

研究生教材

风光储系统容量优化配置 及经济性评估

韩晓娟 李建林 田春光 等 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

研究生教材

风光储系统容量优化配置 及经济性评估

韩晓娟 李建林 田春光 著
吕项羽 孔令达 张 斌



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书重点研究风光储联合发电系统协调控制策略及容量优化配置问题。通过控制储能的充、放电,制定相应的协调控制策略,平滑风光并网功率的同时,将风光联合发电系统输出功率的波动率控制在要求的范围内,减少储能容量配置、延长储能装置的使用寿命,提高风光储联合发电系统的经济性。本书的主要内容包括风光储系统发展概述、风光储特性分析及储能技术、光储联合系统时间序列特征量灵敏度分析、风电/光伏有功功率短期预测技术、基于储能技术的风电/光伏有功功率平滑控制、基于混合储能技术的优化调度控制技术、计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化配置、储能系统用于配电网削峰填谷的经济性评估及具有复合滤波结构的风储联合发电系统经济性评估等。本书遵循深入浅出、循序渐进的编写思路,同时,理论联系实际,对文中涉及内容进行仿真和实验双重验证。

本书可作为电气工程类专业研究生教学用书,也可作为相关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风光储系统容量优化配置及经济性评估/韩晓娟等著. —北京:中国电力出版社, 2016. 5

研究生教材

ISBN 978-7-5123-8618-1

I. ①风… II. ①韩… III. ①风力发电-系统容量-优化配置-研究生-教材②风力发电-系统容量-经济评价-研究生-教材③太阳能发电-系统容量-优化配置-研究生-教材④太阳能发电-系统容量-经济评价-研究生-教材 IV. ①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 086225 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>)

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 5 月第一版 2016 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 362 千字

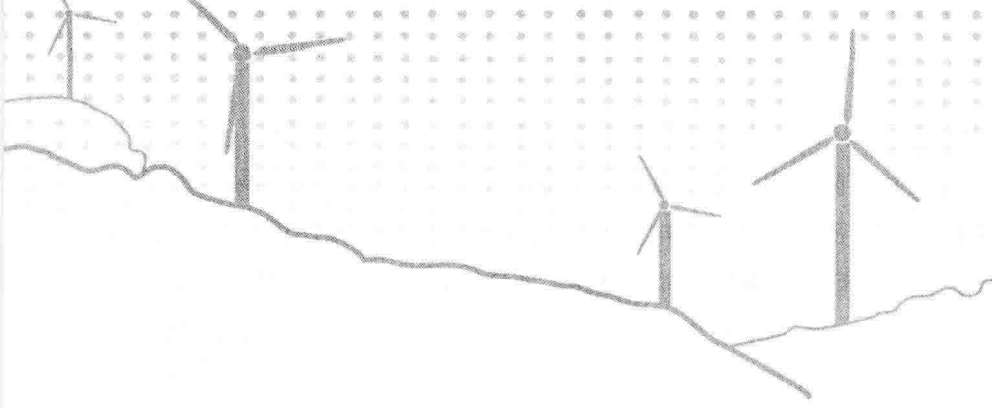
定价 60.00 元

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



前言

近年来,智能电网技术飞速发展,信息化、自动化水平逐步提高。在减少碳排放和去雾霾的需求背景下,以风电和光伏为代表的大规模可再生能源逐步接入电网。值得注意的是,在保证电网稳定和坚强的同时,需要统筹电力平衡关系,增加电网调度灵活性,保障大规模清洁能源输入电网,积极促进清洁能源消纳。

先进的预测和控制技术可以使具有间歇性和波动性的风电/光伏在一定程度上达到友好接入电网的目的。在风电/光伏发电的并网点引入储能系统能够更好地增强发电侧的柔性 and 惯性,提升可再生能源的参与能力。储能系统本身也能够配电网中进行负荷转移和削峰填谷等快速响应,保障电网安全稳定。

目前,关于风光储联合应用技术的基本原理、分析方法和典型应用分散在部分期刊、文献中,不能系统且全面地为从事该领域研究的人员提供参考。本书作者在风光储电力系统领域进行了多年的研究与实践,形成了大量的研究成果,并汇编整理成此书,希望能为从事该领域的研究人员提供一些帮助。

本书共分为9章,第1章介绍智能电网特点、风光储技术发展现状和应用案例;第2章介绍风光发电的运行特性和储能技术基本工作原理;第3章介绍以光伏为代表的间歇能源数据采集粒度、样本跨度选择方法,灵敏度分析和典型曲线选择方法;第4章介绍风电/光伏有功功率的灰色预测、马尔可夫链预测、小波变换与LS-SVM预测等短期功率预测技术;第5章介绍风电/光伏有功功率的一阶低通滤波、模糊控制、小波包分解、经验模态分解的平滑控制技术;第6章介绍了基于混合储能技术的优化调度、跟踪计划出力等多目标优化控制策略;第7章介绍了计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化配置策略;第8章介绍了储能系统用于配电网削峰填谷和经济性评估应用模型及策略;第9章介绍了基于合作博弈模型的风电-混合储能系统的经济性评估。

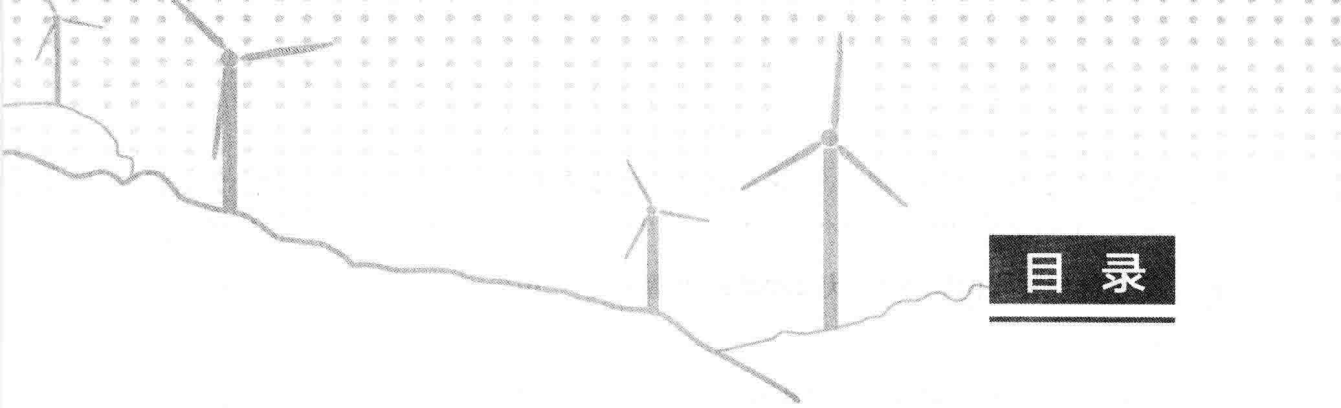
本书旨在对储能技术在能源互联网中典型应用技术进行探讨,以期通过本书的研究,为今后我国储能技术健康、有序发展,乃至我国储能行业相关标准的制定提供一定的理论依据和技术支撑。书中涉及的内容均进行了严格推导和仿真验证,力争准确无误。书中内容均出自作者及其研究团队的学位论文、学术论文。其中,孔令达、张斌、程成、陈小军、李勇、宋志惠、陈芳、张浩、孟芳园等对本书做了大量的前期工作,向他们致意。同

时,感谢中国电力科学研究院团队的田立亭、徐少华、谢志佳、靳文涛、马会萌、修晓青、杨水丽、李蓓等工程师,以及国网吉林省电力有限公司电力科学研究院团队的吕项羽、常学飞、李德鑫、王鼎等工程师,他们为本书提供了大量的技术支撑。特别感谢国家自然科学基金项目(51577065)、国家高技术研究发展计划项目(863计划)(2014AA052004)、国家电网公司科技项目(DG71-15-039, KY-SG-2016-204-JLDKY)对本书的资助。

限于编者水平,在编写过程中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正,并给予谅解。

韩晓娟

2016年5月



目录

前 言

1	风光储系统发展概述	1
1.1	智能电网的特点	1
1.2	风光发电技术发展现状	2
1.3	储能技术发展现状	3
1.4	本书的主要内容	3
2	风光储特性分析及储能技术	5
2.1	风电功率特性分析	5
2.2	光伏发电特性分析	8
2.3	风光互补特性分析	10
2.4	储能技术	13
2.5	本章小结	16
3	光储联合系统时间序列特征量灵敏度分析	17
3.1	引言	17
3.2	有功功率时间序列统计量灵敏度分析	17
3.3	数据最佳采集粒度标定	29
3.4	数据最佳样本跨度标定	37
3.5	光储联合系统数据采集粒度和样本跨度的灵敏度分析	47
3.6	确定应用场景下的储能系统典型运行曲线挖掘	52
3.7	本章小结	62
4	风电/光伏有功功率短期预测技术	63
4.1	引言	63
4.2	基于灰色理论的风电/光伏有功功率预测方法	63
4.3	基于时间序列的风电/光伏有功功率预测方法	68
4.4	基于马尔可夫链的风电功率预测方法	72
4.5	基于小波变换和 LS-SVM 的短期风速预测方法	79

4.6	基于组合预测的风电/光伏有功功率短期预测	84
4.7	本章小结	90
5	基于储能技术的风电/光伏有功功率平滑控制	91
5.1	引言	91
5.2	基于一阶低通滤波器的风电/光伏功率平滑控制	91
5.3	基于模糊控制策略的风电/光伏功率平滑控制技术	100
5.4	基于变权值自适应滤波的风光储系统协调优化控制	111
5.5	基于小波包分解的储能技术平抑有功功率控制	118
5.6	基于经验模态分解的风电/光伏有功功率平滑方法	127
5.7	预测控制在储能技术平抑风电功率波动中的应用	138
5.8	本章小结	145
6	基于混合储能技术的优化调度控制技术	146
6.1	混合储能系统特性分析及数学模型	146
6.2	基于风电功率预测误差分布的混合储能系统容量配置	149
6.3	混合储能系统跟踪计划出力优化控制	153
6.4	混合储能系统的多目标优化控制	159
6.5	算例分析与仿真	163
6.6	本章小结	167
7	计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化配置	168
7.1	引言	168
7.2	电池等效循环寿命计算	168
7.3	全寿命周期成本	173
7.4	资金的时间价值	174
7.5	数学模型	174
7.6	算例分析	176
7.7	本章小结	178
8	储能系统用于配电网削峰填谷的经济性评估	179
8.1	引言	179
8.2	储能系统用于削峰填谷的控制策略研究	183
8.3	储能系统削峰填谷经济模型	190
8.4	储能电池选型及容量优化配置	202
8.5	本章小结	209
9	具有复合滤波结构的风储联合发电系统经济性评估	211
9.1	风电-混合储能系统的复合优化模型	211

9.2 风电-混合储能系统的博弈建模	212
9.3 仿真分析	216
9.4 本章小结	219
参考文献.....	220

风光储系统发展概述

1.1 智能电网的特点

近年来,我国多地频发严重雾霾天气,这说明以化石能源为主宰的发展方式已经超出了环境的承载负荷,发展风电、太阳能、潮汐能等可再生能源迫在眉睫。但是,可再生能源电站出力特性与火力发电等传统能源不同,其受天气状态影响强烈,可再生能源因其间歇性和不稳定的特性,不受普通电网的青睐,弃光、脱网等现象频频发生,发电企业经济效益难以提高。为此,研究可再生能源电站有功功率变化特性具有重要的现实意义和应用价值。同时将储能技术应用于电力系统,可以减小电力系统负荷峰谷差,还可抑制电力系统振荡,提高系统运行的稳定性。

我国储能产业处于发展初期,未来应用潜力不可限量。然而,储能系统作为可再生能源并入电力系统的有益补充,还存在成本高、投资大、前期市场认可程度低等发展瓶颈。目前亟待探索符合我国基本国情的储能系统集约化规划方法和具有世界领先的科学配置策略,为即将到来的产业结构调整和投资建设大规模储能系统应用提供坚实的理论背景和科学的指导意见。

储能电站规划和设计阶段主要依赖与其联合使用的可再生能源电站的大量历史运行数据,而可再生能源电站有功功率变化特性对储能电站的规划及其容量配置具有重大影响。通过深入挖掘历史运行数据提取系统特征是直观有效的方式之一,而数据样本的科学建立则是统计分析工作的前提,其质量水平关系到对系统特性把握的准确与有效。数据采集粒度(采样时间间隔)和总体跨度(样本总体容量)作为评价数据样本的特征量,是在数据收集或统计处理过程中需要首先确定的要素。数据采集粒度过大,会疏漏部分信息,影响有效信息的提取,甚至导致反向结论的产生;数据采集粒度过密,势必需要配备更充足的存储空间和有效的管理系统,造成资源浪费和成本增加。数据总体跨度降低,会线性减少总体数据量,造成总体样本数量不够,不确定性增加;数据总体跨度增加,总体数据量增长,会产生冗余,增加数据资源的管理成本。单纯套用不同数据采集粒度和总体跨度的研究结论都会产生意外的结果,甚至给智能电网和新能源电站安全运行带来安全隐患。在不损失系统特征的前提下,科学选择采集粒度和总体容量来研究间歇式电源出力轨迹,是准确把握系统特性,并开展优化利用的基础。

目前围绕电池储能及其他类型储能可再生能源发电中的研究主要集中在储能配置方式和容量优化等方面,储能系统在运行时的状态和对应的控制策略,与储能系统运行特性



息息相关,储能系统的整体经济性也与系统运行状态和控制策略密不可分。如何科学、合理地配置混合电力系统中风力发电、光伏发电和储能设备等分布式能源的容量,并协调控制各个能源之间的出力情况,不仅是发挥混合电力系统综合效益,实现安全、可靠、经济和环保性能的重要前提,更是现阶段推进新能源发展建设的重要环节。

-----1.2 风光发电技术发展现状-----

解决能源安全与环保问题,是发展智能电网的核心动力。智能电网是将先进的传感测量技术、信息通信技术、分析决策技术、自动控制技术、能源电力技术,以及电网基础设施高度集成而形成的新型现代化电网。

美国西北太平洋国家实验室于2013年建成了基于需求响应网络的智能化电网示范工程,该示范工程以5min为数据采集粒度,基于用户需求侧的响应技术对112户家庭进行实时电价控制,目前运营结果显示,用户通过主动参与降低了10%的能源消耗,与此同时,风电的使用率大幅提高,提升了新能源发电参与电能供给的价值。

目前,世界上最大规模的跟踪式太阳能发电站在韩国全罗南道新安郡智岛邑。该电站名为新安东洋太阳能发电站,总投资约2000亿韩元(约合人民币10.6亿元),占地面积67万 m^2 ,安装有13.0656万块太阳电池板,发电规模为24MW。与以往的固定式发电装置不同,该电站采用的是跟踪式聚焦太阳光发电装置,通过太阳能面板尾随太阳方向的变化而移动,从而延长聚集太阳光的时间,并提高聚光效率,使发电效率提高15%以上。新安东洋太阳能发电站平均每天发电4h,年发电可达3.5万MW,所发电量可供1万户家庭使用1年。此外,该电站运营后有望每年减少3万辆汽车约2.5万t二氧化碳的排放。

2014年,全国风电产业继续保持强劲增长势头,全年风电新增装机容量1981万kW,新增装机容量创历史新高,累计并网装机容量达到9637万kW,占全部发电装机容量的7%,占全球风电装机的27%。2014年风电上网电量1534亿kWh,占全部发电量的2.78%。风力发电的迅猛发展,虽然在缓解能源需求和减少环境保护压力的方面起到了良好的效果,但同时也对电力生产、传输和分配等相关环节提出了更高的要求 and 严峻的挑战。

风力发电作为一种新兴的特殊电力,以自然风资源为动力,风能资源固有的随机性是导致风电机组输出功率存在波动性和间歇性的主要原因。根据统计分析,风电场1min最大功率波动可达装机容量的60%。风电的渗透率较高时,当风电功率波动剧烈而超出电网调节能力范围时,会造成接入点电压变化明显,对电网冲击剧烈,严重影响电网的电能质量。这在很大程度上制约了风电的利用率和快速发展,是亟待解决的重要问题。

国内、外尝试采用多种方法来解决上述问题,如网架改造、变桨距、风功率预测、配置备用容量,以及大规模储能技术等。其中,大规模储能技术因其能量能够双向流动,并具有响应速度快、可靠性高等特点,受到越来越多的关注。储能系统(energy storage system, ESS)可通过快速功率控制,动态功率输出和有功功率的适量吸收,使风电场的输出功率更为平稳,从而提高风电的可控性。风储联合发电系统也成为当前研究的热点。然而,由于目前大规模储能技术的成本依然较高,为风电场配置容量合适的储能系统,从而实现经济性和技术性的统一,是一项重要的现实需求。

1.3 储能技术发展现状

随着储能技术的不断突破和电力电子技术的发展,传统储能技术不断完善的同时,新型储能技术也越来越广泛地应用于电力系统的各个方面。

超级电容器(super-capacitor, SC)是一种新型电磁储能元件,兼有普通电容器与化学电池二者共同的性能特点,近些年来在国内、外逐步兴起。其基本原理为电化学双电层理论:充电时电极表面处于理想极化状态,电解质溶液中电荷将吸引周围的异性离子,使其连接到电极表层,形成双电荷层,组成了双电层电容。因为电荷层的间距非常小,并采用特殊电极结构,所以具有比普通电容器高出上万倍的表面积,从而产生巨大的电容量。超级电容器的优点主要表现为极快的动态响应、大功率密度、极高的循环次数、无污染和较宽的稳定工作范围等,因此全世界许多科研组织都尝试深入研究。目前,国外的Maxwell、Econd、Elna等公司,国内合众汇能、凯迈嘉华、奥威等公司均已实现产业化生产。西门子公司和美国TVA电力公司已将超级电容器用于地铁配电和启动支撑等领域。

铅酸电池是一种历史悠久、性能成熟和广泛应用的蓄电池,由正极活性物二氧化铅、负极活性物海绵状金属铅,以及电解质硫酸溶液共同构成。按照大规模应用的需求,目前铅酸电池已能够实现千瓦级到50MW级的应用,同时最大容量可达40MWh。

锂离子电池主要基于锂离子在正极和负极之间的移动来工作。在充、放电过程中,锂离子在两个电极之间往返嵌入和脱嵌:充电时,锂离子从正极脱嵌,经过电解质嵌入负极,负极处于富锂状态;放电时则相反。锂离子电池的优点表现为高储能密度、高使用效率、高循环次数等。基于这些优势,近年来锂离子电池得到了快速发展,技术性能趋于成熟,同时制造成本不断降低,在储能中的应用前景广阔。目前,国内、外均建有兆瓦级锂离子电池储能电站。2009年,美国电力科学研究院在开展了用于电力系统的频率和电压控制的兆瓦级(2MW)锂离子电池储能系统的示范应用。2012年,日本三菱公司开展了20MW级的锂离子电池组在风力发电并网中的示范应用。国内的南方电网公司于2009年建设了4MW/16MWh的深圳宝清锂离子电池储能电站。

1.4 本书的主要内容

本书重点研究风光储联合发电系统协调控制策略及容量优化配置问题,通过控制储能的充、放电,制定相应的协调控制策略,平滑风光并网功率的同时,将风光联合发电系统输出功率的波动率控制在要求的范围内,减小储能容量配置、延长储能的使用寿命,提高风光储联合发电系统的经济性。主要研究内容如下:

(1) 研究风光发电和储能系统特性,主要包括风力发电、光伏发电的原理,二者功率输出特性分析,以及风光储联合发电系统的关键技术。

(2) 针对兆瓦级风/光发电系统,采用数据统计分析法研究不同时空尺度的数据样本统计量变化规律,研究不同数据采集粒度在描述性统计量、差分量和计算出力能量的插值方法上的变化规律,结合数据样本总体跨度对样本容量的充盈程度,研究用于可再生能源数据样



本采集粒度和样本跨度的数据挖掘方法,揭示样本采集粒度和跨度与储能系统容量之间的关系,为合理、科学地选择储能容量规划所需的数据样本粒度和跨度提供理论依据。

(3) 基于灰色系统理论的预测方法和时间序列方法分别实现了风电场短期功率预测,根据 GM (1, 1) 模型、GM (1, 2) 模型和时间序列功率预测方法,分别实现了风电场输出功率的短期预测,分析了三种预测方法的预测效果和各自的特点。基于马尔可夫链理论直接对历史风电功率建立预测模型的方法,直接对风电功率进行短期、超短期的预测。针对风速序列的周期性和非平稳性,提出了基于小波变换和 LS-SVM 相结合的风电场风速预测模型。为了避免单一预测方法的局限性,提出了基于最小方差和熵值法的组合预测方法,提升了风电/光伏输出功率预测的精度。

(4) 介绍了基于一阶低通滤波原理,以及改进的滤波算法,提出基于模糊控制策略的储能系统容量优化配置方法,引入 Takagi-Sugeno 型多维模糊控制器根据风电功率波动情况、储能系统荷电状态 (SOC) 及充、放电状态等自适应调整一阶低通滤波器的时间常数,避免储能系统出现过充、过放现象。针对风能幅频特性的分析,采用小波包滤波方法对风能信号进行多尺度分解,结合储能设备的特点,构建了基于混合储能技术的风电功率平滑控制模型,提出了一种从频域角度进行风电功率平滑和混合储能系统功率分配的方法,研究了经验模态分解和自适应滤波理论相结合,同时根据储能系统 SOC 实时调整,从而确定电池和超级电容器储能系统的输出功率。选择目前较为先进的自适应控制算法——广义预测控制 (GPC) 作为整体储能系统的充、放电控制策略,与传统比例积分微分控制器 (PID) 控制策略进行对比。

(5) 提出了一种基于核密度估计法的储能系统容量配置方法。根据风电功率的预测误差分布确定储能系统容量,研究基于混合储能系统内部能量协调控制和多目标优化控制方法,进一步提升风电场跟踪目标功率出力的能力。

(6) 提出了一种基于储能设备寿命和全寿命周期成本的混合储能系统容量优化配置的方法。该方法在雨流计数法和等效循环寿命的基础上,计算出储能设备寿命。应用全寿命周期成本理论,分析储能系统在建设、运营和报废各个阶段的成本构成,以成本最小作为目标函数建立了数学模型。通过仿真算例得出了混合储能系统的容量和额定功率,实现了储能容量配置的目的。

(7) 研究用于削峰填谷的储能系统经济模型,该模型包含了储能系统参与配电网削峰填谷时所能获得的各种收益,以及需要投资的成本,研究了基于博弈论的储能系统电池选型及容量优化配置方法。该方法基于储能系统经济性模型的建立,采用博弈论的方法进行选型建模,模型中以经济性最优为目标函数,通过遗传算法进行优化求解,以求得到具有经济性的电池储能系统电池类型和相对应的最佳容量配置。以博弈论理论为基础进行的电池选型建模,可以有效地探寻多类型电池储能系统间的合作博弈情况,进而快速有效地实现储能系统削峰填谷电池类型选择,寻求最具经济性的容量配置结果。

(8) 基于合作博弈的理论,设计了合作博弈模式下的复合优化滤波结构。利用建立的数学模型找到了合作博弈的纳什均衡点,实现了对风电有功功率的平滑控制,并结合两种储能设备的特点,实现了两种储能方式间的能量分配。

风光储特性分析及储能技术

2.1 风电功率特性分析

国内某风电场 2014 年风能资源季节分布如图 2-1 所示。春季（2~4 月）是风电场风能资源最丰富的季节，大约占全年风能资源的 29%，冬季（11 月~下年 1 月）以全年 26% 的比例次之，而在夏季（5~7 月）和秋季（8~10 月）时，风电场的风能资源最少，分别只占全年风能资源的 23% 和 22%，此时可适当安排风机检修维护计划等。

从强风季节和弱风季节的角度分析，该风电场全年资源呈现较为明显的季节性。风电场风能资源月分布如图 2-2 所示。从图 2-2 可知，4、10 月是风电场风能资源最丰富的月份，分别占全年风能资源总量的 12% 和 11%，3、5、11、12 月也属于风能资源丰富的月份，而 8 月为风能资源最贫瘠的月份，仅占全年风能资源总量的 5%。由此可见，强风季节的月发电量几乎是弱风季节的一倍，呈现出明显的季节性。

风电场风速也是描述风电场资源情况的重要指标之一，它通常表示一年当中不同风速出现的概率。对同一时刻所有风力机处的风速取平均得到该时刻的风速值，该风电场 2014 年风速曲线及风速的概率分布如图 2-3 所示。

从图 2-3 可看出，风电场风力资源较为丰富，经计算得到全年平均风速达到了约 6m/s，且从概率分布图中可看出风速值大部分都分布在可以被风力发电机利用的风速段内（4~14m/s），以全年计算，实际可发电时间超过全年时间的 70%。

由于原始数据部分缺失，2、3 月只有 55 台风力机的数据，8 月只有 64 台的风力机数据。考虑到数据的有效可用，在计算全年风电场满负荷率及统计满负荷率概率分布时，2、3 月和 8 月的风电场的装机容量分别采用 55 台和 64 台的风力机容量进行计算。

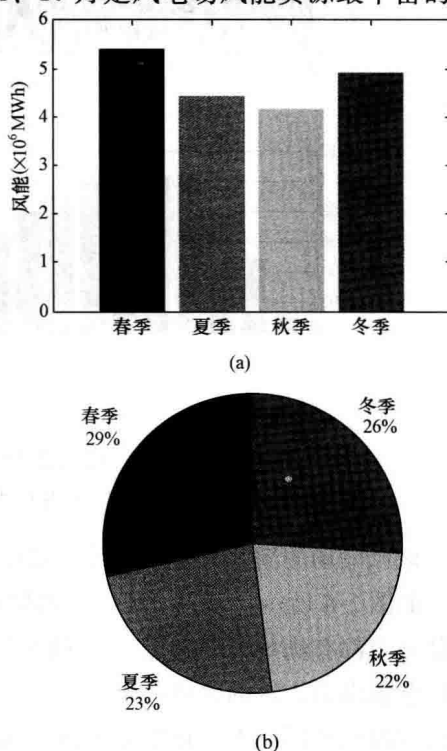


图 2-1 国内某风电场 2014 年风能资源季节分布

(a) 风电场 2014 年风能资源的各季节具体情况；
(b) 风电场 2014 年风能资源的各季节分布情况

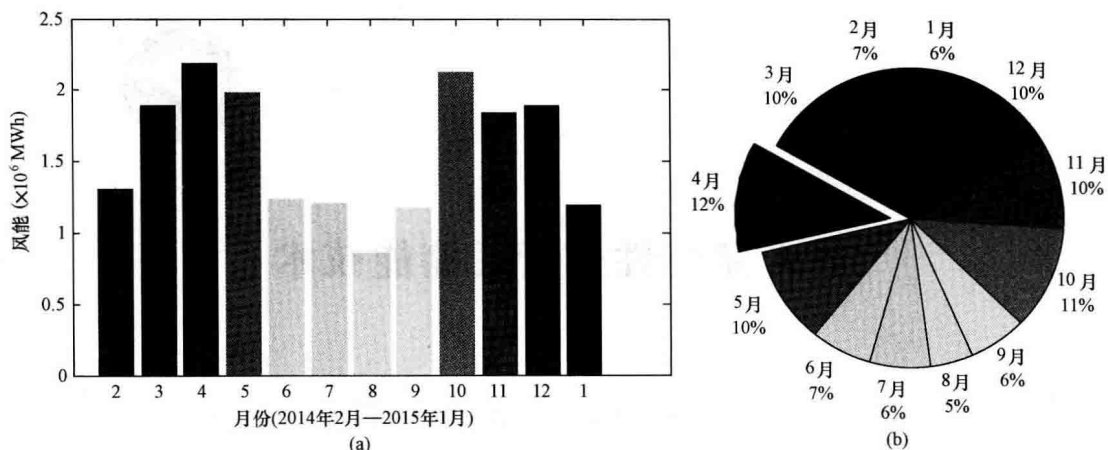


图 2-2 风电场风能资源月分布

(a) 风电场 2014 年风能资源的各月份具体情况；(b) 风电场 2014 年风能资源的各月份分布情况

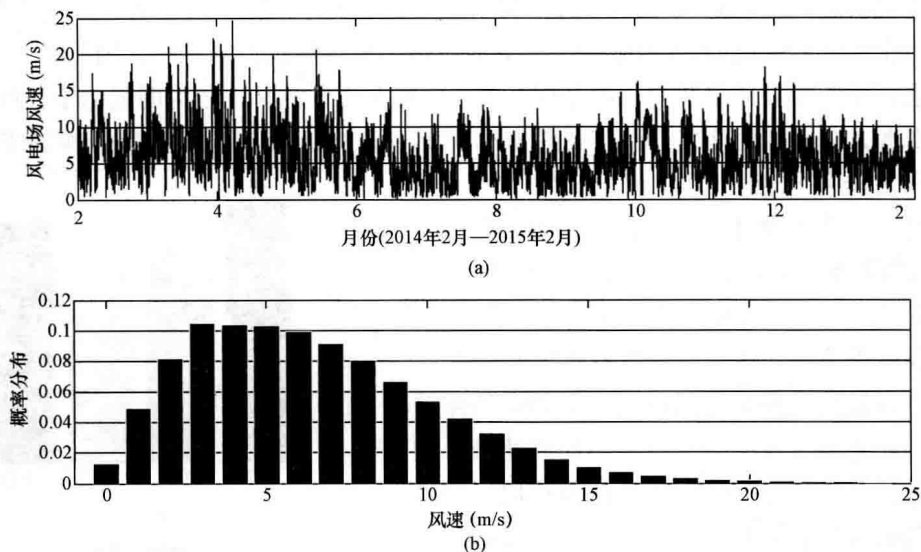


图 2-3 风电场 2014 年风速曲线及风速的概率分布

(a) 风电场 2014 年风速曲线分布；(b) 风电场 2014 年风速的概率分布

该风电场的满负荷率及统计满负荷率概率分布如图 2-4 所示。

如图 2-4 所示，若以 2014 年为研究时段，大部分时间内风电场出力水平较低。在大部分月内都有满负荷率超过 80% 的情况，同时也有风电场出力为零的情况，统计得到全年风电场出力为零的时间约 17 天，没有达到满出力的情况，最大满负荷率约为 86%。风电出力波动范围较大，在部分天内，风电出力有在接近零出力与装机容量 80% 之间变化的现象，此时系统调峰需求很大。

风电场一年内有功输出小于装机容量 20% 的概率超过 57%，大于装机容量 50% 的概率小于 20%，通过计算得到输出的平均有功功率约为额定功率的 23.6%，风电场满负荷率超过 70% 的时间约占全年时间的 8%。

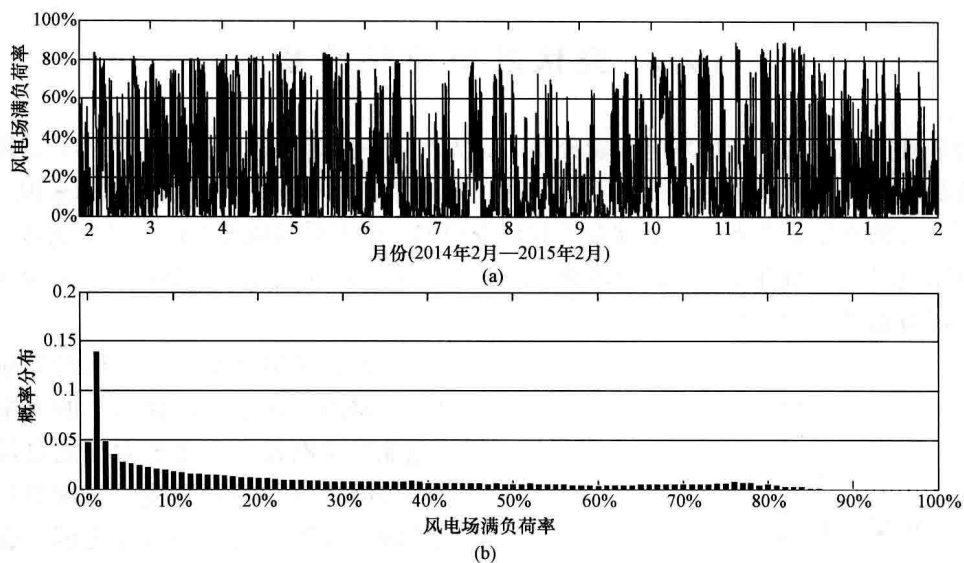


图 2-4 风电场满负荷率及统计满负荷率概率分布

(a) 风电场满负荷率分布情况；(b) 风电场满负荷率的概率分布

如图 2-5 所示, 由于风电场风力机惯性等因素的影响, 在 1min 内风电场有功输出变化很小, 将所有占其有功输出变化量小于 5% 的概率叠加在一起, 可知风电场有功输出变化量小于 5% 的概率为 99.58%, 有功输出变化量大于 5% 的概率为 0.42%。根据全年每分钟采样一次的频率, 可统计出风电场有功输出波动率大于 5% 的频数为 4800, 因此, 需要进行平抑风电功率波动。

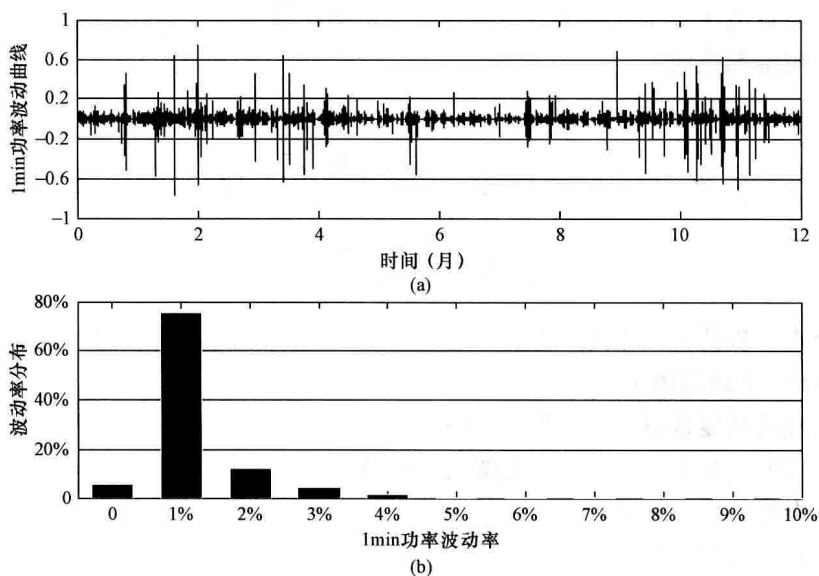


图 2-5 风电场 2014 年 12 个月输出有功功率 1min 功率波动率曲线及分布

(a) 风电场 2014 年 12 个月的 1min 功率波动曲线；(b) 1min 功率波动率分布



2.2 光伏发电特性分析

与常规能源相比,光伏发电有着分布广、无污染、能源巨大等优势。当然,太阳能也有其自身的缺陷,如能量密度低、不稳定性、效率低、成本较高等。然而总的来说,作为新能源,太阳能发电带来的利远远大于其自身的弊,因而受到世界各国的日益重视,并且随着科学技术的不断进步及光伏电池成本的不断降低、转换效率的不断提升,未来光伏发电的发展有着美好的前景。

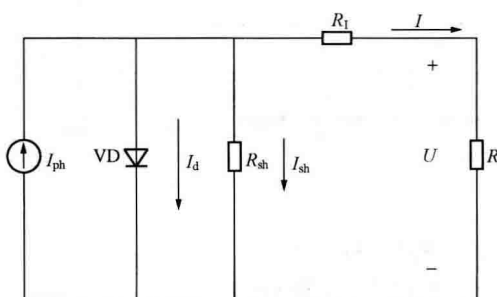


图 2-6 光伏电池等效电路

太阳能光伏电池是以光生伏特效应为理论基础,将照射在半导体材料上的太阳能转换为电能的发电设备。由于太阳能电池受到来自外界因素(如日照强度、温度等)多方面的影响,使得其具有调节能力弱、稳定性差等特点,然而,由于系统的电压和频率对太阳能电池的影响较小,所以可将太阳能光伏电池等效看作由一个电流源、非线性阻抗和负荷电阻组成,其等效电路如图 2-6 所示。

由光伏电池等效电路可得

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2-1)$$

式中 I ——光伏电池输出电流;

I_{ph} ——光生电流;

I_d ——负载电压 U 正向偏置于 PN 结引发的暗电流;

I_{sh} ——电池漏电流。

其中,

$$I_d = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} \quad (2-2)$$

$$I_{sh} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-3)$$

式中 q ——电子电荷,大小为 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$;

A ——PN 结理想因子;

k ——玻耳兹曼常量,大小为 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$;

I_0 ——反向饱和电流,通常数量级为 10^{-4}A ;

R_s 、 R_{sh} ——电池的串、并联电阻;

U ——负载电压, V;

T ——开尔文温度, K。

综合式 (2-1) ~ 式 (2-3) 得到光伏电池的输出电流-电压方程为

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(U + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-4)$$



不同温度下光伏电池电压-电流特性曲线如图 2-7 所示。

不同光照下光伏电池电压-电流特性曲线如图 2-8 所示。

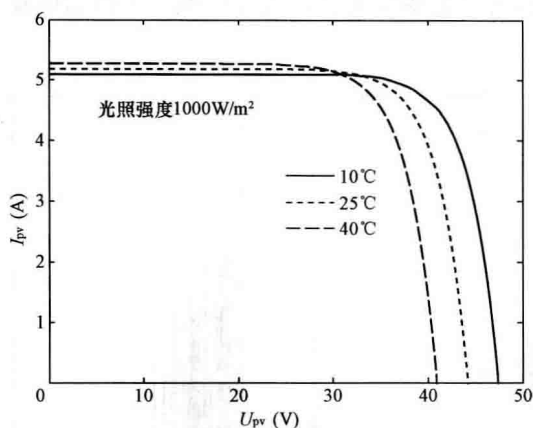


图 2-7 不同温度下光伏电池电压-电流特性曲线

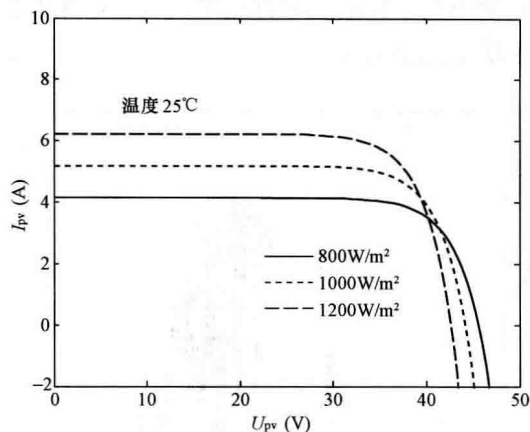


图 2-8 不同光照下光伏电池电压-电流特性曲线

由于受到光照、温度及不同最大功率追踪控制方式等多种因素的影响，光伏电池的功率输出特性具有强烈的非线性。从图 2-7 和图 2-8 中可以看出：①光伏电池的输出是直流电；②光伏电池的输出电压是随着光照、温度等环境因素的升高而有所增加，但增加的幅度并不是很大；③光伏电池输出的电流随着光照、温度的变化而变化。

不同温度下光伏电池电压-功率特性曲线如图 2-9 所示。

不同光照下光伏电池电压-功率特性曲线如图 2-10 所示。

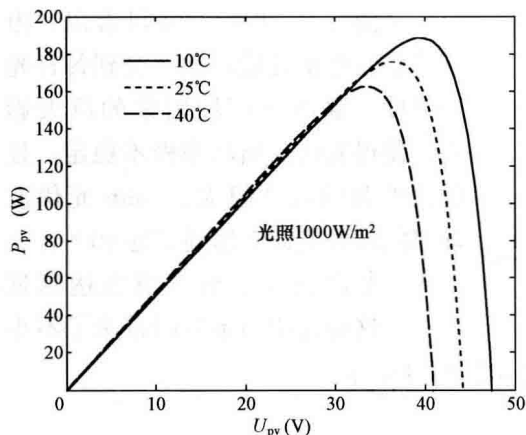


图 2-9 不同温度下光伏电池电压-功率特性曲线

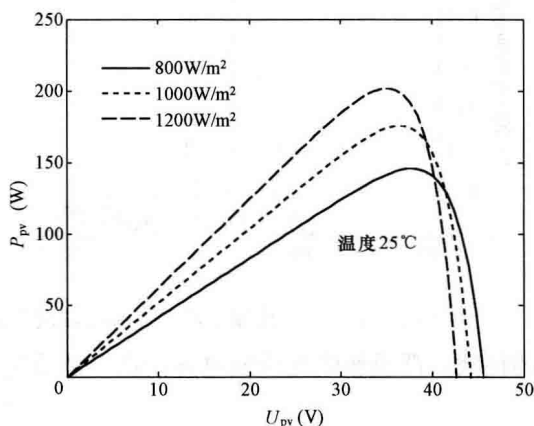


图 2-10 不同光照下光伏电池电压-功率特性曲线

从以上两幅图中可以明显看出，光伏电池有且仅有一个最大输出功率点，且最大输出功率点受光照强度和温度的影响而发生改变，并且在一定的光照强度和环境温度下，只有使其工作在特定的电压下，才能达到最大输出功率。

某天典型光伏发电系统输出功率曲线如图 2-11 所示。

图 2-11 是某天典型光伏发电系统实测功率数据仿真结果，该光伏发电系统额定功率