

Optimization Dispatching
Research within Wind Farm

风电场内优化调度研究

张晋华 著



科学出版社

风电场内优化调度研究

Optimization Dispatching Research within
Wind Farm

张晋华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统介绍风电场优化运行调度研究方法以及相应的仿真研究。全书共 10 章。第 1 章介绍风电优化调度的研究目的和现状。第 2、3 章介绍风力发电机组关键部件相对疲劳损伤量模型和基于相空间重构的神经网络风电功率预测模型。第 4~6 章介绍以风电场内集电系统损耗最小为目标函数的优化调度模型和以风电场内机械损伤量最小为目标函数的优化调度模型,以及风电场内机组分类运行研究。第 7~9 章介绍多目标的风电场内优化调度研究和基于风功率场景预测的风电场内优化调度研究,以及基于提高电能质量的风电场内优化调度研究。第 10 章总结和展望风电场内优化调度研究。

本书可作为风电优化运行方向的研究生教材,也可供风能与动力工程和电气工程专业科研人员、高等院校教师和高年级学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

风电场内优化调度研究=Optimization Dispatching Research within Wind Farm/张晋华著.—北京:科学出版社,2017.3

ISBN 978-7-03-046737-9

I. ①风… II. ①张… III. ①风力发电-发电调度 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第303521号

责任编辑:陈构洪 赵微微 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:240 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着电力系统中风电并网比例的增加，风能的随机波动性给传统电力系统经济调度和安全运行带来挑战。研究在风电功率预测与电力系统的负荷约束条件下风电场内机组的优化调度问题，不仅能减少风力发电机组的冗余运行和磨损浪费，避免机组的频繁启停，还可以降低运行成本，提高风电场输出功率的电能质量，有效减轻风电波动性对电网的影响，从而在保证电力系统安全性的前提下，提高电力系统消纳风电的能力和经济效益。

以风电场功率预测数据为基础，本书重点研究了以降低风力发电机组疲劳载荷损伤相对量和降低集电系统损耗为目标的风电场内机组组合的优化算法。本书完成以下研究工作。

第 1 章论述目前风电行业发展的研究背景，本书研究的目的和意义，总结概括了风电场风电功率预测、含风电场的电力系统和风电场内优化调度、风力发电机组疲劳载荷的研究现状，确定本书的研究内容和技术路线。

第 2 章建立风力发电机组关键部件相对疲劳损伤量模型。根据华北某风电场的风资源数据，利用瑞利分布的风速累积分布函数，基于 GH-Bladed 模拟了 1.5MW 风力发电机组的疲劳载荷，利用雨流循环计数法，得到风力发电机组各个部件的疲劳载荷谱。然后根据仿真计算和 Miner 法则得到风力发电机组关键部件的相对疲劳损伤量。

第 3 章建立基于相空间重构的神经网络风电功率预测模型。风电场内优化调度是以风力发电机组的短期和超短期功率预测值为研究基础的，根据混沌-相空间重构的原理可知风力发电机组的风速和风电功率时间序列数据具有混沌的属性，在此基础上，将相空间重构与神经网络相结合，建立混沌-Elman、混沌-BP 和混沌-Volterra 级数的风电功率预测模型，经实例验证，分析比较得出混沌-Elman 模型的预测效果相对较好。

第 4 章以风电场内集电系统损耗最小为目标函数建立机组优化调度模型。根据风电场出力满足电网调度要求，以风力发电机组有功输出的功率上下限、风力发电机组无功输出的功率上下限、风力发电机组端电压上下限、变压器变比上下限等为约束条件，以风电场内集电系统损耗最小为目标函数建立机组优化调度的数学模型，通过粒子群算法和遗传-粒子群算法进行对比寻优，遗传-粒子群算法结果较优，其线路功率损耗较少。

第 5 章以风电场内机械损伤量最小为目标函数建立机组组合模型。风电场内

机组组合是风电场的发电计划从场一级到机组的延伸，是对未来风电场内优化调度的问题做一些深入研究。根据风电场内优化机组组合的目标函数和约束条件，建立风电场内优化调度模型，然后利用改进二进制粒子群优化(BPSO)算法、遗传优化算法(GA)、遗传-粒子群混合优化(GA-BPSO)算法，进行优化求解。在同样条件下进行优化机组组合，GA-BPSO效果比GA和BPSO有了很大的改善，得到运行期间总的疲劳损伤量要稍小；引入粒子群优化参数的GA-BPSO算法的计算时长相对BPSO算法略长，但比GA计算时长要短；三种模型的计算时长从大到小依次为：GA，GA-BPSO，BPSO。

第6章建立风电场输出的风电功率分配模型。通过大量历史数据分析风电场各机组性能，提取每台风力发电机组发电功率、风速的平均值和均方根差值作为特征值，分别采用自组织特征映射(SOFM)神经网络算法与基于模拟退火遗传算法的模糊 c 均值聚类(SAGA-FCM)算法进行分类。将利用上述分类算法得到的分类机组中发电功率性能较好的一类作为优先执行发电计划的机组，计及线路损耗后的发电计划，对风电场内其余机组进行两层优化，外层是以风力发电机组相对疲劳损伤量最小为目标的机组优化出力，内层是确定机组间负荷满足电网调度要求的最优功率分配。最后可以得到风电场输出的风电功率与电网的调度要求一样的功率分配模型。两种分类算法都可以得到满足电网调度要求的机组组合，但通过比较，基于遗传模拟退火算法的模糊聚类算法分类方法的疲劳损伤量比自组织特征映射神经网络分类方法的疲劳损伤量较小，SAGA-FCM分类方法下停机的机组台数较多。

第7章建立降低风电场损耗的风电场内机组优化调度模型。以风电机组关键部件总损伤量和风电场内集电系统网损最小为目标，结合风电场功率预测数据和负荷调度要求，建立机组优化调度的数学模型；应用粒子群优化算法和萤火虫优化算法求解非线性规划，寻找全局最优解。

第8章建立基于风功率场景预测的风电场内优化调度模型。将风电场景和机组组合模型相结合，得到了适用于场景树的机组组合模型，将风电场的机组组合问题求解过程中风电的不确定性处理转化为多个场景下的确定性问题；同时，在模型中还引入了切风量，允许系统在一定情况下切除部分风电，在保障优先接纳风电的前提下降低系统的总体运行成本。利用遗传算法求解了机组组合模型；并用算例仿真验证了本章所建立的数学模型的有效性和算法的可行性。

第9章建立基于提高电能质量的风电场内机组优化调度模型。电能质量是制约风电规模化发展的主要因素之一，闪变是衡量电能质量的重要指标之一，风电场风况是影响风电机组闪变的重要因素。根据国际电工标准 IEC 61400-21 和国家标准 GB/T 12326—2008，推导出风电场单台机组连续运行时闪变的计算方法，通过 GH-Bladed 软件仿真，采用线性方法、非线性方法和 BP 神经网络方法建模，分

别建立风电场风况与风电机组连续运行时闪变的映射关系；以提高风电电能质量为目标函数，建立风电场内机组优化调度模型，利用某风电场风电功率预测数据，进行仿真验证。

第 10 章总结本书完成的主要工作，给出主要研究结论，对风电场内优化调度研究需要进一步深入研究的问题做出展望。

本书是作者及其课题组成员在风电领域近几年研究成果的总结，重点研究了智能算法在风电场优化调度中的作用，参与研究的成员还包括阎洁、陈构洪、马远驰、杨衍、吴文静等。

书中的很多内容都始于作者在博士期间的研究成果，本书的出版特别要感谢尊敬的博士生导师刘永前教授和田德教授，他们在我的学术成长之路上倾注了大量的心血，给了我巨大的关心和支持。还要感谢华北电力大学风电场技术课题组给我提供了良好的科研环境，感谢华北水利水电大学提供的工作环境。

本书的研究工作得到了河南省高等学校重点科研项目(15A120002)、河南省高等学校青年骨干教师资助计划资助对象——风电场内优化调度研究(2014GGJS-066)和华北水利水电大学高层次人才资金项目的支持。此外，本书还参阅了国内外大量著作和文献资料，在此对这些作者一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不当之处，欢迎使用本书的广大读者给予指正。

张晋华

2016 年 12 月于华北水利水电大学

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 本书研究背景	1
1.1.2 本书研究的目的和意义	4
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 风力发电机组疲劳载荷方面的研究	6
1.2.2 风电场功率预测的研究	7
1.2.3 含风电场的电力系统经济调度及风电场内优化调度的研究	8
1.3 本书研究内容和技术路线	10
第 2 章 风力发电机组疲劳载荷与疲劳损伤研究	13
2.1 引言	13
2.2 基于 GH-Bladed 的疲劳载荷计算	13
2.2.1 风力发电机组载荷及其来源	13
2.2.2 风力发电机组载荷计算坐标	15
2.2.3 风力发电机组疲劳载荷计算工况	17
2.2.4 风力发电机组基本参数以及风模型	19
2.3 风力发电机组疲劳载荷与疲劳损伤	22
2.3.1 雨流计算法则与 Miner 疲劳累积损伤理论	22
2.3.2 等效疲劳载荷以及相对疲劳损伤量	24
2.4 本章小结	37
第 3 章 基于相空间重构的风电功率预测研究	39
3.1 引言	39
3.2 基于相空间重构的风电功率短期预测	40
3.2.1 混沌动力学系统的相空间重构	40
3.2.2 神经网络和 Volterra 级数	41
3.2.3 风电功率的预测模型	43
3.2.4 算例分析	44
3.3 本章小结	47

第 4 章 基于降低集电系统损耗的风电场内机组功率分配模型	49
4.1 引言	49
4.2 风电场内功率分配模型	49
4.2.1 风电场集电系统	49
4.2.2 牛顿-拉弗森法潮流计算	53
4.2.3 粒子群算法和遗传-粒子群算法优化风电场内功率分配研究	57
4.2.4 算例及分析	64
4.3 本章小结	73
第 5 章 基于降低风力发电机组疲劳损伤的风电场内优化调度研究	74
5.1 引言	74
5.2 以机组疲劳损伤量最小为目标的机组组合模型	74
5.2.1 目标函数	74
5.2.2 约束条件	75
5.3 改进二进制粒子群算法优化机组组合研究	76
5.3.1 改进二进制粒子群算法原理概述	76
5.3.2 算例及分析	78
5.4 遗传算法优化机组组合研究	82
5.4.1 遗传算法原理概述	82
5.4.2 算例及分析	85
5.5 遗传-粒子群算法优化机组组合研究	87
5.5.1 遗传-粒子群算法模型	87
5.5.2 算例及分析	88
5.6 本章小结	91
第 6 章 风电场内机组分类运行研究	93
6.1 引言	93
6.2 自组织特征映射神经网络	93
6.2.1 自组织特征映射神经网络的概述	93
6.2.2 建模过程	94
6.2.3 算例及分析	96
6.3 基于遗传模拟退火算法的模糊聚类算法	100
6.3.1 模糊聚类算法	100
6.3.2 模拟退火算法原理概述	106
6.3.3 基于遗传模拟退火算法的模糊聚类算法原理概述	109
6.3.4 算例及分析	111
6.4 基于风力发电机组分类的风电场内功率分配模型	112
6.4.1 遗传算法优化风电场内功率分配研究	112

6.4.2	算例及分析	114
6.5	本章小结	120
第 7 章	多目标的风电场内优化调度研究	122
7.1	引言	122
7.2	多目标的风电场内优化调度模型	122
7.2.1	目标函数	122
7.2.2	约束条件	123
7.2.3	优化算法	124
7.2.4	算例及分析	128
7.3	本章小结	132
第 8 章	基于风功率场景预测的风电场内优化调度研究	133
8.1	引言	133
8.2	风电功率场景预测的描述与构建方法	134
8.2.1	离散状态马尔可夫链风速模型	134
8.2.2	场景生成	136
8.2.3	场景缩减	137
8.3	风力发电机组功率场景预测算例	138
8.4	基于场景预测的风电场内日前机组组合模型	140
8.4.1	目标函数	141
8.4.2	约束条件	142
8.4.3	遗传算法求解机组组合模型	144
8.5	算例分析	146
8.5.1	风电场景预测信息	147
8.5.2	用遗传算法求解基于场景树的机组组合模型	148
8.6	本章小结	150
第 9 章	基于提高电能质量的风电场内优化调度研究	151
9.1	本章研究背景	151
9.2	本章研究目的及意义	151
9.3	风电场电能质量问题	152
9.3.1	电压偏差	152
9.3.2	电压波动和闪变	152
9.3.3	谐波	154
9.4	目前相应解决方案	155
9.5	机组闪变分析模型的建立	156
9.5.1	风的湍流模型	156

9.5.2	风力发电机组模型参数以及接入电网情况	162
9.6	风况对闪变的影响	165
9.6.1	风况的生成与加载	165
9.6.2	参数拟合情况	169
9.7	风况的预测	173
9.7.1	基于神经网络的时间序列预测	173
9.7.2	算例预测情况	175
9.8	风电场内机组组合优化调度情况	176
9.9	本章小结	178
第 10 章	结论与展望	179
10.1	结论	179
10.2	展望	182
参考文献	184

第1章 绪 论

1.1 引 言

1.1.1 本书研究背景

随着环境问题受到越来越多的关注，世界各国发展新能源的意识正在不断加强。开发利用可再生能源、实现能源的可持续发展成为世界各国能源发展战略的重大举措。风电是除了水电以外开发技术最成熟、成本最低的可再生能源，也是最具有开发价值的可再生能源。随着国际市场化石能源价格的不断上涨，风电成本已与传统火电、核电成本接近，远低于生物质、太阳能等其他可再生能源的发电成本。

风能作为重要和技术最成熟的可再生能源，因具有蕴藏量丰富、可再生、分布广、无污染等特性，成为可再生能源发展的重要方向。风力发电是风能开发利用的主要形式。因此风电的开发已受到世界上很多国家，特别是发达国家的高度重视，十多年来全球风电稳步发展，截止到 2015 年年底，风电新增装机容量 63.013GW，全球风电产业累计装机容量接近 432.419GW^[1]。图 1-1 和图 1-2 是 2000~2015 年全球风电新增装机容量的增长图和全球累计风电装机容量的增长图。

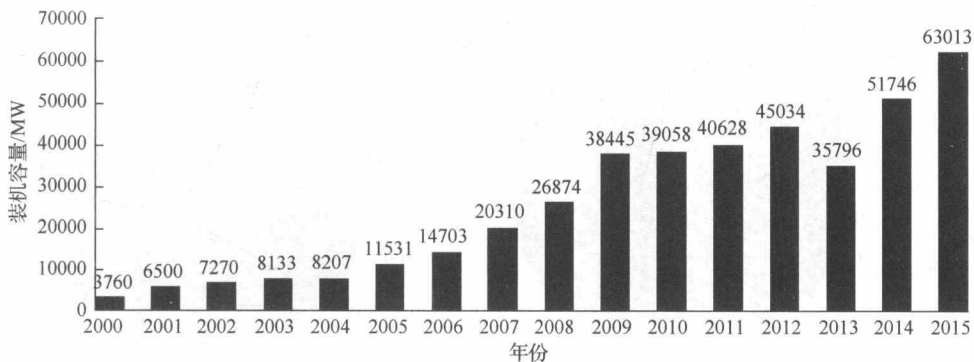


图 1-1 2000~2015 年全球风电新增装机容量增长图^[1]

根据全球风能理事会的统计，2015 年风电装机容量超过 10GW 的国家有 8 个，这 8 个国家包括中国 (145GW)、美国 (74GW)、德国 (44.9GW)、印度 (25GW)、

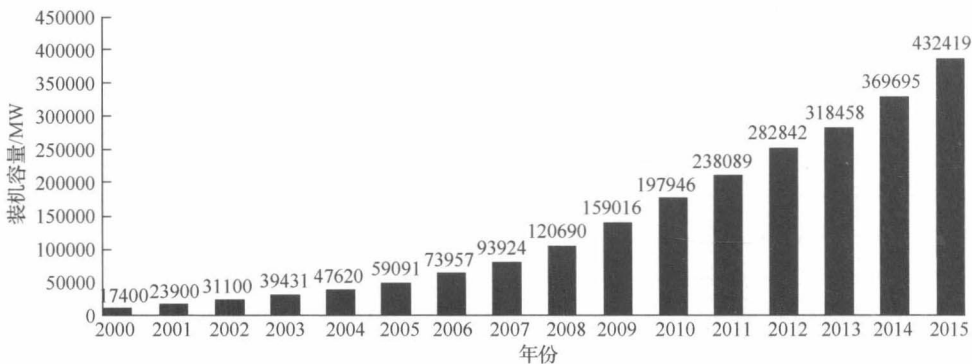


图 1-2 2000~2015 年世界累计风电装机容量增长图^[1]

西班牙(23GW)、英国(13GW)、加拿大(11GW)和法国(10GW)。从图 1-3(a)中全球排名前十的情况来看,年度新增市场最大的赢家是中国,其 30GW 的装机容量不仅创造了本国的装机纪录,也是全球风电发展历史上最高的国家年度新增装机。排名第二是美国(8.5GW),德国 6.0GW 排第三,巴西 2015 年表现不俗,以 2.7GW 的成绩位列第四。印度(2.6GW)、加拿大(1.5GW)、波兰(1.26GW)紧随其后。法国实现了 2012 年以来的最好装机成绩,装机容量超过 1.07GW,英国(975MW)位列第九名。全球前十榜单中的最后一名是土耳其,以 956MW 的装机容量进入全球前十位。土耳其位于欧亚之间,是欧亚大陆的桥梁,风资源良好,又有政府的扶持,在未来几年将存在更大的发展空间。

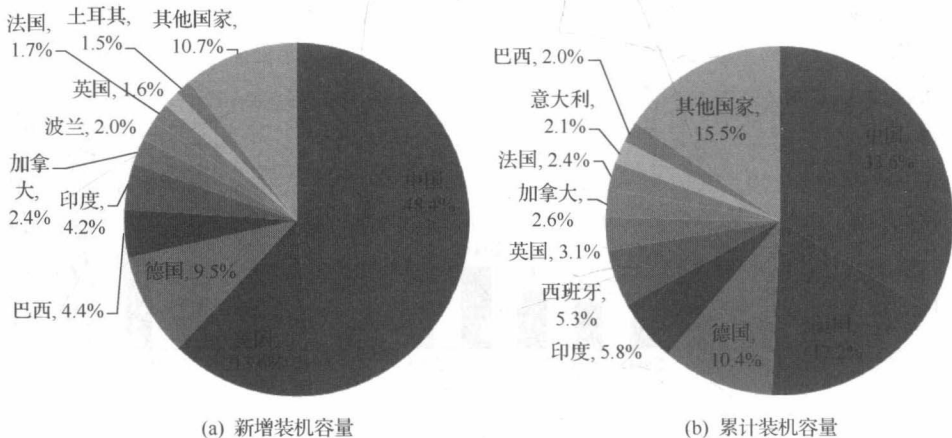


图 1-3 世界风电新增和累计装机容量前十位国家统计图^[1]

我国是一个风能资源丰富的国家,陆上风能资源丰富区主要分布在东北、内蒙古、华北北部、甘肃酒泉和新疆北部,云贵高原、东南沿海也是风能资源较丰

富的地区。我国风电产业发展迅速,对能源结构的调整和安全、节能减排、经济可持续发展都具有可实现的意义。我国在颁布了《中华人民共和国可再生能源法》和相关政策后,风电装机容量迅速增长,风电装备制造业也发展迅猛,产业体系已逐步形成。据中国可再生能源学会风能专业委员会(中国风能协会, Chinese Wind Energy Association, 以下简称 CWEA)的年终统计数据,2015 年全国风电新增装机容量 30753MW(不含台湾地区,下同),创造了新的纪录,与上一年的 23196MW 相比增加了 7557MW,同比增长 32.6%;2015 年全国累计风电装机容量达到 145.36GW,同比增长 26.8%;从装机台数统计,2015 年新增装机 16740 台,累计装机 92981 台;全国各个省、自治区、直辖市都已经建立了规模不等的风电场^[2]。2005~2015 年全国风电新增和累计装机机组台数见图 1-4。

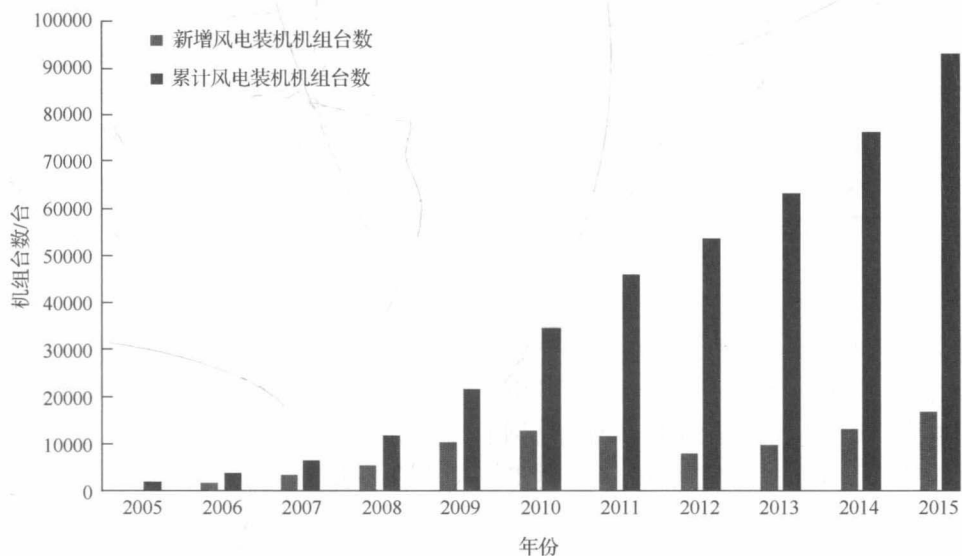


图 1-4 2005~2015 年我国新增及累计风电装机机组台数^[2]

《国家应对气候变化规划(2014~2020 年)》提出到 2020 年并网风电装机容量达到 200GW 的发展目标。根据这一目标测算,“十三五”期间,我国风电每年需要投产 20GW 以上。这意味着风电发展的目标任务基本清晰,风电产业将在较长时间内保持快速增长势头。国家有关政府部门近年来密集出台了一系列政策文件,支持引导风电等可再生能源的发展。地方政府及能源主管部门积极配合国家政策,对本地风电等可再生能源发展都十分重视,一些省份还出台了适宜本地情况的可再生能源鼓励政策。在全国不同层面政策的引导以及产业界共同的努力下,近两年我国风电并网情况有所好转,弃风限电问题得到遏制,电网配套送出工程建设加快,市场秩序环境得到优化,全国陆地、海上风电开发稳步推进,海外市场

不断扩大,设备研发制造能力不断增强。全产业链在经历了近十年的快速发展之后更加成熟和稳健,为今后中国风电市场继续保持高速稳定增长奠定了良好的基础。

1.1.2 本书研究的目的和意义

近年来我国风电产业呈加快发展趋势,我国电力系统所要面临的问题是如何合理地提高风电利用率。未来风电将在世界范围内继续快速发展,随着风电在电力需求中占的比重逐渐增大,研究表明,2020年全国发电装机规模将达到17.6亿kW左右,其中风力发电将占可再生能源的62.7%,占总能源的8.6%。风电并网和消纳问题引起了国家广泛的关注并开展了多项研究。投入使用的风电场数目的增多,风电并网规模的逐渐增大,给电力系统的安全稳定运行带来了新的挑战。当风电在电网中所占比例较小时,电网受到影响比较小,当风电在电网中的比例越来越大时,电网受风电的波动性、不确定性的影响可能会比较显著,表现在电能质量、系统稳定性、发电与调度计划等多个方面^[3,4]。增加旋转备用容量和限制风电出力等手段在一定程度上可以缓解上述问题,但这增加了电力系统和风电场运行的成本,浪费了清洁能源的电力,打消了风电业主的积极性,不利于风电今后的良性发展。

由于现在并网风电场普遍具有动态、波动性及容量大等特点,尤其是其波动性会影响电力系统的经济调度和安全运行^[5-7],为了避免以上不良影响,有时甚至会对风电场接入电网进行限制。而且由于风电场难以提供稳定的输出功率,势必影响到当地电网的电能质量,增加电网的运行成本^[8]。电力系统对风电场进行优化调度,不仅可以提高风电的消纳水平,而且还可以提高风电的市场竞争力,促进风力发电的科学发展。《可再生能源发展“十二五”规划》指出,在未来的工作安排中,应建立适应风电发展的电力调度和运行机制,提高风电利用效率。鉴于此,本书将围绕风电场内优化调度进行研究,研究的意义主要表现为以下几个方面。

(1)目前电网对风电的调度管理只是把发电计划下达到风电场侧,而且风电场并网点维持电压水平能力不足。因此根据风电功率预测数据与相应的负荷约束条件,对风电场运行过程中的机组组合调度进行优化研究,对风电场内风力发电机组间的功率进行优化分配,不仅可以对风电场内的发电功率进行调控输出,提高风电场输出功率的电能质量,还可以为电力调度部门提供参考调度方案,从而有效减轻风力发电对整个电网的不利影响,提高风电并网能力和稳定电力系统的安全经济运行,因此对国民经济的发展具有十分重要的意义。

(2)近年来我国在甘肃酒泉、内蒙古西部、内蒙古东部、新疆哈密、河北、吉

林、江苏沿海及海上、山东、黑龙江、山西确定了 10 个千万千瓦级风电基地，规划风电总装机容量已达 140GW。具有机组数量多、地域广的特点的大规模风电场与风电基地的建设和投入使得风电场内的各种损耗问题日益突出。与传统的能源发电站不同，风电场机组运行没有火电厂机组的煤耗曲线，也没有水电站的流量调控，风电场能利用的就是当地的风电功率预测曲线。对于风电场内的优化功率分配，需要分析风电场内的损耗，包括风力发电机组的机械损耗和功率损耗。由于风力发电机组的设计寿命周期为 20 年，本书以机械损耗为研究目标之一，将风力发电机组寿命周期内的机械损耗结合风电场当地风资源情况进行量化，与风力发电机组的成本建立了间接联系，和寿命建立映射关系，进行机组组合优化的研究，对风电场降低运营成本，延长机组寿命具有重大的意义。

(3) 电力系统发电机的机组组合，又称为开停机计划，所要研究的问题是，在保证系统安全运行的前提下，在所研究的周期内，如何合理地安排机组的运行，使系统消耗的燃料总量(或支出的费用)最少^[9]。为了满足机组的安全稳定运行和周期内的整体经济性，需要确定合理的开停机计划。机组组合又是有功经济负荷分配、区域交换计划、自动发电控制、最优潮流(optimal power flow, OPF)的基础，不合理的开停机计划难以被其他算法接受，并且可能完全抵消其他算法的优化效果。它与其他程序之间的关系见图 1-5。

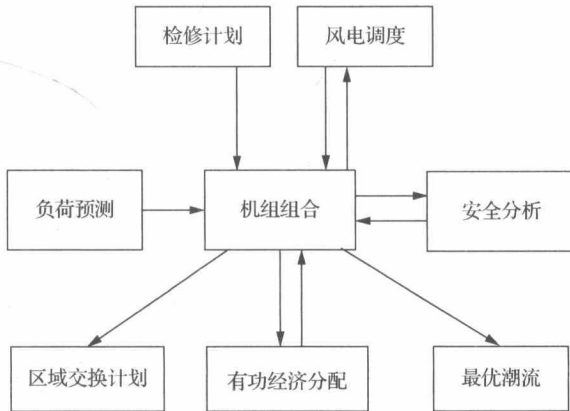


图 1-5 机组组合的关系图

对于风电来讲，当电力系统中有足够的消纳能力接受风电时，风电场可以将全部机组投入运行，实现发电量最大；但是当电力系统中消纳能力小于风电场的风电功率预测值时，为了系统的安全稳定运行，需要对风电限制入网。在限定负荷的情况下，风电场中的机组组合调度是指根据调度周期限定负荷功率的变化情况与相应的风电场内各台风力发电机组的风电功率预测值，计划风力发电机组的

投入运行。对风电场限定负荷的情况下的风电场内机组组合的优化调度研究,为电力系统的调度部门合理安排调度任务提供参考依据,为风电场内合理安排发电计划,减少风力发电机组启停机的次数和成本,还可以为电力系统以及风电场的安全与稳定运行提供保证,使由于风电场输出功率的频繁波动而造成电网的电能质量、电压稳定等方面的影响降低,使电网接纳风电的能力有所提高。因此从提高风电占能源消耗比例与经济效益的角度看,对风电场内的机组组合进行优化调度研究具有非常重要的意义。

1.2 国内外研究现状

国外对风力发电技术研究开展得较早,特别是欧洲国家具有比较成熟的风电市场和丰富的风电技术储备,可以有效地调节风力发电,优化风力发电出力,提高风力发电的利用率。由于风力发电在欧洲与北美的高速发展,其容量已占到全球的80%左右,而且拥有较长的风力发电运营时间和成熟的风力发电管理经验。虽然我国的风力发电起步较晚,但在最近几年我国风力发电呈跨越式发展,国内专家学者也不断地深入研究风电调度运行。

1.2.1 风力发电机组疲劳载荷方面的研究

根据风电行业的相关标准^[10-12],风力发电机组的载荷计算主要包括疲劳载荷和极限载荷计算。风力发电机组在正常外界条件下正常运行时的载荷较小,主要对疲劳强度的影响较大。制定风力发电机组运行工况的基础是风速特性以及风力发电机组运行状态等。

文献[13]构建了风力发电机组的疲劳载荷测试系统,重点是对风力发电机组叶片和塔架做了疲劳载荷分析和寿命预测,得到了载荷-循环次数曲线。Inomata等^[14]于1999年发表了关于500kW风力机NED03叶片的测量压力,Noda等^[15]研究了风力机叶片疲劳载荷的仿真模型。文献[16]~文献[19]讨论了风力发电机组结构疲劳载荷的计算与分析,探讨了影响其结构疲劳寿命的主要因素,然后提出了损伤累积法则。最后,结合有限元法,以两个典型的零部件(机舱底座和塔架)为实例进行抗疲劳设计。在疲劳载荷工况分析中,按正常工作时的风速段来进行划分,在切入风速和切出风速之间划分了11种工况。没有考虑在切入风速和切出风速之间的风速下启动所受的载荷,在切入风速和切出风速之间的风速下正常停机工作时所受的载荷等一些特殊工况对结构疲劳寿命的影响。文献[20]对机组在正常运行发电期间桨叶的疲劳进行了分析,对于极端的风切变、极端的风向变化等恶劣风况还没有考虑,启动和停机过程对材料疲劳的影响也是不可忽略的。在启

动和停机过程中,风轮转速都有较大幅度的变化,一般都会经过共振区,因此载荷幅度变化较大,需要设计专门的载荷工况。这些运行条件在设计寿命内经常发生,因此对疲劳性能影响较大。在启动工况下,变桨类型的风力发电机组的叶片在顺桨位置,考虑叶片受到重力的影响,绕着变桨轴的弯矩分量在叶片变桨过程中会逐渐增大,若这种情况经常发生,这种工况产生的载荷将会对风力发电机组疲劳性能或者疲劳寿命有较大影响。在正常停机时,大型风力发电机组利用叶片变桨降低风力发电机组的转速,则不会出现较大的载荷。文献[21]指出,当风速达到或超过额定风速后,通过转动桨叶减小攻角,达到限制功率的目的,减少作用在机组上的极限载荷。文献[22]基于风力机叶片根部随机载荷谱和线性累积损伤方法,研究了轮毂多轴疲劳特性及疲劳寿命分析方法。文献[23]~文献[27]研究了轮毂材料的 $S-N$ 曲线定义和各工况下随机载荷谱的分析处理方法。文献[28]研究了风力发电机组塔架优化设计与分析,文献[29]分析了风力机玻璃钢叶片疲劳寿命。张红磊^[30]对大型风电机组齿轮箱疲劳特性进行了数值模拟。赵德钊^[31]研究了海上风机系统载荷仿真及轮毂的优化设计。以上文献都是单独分析了风力发电机组的各部件的疲劳载荷,没有把风力发电机组看作一个整体来研究分析。

1.2.2 风电场功率预测的研究

风电的随机性、波动性、不可预知性在电网运行中都已渐渐凸显。随着装机容量的增大,风电的不可预知性增加了调度的困难,只有通过限电的方式维护电网安全运行。限电不是最科学的维护运行的方式,因为限电既浪费了可再生能源的电力,也减少了风电业主的收入和积极性,不利于风电发展。开发建设风电预测系统,对风电功率进行预测,可以为优化风电场出力提供有力的依据,对保证电力系统安全稳定运行、降低系统备用容量、调度安排系统的发电计划等具有重要的意义。

到目前为止,风电场风电功率预测的方法主要分为两类:物理建模方法和统计建模方法^[32]。物理方法^[33]是指通过地形特征、大气压、风速、风向和环境温度等物理因素建立相关方程组,采用微观气象学和流体力学等理论计算出风力发电机组轮毂高度处风速风向,最后与风电场功率曲线拟合得到风电场输出的风电功率。统计方法必须根据大量的历史数据进行统计分析,找出其内在规律并用于预测,具体方法包括时间序列法^[34]、持续法^[35]、卡尔曼滤波法^[36]、神经网络法^[37]、模糊逻辑法^[38]、空间相关性法^[39]以及相关方法的组合^[40]等。按照时间尺度划分预测主要有短期预测(未来 24~72h)和超短期预测(未来 15min~6h)。

数值天气预报^[41,42](numerical weather prediction, NWP)是一种客观预测。在这种预测中,大气未来状态完全由描述气象变量演变过程的方程组的数值解来确