

国家“863”课题资助

GUOJIA“863”KETI ZIZHU

The Dispatching Technology
of Large-scale Wind Power

大规模风电 调度技术

王芝茗 主 编

李 强 罗卫华 文劲宇 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

The Dispatching Technology
of Large-scale Wind Power

大规模风电 调度技术

王芝茗 主 编

李 强 罗卫华 文劲宇 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书基于国家“863”重点项目“储能系统提高间歇式电源接入能力关键技术研究”与开发”和国家电网科技项目“大规模风电协调控制系统”项目的部分研究成果编写而成。

全书共分为6章,分别是概述、风电功率预测、含大规模风电的发电计划和安全校核、含大规模风电的自动发电控制、含大规模风电的自动电压控制技术、应用案例。

本书既可供电力系统相关从业人员以及设备制造单位相关专业的技术人员、管理人员使用,也可供大专院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

大规模风电调度技术 / 王芝茗主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.1

ISBN 978-7-5123-8110-0

I. ①大… II. ①王… III. ①风力发电-调度 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 173886 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 1 月第一版 2016 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.5 印张 219 千字

印数 0001—1500 册 定价 45.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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

《大规模风电调度技术》

编写人员

主 编 王芝茗

副主编 李 强 罗卫华 文劲宇

参 编 蔡 帜 卓峻峰 于 汀 卢 静

戴 赛 丁 强 邱金辉 施毅斌

李军徽 韩杏宁 黄 杨 严干贵

周京阳 尚学伟 赵 林 王爱华

曲祖义 高 凯 赵永生 张宏宇

句荣滨 刘颖明

21 世纪以来,世界性的能源危机和环境问题日益显现,开发利用可再生能源成为各国关注的焦点。降低对化石能源供应的依赖程度,提高可再生能源在能源供应中的比重,从而实现能源消费总量的结构优化,是我国发展低碳能源、应对气候变化的必由之路。以风能、太阳能为主的可再生能源及储能系统近年来发展十分迅速,相比太阳能等新能源,风电是目前我国可再生能源技术中最为成熟、最具规模化开发条件的新能源。但其特有的功率特性给电网的调度运行带来了愈加显著的影响,除具有间歇性和随机性特点外,我国大部分地区风电出力呈春冬高夏秋低的年度特性和夜间高白天低的反调峰特性,因此,给传统的电网调度带来很多新的不确定因素。如何在电力系统调度运行领域考虑风电及储能系统的功率特性,建立系统的多源优化调度运行机制是需要深入研究的问题,这对提高电力系统风电接纳能力及安全稳定运行水平,促进风电及储能系统广泛、深入发展具有重要意义。

尽管最近对含风电的电网调度、储能调度技术等有不少研究报道,但是国内外在实际工程应用中尚不多见,大规模风电接入下的多源协调调度的技术体系尚未成熟,国际上风电参与电网调度方面也仍处于探索阶段,因此,这些方面的研究正成为国内外电力行业的热点内容,各国也纷纷开展相关方面的科研项目和工程项目。本书正是可再生能源调度研究方面多年来取得的研究成果的总结,并且是国家“863”重点项目“储能系统提高间歇式电源接入能力关键技术研究与开发”和国家电网科技项目“大规模风电协调控制系统”项目的部分研究成果的体现。本书不但介绍了含大规模风电的电网调度技术理论,同时还与已经实施的工程项目相结合,更加有借鉴意义。

本书共分为 6 章,分别是概述、风电功率预测、含大规模风电的发电计划和安全校核、含大规模风电的自动发电控制、含大规模风电的自动电压控制技术、应用案例。本书收编了课题的最新研究成果和工程分析实例,供读者学习参考。

本书主编为王芝茗,各章编写人员分别为第 1 章王芝茗、蔡帜、卢静;第 2 章卢静、李强;第 3 章蔡帜、文劲宇;第 4 章卓峻峰、罗卫华、邱金辉、施毅斌;第 5 章于汀、

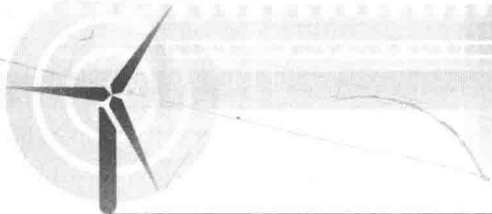
戴赛、丁强；第6章李军徽、韩杏宁、黄杨、严干贵、周京阳、尚学伟、赵林、王爱华、曲祖义、高凯、赵永生、张宏宇、句荣滨、刘颖明。

刘斌、门德月、李伟刚等人为本书的编写工作提供了相关材料，同时在书中列出了相应的参考文献，在此表示衷心感谢。

限于作者的水平和实践经验，书中难免有不足或疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2015年10月



目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 风电发展现状	1
1.2 风电场分类控制类型与方法	3
1.3 含大规模风电的电网调度技术	4
参考文献	6
第2章 风电功率预测	7
2.1 风电功率预测方法	7
2.2 风电功率预测原理	8
2.3 短期风电功率预测	17
2.4 超短期风电功率预测	25
参考文献	27
第3章 含大规模风电的发电计划和安全校核	28
3.1 概述	28
3.2 发电计划基本模型	29
3.3 发电计划建模	38
3.4 多时间尺度发电计划	42
3.5 储能系统计划	45
3.6 风火储联合发电计划实例	47
3.7 安全校核	49
参考文献	51
第4章 含大规模风电的自动发电控制	52
4.1 概述	52
4.2 自动发电控制	52
4.3 含大规模风电的自动发电控制策略与模式	68
参考文献	74

第 5 章 含大规模风电的自动电压控制技术	75
5.1 概述	75
5.2 风电无功电压特性	80
5.3 风电场无功电压控制	87
5.4 调度主站自动电压控制技术	95
参考文献	115
第 6 章 应用案例	116
6.1 系统设计	116
6.2 工程建设	121
参考文献	142

概 述

1.1 风电发展现状

可再生能源在保护生态环境、保证能源安全和解决偏远地区居民用电问题等方面具有重要的作用,越来越受到世界各国的重视并得到了广泛的开发和利用。而风力发电是目前最成熟、最具规模开发和商业化发展前景的可再生能源发电方式之一。

人类最早利用风力发电始于 19 世纪末,大规模发展则是从 20 世纪 70 年代世界石油危机开始。世界上很多国家尤其是发达国家认识到风电在调整能源结构、缓解环境污染方面的重要性,对风电的开发给予了高度重视及政策激励。美国、西欧等国家投入了大量经费,综合了空气动力学、结构力学和材料力学等诸多领域的新技术研制了现代风力发电机组,开创了风能利用的新时代。截止到 2013 年底,全球风电累计装机达到 31 8137MW,2013 年全球风电新增装机 35 467MW。其中,非洲和中东地区风电新增装机 90MW,亚洲风电新增装机 18 228MW,欧洲风电新增装机 12 031MW,拉丁美洲和加勒比地区风电新增装机 1158MW,北美地区风电新增装机 3306MW,太平洋地区风电新增装机 655MW。图 1-1 为 1996~2013 年全球风电每年新增装机容量。

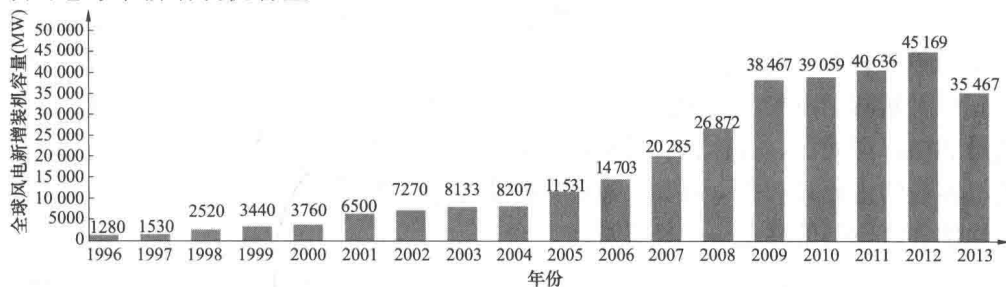


图 1-1 1996~2013 年全球风电每年新增装机容量

截至 2013 年底,全球风电累计装机容量排名前五位的国家依次为中国、美国、德国、西班牙、印度,2013 年全球风电新增装机容量排名前五位的国家分别是中国、德国、英国、印度、加拿大。2013 年全球风电累计及新增规模排名前十的国家装机情况见表 1-1。

表 1-1 2013 年全球风电累计及新增规模排名前十的国家装机情况

排名	2013 年新增装机		2013 年累计装机	
	国家	容量 (万 kW)	国家	容量 (万 kW)
1	中国	1610	中国	9142

续表

排名	2013 年新增装机		2013 年累计装机	
	国家	容量 (万 kW)	国家	容量 (万 kW)
2	德国	324	美国	6109
3	英国	188	德国	3425
4	印度	173	西班牙	2296
5	加拿大	160	印度	2015
6	美国	108	英国	1053
7	巴西	95	意大利	855
8	波兰	89	法国	825
9	瑞典	72	加拿大	780
10	罗马尼亚	70	丹麦	477

注 中国的数据统计口径为中国风能协会的风机出厂口径。

自 1986 年在山东荣成建立了我国第一座并网型风力发电场，中国的风力发电开始逐步发展。从 2004 年开始，我国的风电进入了快速发展期。2005 年 2 月，我国颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，并于 2006 年 1 月 1 日正式实施，制定了可再生能源发电优先上网、全额收购、价格优惠及社会公摊的政策。2007 年 9 月，国家发展和改革委员会发布了《可再生能源中长期发展规划》，提出到 2020 年使可再生能源消费量达到能源消费总量 15% 的发展目标。我国积极推进风力发电利用技术，将建设若干个百万千瓦级风电基地，以规模化带动产业化。积极落实可再生能源发展的扶持和配套政策，培育持续稳定增长的可再生能源市场，逐步建立和完善可再生能源产业体系和市场及服务体系，促进可再生能源技术进步和产业发展。

截至 2013 年底，我国已有 13 个省级电网中风电装机容量超过百万千瓦，风电已在 13 个省级电网中成为第二大装机电源。风电装机容量超过 500 万 kW 的有蒙西、蒙东、冀北、甘肃、辽宁、新疆、山东 7 个地区，其中，蒙西、蒙东、冀北、甘肃、辽宁 5 地区装机容量占比超过 20%，黑龙江、吉林、宁夏装机容量占比接近 20%。而我国风电装机容量占全国总发电装机容量的占比只有 5%~6%，年度发电量占比约为 2.6%。风电装机容量在全国比例不高、而局部省区比例偏高是一个显著特点。

我国风力发电的发展呈现以下特点：① 总装机容量快速增长，风电在电网中所占比重不断增加；在风能资源较丰富地区，风电在电网中所占比例可达到很高的水平，某些地区电网中风电的装机容量甚至超过当地的负荷水平。② 单个风电场装机容量不断增加。③ 风电场接入电网的电压等级更高，我国大多数大容量风电场都通过升压后接入 110kV 以上等级电网。④ 风电机组的种类不断增多，风电机组单机容量不断增大。

伴随着一系列促进支持新能源发展政策的出台，我国新能源产业快速发展，逐步缩小了与世界先进水平的差距。目前，我国已建立起了涵盖新能源发电接入、调度运行、并网检测等关键环节的技术标准体系，有效解决了风电等新能源建设不规范、并网没有标准等问题；新能源发电装备技术性能不断增强，脱网事故大幅减少，有力推动和保障了我国新能源发电装备行业的健康快速发展。与此同时，我国涌现出了一批具有国际先进水平的新能源装备制

造企业，在政府主管部门支持和引导下，先后成立了多个新能源研发中心及重点实验室，依托国内科研机构和骨干企业开展基础研究，涵盖新能源发电工程、装备技术、并网运行仿真、调度控制及检测认证等相关技术环节，新能源科技研发体系日趋完善。以新能源场站级监控技术、风电功率预测技术、风电调度控制技术为代表的一系列新能源科技研发成果得到快速推广应用，实现了新能源发电的可观测、可预测、可控制和可调度，促进了新能源设备制造技术的不断升级，带动了我国新能源的创新发展。

如果把风电功率看作负的负荷，其与负荷的波动曲线叠加在一起可以构成等值负荷波动曲线。某典型日的等效负荷曲线如图 1-2 所示。如果负荷波动趋势和风电功率波动趋势一致，则等效负荷曲线变得平滑，对电力系统的运行有利；反之，如果负荷波动趋势和风电功率波动趋势相反，则等效负荷曲线波动幅度更大，相当于等效负荷峰谷差加大，对电力系统的运行不利。大规模风电的接入会影响到系统的运行方式，因此，研究含大规模风电的电网调度技术有十分重要的意义。

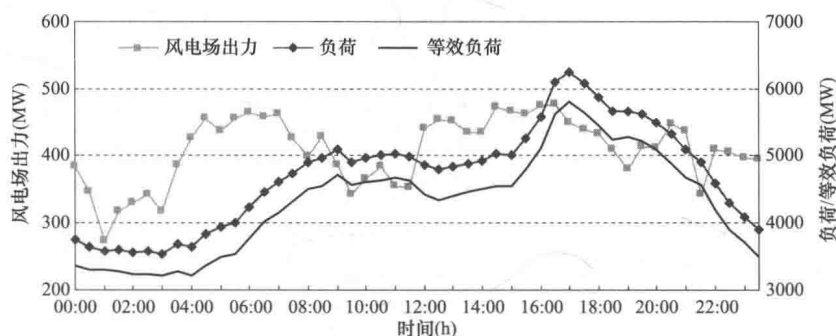


图 1-2 某典型日的等效负荷曲线

电力系统是一个复杂的动态稳定系统，维持发电、输电、用电之间的功率平衡是电网的责任。一般来讲，无功功率的平衡与系统电压紧密相关，有功功率的平衡和系统频率紧密相关。风速波动会导致风电场输出功率波动，引起系统有功功率和无功功率的变化。对于电网调度侧来说，提高风功率预测精度和有功功率、无功功率控制水平，是解决风电大规模并网后电力系统安全稳定运行的关键技术，也是本书的重点内容。

1.2 风电场分类控制类型与方法

风电属于分布式能源，各个风电场的硬件设备及现代化程度有所差异，所处的运行状态及运行方式也有所不同，因此需要在风电的自动发电控制（Automatic Generation Control, AGC）过程中对风电场进行分类处理，如图 1-3 所示。

要实现大规模风电的 AGC，首先需要解决风电是否可控的问题，目前国内的风电场从控制方式上大致可以分为两类情况：

（1）风电场不可控。这类风电场通常规模较小，并网时间较早，设备老旧，对电网运行的影响也很小，不参与 AGC，本书不做讨论。

（2）风电场可控。根据控制方式分为两种情况：① 比较粗糙的控制方式，仅在必要时

设定一个控制上限，在该限值以下风电功率的波动则不受控制，这种控制方式属于低水平的控制。② 采用精细化的控制方式，风力充足时，要求风电场有功出力准确跟踪 AGC 指令；风力不足时，AGC 实时探测风电场的发电能力，并根据风电场的发电能力及时调整 AGC 控制策略。

本书主要讨论精细化的控制方式，具备 AGC 功能的风电场可以根据是否投入 AGC 状态、有无计划值、有无预测值、有无基点、是否受到断面约束等条件分为图 1-3 中的几类。

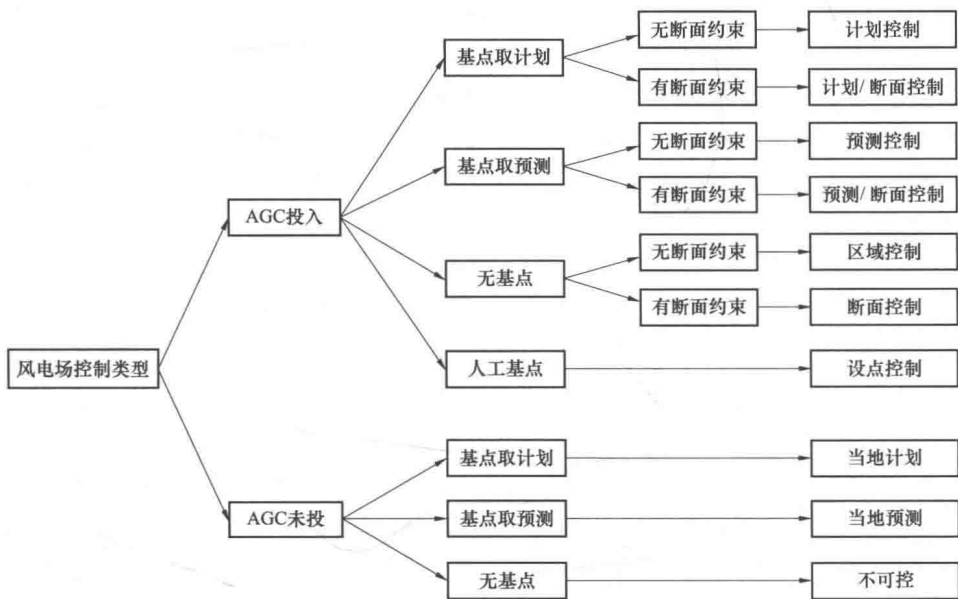


图 1-3 风电场控制类型

对于投入 AGC 状态的风电场，其基点可以是计划值、预测值、人工设定值、当前出力（即无基点模式）等。在每种基点模式下，又同时需要考虑是否受到输电断面的约束。

对于未投入 AGC 状态的风电场，其运行方式可以按照计划曲线发电、按照预测值发电、自由发电等。

1.3 含大规模风电的电网调度技术

我国制定了关于风电等新能源接入电网的一系列相关技术标准，各个风电场为满足并网的考核要求，对自身进行运行监控，而电网未将其纳入调度控制体系。但是，随着风电场的快速发展和大规模接入，其对电网的影响进一步加深，提高其可控性、增强电网协调运行能力和安全稳定运行水平成为亟待解决的问题，自主研发适合我国大规模风电并网的复杂电网优化调度控制系统已成必然趋势。风电机组/风电场/集群式风电场的出力特性是进行风电场集群控制理论研究与实践应用的基础。目前风电单机出力模型仍以风功率曲线形式为主，该模型没有考虑不同时空尺度下，由风资源的随机波动和机组惯性等原因造成的风机出力分布特性。全场等值模型和集群等值模型对这种随机性的影响具有一定削弱作用，但在一些极端条件（如气象极端条件）下，误差仍可能很大，无法完全满足综合分析的需求。

近年来,以蓄电池、飞轮、压缩空气和抽水蓄能等为代表的电能大规模存储技术高速发展。研究和实践表明,大规模储能技术的引入,不仅可以有效改善间歇式电源的接入性能,而且还能提高电网对于间歇式电源的兼容性:一方面,利用储能电站在发电侧与间歇式电源配合,利用其快速四象限功率调节的能力,可以实现平抑间歇式电源的发电出力波动,改善发电出力品质,提高间歇式电源的可调度能力;另一方面,在电网侧选择合适的地点建设储能电站,可以有效减少系统的旋转备用,丰富调频调峰以及应急备用的手段,提高电网接纳间歇式电源的能力。

各国根据其电源结构和网架结构的不同特点,应对间歇式电源接入的研究思路也不同。欧洲电网结构趋于稳定,负荷需求增长缓慢,主要是利用间歇式电源替代常规电源以降低排放,间歇式电源单场容量较小,除近期集中开发的大规模海上风电场采用高电压远距离输送外,其间歇式电源以小规模分散接入电网为主,注重提高间歇式电源的预测精度,通过电网调度和电源负荷波动互补实现就地消纳。以德国为例,目前德国绝大多数风电场装机容量小于 50MW,就地分散接入 110kV 以下配电网的规模约占总量的 70%。也有少数地方采用小容量储能系统,比如丹麦修建了 400kW 的储能电站用于风电功率调节。

与欧洲不同,美国注重利用广域分布的储能系统,通过全网可调度电源和负荷协调控制以达到提高电网接纳间歇式电源能力的目的。美国波利维尔电力公司(Bonneville Power Administration, BPA)和加州独立系统运营商(Independent System Operator, ISO)联合开展了广域储能电站能量管理系统的研究与开发,根据不同类型储能技术的性能指标,如容量、寿命和响应速度等,选择了飞轮、抽水蓄能和蓄电池三种不同类型的储能系统进行广域配合和电源结构优化。美国能源部(Department of Energy, DOE)与美国电力科学研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)针对多类型清洁能源的互补集成与整体控制技术部署了多项重点研究项目及示范工程。

日本新能源产业的技术综合开发机构(The New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)近年来注重风储的集成技术研究以提高间歇式电源的接入能力,并实施了多项大型风储联合发电示范工程。储能与间歇式电源联合运行的模式主要包括两种,以风电场的运行为例,按照并网要求分为限制并网功率变化运行模式和并网功率恒定运行模式。前者要求限制风电场出力的波动幅度,比如在任意 20min 内出力变化不得超过 10%;后者要求风电场按照调度指令发电,并规定出力围绕调度指令波动的限幅,比如风电场出力在任意 1min 内并网功率偏离调度指令不得超过 2%。日本 NGK 公司和住友公司分别建造了 34MW/245MWh 和 4MW/6MWh 的钠硫电池和全钒液流电池储能系统,安装于风场接入点,并建立了结合风功率预测、电池充电状态(State of Charge, SOC)监测和风储协调控制等功能的数据采集和监控(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)系统,主要目的是提高风电接入电网的品质。

我国风电具有大规模集中接入远距离输送的特点,功率波动对电网运行与控制的影响更加显著,包括电网调频调峰、系统稳定以及电能质量等。常规电源以火电和水电为主,由于降低排放的要求,中小容量火电机组已基本全部关停,电网调频调峰的能力降低,进一步限制了风电接入容量。

风功率预测技术、多种能源协调发电计划、含大规模风电的电网有功、无功电压协调优

化控制策略及系统示范工程实现是目前亟待解决的问题。国内已有一些初步的研究,如基于不同目标的各类风电机组的控制策略,风电场的有功功率控制策略、无功电压控制策略,改善地区电压稳定性的风电场控制策略等。从集群式风电场控制曲线优化技术、集群式风电场有功/无功协调优化控制技术、含风电场的安全在线分析着手,提高电网消纳新能源的能力,最终形成风电场集群协调优化控制技术,对保证大规模风电接入的复杂电网安全运行和风资源的安全高效利用具有重大意义。

针对我国大规模风电并网接入的现状,如何提高风功率预测精度、制定多源协调发电计划、主动进行风电场的有功控制和无功控制成为了各电网公司和风电场十分关心的课题。针对风速的随机性和间歇性对电力系统调度与控制带来的困难,本书主要介绍了风电功率预测技术、含大规模风电的发电计划、含大规模风电的自动发电控制技术和含大规模风电的自动电压控制技术等方面内容。

参 考 文 献

- [1] 王承煦,张源. 风力发电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 《全球风能理事会 2013 年风电发展年报》. [http: //www.gwec.net/](http://www.gwec.net/).
- [3] 范高峰,赵海翔,戴慧珠. 大规模风电对电力系统的影响和应对策略 [C]. 2007 年中国电机工程年会, 东莞.

风电功率预测

2.1 风电功率预测方法

按照不同的标准，可以对风电功率预测方法进行分类，如图 2-1 所示。

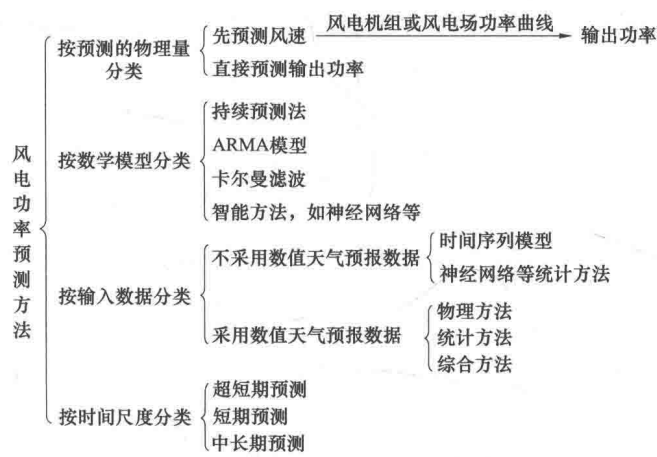


图 2-1 风电功率预测方法分类

根据预测的物理量可以分为两类，第一类为对风速的预测，然后根据风电机组或风电场的功率曲线得到风电场的功率输出；第二类为直接预测风电场的输出功率。

根据所采用的数学模型不同可分为持续预测法、ARMA 模型、卡尔曼滤波法和智能方法等。采用持续预测法建立的数学模型是最简单的预测模型，这种方法认为风速预测值等于最近几个风速值的滑动平均值，通常认为最近一点的风速值为下一点的风速预测值。该模型的预测误差较大，且预测结果不稳定。改进的方法有 ARMA 模型法、卡尔曼滤波法或时间序列法和卡尔曼滤波法相结合。另外还有一些智能方法，如人工神经网络等。

根据预测系统输入数据也可以分为两类，一类不采用数值天气预报的数据，一类采用数值天气预报的数据。

根据预测的时间尺度可分为超短期预测、短期预测和中长期预测。所谓的超短期并没有一致的标准，一般可认为不超过 4h 的预测为超短期预测。而对于时间更短的数分钟内的预测，主要用于风力发电控制、电能质量评估及风轮机机械部件的设计等，这种分钟级的预测一般不采用数值天气预报数据。短期预测一般可认为是 1~72h 的预测，主要用于电力系统的功率平衡和经济调度、电力市场交易、暂态稳定评估等。对于更长时间尺度的预测，主要

用于系统检修安排等。目前,中长期预测还存在比较大的困难。

从建模的观点来看,不同时间尺度是有本质区别的,对于 0~4h 的预测,因为其变化主要由大气条件的持续性决定,因此不采用数值天气预报数据也可以得到较好的预测结果,如果采用数值天气预报数据,可以得到更好的预测结果。对于时间尺度超过 4h 的预测,不采用数值天气预报数据无法反映大气运动的本质,也难以得到较好的预测结果,所以现在研究的风电场输出功率预测都把数值天气预报数据作为一组重要的输入数据。

考虑了地形、粗糙度等信息采用物理方程进行预测的方法称为物理方法。根据历史数据进行统计分析,找出其内在规律并用于预测的方法称为统计方法。如果物理方法和统计方法都采用则称之为综合方法。

(1) 物理方法。风电功率预测的物理方法根据数值天气预报系统的预测结果得到风速、风向、气压、气温等天气数据。根据风电场周围等高线、粗糙度、障碍物、温度分层等信息,采用微观气象学理论或计算流体力学(CFD)的方法,计算得到风电机组轮毂高度的风速、风向、气温、气压等信息。然后根据风电场的功率曲线计算得到风电场的输出功率。

(2) 统计方法。统计方法不考虑风速变化的物理过程,而是根据历史统计数据找出天气状况与风电场出力的关系,然后根据实测数据和数值天气预报数据对风电场输出功率进行预测。常用的预测方法有时间序列法、BP 神经网络方法(BP Neural Network)、径向基函数神经网络(RBF Neural Networks)和支持向量机(Support Vector Machines, SVM)等。其中,因为人工神经网络具有分布并行处理、非线性映射、自适应学习、鲁棒容错和泛化能力等特性,成为了功率预测中应用最广泛的统计方法。

(3) 综合方法。物理方法和统计方法各有优缺点。物理方法不需要大量的历史测量数据,但要求对大气的物理特性及风电场特性有准确的数学描述,这些方程求解困难,计算量大。统计方法不要求解物理方程,计算速度快,但需要大量的历史数据。

综合方法的基本原理为采用基于微观气象学理论或基于计算流体力学方法建立风电场的物理模型,对风电场的输出功率进行预测。建立风电功率预测系统的统计模型,以物理模型的输出和数值天气预报数据作为统计模型的输入,从而实现对风电场输出功率的预测。综合方法的应用可有效提高预测精度和模型的适用性。

2.2 风电功率预测原理

风电场的原动力是风,风电机组和风电场的输出功率由风的特性决定。本节首先介绍风的特性,包括风速、风速随时间的变化、风速随高度的变化以及阵风、湍流等,这些因素对风电场输出功率有直接影响。风电场输出功率预测的主要目的之一是为电网运行调度服务,这需要风电功率预测系统能够提供至少未来 24h 的风电场输出功率预测曲线。由于风速和风电场输出功率的随机性较强,周期性较差,目前基于时间序列的预测方法无法给出 24h 的预测。数值天气预报能够以网格数据的方式给出未来 24~72h 的气象预测,因此结合数值天气预报数据对风电场输出功率进行预测是最可行的方法。其次,简单叙述了数值天气预报的原理及目前几个流行的数值天气预报模型,然后结合风电机组和风电场的实测数据分析了影响风电机组和风电场输出功率的一些因素。由于预测总是存在一定的误差,为了对预测结果进

行评价，本节给出了预测系统的评价指标。

2.2.1 风的特性

1. 平均风速

风是空气相对于地球表面的运动，空气的运动可以分解为水平运动和垂直运动，风速是指单位时间内空气在水平方向上移动的距离。风速随时间和空间的变化是随机的，瞬时风速由平均风速和脉动风速组成。研究表明，周期在 10min~1h 范围内的功率谱曲线比较平坦，如果将平均风速的时距取在这个范围，可以忽略湍流引起的天气变化，平均风速基本上是一个稳定值，我国规范规定的时距是 10min。

2. 平均风速随高度的变化

平均风速的取值除了取决于时距外，还取决于高度。在大气边界层中，平均风速随高度发生变化，其变化规律称风剪切或风速廓线，风速廓线可采用对数律或指数律分布。

(1) 对数律分布。在离地高度 100m 内的表面层中，可以忽略剪切应力的变化，这时，风速廓线可采用普朗特 (Prandtl) 对数律分布表示

$$\bar{V}(z) = \left(\frac{V_*}{k} \right) \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2-1)$$

式中 $\bar{V}(z)$ —— 离地高度 z 处的平均风速，m/s；

V_* —— 摩擦速度，m/s；

k —— 卡门常数，一般近似取 0.4；

z_0 —— 地表粗糙长度，m。

采用普朗特对数律分布表示的风速廓线如图 2-2 所示。

(2) 指数律分布。用指数律分布计算风速廓线时比较简便，因此，目前许多国家采用经验的指数律分布来描述近地面层中平均风速随高度的变化，可表示为

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_s)} = \left(\frac{z}{z_s} \right)^\alpha \quad (2-2)$$

式中 $\bar{V}(z_s)$ —— 离地参考高度 z_s 处的平均风速，m/s；

α —— 风速廓线指数，与地面粗糙长度有关。

在海面、海岸及沙漠地区，取 $\alpha=0.12$ ；在田野、乡村、丘陵等地区，取 $\alpha=0.16$ ；在有密集建筑群的城市地区，取 $\alpha=0.2$ ；在有密集建筑群且建筑物较高的城市地区，取 $\alpha=0.3$ 。图 2-3 给出了不同风速廓线指数下的风速廓线。由图 2-3 可知，平均风速随高度的增加而增加，一般到离地面 300~500m 之间的梯度风的高度后，才趋于常数，这时，风不再受地貌的影响。

由于受地形复杂程度、地表粗糙度和湍流的影响，不同高度的风速并不完全和对数风速廓线一致，10m 高度处的风速也有可能大于 70m 高度处的风速。图 2-4 是某风电场某日测风塔测得的不同高度处的风速，时间间隔是 10min。

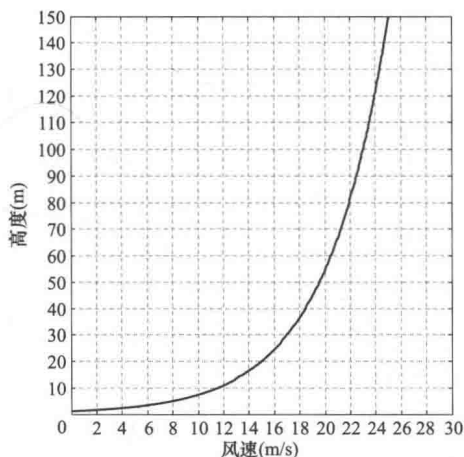


图 2-2 对数风速廓线