,对促进风电产业的健康快速发展、合理有效开发风能资源和实现风力发电机组真正走自主国产化道路意义深远。

## 1.2 风电控制技术及发展趋势

### 1.2.1 风电控制技术

风电控制技术是风电机组安全、稳定、高效运行的关键,主要因为:

①风速大小和方向的变化,大气压、湿度和气温等的变化以及风电场所处地形、地貌等的不同,造成风力发电机捕获的风能随机而不可控。

②为增大捕获风能的利用率,MW级风力发电机的叶片直径通常都很大,可达100 m以上,这样风轮就具有较大的转动惯量,可能造成机组不平衡载荷而减少机组的运行寿命。

③风电机组的并网、脱网、功率的优化及限制、风轮的主动对风和运行过程中的故障检测及保护都离不开安全可靠的控制技术。

④风资源丰富的地区大都环境条件较为恶劣,如人迹罕至的海岛和边远地区,故希望风电场能够实现无人值守和远程监控,这就更需要风电机组控制技术。

因此,国内外众多学者致力于研究风力发电的控制技术和控制系统,风电机组控制的研究对风电机组安全稳定的运行有着极其重要的意义。

风电机组控制技术主要包括:风力发电机变桨距控制、风力发电机偏航控制、风力发电机控制、机组载荷控制、并离网控制等以及对它们采取的控制策略。

### 1.2.2 风电控制技术的发展趋势

计算机技术和现代控制技术在风电领域的应用,使并网风力发电控制技术得到了较快发展,控制方式从单一的定桨距失速控制向变桨距和变速恒频控制方向发展,甚至向智能控制方向发展。

风电现代控制技术主要包括变结构控制、鲁棒控制、自适应控制、智能控制等。风力发电系统中,变结构控制因具有快速响应、对系统参数变化不敏感、设计简单和易于实现等优点而在风电系统中得到广泛的应用。在处理一些多变量问题时,鲁棒控制技术可以发挥很好的作用,建模有误差、参数不准确和干扰位置系统的控制问题,在强稳定性的鲁棒控制中可得到直接解决。而智能控制技术最突出的方法是模糊控制,它无须过度依赖数学模型,只需凭借专家经验就能克服一些非线性因素带来的影响。由于风力发电机的精确数学模型难以建立,模糊控制非常适合风力发电机组的控制,因此模糊控制越来越受风电研究人员的重视。人工神经网络是以工程技术手段来模拟人脑神

经元网络的结构与特征的系统。利用神经元可以构成各种不同的拓扑结构的神经网络,它是生物神经网络的一种模拟和近似。利用神经网络的学习特性,可用于风力发电机的低风速的桨距控制。另外,仿生智能控制也是近年来备受关注的控制技术之一,其自适应、在线优化、非线性逼近等优良特性使其在风电机组的控制和监测领域得到应用和发展。

## 1.3 变桨距风电机组桨距控制技术的研究现状及发展趋势

### 1.3.1 变桨距风电机组桨距控制技术的研究现状

随着全球风电装机容量的增加,风电技术得到了快速发展。风力发电机组朝着大型化、变速运行、变桨距调节等技术方向发展,具有单机 MW 级容量的大型变速变桨距风力发电机已成为当今风电市场的主流机型。对于大型风力发电系统来说,关键部分是叶轮和控制系统。叶轮是风电机组直接获取风能的前端部分,要求运行过程中应具有一定的耐疲劳机械强度和寿命,控制系统是保证机组正常运行的核心,而控制技术是风电机组的关键技术之一,控制性能的好坏将直接影响机组的安全、效率及寿命。

风力发电机组变桨距控制有统一变桨距和独立变桨距两种。风力发电机使用统一变桨距的前提是风轮整个扫掠面上的风速是均匀的。然而随着风机单机容量的增加,风轮叶片尺寸及塔架高度不断增大。由于风湍流、风切变、塔影效应等对风轮扫掠面风速的影响,风力发电机 3 个叶片所受风速很不均匀。风轮不均匀的风速,使叶片、传动轴以及风力发电机结构部件之间承受的载荷分布不均,导致风轮转矩波动和桨叶承受不平衡载荷,从而产生桨叶拍打和塔架振动。这些不均匀的载荷会加速风力发电机结构部件的磨损,减少机组的耐疲劳寿命,降低发电效率,使得风力发电机组维修维护频次增多,电能质量恶化。独立变桨距调节风机的出现,为削弱和平衡气动不平衡载荷,有效地减小机组承受的动态载荷、风电机组塔架振动和风轮转矩的波动,提供了便利条件。

独立变桨距是在统一变桨距的基础上发展起来的,它按照每个桨叶所处的位置和风速的大小,利用桨叶各自独立的变桨距执行机构,对每个桨叶分别进行独立调节,以达到在额定风速及以上时,不仅稳定发电机的输出功率,而且削弱桨叶所受不平衡载荷的目的,从而有效抑制桨叶拍打和塔架振动,甚至在一个变桨执行机构出现故障时,通过自适应容错变桨技术,使另外两个桨叶通过自身桨距角的调节来完成控制目的,从而维持控制系统在故障情况下的稳定性,使风机具有一定的安全运行能力。由此可见,独

立变桨距控制技术的研究既有其理论意义,又有其工程实际意义。

独立变桨距技术的关键在于桨距角控制策略,国内在大型风电机组独立变桨距控制研究方面,考虑风机动态不平衡载荷影响的独立变桨距研究起步较晚,经验相对不足,缺乏强有力的理论指导与实践经验,又存在竞争、技术和知识产权保护问题,与其他风电强国相比存在一定差距。由于在桨距控制策略和机组载荷的相互关系方面缺乏足够的重视和较深入的研究,国内一些风电机组在运行过程中出现过很多事故和故障,比如机组叶片裂纹及断裂、传动系统断轴、齿轮箱齿圈开裂等。机组变桨距控制策略对机组所受的动态载荷、机组的结构强度和耐疲劳寿命以及电能质量等方面有很大的影响。在国内外不可再生一次能源紧缺和大力发展可再生洁净能源的背景下,本书对大型风力发电机独立变桨距控制中的一些关键技术问题进行研究,为大型风机独立变桨距控制提供理论指导和奠定实践基础。

变桨距是借助控制技术和动力系统,改变风电机组安装在轮毂上的叶片的桨距角,从而改变桨叶的气动特性,限制额定风速及以上时风力发电机吸收的风能,改善桨叶和整个风力发电机的受力状况。变桨距控制多用于大型风力发电机组主流机型。大型变速风力发电机组运行在额定风速及以上时,由于受机组机械强度和电气设备额定值的限制,为使机组能够安全稳定运行,必须设法控制风能吸收。变桨距控制可划分为被动变桨距控制和主动变桨距控制。被动变桨距控制的思想是将叶片或叶片的轮毂设计成在叶片载荷的作用下扭转,以便获得需要的桨距角。这种被动变桨距控制实现起来很难,因为随风速变化,叶片扭转量一般情况下与其载荷变化匹配存在难度,在并网运行的风电机组中,这种被动变桨距还处在概念阶段。主动变桨距的实现是通过一定的变桨距控制策略,将每个叶片的部分或全部相对于叶片轴旋转,以改变桨叶桨距角,从而限制额定风速及以上时的功率吸收。若采用独立变桨控制,还可优化风电机组所受载荷,这是研究变桨距控制的主要目的所在。

目前,对于变桨距技术的研究主要集中在变桨控制策略和变桨执行机构的实现上。大型风力发电机组变桨距执行机构主要有以下两种。

### 1) 桨叶由电机驱动的电动变桨距执行机构

这种变桨距执行机构结构简单,产生的扭矩大,不存在液压变桨距的漏油现象。电动变桨距系统每个叶片单独装设电动变桨距机构,能够对每个桨叶实现独立控制,控制精度高,响应快,这对大容量风电机组实现载荷优化是十分重要的,因此越来越受重视并得到广泛应用。全球风电机组实力供应商多采用电动变桨距机构,比如,GE WindPower 的 3.6 MW 风电机组、Repower 公司的 5 MW 风电机组、Siemens 公司的 3.6 MW 风电机组等。

### 2) 桨叶由液压缸驱动的液压变桨距执行机构

这种变桨距执行机构以液压缸为原动机,通过偏心块推动桨叶旋转,具有扭矩大、