

# 文本复制检测报告单(全文标明引文)

№:ADBD2021R\_2021072315351220210723154735311182979052

检测时间:2021-07-23 15:47:35

检测文献: 011

作者: 养方式

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

学术论文联合比对库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

源代码库

CNKI大成编客-原创作品库

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2021-07-23

## 检测结果

去除本人文献复制比: 8.1%

跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 6.5%

总文字复制比: 8.1%

单篇最大文字复制比: 4.1% (019)

重复字数: [2826]

总段落数: [4]

总字数: [35081]

疑似段落数: [4]

单篇最大重复字数: [1451]

前部重合字数: [179]

疑似段落最大重合字数: [1586]

后部重合字数: [2647]

疑似段落最小重合字数: [394]



指 标: ☒ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

表 格: 0

公 式: 没有公式

疑似文字的图片: 0

脚注与尾注: 0

4.4%(437) 4.4%(437) 011\_第1部分 (总9939字)

4.3%(394) 4.3%(394) 011\_第2部分 (总9121字)

15.3%(1586) 15.3%(1586) 011\_第3部分 (总10339字)

7.2%(409) 7.2%(409) 011\_第4部分 (总5682字)



(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

疑似剽窃观点 (1)

011\_第2部分

1. 观察日负荷曲线可以发现负荷是动态实时高低变化的, 在变化的过程中可以看出高峰时段和低谷时段,

1. 011\_第1部分

总字数: 9939

相似文献列表

去除本人文献复制比: 4.4%(437)

文字复制比: 4.4%(437)

疑似剽窃观点: (0)

1 019

1.6% (155)

- 《学术论文联合比对库》- 2016-12-11

是否引证: 否

2	019	1.6% (155)
	- 《学术论文联合比对库》- 2016-12-13	是否引证：否
3	智能电网下需求响应机理及其短期负荷预测模型研究	1.4% (135)
	于道林(导师：张智晟) - 《青岛大学硕士论文》- 2017-05-20	是否引证：否
4	计及需求响应的用户侧光伏微电网储能配置方法	1.1% (106)
	周楠(导师：张建华) - 《华北电力大学(北京)硕士论文》- 2017-03-01	是否引证：否
5	微电网备用容量优化配置与经济调度研究, 徐传琳2. 27	1.0% (98)
	徐传琳 - 《学术论文联合比对库》- 2017-03-02	是否引证：否
6	考虑需求侧响应的主动配电网优化调度策略研究	0.5% (53)
	张栗楠(导师：李庚银) - 《华北电力大学(北京)硕士论文》- 2019-03-01	是否引证：否
7	基于储能装置不同接入方式的微电网控制策略与运行特性研究	0.3% (30)
	邵泓钦(导师：谭永东) - 《西南交通大学硕士论文》- 2013-06-01	是否引证：否

原文内容

专业硕士学位论文考虑需求响应的微电网储能容量优化配置研究

Optimal allocation of energy storage capacity for microgrids considering demand response

2021 年 08 月

国内图书分类号：TM761 学校代码：10079

国际图书分类号：612.3 密级：公开

专业硕士学位论文考虑需求响应的微电网储能容量优化配置研究

硕士研究生：

导师：

企业导师：

申请学位： 工程硕士

专业领域： 电气工程培养方式： 非全日制

所在学院： 电气与工程学院

答辩日期： 2021 年 8 月

授予学位单位： 华北电力大学

Classified Index: TM761

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Professional Master's Degree

Optimal allocation of energy storage capacity for microgrids considering demand response

Candidate:

Supervisor:

Enterprise Mentors:

Academic Degree Applied for: Master of Engineering

Speciality Field: Electrical engineering

Training Mode: Part-time

School : School of Electrical and Electronic Engineering

Date of Defence: August, 2021

Degree-Conferring-Institution: North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《 》，是本人在

导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。

对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本

声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名： 日期： 年月日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《 》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段

保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

学位论文全文

(TMLC)

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名： 日期： 年月日 导师签名： 日期： 年月日

摘要

微电网可有效实现可再生能源的就地消纳，减小可再生能源接入大电网时产生的冲击。为提高微电网中可再生能源消纳率，需要配置大容量的储能系统，对价格高昂的储能系统进行容量优化是降低微电网成本的关键部分；随着电力市场的逐步开放，利用需求响应可以改善负荷的特性降低储能容量配置，进一步优化微电网运行经济性与环保性。

本文首先介绍微电网典型结构；分别对光伏发电系统和储能系统进行建模研究，同时介绍了光伏发电出力特性的日规律与季节性规律特点及计算储能寿命的等效循环次数法，最后对微电网的能量流动、运行流程及能量管理系统三个方面进行分析研究。

通过需求响应分析，需求响应对微电网光伏消纳及储能配置等方面影响较大，有必要基于需求响应进行储能配置研究；本文采用隶属度函数和模糊聚类的方法进行峰谷时段划分，建立需求响应模型，该模型能够对峰谷分时电价进行量化处理，评估实施后需求侧变化量，有利于分析需求响应效果。根据微电网运行的评估指标，包括微电网年成本、微电网年收益和可再生能源消纳率；建立以提高微电网系统净利润和可再生能源消纳率作为目标的储能容量优化配置模型，考虑系统平衡、储能系统、联络线功率传输和用户购电成本的相关约束，采用带精英策略的非支配排序遗传算法求解模型。

根据算例结果分析可以得出：考虑需求响应下的储能配置容量得到了一定的优化，该模型同时能够在储能配置方面的经济性和环保性之间的权衡提供丰富的指导信息。项目研究成果将对微电网系统高比例消纳可再生能源及经济性、稳定性运行提供一定的理论支撑和方法指导。

关键词：微电网；需求响应；储能系统；非支配排序遗传算法 II

II

Abstract

Microgrids can effectively achieve the local consumption of renewable energy and reduce the impact of renewable energy when connected to the grid. In order to improve the consumption rate of renewable energy in microgrids, large-capacity energy storage systems are required. Capacity optimisation of expensive energy storage systems is a key part of microgrid cost reduction; with the gradual opening of the electricity market, demand response can be used to improve load characteristics and reduce energy storage capacity allocation, further optimising microgrid operation economy and environmental protection.

This paper firstly introduces the typical structure of microgrid; modeling research on PV power generation system and energy storage system respectively, and introduces the daily and seasonal law characteristics of PV power output characteristics and the equivalent cycle number method to calculate the energy storage life, and finally analyzes and studies three aspects of microgrid energy flow, operation process and energy management system.

Through the price demand response analysis, the demand response has a huge impact on the PV consumption and energy storage configuration of the microgrid, and it is necessary to conduct research on energy storage configuration based on the price demand response; this paper adopts the affiliation function and fuzzy clustering method for peak and valley time division, and establishes a price-based demand response model, which can quantify the peak and valley time division tariff and assess the amount of demand-side changes after implementation, which is conducive to the analysis of The demand response effect is also analysed. According to the evaluation indexes of microgrid operation, including the annual cost of microgrid, annual revenue of microgrid and renewable energy consumption rate; the model of optimal allocation of energy storage capacity with the objective of improving the net profit of microgrid system and renewable energy consumption rate is established, considering the constraints related to system balance, energy storage system, power transmission of contact line and power purchase cost of customers, and the model is solved by non-dominated ranking genetic algorithm with elite strategy.

Based on the analysis of the results, it can be concluded that the capacity of energy storage is optimised under the consideration of price demand response, and the model can provide rich guidance information on the trade-off between economic and

III

environmental aspects of energy storage deployment. The research results will provide theoretical support and methodological guidance for the high proportion of renewable energy consumption and economic and stable operation of microgrid systems.

Keywords: microgrid, demand response, energy-storage systems, NSGA-II

目录

摘要	?
Abstract	?
第 1 章绪论	
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.2 微电网及储能研究现状	
1.2.1 微电网研究现状	
1.2.2 储能系统研究现状	3
1.2.3 储能容量配置研究现状	4
1.3 需求响应研究现状	5
1.4 本课题的主要工作内容	
第 2 章微电网结构及运行特性分析	7
2.1 微电网典型结构	7
2.2 光伏发电模型及出力分析	7
2.2.1 光伏发电系统模型	7
2.2.2 光伏典型出力特性	9
2.3 储能系统分析	10
2.3.1 储能系统结构	10
2.3.2 储能电池模型	11
2.3.3 储能电池寿命	13
2.4 微电网运行特性分析	14
2.4.1 微电网能量流动方式	14
2.4.2 微电网运行流程	15
2.4.3 微电网能量管理系统	16
2.5 本章小结	17
第 3 章需求响应模型	18
3.1 需求响应影响分析	18
3.2 峰谷时段划分	19
3.3 电力需求价格弹性理论	22
3.4 基于电量电价弹性矩阵的需求响应模型	24
3.5 本章小结	27
第 4 章储能容量优化配置方法研究	28
4.1 微电网运行评价指标	28
4.1.1 微电网年总成本	28
4.1.2 微电网年收益	29
4.1.3 可再生能源消纳率	30
4.2 储能容量优化模型	31
4.2.1 目标函数	31
4.2.2 约束条件	31

4.2.3 运行策略	32
4.3 NSGA-II 遗传算法	33
4.3.1 帕累托最优解	33
4.3.2 NSGA-II 求解方法	33
4.3.3 算法流程图	34
4.4 算例验证	35
4.4.1 算例介绍	35
4.4.2 需求响应分析	36
4.4.3 储能容量优化配置分析	39
4.5 本章小结	41
第 5 章结论与展望	43
5.1 结论	43
5.2 展望	43
参考文献	45

## 第 1 章绪论

1.1 课题背景及研究的目的和意义能源与环境两大问题与我们每个人的生活都息息相关，是关乎我国经济发展和全民健康的关键问题，也是全世界各国关注的焦点。工业时代的能源革命使煤炭、石油等化石能源在生产生活得到了广泛应用，随着化石能源的消耗量急剧增加，世界范围内发生过多次石油危机，能源匮乏甚至导致多起战争，全球范围产生大量能源问题和供求矛盾。由于传统的化石能源具有不可持续性和有限性的特点，世界各国已经将焦点转向太阳能、风能等可再生能源；与此同时化石能源大量的消耗也导致了全球气候变暖和海平面上升等环境问题，极大地威胁全球生态系统的平衡与稳定，化石能源的过度消耗造成的环境问题已经引起了大众的普遍关注。我国近年来采取多种措施治理空气污染问题，但全国各地在冬季供暖期间依然频繁出现雾霾天，彻底改善气候环境还需要从改变能源结构的方面入手，才能从根本上解决问题。

与化石能源不同，自然界中的风能、太阳能等可再生能源具有分布广泛、取之不尽、用之不竭的特点，各国都开始深入研究用于替代传统化石能源的可再生能源方案，我国目前已经建设完成多个大规模的风电基地及光伏电站项目。可再生能源发电出力受天气条件的影响很大，其输出功率具有随机性、波动性和不可控等特点，导致可再生能源规模化大量接入时对电力系统的正常运行造成巨大的电量冲击，严重威胁了电力系统的稳定性，尤其是当可再生能源的渗透率超过一定的极限时，电力系统无法为可再生能源的随机性、波动性提供足够的旋转备用，

造成了大量的弃风、弃光的现象，最终导致可再生能源规模化应用的经济效益低下、资源浪费严重；为解决这一矛盾，提高可再生能源的经济效益和环境效益，

以分布式可再生能源为主体的微电网技术应运而生，成为解决大量分布式可再生能源接入电力系统的一种重要的技术手段。微电网将分布式可再生能源汇集并通过储能系统和控制系统协调控制实现小范围区域自治，提高可再生能源接入后电网的稳定性[1]，减缓电网遭受可再生能源接入所产生的冲击。

微电网技术能够有效提高可再生能源的消纳率，减少化石能源对环境的污染，产生较高的环境效益；促进电网安全稳定吸纳可再生能源，缓解可再生能源不可控性与传统大电网可控性之间的矛盾；微电网通过与配电网有效连接可以满足局部负荷增长过快导致的用电需求[2]，降低配网结构成本及促进电网结构更加合理化；通过储能系统充放电过程进行电量转移，微电网电价制定策略灵活性、

自由度较高，具有较强的市场竞争能力，推动电力市场多元化发展。 2

储能系统是微电网中一种能量可以进行双向流动的装置，既可以看做是一个负荷，也可以看做是一个电源。它是由不同类型的储能元件和双向储能变流器及储能控制管理系统组成，能够根据自身的荷电状态及控制策略有选择地存储和释放能量，具有很高的灵活性和可控性[3]。通过对储能的充放电控制，可以将能量暂时存储，根据需要再进行能量释放，弥补常规电能不能存储的缺点，使电能具有时间转移的能力；储能系统还能够进行能量的快速转换，它是应对可再生能源随机波动出力有效解决办法，不但改善微电网的电能质量，还可以提高系统稳定性。储能系统技术目前处于高速发展阶段，受技术发展、工艺要求、材料成本等多方面因素限制，储能系统的工程费用占微电网工程总成本的比例很高[4]，因此对储能容量进行优化，降低储能系统成本是现阶段的研究热点之一。

传统通过控制火电机组出力与负荷曲线相匹配，面对可再生能源高渗透率的微电网，仅仅依靠发电侧来确保微电网安全稳



定运行可实施性较差；微电网为保持发电侧和需求侧功率实时平衡而配置大量价格高昂的储能，除了在需求侧引入储能系统之外，还可以通过需求响应(demand response, DR)来引导和调整用户侧的固有电力消费模式，缩小负荷曲线与可再生能源出力曲线在时序上的较大差异，两条曲线贴近可以进一步提高可再生能源消纳率和降低储能成本。综上，需求响应有助于微电网消纳可再生能源及降低建设成本，因此有必要在储能配置研究中考虑需求响应的因素。本文针对并网型光储微电网，考虑需求响应影响进行储能容量优化配置进行研究。

## 1.2 微电网及储能研究现状

1.2.1 微电网研究现状微电网是分布式可再生能源发电的小型系统，通过储能系统平衡可再生能源出力波动，采用控制系统实现不同发电单元与储能单元的协调和保护功能，该发电系统能够实现自动控制、小区域平衡与协调配合等功能。微电网可以实现可再生能源就地消纳，降低能源输送损耗，可以看做是智能电网一种含有电源的特殊表现形式。微电网的能量来源以风能和太阳能为主，因此单位电量分摊发电成本较低；微电网既可以并网运行也可以孤网运行，并网运行时可以依靠大电网提高微电网系统稳定性，孤网运行时可以隔离大电网故障，在电网故障时可以不间断重要用户供电，在偏远地区可用于独立供电，由于促进能源的就地消纳，满足当地用电需求，缩短了能源输送通道，同时节约了输电线路的建设费用[5]。

微电网中可再生能源发电过程主要通过逆变器电力电子装置实现，极大的降低了系统惯性[6]；同时可再生能源出力具有波动性、随机性和不可控性，这两方面都对微电网稳定运行都带来巨大的挑战，目前关于光伏和风力发电预测已有 3

大量相关研究，使得发电预测的准确性得到了大幅度提高，降低了发电侧的随机性；由于可再生能源具有零能源成本、零污染的优势，为了充分发挥它的优势，

提高能源利用率，需要对能源进行合理的存储和利用，储能系统作为能量转移存储的有效解决方式之一应运而生，利用储能自身的充电放电的可控性获得能量的时间平移，使其既可以作为一种特殊的电源，也可以作为一种负荷，可以提高微电网运行的灵活性和稳定性，促进微电网的进一步发展。从负荷侧的角度，电动汽车、空调等可控、可转移负荷的范围及种类逐渐增加，产生了针对需求响应的多角度研究分析，利用需求响应的影响进行微电网研究也逐步引起了大家的关注；传统电网中可控的“源”变为不可预测的“源”，不可控的“荷”变成了可控的“荷”，通过调动需求侧的负荷参与微电网的运行，使其更加稳定和高效[7]。

随着电网中可再生能源接入量不断增加，可再生能源接入对电网的冲击性问题越来越突出，传统电网运行方式及相应保护控制设备配置已经不能完全解决可再生能源接入所引起的新问题，利用微电网就地消纳可再生能源的特点，可以有效缓解未来可预见的小容量、分散式和大规模的可再生能源的冲击，储能系统是微电网实现可再生能源消纳的关键。虽然微电网对可再生能源消纳有很大优势，

但由于储能系统高成本的制约，投资收益较低，限制了微电网的迅速发展；随着需求响应的研究深入，有必要研究如何在需求响应影响下深度优化储能系统容量，降低储能成本，提高系统的经济性。

1.2.2 储能系统研究现状美国能源部针对储能系统制订相关法案，如第 755 号令和 784 号令法案规定了储能技术应用和使用方式等要求细则，同时也对储能项目的研究提供了大量的资金支持，目前其储能研究和设备生产份额占全球的一半左右。其他国家对于储能系统研究也有了很大的发展，其中欧盟的战略规划要求在 10 年内突破储能技术

[8]，德国已完成 20 个储能示范项目，法国的锂离子电池的设计、制造等技术处于全球领先地位，日本开发了第一个大容量可以移动的储能模块，容量为

0.4kWh，功率为 1kW。综上所述，储能技术作为一个新兴产业，正在突破原有的技术瓶颈，以飞快的速度不断发展，在各国政府的政策和资金双重支持下，独立储能系统项目、微电网中储能配置项目、新型示范项目和商业项目都在不断增加。当前是我国储能技术迅猛发展阶段，示范项目已经大量落地实施，在项目中实现了储能的电网备用、平抑功率、维持系统稳定等各项功能，同时在项目的应用过程中积累一定的运行经验和数据[9]。在现阶段研究及实践中，储能系统应用范围主要体现在以下几个方面：

(1) 小容量、分散式、随机性和间歇性的可再生能源进行大规模并网，并网容量的急速增长导致电网安全稳定运行问题突出，产生的弃风弃光现象严重， 4

通过配置储能系统极大减少弃风弃光量，大幅度提高可再生能源消纳率；

(2) 我国能源多分布于偏远地区且具有分散性的特点，电源与用电需求之间需要架设长距离高电压输电线路[10]，为尽量将能源就地消纳，降低输电线路损耗，可以借助储能系统来提升能源利用率；

(3) 储能在负荷侧可以进行灵活可控的支撑，降低电网电压损耗，可以提供不同质量水平的电能，用户可以自己定制供电标准和要求，电价制定策略根据市场需求进行灵活调整[11]。

储能在发电、输电、配电各环节都有大量的应用，如传统发电环节：可对传统的发电系统进行频率调节，参与火力发电的一次、二次调频，根据政策获得相应调频补贴收益[12]；可以进行能量存储，在功率缺额时提供功率支撑。可再生能源发电环节：利用储能充放电的能力，将过剩能源存储起来，在负荷侧需求增大时供应，降低可再生能源波动性和随机性干扰；储能提供黑启动功能，带动孤立运行的微电网或其他发电单元启动及与主网同步[13]。输配电环节：储能可以降低配电网反向潮流的负面影响以及电力传输通道过载的风险，减少负荷的高峰波动带来的电力需求改造和限电策略的情况，可以降低输电线路的配置成本[14]。配电侧需求缓解：储能系统可进行能量时空转移，根据电价的峰谷差等优惠政策获取收益，根据用户要求进行电能质量标准匹配，提升供电可靠性及电能品质，保证重要设备不间断供电，提高应对突发故障状况的能力[15]。

1.2.3 储能容量配置研究现状从总成本、总投资、净现值及等年值等直接经济指标进行储能容量配置优化：

文献[16]通过建立微电网的结构，从经济性角度进行分析，以微电网系统总成本最小为目标函数，采用 HOMER 软件求解，获得最优的储能容量方案。文献[17]

以储能系统的一次性总投资最小作为目标函数，运用粒子群算法进行储能系统容量的优化配置。文献[18]通过对微电网系统建模，以总净现值成本最小作为目标函数，采用全生命周期成本经济模型，应用 HOMER Pro 软件进行优化求解，最后得到最优的容量配置方案。文献[19]以风光储微电网为研究对象，以系统总成本的等年值投资费用最小做为目标函数，在满足运行约束的条件下，采用粒子群优化算法获得储能容量的最优配置。

从微电网系统能够抵抗外界干扰的角度进行储能容量配置优化的研究；从改善支撑电压的角度进行优化；从复合储能协调控制的角度，补偿功率并进行母线电压调节。文献[20]通过负荷的具体特性如负荷率、负荷变化和峰谷差等作为优化策略，通

过目标函数的求解进行储能的配置优化。文献以保持电网电压的稳定性为求解目标，获得最有利的储能配置；采用混合整数线性规划（LP）算法，以最小化电压偏差为目标函数的最优配置，提高了电网电压的稳定性。文献[21]通 5

过在配电网中配置储能系统，使其发生故障时进入孤岛状态时，通过储能系统提高孤岛运行的成功率及配电网的可靠性。从储能参与电力市场，提供辅助服务等多角度进行分析，参与系统调频、调峰，进行低储高发盈利，削减输电成本，相关政策补贴，延缓配网升级改造等：

文献[22]分析储能系统参与电网一次调频特性，提出荷电状态与最大频率偏差相结合的综合控制策略。文献[23]在光储系统中，通过逆变器的空闲容量和储能系统的闲置容量参与到电网侧的调频和调峰，提出了针对电网的调频和调峰的综合控制策略。文献[24]以储能安装、线路扩展、系统维护运行成本最低及输电成本的总和最小为函数目标，结合潮流、功率、容量等约束条件，进行系统的重新优化。文献[25]基于系统功率平衡及储能提供电网的辅助服务，结合相关补贴政策，

提出了技术性与经济性的结合的综合目标，进行微电网储能容量的综合优化。  
1.3 需求响应研究现状需求响应指的是通过价格或制定激励机制引导用户改变用电模式，进而改变负荷曲线，参与到微网的需求侧运行管理中，实现需求侧资源的合理部署[26]。传统的电力系统中，供应侧资源根据负荷的变化进行调整，来保证供需的实时平衡；

微电网中电源侧具有不可控性，需求响应则可以从负荷侧调整与电源侧的匹配性，通过源、网、荷的有机互动使微电网经济稳定运行。根据电力终端用户所采取的响应方式不同，将需求响应分为两类，一类是基于价格的需求响应，另一类是基于激励方式的需求响应[27]。

基于价格的需求响应是以经济学的价格理论作为基础，通过价格的分类制定，依据经济学原理及消费的心理机制，引导电力用户改变用电策略，从而改变负荷曲线，通过将高电价时段的负荷，在不影响用户正常的的生活的前提下转移到低电价时段，最终达到降低综合成本的效果。需求响应电价策略主要有分时电价、实时电价和尖峰电价，其中分时电价是通过区分不同的时间来制定不同的价格的一种价格策略；实时电价策略的基础是现货价格理论，该电价体系中的难点是确定更新周期的大小；尖峰电价是针对尖峰时段进行高电价的制定策略，主要是用于对尖端负荷的控制，通常尖峰电价不是单独存在的，而是在分时电价的基础上进行叠加。不同于价格的引导作用，基于激励的需求响应主要是通过提前制定相关政策或直接签订合同，对用户的用电行为进行强有力的约束，主要目标是让用户按照规定的策略进行响应来削减或转移负荷来保证系统的供电可靠性和经济型。主要的激励方式如直接负荷控制、可中断负荷控制和需求侧竞价等方式。

一般费用可以独立设定，也可以叠加在其他电价之上或者按照转移负荷赔偿的方式。  
目前自动需求响应是需求响应机制的新发展方向，完全依赖自动化和信息技术  
术将需求响应纳入实时调度范畴，可以更充分的调动负荷侧的潜力，极大调高可再生能源大规模接入后系统稳定运行能力[28]。实现自动需求响应需要具备智能用电载体、信息实时获取装置和智能控制装置等设备作为硬件基础，利用高级测量体系和智能电表等提供技术支撑。由于目前动需求响应实施条件不够充足，而峰谷分时电价已经处于实施阶段，本文通过峰谷分时电价进行储能容量优化，使用电量电价的弹性矩阵进行具体分析。该理论能够对峰谷分时电价引起的用户侧响应进行量化处理，进而可以评估具体的实施效果。

1.4 本课题的主要研究内容基于上述研究成果分析，本课题主要研究并网型光储微电网储能容量的配置，考虑需求侧具有可调负荷的潜力，充分调动价格型需求响应参与微电网的经济运行，在此基础上建立储能容量优化配置模型。

本文各章节的主要工作内容如下：  
第一章：主要介绍微电网、储能系统及需求响应研究现状，提出本课题的主要研究内容。  
第二章：介绍微电网典型结构，建立光伏发电系统的数学模型，研究光伏出力  
力的季节性规律和日出力规律；分析储能系统的结构，建立储能电池模型和使用寿命计算公式；研究微电网能量流动方式及运行流程，通过微电网能量管理系统实现各部分之间协调控制。  
第三章：分析需求响应对光伏消纳、储能配置及运行方式的影响。介绍划分  
峰谷时段的理论及方法，根据电力需求价格弹性理论建立基于电量电价弹性矩阵的需求响应模型，该模型可以量化电价激励引起的用户负荷侧的响应。  
第四章：确定微电网运行评价指标，包括微电网年运行成本、微电网年运行  
收益和微电网光伏消纳率；建立储能容量优化配置的微电网系统净利润和可再生能源消纳率双目标优化模型；介绍 NSGA-II 遗传算法及其流程图；通过微电网算例对考虑需求响应下储能容量配置进行分析，结果验证了该模型的有效性。

指 标		
疑似剽窃文字表述		
1. 储能系统、联络线功率传输和用户购电成本的相关约束，采用带精英策略的非支配排序遗传算法求解模型。		
2. This paper firstly introduces the typical structure of microgrid;		
3. 峰谷分时电价进行储能容量优化，使用电量电价的弹性矩阵进行具体分析。该理论能够对峰谷分时电价		
2. 011_第2部分		总字数：9121
相似文献列表		
去除本人文献复制比：4.3%(394) 文字复制比：4.3%(394) 疑似剽窃观点：(1)		
1	微电网能量管理系统研究综述 吴雄;王秀丽;刘世民;祝振鹏;刘春阳;段杰;侯菲; - 《电力自动化设备》- 2014-10-10	1.7% (156) 是否引证：否
2		1.6% (142)



	计及电池储能寿命损耗的风光储电站储能优化配置	
	王磊;冯斌;王昭;范丽霞;杨攀峰; - 《电力科学与工程》 - 2019-05-28	是否引证: 是
3	微电网多微源协调控制策略研究	0.5% (45)
	詹俊男(导师: 白迪;狄跃斌) - 《沈阳工程学院硕士论文》 - 2019-12-20	是否引证: 否
4	计及分布式光伏发电的分时电价优化研究	0.5% (44)
	李沐珂(导师: 张靠社) - 《西安理工大学硕士论文》 - 2018-06-30	是否引证: 否
5	光(伏)储(能)一体发电系统的储能配置和能量管理策略研究	0.4% (37)
	傅金洲(导师: 孙鸣) - 《合肥工业大学硕士论文》 - 2018-03-01	是否引证: 否

原文内容

第五章：总结本文的研究成果，并对微电网储能容量优化配置及需求响应的发展进行展望。 7

第 2 章微电网结构及运行特性分析

2.1 微电网典型结构微电网的典型结构如图 2-1 所示，微电网系统主要包括光伏发电阵列、储能装置、储能变流器、逆变器、直流负载、交流负载等部分，系统通过并网开关与电网相连。光伏型微电网需要并网运行来弥补光伏夜间无法出力的缺点，因此微电网正常运行时为并网运行状态，当大电网出现故障或微电网内部故障还可以孤网运行，从而有效隔离故障，提高电网安全稳定运行能力。

图 2-1 微电网典型结构图

2.2 光伏发电模型及出力分析

2.2.1 光伏发电系统模型光伏发电系统主要由太阳能电池、功率控制器和电压逆变器三部分组成；其核心功能是太阳能电池对于光能的转换，主要的工作原理是光生伏打效应，即半导体材料在收到太阳能辐射后，由于材料具有 PN 结特性，对材料内部的电子和空穴进行重新排列形成新的内建电场。目前光伏组件的主要材料是晶体硅，其中单晶硅较多晶硅价格较高，转化率也相对较高。

为了更准确的描述光伏发电的输出功率，需要选择一个标准状态作为基准点，再叠加非标准状态下环境因素的影响，即先选定太阳辐射强度、表面环境温度、光学质量标准值，这些条件统称为标准的额定条件，再根据现场实际情况计算当前时刻的光伏输出功率[29]。通过该标准值与实际所处环境的光照辐射强度、周围的环境温度得到函数关系式如下：
 8

$$P_{pv} = P_{STC} \frac{G}{G_{STC}} [1 - K(T_c - T_{STC})] \quad (2-1)$$

式中  $P_{pv}$  —— 光伏出力(kW)；  
 $P_{STC}$  —— 标准额定条件下的光伏出力(kW)；  
 $G$  —— 作点下的辐射强度(W/m²)；  
 $G_{STC}$  —— 标准额定条件下的辐射强度(W/m²)；  
 $K$  —— 功率温度系数(％/℃)；  
 $T_c$  —— 运行工况条件下表面环境温度；  
 $T_{STC}$  —— 额定工况下的表面环境温度。

光伏发电系统输出功率受太阳辐射强度因素的影响最大，太阳辐射强度可以通过气象监测数据及分布函数模型刻画。由于辐射强度具有随机性和波动性的特点，在一定时间间隔内，辐射强度的分布特点可近似看成 Beta 分布，其与辐射强度  $G$  相关概率密度函数可表示为  $f(G)$  如下：
 1

$$f(G) = \frac{1}{G_{max}} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G^{\alpha-1} (G_{max} - G)^{\beta-1} \quad (2-2)$$

式中  $G_{max}$  —— 一定时间间隔内辐射强度最大值；  
 $\alpha$  —— Beta 分布的形状参数；  
 $\beta$  —— Beta 分布的形状参数。

分布形状参数可以的通过计算得到，具体公式如下：
 2

$$\alpha = \frac{G_{max} - \bar{G}}{\bar{G}^2} \left( \frac{G_{max}^2}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (2-3)$$

$$\beta = \frac{G_{max} - \bar{G}}{\bar{G}} \left( \frac{G_{max}^2}{\sigma^2} - 1 \right) - \alpha \quad (2-4)$$



G  
GG  
G  
G ) (2-3)

式中  $\mu G$ —— 时间段内的光照平均值;

$\sigma G$ —— 时间段内的光照标准差。

目前光伏发电系统常采用最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking,

MPPT)技术。具体的跟踪方法有电导增量、恒定电压和扰动观察等方法。其中扰动观察法最为实用,主要工作内容是:在光伏电池端口加扰动量,观察功率变化趋势来确定下一步所需施加扰动量的方向,通过循环多次后将光伏电池的工作点稳定于最大功率点附近。

2.2.2 光伏典型出力特性由于光照辐射受自然客观规律影响,光伏发电具有典型的季节性规律特点和典型日规律性特点,具体的分析如下: 9

(1) 季节性规律输出特性分析光伏电池的出力特性既和地理位置有关,也和春夏秋冬四季有关,在某一固定地理位置进行光伏出力特性分析,可以分为四季不同的曲线进行分析,因为春秋的共性较多,此处只选择了冬季、春季和夏季的典型日的特性曲线进行对比分析。

如图 2-2 所示,因为日照受季节性影响比较大,不同季节日出时刻与日落时刻都有一个稳定的波动范围,光伏在日落之后和日出之前零出力,从典型日的光伏曲线可以总结出夏季的日照时间最多,比冬季多出共计 4 个小时,在典型日早上和晚上相比冬季分别延长 2 个小时的光照时间,出力明显更大。根据季节性的特点,一般可以通过寻找当地的日出时刻和日落时刻的气候资料,通过分别加

0.5h 来计算日出时刻和日落时刻。因为当地的日出、日落时刻与地理位置有关,

波动范围较小,比较稳定,所以光伏曲线在季节性规律明显,具有更可靠的预测值。

图 2-2 季节典型日光伏出力对比曲线[30]

(2) 日规律输出特性分析光伏出力的季节性规律明显,在确定的地理位置下有基本固定的日出日落时间,但是大气层的状态中云层过厚会极大削减太阳的辐照度,云层减少将会获得很高的辐射能量。当处于阴雨天时,太阳辐射量急剧降低,光伏出力也是骤降接近于零,单独依靠光伏是无法对负荷进行持续的供能,因此分析典型天气下光伏出力的特性。

从图 2-3 可以看出晴天接收到的太阳辐射能量最大,光伏电池能发出的功率最大,波动性也较大,波动范围最大,形成一个近似的半圆形,从最低的零出力到最大出力;多云天气的光伏输出功率相比晴夭折半,虽然出力降低,但是波动范围也明显减少,在一定范围内,出力比较稳定;阴雨天的光伏出力最低,基本靠近零值,波动依然存在,此时对微电网的支撑性能最差;综合分析日规律明显, 10

其中阴雨天的占比对评估光伏系统的稳定性具有巨大的价值。

图 2-3 不同天气下典型日出力曲线[30]

## 2.3 储能系统分析

2.3.1 储能系统结构储能系统的主要功能是进行能量的吸收和释放,将能量穿越时间进行转移。

根据微电网储能部分目前的研究现状,从实际工程中广泛应用的成熟产品类型中,选取锂电池储能元件进行分析,锂电池是能量型电池的代表,对其基本原理和模型进行研究分析,具有一定的实际意义和价值[31]。储能系统结构包含以下几个部分:储能电池、电池管理系统、控制单元和储能换流器。储能电池经过串并联后经双向换流器接入电网,为了实现储能系统利用的最大化,通过电池管理系统和系统控制策略进行综合控制,通过控制换流器来调节储能电池系统的有功、

无功功率输出,储能电池系统结构如图 2-4 所示。

图 2-4 储能电池系统结构图

2.3.2 储能电池模型锂电池的工作原理是基于化学反应的理论,工作过程中发生电能与化学能相互转换。锂电池工作包含充电和放电两个过程,电池将电能通过化学反应形成自 11

身活性物质,作为化学能的一种形式储存起来;由于活性物质在充电和放电的过程中会产生相应的损耗,电池的转换效率会随转换过程次数增加而不断降低,最终充电、放电都无法达到容量的最低要求而报废。

锂电池的基本指标主要电池容量、等效内阻,开路电压和荷电状态。其中电池容量表征电池存储能量最大能力,等效内阻描述电池内部消耗能量大小,开路电压表示电池的电压特性,荷电状态(SOC)指标表示电池现有的能量与额定容量比值,该指标可以清晰的表示出电池当前的能量状态,描述出电池下一状态可以进行的能量的增量程度和能量的可降低水平,描述电池对能量可吸收能力和可释放能力。荷电状态随着电池运行状态不断发生变化,而且具有明显的自相关性,

每个状态下的 SOC 值还会影响电池的端口电压的稳定性,对锂电池内部的阻抗值也有影响,通过研究分析他们之间的函数关系,可以找到最佳的工作状态区间,

这个区间常设定在 0.2 到 0.9 之间,设定的区域不能过高或过低,因为两端的极限情况会导致内阻偏大和电池两端电压不够稳定;如果设定的区域过小会降低电池能量吸收和释放的灵活性,不利于在随机性较大场合下储能系统作用得到充分发挥[32]。锂电池的端电压、内阻与 SOC 的关系曲线如图 2-5、图 2-6 所示。

图 2-5 锂电池端电压与 SOC 的关系曲线图 2-6 锂电池内阻和 SOC 的关系曲线 12

锂电池的等效模型如图 2-7 所示:

图 2-7 锂电池等效模型根据锂电池等效模型,锂电池的开路端电压与锂电池能量的函数关系式如下:

放电时:

tBQ

t

t

t

Ble

$Q$   
 $QKQ$   
 $Q$   
 $QKIUU \quad 0(2-4)$   
 $IREV \quad (2-5)$   
 $t$   
 $tt \quad EE \quad Q)1() \quad (2-6)$

充电时:

$tBQ$   
 $t$   
 $t$   
 $t$   
 $B I_e$   
 $Q$   
 $QKQ$   
 $Q$   
 $QKIUU \quad 0(2-7)$   
 $IREV \quad (2-8)$   
 $t$   
 $t)1() (Q_t \quad EE \quad (2-9)$

其中:

$I_Q \quad \Delta t t \quad (2-10)$   
 $Q$   
 $t \quad E t \quad SOC)() \quad (2-11)$   
 式中  $U$  —— 开路电压 (V);  
 $U_0$  —— 理想电压 (V);  
 $K$  —— 极化系数;  
 $Q$  —— 电池容量;  
 $Q_t$  —— 电池电量的变化量; 13  
 $B$  —— 常数系数;  
 $I$  —— 电池的电流 (A);  
 $E(t)$  ——  $t$  时刻的剩余容量;  
 $E(t-1)$  ——  $t-1$  时刻的剩余容量;  
 $SOC(t)$  —— 锂电池  $t$  时刻的荷电状态;  
 $V$  —— 锂电池的端电压 (V);  
 $I^*$  —— 锂电池滤波后的电流 (A);  
 $R$  —— 锂电池的内电阻。

2.3.3 储能电池寿命 储能电池的工作寿命与工作状态密切相关, 影响寿命的因素中最关键的是充放电循环次数, 而放电深度 (Depth of Discharge, DOD) 是影响循环次数的关键性因素, 其主要关系为: DOD 的值越大, 循环次数的最大值越低, 对应工作寿命就越短。一般工程上采用等效循环次数 [33] 法对储能电池的寿命进行测算评估。该

计算方法将 不同 DOD 所对应的最大循环次数  $N$  折算到满充满放条件下 (即  $DOD=1$  时) 的等效循环次数  $N^*$  并累计加和, 实际工作寿命根据  $DOD=1$  时的最大循环次数  $N$  反推计算得出。一个完整的充放电循环包含两个半周期: 充电半周期 ( $SOC_a \rightarrow SOC_b$ ) 和放电半周期 ( $SOC_b \rightarrow SOC_a$ ), 其中  $0 \leq SOC_a \neq SOC_b \leq 1$ 。DOD

计算公式如下:

$ab$   
 $SOC SOC DOD a$   
 $b \quad (2-12)$   
 定义储能电池的第  $K$  次循环时等效循环系数  $\delta DOD_k$ :  
 $k$   
 $NDOD$   
 $N)1($   
 $k DOD \quad (2-13)$

式中  $N(1)$  —— 放电深度  $DOD=1$  所对应的最大循环次数;  
 $NDOD_k$  —— 为第  $K$  次循环时该放电深度所对应的最大循环次数。

根据电池的实际 SOC 变化曲线图, 工程上通常采用雨流计数法统计和提取每个实际循环周期, 若总循环周期数量为  $n$ , 对应  $DOD_1, DOD_2, \dots, DOD_n$ , 则该时长内的等效循环次数  $N^*$  为:

$n$   
 $k$   
 $N \quad 1$   
 $DOD_k * \quad (2-14)$

定义电池寿命损耗系数  $\varepsilon$  :

$N$

$N$

$N)1( * (2-15) 14$

## 2.4 微电网运行特性分析

2.4.1 微电网能量流动方式如图 2-8 所示,微电网主要由光伏、电网、储能和负荷四部分组成,其中光伏和电网两部分为微电网能量的供给来源,其中电网侧还同时具有提供电能和接纳可再生能源两种能力;储能与负荷两部分可做为能源的消纳侧,其中储能具有充放电能力,使储能的能量流动具有双向性,研究这四部分之间的能源流动方式,

有利于分析微电网的运行方式。

光伏组件系统是微电网发电部分的核心,是微电网内部电力供给的主要来源,由于光伏能源的波动性、随机性较大,从光伏的日出力特性可以看出,电源的出力峰谷差较大,需要用储能系统和电网系统进行相应的系统稳定性支撑。光伏能源的输出主要有三个方向,一是负荷侧,二是储能侧,三是电网侧;光伏的出力首先用于微电网内部消纳,在满足负荷需求的前提下,多余的电量通过储能系统进行存储,此时,如果储能系统处于充满状态,或者储能系统充满后仍然有剩余的光伏出力,则可以向电网送电,此种能量传输方式可以有效的减少弃光量,

提高光伏的消纳率。

电网部分是并网型微电网可靠性的重要保障,能够在微电网内部光伏能源不足时,提供可靠的电力供应;同时,在光伏发电无法在微电网内部消纳时,允许

光伏能源上网,提高了微电网的经济效益。电网侧能源的输出主要有两个方向,

一个是负荷侧,另一个是储能系统;在内部供电能力不足,无法满足负荷需求时,

通过电网侧能源的输入来进行功率和能源的平衡;在实行峰谷电价时,可以结合当前时刻的电价情况,如果处于低谷电价,可以通过电网侧对储能系统进行充电,

使电网侧能源得到有效利用,同时降低微电网侧购电成本。电网侧还可以对光伏能源进行接收,在光伏出力高峰时,既满足了负荷需求,又能在储能系统达到饱和的前提下,向大电网系统输送光伏能源。

储能系统的能源供给方有两部分:光伏电源,电网供电;由于光伏电源的成本低于电网供电成本,所以只有在光伏电源不足时,才考虑电网侧对储能系统供电;由于储能系统的能量具有双向性,储能系统的输出方为负荷侧,当光伏系统能量不足,储能成本较低时,考虑由储能系统向负荷进行充电;同时储能也是微电网在离网运行时对负荷提供能源的有效保证。

负荷侧能源供给主要来源有三部分:光伏能源,电网供电,储能系统;首先供给方是光伏,在光伏能源满足不了需求的前提下考虑是由电网供电还是储能系统供电,通常采取储能优先的原则,结合当前的峰谷电价,如果储能的成本高于电网,则由电网供电,如果储能成本低于电网,则由储能系统供电。负荷内部本 15

身由于价格的激励也会产生调整,也就是价格激励使系统需求侧获得了用户用电行为的响应,这部分需求响应将用户可转移的负荷利用起来,通过价格激励或者其他方式进行控制和引导,使负荷侧成为一种可控资源加以利用,以更优化的负荷曲线参与微电网能量流动中,促进整个体系更加经济合理运行。

图 2-8 微电网能量流动示意图

### 2.4.2 微电网运行流程考虑峰谷分时电价下微电网并网运行时基本流程如下:

- (1) 基本信息输入:当前时刻的光伏出力,考虑需求响应后的负荷侧需求曲线,储能荷电状态,售电电价等信息;
- (2) 判断光伏出力是否能够满足微电网内部的负荷需求;
- (3) 判断储能此刻的 SOC 状态,是否可以充放电;
- (4) 判断当前时刻处于峰、平、谷哪个时段,确定当前电价;
- (5) 根据光伏自用为主,外购为辅的原则,确定光伏电量自用和上网比例分配;
- (6) 根据储能系统可以进行“低储高卖”的原则,制定储能系统充放电策略。

微电网中实施电价激励措施会影响微电网的运行决策,同时系统还会获得负荷需求响应资源,因此,微电网的储能配置不仅考虑运行决策中涉及的充放电策略等因素影响,还应该考虑需求响应的影响,使储能配置结果更符合实际情况。

微电网运行流程图如图 2-9 所示。 16

图 2-9 并网型微电网运行流程图

2.4.3 微电网能量管理系统微电网能量管理系统具有预测及与优化可再生能源机组出力、执行储能系统充放电策略,管理需求响应方式、维持微电网稳定运行等功能[34],实现微电网能量流动及运行控制。微电网能量管理系统功能如图 2-10 所示,微电网能量管理系统的 4 个功能模块介绍如下:

人机交流模块主要负责人与能量管理系统的交流,提供一个人机友好的交互界面,作为将各关键信息可视化的平台,该平台可以展示微电网的整体拓扑结构,

电气元件及操作开关所处的工作状态,实时显示各采集点处的状态数据,通过直观的图表和数据使人员更加方便监控微电网的运行状况。

数据分析模块具有数据存储统计、打印及编辑等功能。存储的数据包括实时数据、操作日志、预测数据,可以根据数据的不同特征,采用不同的存储周期,

并设定不同的存储数据,按照日、月、年不同的时间跨度进行统计工作,并形成预测误差的统计报表。

预测模块是微电网能量管理系统的一个关键模块。预测内容包括可再生能源出力,未来某段时间内负荷和市场价格,预测时间尺度根据调度计划时间的不同而有所差异。通常有短期离线和超短期实时滚动等方式,预测所需的数据来自于系统的数据采集,预测最终结果要在规定的时间内传递至管理系统[35]。

决策优化模块是整个能量管理系统的核心。该系统根据可再生能源出力及负荷值、用户侧需求响应、调度总体规划和市场电价信息等进行决策,决策的内容包括:可再生能源出力调度、微电网外购电量、储能充放电策略和可控负荷调整 17

计划等,同时需满足一系列的约束条件及控制目标,尽可能使能源损失最小,微电网运行效率最高。

图 2-10 微电网能量管理系统功能示意图

2.5 本章小结本章首先介绍微电网典型结构，然后建立光伏发电模型和光照的概率密度函数，介绍光伏出力特性具有典型季节性和典型日规律性特点；分别从储能系统结构组成、储能电池模型、储能电池寿命三个方面介绍典型的储能系统；最后进行微电网运行特性分析，包括能量流动方式、运行流程及能量管理系统三个部分。 18

### 第 3 章需求响应模型

3.1 需求响应影响分析需求响应是从动态可控的角度看待需求侧的可控负荷资源，利用电价或其他激励的方式来调用需求侧负荷，提高光伏出力与负荷之间的相关性，进而促进光伏的就地消纳，经过需求响应优化后，负荷曲线特性得以调整，负荷曲线与光伏出力曲线相关性提高，净负荷功率曲线更为平缓，最终光伏消纳率得以提高。需求响应促进光伏消纳示意图如图 3-1 所示。

图 3-1 需求响应促进光伏消纳示意图需求响应同时会影响储能的配置及运行策略，如在光伏尖峰时刻采用价格激励，响应后的负荷曲线相关度提高，从而降低与光伏出力的差额，此时对剩余光伏电能进行吸收所需要的储能容量降低；基于需求响应后的负荷曲线会影响储能的充放电策略，降低储能系统充放电次数，提高储能使用寿命，进而降低微电网系统的储能配置综合成本。因为微电网的运行分析是在调整后的负荷曲线的基础上开展的，需求响应引起负荷曲线的调整也会对储能充放电策略及外购电量、上网电量等多方面产生影响。

综上，需求响应带来负荷曲线变化，进而引起光伏消纳率变化，消纳率变化影响储能配置需求的变化，电价、负荷、光伏、储能又与系统的运行方式息息相关。因此研究微电网储能的配置有必要考虑需求响应的影响，本文研究的需求响应方式选用峰谷分时电价引导用户侧进行负荷转移，同时依据需求价格弹性理论建立需求响应模型，充分利用电价调动负荷侧的资源，获得改善后负荷特性曲线，

结合相应的运行方式调整，寻求最优的储能配置方式。 19

3.2 峰谷时段划分峰谷时段划分是峰谷分时电价的基础，本文采用模糊隶属度函数计算负荷曲线上各点处于峰谷时段的隶属度，采用模糊聚类的方法确定峰谷时段。首先观察日负荷曲线可以发现负荷是动态实时高低变化的，在变化的过程中可以看出高峰时段和低谷时段，为了降低峰谷差首先需要对峰谷时刻进行更准确的描述。如图 3-2 所示，负荷曲线上的各时刻的负荷点为峰谷时段划分的研究对象，需要根据隶属度函数确定各负荷点的隶属度指标，首先隶属度函数的值域范围为[0,1]，

具体划分准则为：负荷曲线上的最低点的谷隶属度为 1，峰隶属度为 0；负荷曲线上最高点的峰隶属度为 1，谷隶属度为 0；负荷曲线上其余各点的峰、谷隶属度根据隶属度函数来确定[36]。

图 3-2 典型的日负荷曲线隶属度函数有多种类型：如高斯型、钟形、差型、积型、梯形等[37]。本文选择半梯形隶属函数，峰、谷隶属度分别是确定各时刻负荷相对于最大值和最小值的比例，不只与数值本身有关，还与各时刻负荷的相对大小有关，本文采用的半梯形隶属度函数易于理解，也便于计算，偏大型、偏小型半梯形隶属函数见公式

(3-1) 和公式 (3-2)，函数分布示意图如图 3-3、图 3-4 所示。

$$\begin{aligned} & b x \\ & b x a \\ & x \\ & a b \\ & a x x > < \\ & a 1 0 \\ & ) (A (3-1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & b x \\ & b x a \\ & x \\ & a b \\ & x b x > < \\ & a 1 0 \\ & ) (A (3-2) 20 \end{aligned}$$

图 3-3 偏大型半梯形隶属度函数分布示意图图 3-4 偏小型半梯形隶属度函数分布示意图将日负荷曲线划分 24 段，各时刻点为  $t_1, t_2, \dots, t_{24}$ ，分别对应的各时刻点的负荷为  $l_1, l_2, \dots, l_{24}$ ，其中  $a$  为最小负荷  $l_{\min}$ ， $b$  为最大负荷  $l_{\max}$ ，根据上述隶属度函数，

可计算日负荷曲线中， $t_i$  时刻下对应的峰谷时段隶属度的计算公式如下：

$$\begin{aligned} & \min \max \\ & \max \\ & \min \max \\ & \min \\ & l_1 \\ & t l l u \\ & l l \\ & l t l u \\ & i \\ & g i \\ & i \\ & f i (3-3) \end{aligned}$$

式中  $u_{fi}$  ——  $t_i$  时刻下的峰时段隶属度；

$u_{gi}$  ——  $t_i$  时刻下的谷时段隶属度。

则可得到对应每个时刻点都具有两个隶属度，将各时刻点的峰谷隶属度组成负荷特性的指标矩阵  $T$ 。



g  
g  
g  
f  
f  
f  
u  
u  
u  
u  
u  
T (3-4)

模糊聚类基本定义是采用模糊数学语言对事物进行分类和描述的一种数学方法[38]。但是现实生活中的问题很难有意个清晰的边界进行划分，因此采用模糊聚类的方式进行最大程度的区分，使它更接近现实情况。本文主要是进行峰、谷、平三个时段的分类，由上文公式可计算得出各负荷点的隶属度，再采用模糊聚类的方法将一个运行周期 T 内的负荷划分为峰、平、谷三种聚类，使某一类内的数据差别尽可能的小，使不同峰、平、谷三类之间的负荷点数据尽可能的大；形成一个更合理的动态分类方法，并同时满足三个时段数总计为一个定值的要求。 21

模糊聚类方法最后提供的分类结果不是明确个体的绝对地归属问题，而是描述在数据比较下相对更偏向于哪一类。归属关系可用布尔矩阵表示，同样，模糊关系也可以用模糊矩阵来表示[39]。

指 标		
疑似剽窃观点		
1. 观察日负荷曲线可以发现负荷是动态实时高低变化的，在变化的过程中可以看出高峰时段和低谷时段，		
疑似剽窃文字表述		
1. 2 光伏发电模型及出力分析 2.2.1 光伏发电系统模型光伏发电系统主要由太阳能电池、		
3. 011_第3部分		总字数：10339
相似文献列表		
去除本人文献复制比：15.3%(1586) 文字复制比：15.3%(1586) 疑似剽窃观点：(0)		
1	019 - 《学术论文联合比对库》- 2016-12-11	9.4% (971) 是否引证：否
2	019 - 《学术论文联合比对库》- 2016-12-13	9.4% (971) 是否引证：否
3	计及需求响应的用户侧光伏微电网储能配置方法 周楠(导师：张建华) - 《华北电力大学(北京) 硕士学位论文》- 2017-03-01	8.6% (887) 是否引证：否
4	6_周楠_计及需求响应的用户侧光伏微电网储能配置方法 周楠 - 《学术论文联合比对库》- 2016-12-08	6.9% (710) 是否引证：否
5	面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述 王蓓蓓；- 《中国电机工程学报》- 2014-08-05	3.8% (389) 是否引证：是
6	M201471272 魏添 魏添 - 《学术论文联合比对库》- 2017-04-21	0.6% (62) 是否引证：否
7	含风电的高维多目标安全约束机组组合问题求解方法 吴悔;林舜江;范官盛；- 《电网技术》- 2020-08-10 10:31	0.6% (60) 是否引证：否
8	带模糊预约时间的车辆路径问题的多目标禁忌搜索算法 王君;李波；- 《计算机集成制造系统》- 2011-04-15	0.5% (50) 是否引证：否
9	基于多代理的微电网需求响应机制研究 张仔琪;莫峻;高志展;任西旺；- 《电气应用》- 2021-05-15	0.5% (47) 是否引证：否
10	计及“源-网-荷”影响的主动配电网可靠性评估 丁健;马春雷;陈宣林;付滨；- 《电网与清洁能源》- 2020-03-25	0.3% (32) 是否引证：否
原文内容		

(1) 矩阵标准化为了解决实际问题中数据有不同量纲的问题，通常要对数据进行适当的变换，同时为了使数据能在相同的区间内，需要进行数据的标准化，将数据的范围限制在[0, 1]之内，标准化公式如下：

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3-5)$$

(2) 建立相似关系  
采用绝对值减法建立相似关系  $R(u_i, u_j) = r_{ij}$ ，公式如下：

$$r_{ij} = \frac{\max_k |u_i - u_j|}{\max_k |u_i - u_k|} \quad (3-6)$$

式中  $k=1, 2$  分别表示  $f, g; c$  适当选取，使得  $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 。

(3) 转换为等价关系通过求取传递闭包  $t(R)$ ，将相似关系转为等价关系。对矩阵  $R$  采用平方法进行求取，即  $R \rightarrow R^2 \rightarrow \dots \rightarrow R^{2k} = R^{2k+1}$  时， $R^{2k}$  即是传递闭包[40]，公式如下：

$$t(R) = \bigcup_{k=0}^{\infty} R^k \quad (3-7)$$

式中  $k \geq \log_2 24; i, j=1, 2, \dots, 24$ 。

$$R^k = R \circ R^{k-1} \quad (3-8)$$

当  $t_{ij} \geq \lambda$  时， $t_{ij}(\lambda)$  为 1，否则为 0，阈值  $\lambda \in [0, 1]$ ，通过调整阈值进行动态聚类[41]，当聚类数达到 3 时，可对负荷曲线进行峰平谷 3 个时段的划分，动态聚类示意图如图 3-5 所示。

图 3-5 动态聚类示意图

3.3 电力需求价格弹性理论电力需求价格弹性理论是需求响应的理论基础。电价对用户用电量的影响在电力系统中有明显的经济规律，采用分时电价或其他形式的电价调整会促使用户根据自身需要合理调整用电时间和用电量。这种经济性规律可以用电力供求关系曲线来描述，电力供应曲线可以反映发电侧的成本特性，需求侧负荷曲线会受到电力电价的制定方式影响。电力价格与用电量关系可以用公式 (3-9) 近似描述，

在市场平衡点附近，可近似认为电力价格  $p$  与用电量  $E$  成线性关系，即：

$$p = a + bE \quad (3-9)$$

式中  $a$  —— 电量电价曲线参数  
 $b$  —— 电量电价曲线参数  
 $p$  —— 电价；  
 $E$  —— 电量。

在电力市场中，电力也可以作为一种商品，它的价格也将会受消费者行为变化的影响[42]。当消费者即电力用户对电力市场制定的价格进行响应，需求曲线随电价降低而电量增加，如图 3-6 所示。

图 3-6 电量与电价的关系

与其他因素相比，价格因素引起的需求响应最明显有效，同时也适合计量与评估电价引起的用户侧负荷变化；因此本文采用需求价格弹性来计量评估电价波动引起需求侧用户对可控负荷的调整量，需求侧价格弹性按照所需信息量由多到少的顺序主要分为三类，分别是替代弹性、弧弹性和电量电价弹性。

(1) 替代弹性  
替代弹性在数学上可表示为

$$\epsilon = \frac{E}{p} \frac{dp}{dE}$$

k  
u  
ku  
Q  
Q  
P  
P  
P  
Pd  
Q  
Qd  
se

, (3-10)

式中  $Q_u$  ——  $u$  时段电量;

$Q_k$  ——  $k$  时段电量;

$P_k$  ——  $u$  时段电价;

$P_u$  ——  $k$  时段电价。

替代弹性表示为用户侧电量的变化与电价变化的比值[43]，常用于项目规划前期阶段，表示用户侧电量转移程度与电价差额之间的比例关系。

基于替代弹性的峰谷电价下，用户峰时段的负荷削减比例 $\% \Delta L_p$  可表示为：

$$P(\%op$$

$$\frac{P_p - P_o}{P_o} \times 100\%$$

$$P(\%op$$

$$P(\%op$$

用户谷时段的负荷削减比例 $\% \Delta L_o$  可表示为：

$$P(\%po$$

$$\frac{P_p - P_o}{P_o} \times 100\%$$

$$P(\%po$$

$$P(\%po$$

式中  $p$ ， —— 下标  $p$  和分别为峰时段和谷时段； $C_o, C_p$  —— 峰或谷时段电费成本占日总电费成本的比例；  
 $P_p, P_o$  —— 峰或谷时段的平均电价水平。

(2) 弧弹性弧弹性  $\epsilon_{ae}$  的公式为：

$$\epsilon_{ae} = \frac{Q}{Q} \times \frac{P}{P} \times 100\%$$

$$\epsilon_{ae} = \frac{Q}{Q} \times \frac{P}{P} \times 100\%$$

式中  $P_b$  —— 平均电价水平；

$Q_b$  —— 平均电价下基线负荷；

$P_e$  —— 紧急事件下的临时电价水平；

$Q_e$  —— 紧急事件下的负荷。

弧弹性适用于计算紧急事件情况下的负荷削减情况[44]，其负荷削减比例可

表示为 $\% \Delta L_e$ ，公式如下：

$$\% \Delta L_e = \frac{Q_b - Q_e}{Q_b} \times 100\%$$

$$\% \Delta L_e = \frac{Q_b - Q_e}{Q_b} \times 100\%$$

与替代弹性相比，弧弹性用于描述用户响应不够精确，只是一些特殊情况下使用，应用范围较窄，而且价格响应的经济性较弱，但由于计算简单，常在工程中广泛使用。

(3) 电量电价弹性

电量电价弹性在数学上等于  $u$  时刻电力需求量  $E_u$  的变化率相对于  $k$  时刻电力价格  $P_k$  变化率的比值[45]，即：

$$\frac{dE_u}{dP_k} \cdot \frac{P_k}{E_u} \quad (3-15)$$

电量电价弹性将不同时刻之间的电量变化率与电价变化率关系建立了联系，

可以用于描述用户对于价格的不同响应方式，相对于替代弹性和弧弹性，电量电价弹性的所需信息量更少。需求侧用户对价格的响应方式主要分为两类：一类是单一时段响应，即  $u=k$  时，用户在这一时段的用电量变化只与当前时段的电价有关，与其他时段无关；例如空调用电量，当此刻时刻电价较高时，可以适当调整空调温度来调整当前的用电量，即用户对当前时刻的电价进行了单一响应；另一

类是多时段响应，即  $u \neq k$  时，用户总用电量不能减少，但是可以转移的情况，

就不能单纯的看当前时段的电力价格，而是判断出高电价时段和低电价时段，将负荷从高电价时段转移至低电价时段，即表示用户在满足自己用电需求量时，进行了多时段电价响应；例如企业的生产用电，不能因为电价高而降低产量，但是可以根据电价变化调整生产计划，降低总用电成本。

综上，基于 电量电价弹性将电量变化与电价变化建立了较为明确的数学关系，能够通过电价变化程度分析出电量的变化数值，有利于计算和分析电价响应的结果，因此本文选用电量电价弹性作为需求响应模型基础。

3.4 基于电量电价弹性矩阵的需求响应模型电力供给与弹性需求的关系曲线如图 3-7 所示，表示了当前时段电价的变化所引起的当前时段电量变化情况，但是无法表示出不同时段之间的价格变化所带来的相互影响，可以采用电量电价弹性矩阵来进行描述，矩阵中的弹性系数 包括自弹性 (own-price elasticity) 和交叉弹性 (cross-price elasticity)，当  $u$  与  $k$  相等时表示自弹性，用于描述当前时段电量与价格之间的关系；当  $u$  与  $k$  不相等时表示交叉弹性[46]，用于描述不同时段之间的电量与价格之间的相互影响；因此该矩阵可以更全面、准确地刻画用户的电价响应方式。 25

图 3-7 电力供给与弹性需求关系曲线将电量电价弹性的定义应用于峰谷分时电价中，根据峰时段、谷时段、平时段的电价与电量的曲线系数  $a_f, b_f, a_{p,p}, a_{g,b}$ ，通过公式推导，可得出峰、谷、平三个时间段的电量电价弹性系数，包括自弹性系数和交叉弹性系数，全面刻画时段内部与各时段之间的相互影响。基于峰平谷分时电价的弹性矩阵  $M$ ：

$$\begin{matrix} g & g & p & g & f \\ p & g & p & p & p & f \\ f & g & f & p & p & f & f \\ m & m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m & m \\ m & m & m & m & m & m & m \end{matrix} \quad M \quad (3-16)$$

下标  $f, p, g$  分别表示日负荷中峰、平、谷三个时段；矩阵中对角线元素为自弹性系数，其他为交叉弹性系数。交叉弹性系数为正时说明商品具有替代性，交叉弹性系数为负时则说明商品是 互补品[47]；一般来说，不同时间段的电力商品具有替代性，即用户当前时段可以中断其使用，采取负荷转移等方式在其他时段弥补。通过上文公式可得电量变化量  $\Delta E$ ：

$$\begin{matrix} g & g & p & g & f \\ p & p & p & p & p & p & p \\ f & f & f & f & f & f & f \\ p & p & p & p & p & p & p \\ p & p & p & p & p & p & p \\ p & p & p & p & p & p & p \\ M & E & E & E & E & E & E \\ E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g & 0 & & & & & \\ p & 0 & & & & & \\ f & 0 & / & / & / & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \quad (3-17)$$

式中  $E_0, f, E_0, p, E_0, g$  —— 下标 0 表示实行峰谷分时电价前的电量；

$p_0, f, p_0, p, p_0, g$  —— 下标 0 表示 实行峰谷分时电价前的电价；

$\Delta p_f, \Delta p_p, \Delta p_g$  —— 分别为实施分时电价前后各时段的电价差。

负荷曲线在日常观测中为 96 个负荷点，即 15 分钟观测一次负荷，可得到

2 4 0 ' 24 1 ) (



$p_{dt} P$   
 $p_{tp}$   
 $p$   
 $t P_{tp}$   
 $L_{av}$   
 $av_{av}$   
 $av$   
 $L$

$t \quad (3-18) \quad 26$

式中  $p_t(t)$  —— 15 分钟的时刻  $t$  的单价；

$P' L(t)$  —— 每 15min 的负荷；

$PL(t)$  —— 每 1h 的负荷；

$P_{av}$  —— 特定用户的平均单一制电价；

$\alpha$  —— 准实时电价的浮动比例[48]。

实行准实时电价后，典型日分为 24 个时段，电量电价弹性矩阵可表示为：

444241 242221 141211

$M \quad (3-19)$

进行矩阵变化可得：

2424 22 11 2424 22 11 24 1

$pp$   
 $pp$   
 $pp$   
 $E$   
 $EE$   
 $EE$   
 $EE \quad (3-20)$   
 $t$   
 $EEEt' \quad (3-21)$

式中  $E' t$  —— 实行准实时电价后  $t$  时段内的用电量；

$E_t$  —— 实行准实时电价前  $t$  时段内的用电量。

将式 (3-21) 带入式 (3-20) 进行变化求解，可得：

24 2 1 24 24 2 2 1 1 1 1 1 1 24 ' 2 ' 1

$M$   
 $E$   
 $E$   
 $E$   
 $p$   
 $p$   
 $p$   
 $p$   
 $p$   
 $p$   
 $E$   
 $E$   
 $E$   
 $E$   
 $E$   
 $E + . \quad (3-22)$

根据准实时电价定义，可得：

$avi$   
 $avi$   
 $pap$   
 $pp \quad 1 \quad (3-23)$

将式 (3-23) 代入式 (3-22) 可得：

24 2 1 24 2 1 1 1 1 '

24 ' 2 ' 1 1- 1- 1- 24 1

$E$   
 $E$   
 $E$   
 $M$   
 $E$   
 $E$   
 $E$   
 $E$

E  
E + (3-24) 27

3.5 本章小结本章首先分析需求响应对微电网的影响，包括促进光伏消纳率、影响储能配置及微电网系统运行策略，明确了需求响应研究对储能配置优化的必要性；采用隶属度函数及模糊聚类的方法进行峰谷平时段的划分；介绍电力需求价格弹性理论，包括三种价格弹性的数学模型及优缺点，其中 电量电价弹性较优，最后建立基于电量电价弹性矩阵需求响应模型。 28

#### 第 4 章储能容量优化配置方法研究

##### 4.1 微电网运行评价指标

4.1.1 微电网年总成本微电网总成本包括光伏组件与储能的投资、运营维护及系统架构部分及外购电部分，主要内容如下：

(1) 主要设备等年值成本 主要设备投资主要包括光伏系统年成本  $C_{pv}$ ，储能系统年成本  $C_{Bes}$  以及储能系统换流器模块年成本  $C_{ch}$ 。其中，光伏系统年成本包括光伏组件和逆变器费用，

储能系统年成本包括储能本体及能量管理系统的费用的等年值[49]。

pch Besv

CCCC1(4-1) 11 1 0 00

m

m

pvpvpv

r

rrIQC . (4-2) 11 1 0 00

m

m

besbesbesbes

r

rrEn IC (4-3) 11 1 0 00

m

m

chchch

r

rrIPC (4-4)

式中  $Q_{pv}$  —— 光伏系统容量；

$E_{bes}$  —— 储能系统总容量，

$P_{ch}$  —— 储能换流器总功率；

$I_{pv}$  —— 光伏组件单价；

$I_{bes}$  —— 储能系统单价；

$I_{ch}$  —— 储能变流器单价；

$n_{bes}$  —— 储能电池更换次数；

$r_0$  —— 贴现率。

(2) 运营维护及系统架构成本运营维护成本主要指合理的管理费及维护费等，是运行期间发生的日常费用；系统架构成本主要包括除光伏组件及储能系统等主要设备其他部分，如光伏场的集电线路、10kV 及 35kV 的架空线路、升压变压器等，此部分成本根据实际工程的规模、地理条件及入网电压等级要求而不同，两者均可以按照主要设 29

备投资比例估计所需费用，用  $C_{sys}$  表示。

syssys

RCC1(4-5)

式中  $C_{sys}$  —— 系统架构成本；

$R_{sys}$  —— 运行维护及架构成本所占主要设备投资比例，本文取 4%。

(3) 微电网外购电成本并网型微电网的优势之一就是有大电网进行支撑，保证微电网在负荷产生巨大波动时，保证系统的稳定，当微电网内部出现尖端负荷时，可以从大电网购电进行功率的补充，保证功率能够实时平衡，但同时会对微电网经济运行上产生一

定的购电成本。微电网功率平衡公式如下：

$t P_{tt} P_P() () () (tt P_Pd$

$cg_{iipv} L (4-6)$

式中  $P_L(t)$  —— 负荷功率；

$P_{pv}(t)$  —— 光伏发电功率；

$P_i(t)$  —— 微电网光伏上网功率；

$P_{gi}(t)$  —— 微电网外购电功率；

$P_{dc}(t)$  —— 储能放电功率。

微电网外购电成本  $C_{buy}$ ：

$g_{igibuy} E_e C (4-7)$

式中  $e_{gi}$  —— 外购电电价；

$E_{gi}$  —— 外购电量。

(4) 微电网年总成本：

buysystotal

CCCC1(4-8)

式中 Ctotal —— 微电网年总成本。

4.1.2 微电网年收益微电网的收益包括售电收益、政策收益、隐形收益。隐形收益主要是指无法准确用公式计算，但确实存在的收益，这些收益的归属一般与微电网投资及运营、

用户各方相关，对于电网公司，微电网的隐形收益包括降低传输损耗，延缓配网改造投资；从用户的角度，微电网可以提高用户供电的可靠性，根据用户的要求进行“量身定作”，提高用户的满意度，提高供电方式的灵活性；对于社会整体效益方面，微电网可以提高环境效益，节约化石能源，促进能源结构侧改革，减轻环境污染压力[50]。

本文中微电网收益只考虑其售电收益和政策收益。售电收益主要是根据微电 30

网运营期间制定的电价决定；政策收益[51]主要指分布式光伏上网标杆电价按照其光伏总发电量进行相应的电量补贴。现有政策对分布式光伏可再生能源有发电量补贴，有利于微电网整体效益的提升，由于目前储能部分的投资占比仍然很高，

关于储能的补贴政策一直在讨论研究中。本文先在公式计列储能容量的潜在补贴，后面测算时可根据具体情况进行赋值调整。现有的政策鼓励建设单位与运行单位为同一项目单位，这样有利于光伏等可再生能源的补贴分摊建设阶段较高的投资成本，促进项目的建设及后期运营健康发展。

(1) 售电收益

微电网年售电收益 Ssell 表达式为：

$$S_{sell} = \sum_{t=1}^{8760} E_{e,ES} \cdot e_{pop} \cdot e_{grid} \quad (4-9)$$

式中  $e_{pop}$ 、 $e_{grid}$  —— 用户电价、光伏上网电价；  
 $E_{pop}$ 、 $E_{grid}$  —— 用户电量和上网电量。

(2) 政策补贴收益

微电网政策补贴收益 Sbt 可表示为：

$$S_{bt} = \sum_{t=1}^{8760} E_{e,ES} \cdot e_{bt} \quad (4-10)$$

式中  $e_{bt}$  —— 单位光伏电价补贴；  
 $e_{bt0}$  —— 储能容量补贴；  
 $E_{total}$  —— 总光伏发电量。

(3) 微电网总收益

$$S_{SS} = S_{sell} + S_{bt} \quad (4-11)$$

式中 Stotal —— 微电网总收益。

4.1.3 可再生能源消纳率微电网的目标之一就是将分布式可再生能源进行就地消纳，提高可再生能源的消纳率，进一步减少弃光弃风量，因此可再生能源消纳率是一项很重要的评估指标[52]，该指标等于微电网中用户使用可再生能源发电量和储能存储后释放的电

量之和占总光伏发电量的比例，具体公式如下：

$$N_p = \frac{E_{pv} + E_{bat}}{E_{total}} \quad (4-12)$$

total

batpv

pE

EE

N (4-12)

式中  $N_p$  —— 可再生能源消纳率；

$E_{pv}$  —— 微电网中用户使用可再生能源发电量；

$E_{bat}$  —— 储能存储后释放的电量。 31

4.2 储能容量优化模型

4.2.1 目标函数根据微电网的评价指标分析，微电网储能容量优化模型选择微电网年净利润和光伏消纳率两个评价指标作为优化目标，在最大限度满足目标的前提下进行微

电网储能配置的优化，目标函数为：

$$\max F(x) = \max_{x \in X} \{C_{profit}(x) - C_{spv}(x)\} \quad (4-13)$$

vprofit (4-13)

微电网净利润的公式如下所示：

$$C_{total} = C_{profit} + C_{spv} \quad (4-14)$$

CSC (4-14)

式中  $x$  —— 储能容量；

$C_{profit}(x)$  —— 微电网年净利润函数；

$C_{spv}(x)$  —— 光伏消纳率的函数。

4.2.2 约束条件

(1) 系统功率平衡约束：

$$P_{tt} = P_{pv} + P_{bat} + P_{load} \quad (4-15)$$

ceipv L (4-15)

(2) 蓄电池充放电能量约束

d

cdcdccccbb

EtPt Ett tt Pt / (4-16)

1, 0, , 1c

c

d

cdc (4-17)

式中 Eb —— 储能电池容量;

Pc(t) —— 储能充电功率;

Pdc(t) —— 储能放电功率;

$\varepsilon_c, \varepsilon_{dc}$  —— 储能是否充放电的二进制数。

(3) 蓄电池放电程度约束

maxmin

) (o

cococ

S St S (4-18)

9. 0o

d

D (4-19)

式中 Soc(t) —— 储能电池的荷电状态;

Socmax、Socmin —— 荷电状态的最大值和最小值;

Dod —— 储能电池的放电深度。

(4) 用户购电成本约束 32

用户在需求响应后的总购电成本要降低, 公式如下:

22xq

Cp

oppoppoppop

eEe E < (4-20)

式中 Cxq —— 实行需求响应后用户购电成本;

epop2, pop2 —— 分别为需求响应前的电价及电量。(5) 联络线传输功率约束联络线上的传输功率的最大值与联络线本身的传输能力和电网能承受的可再生能源电量冲击有关[53], 当联络线传送功率过大, 可能导致联络线过载或影响电网的电能质量, 需要进行限制, 公式如下:

gridtransgridtransmax,

PP (4-21)

式中 Pgridtrans,max —— 最大允许的传输功率。

4. 2. 3 运行策略

(1) 当光伏发电总功率小于负荷功率需求:

) () (p

v

tt PPL < (4-22)

此时若储能 SOC < SOCmin, 储能系统无法放电, 需由电网供电维持功率平衡, 即:

t Ptt PP) () (g

pv Li . (4-23)

判断此时刻的峰谷分时电价, 若为峰电价, 则储能不进行充电, 降低储能充电次数及成本; 若为平、谷电价, 由电网给储能充电:

) () (ctt PP

gi . (4-24)

此时若储能 SOC > SOCmin, 储能系统可以放电提供给负荷能量, 则由储能维持功率平衡, 即:

t Ptt PP) () (d

pv Lc . (4-25)

(2) 当光伏发电总功率大于负荷功率需求:

tt PP) () (L

pv > (4-26)

此时若储能 SOC < SOCmin, 储能系统可以充电, 峰电价下由光伏向储能充电, 满足公式如下:

) () (ct Ptt PP

Lpv . (4-27)

若为平、谷电价, 光伏不足以使储能充满时, 可以从电网购电向储能充电: 33

) () (ctt PP

gi . (4-28)

此时若储能 SOC > SOCmax, 储能系统已经满负荷, 光伏再向电网送电, 光



伏上网电量为：  
t Ptt PP) (-) () (L  
pvi . (4-29)

4.3 NSGA-II 遗传算法

4.3.1 帕累托最优解实际生活中会遇到的问题很多时候需要完成多个目标，而这些目标往往相互之间存在着制约关系或者矛盾，无法折算成单一的目标，这时就无法找到唯一的解决方案可以使所有的目标都能达到各自的最优值。数学中采用帕累托最优解[54]

来作为这类问题的解集，帕累托解是满足约束条件中的可行域中不存在支配的关系的解，通常采用帕累托前沿作为帕累托最优解的向量集；作为决策人则可以基于一定的分析方法在帕累托最优解的解集中选择一个最适宜的折中解。

4.3.2 NSGA-II 求解方法  
带精英策略的非支配排序遗传算法 ( Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II) 在 NSGA 的基础上改进得到[55]，是有效求解多目标优化问题的方法之一，获得的解为帕累托最优解，其算法的主要内容如下：

(1) 构造非支配解集  
设 N 为种群 Pop 的规模大小，按某种策略将种群分类排序为 m 个子集 P1，P2，...Pm 且满足下列性质：  
m  
op  
PPP  
jimji  
PP 21  
ppp , , 2, 1,  
Pm 2, , 1 (4-30)  
符号表示支配关系，即 Pk+1 中的个体直接受 Pk 中的个体的支配。(2) 计算个体拥挤距离设有两个子目标 f1 和 f2，设 P[i]dis 为个体的拥挤距离，P[i]. m 为个体 i 在子目标上的函数值[56]，P[i]dis 表达式为：  
211  
Pi PpPfi Piffi Pid  
is (4-31)  
则 r 个子目标的个体 i 的拥挤距离为：  
rkkkdisPi Pfffi Pi 1 )]1[]1[(] (4-32) 34  
(3) 精英保留策略  
1) 将所有父代和子代个体分别为 Pt 和 Qt，两者合并后的种群为 Rt，三者的关系为 Rt=Pt∪Qt，并且 Rt 个体数为 Pt 和 Qt 个体数之和[57]；  
2) 新的父代种群 Pt+1 可通过计算新种群 Rt 的局部拥挤距离和非支配排序得来；  
3) 新子代种群 Qt+1 可由种群 Pt+1 交叉、变异、选择得到。  
(4) 处理约束条件此时解 x1 支配解 x2 需满足以下原则[58]：  
1) x1 为可行解，x2 为不可行解；  
2) x1 和 x2 都为可行解，x1 支配 x2，即解 x1 和 x2 的目标函数满足：  
mnxfxf  
mnxfxf  
nn  
nn , , 2, 1) () ( , , 2, 1) () ( 21 21 (4-33)

4.3.3 算法流程图  
选用 NSGA-II 算法对考虑需求响应下储能容量优化的双目标模型进行求解。  
基于 NSGA-II 算法的模型求解流程图如图 4-1 所示。 35  
图 4-1 基于 NSGA-II 算法的模型求解流程图

4.4 算例验证

4.4.1 算例介绍  
本文选取的微电网算例介绍如下：光伏装机容量为 4500kW，年总用电量约为7120MWh，为低负荷高渗透率光伏区域。根据该地区年有效利用小时数1206h，  
光伏平均年发电量约为 5429MWh。

指 标	
疑似剽窃文字表述	
1.	22 图 3-5 动态聚类示意图
	3.3 电力需求价格弹性理论 电力需求价格弹性理论是需求响应的理论基础。电价
2.	当消费者即电力用户对电力市场制定的价格进行响应，需求曲线随电价降低而电量增加，如图 3-6 所示。 图 3-6 电量与电价的关系

相似文献列表

去除本人文献复制比：7.2%(409)文字复制比：7.2%(409)疑似剽窃观点：(0)

1	6_周楠_计及需求响应的用户侧光伏微电网储能配置方法 周楠 - 《学术论文联合比对库》- 2016-12-08	6.9% (394) 是否引证：否
2	019 - 《学术论文联合比对库》- 2016-12-11	5.7% (325) 是否引证：否
3	019 - 《学术论文联合比对库》- 2016-12-13	5.7% (325) 是否引证：否

原文内容

光伏组件初始投资成本为 0.8 万元/kW，蓄电 36  
池储能系统单价为 1.5 元/Wh，储能双向变流器价格为 0.01 万元/kW，能量管理系统价格 0.05 元/Wh，储能系统 SOC 设定范围为 0.2 至 0.9，蓄电池储能系统采用等效循环次数法计算寿命，微电网项目寿命 20 年，联络线能传输的最大功率为 1000kW。微电网售电电价与大电网购电电价采用峰谷平时电价，分布式光伏上网电价采用 0.6 元/kWh，光伏发电补贴采用 0.62 元/kWh。微电网光伏日出力曲线及日负荷曲线如图 4-2 所示：

图 4-2 微电网光伏发电曲线及负荷曲线  
4.4.2 需求响应分析微电网日负荷各时刻数据如表 4-1 所示。  
表 4-1 微电网日负荷数据时刻负荷 (k W) 时刻负荷 (k W) 1:00 943 13:00 1254 2:00 912 14:00 1150 3:00 803 15:00 1105 4:00 812 16:00 1364 5:00 754 17:00 1501 6:00 861 18:00 1510 7:00 934 19:00 1454 8:00 1094 20:00 1400 9:00 1184 21:00 1589 10:00 1401 22:00 1341 11:00 1254 23:00 1154 12:00 1314 24:00 37

采用半梯形隶属度函数计算该日负荷曲线的峰谷隶属度如表 4-2 所示。

表 4-2 日负荷曲线各时刻的隶属度时刻峰隶属度 (%)	
谷隶属度 (%)	时刻峰隶属度 (%)
谷隶属度 (%)	1:00 22.63 77.37 13:00 59.88 40.12 2:00 18.92 81.08 14:00 47.43 52.57 3:00 5.87 94.13 15:00 42.04 57.96 4:00 6.95 93.05 16:00 73.05 26.95 5:00 0.00 100.00 17:00 89.46 10.54 6:00 12.81 87.19 18:00 90.54 9.46 7:00 21.56 78.44 19:00 83.83 16.17 8:00 40.72 59.28 20:00 77.37 22.63 9:00 51.50 48.50 21:00 100.00 0.00 10:00 77.49 22.51 22:00 70.30 29.70 11:00 59.88 40.12 23:00 47.90 52.10 12:00 67.07 32.93 24:00 39.52 60.48

基于表 4-2 中各时刻下负荷的峰谷隶属度值，形成模糊聚类矩阵，并通过自平方法求得传递闭包。通过逐渐缩小阈值，最终得到聚类数为 3 时的分类结果，

即将 24 个小时分为峰、平、谷三种时段，通过 MATLAB 实现这一过程，并令阈值从 1 开始以 10<sup>-5</sup> 的间距减小，直到聚类数为 3，得到负荷曲线基于模糊聚类法的峰平谷时段划分方案：

峰时段：16:00, 17:00, 18:00  
平时段：3:00~7:00, 13:00~15:00, 19:00~23:00  
谷时段：1:00~2:00, 8:00~12:00, 11:00~12:00, 24:00

由于缺乏足够的统计数据，本文依据美国 PJM 市场 2012 年负荷与电价的典型数据，得到近似的电量电价关系曲线参数见表 4-3 所示。

表 4-3 电量电价关系曲线参数负荷水平高峰平段低谷	
( , )	(6.5, 65) (5.0, 60) (4.0, 58) 根据峰谷时段划分结果，
实行峰谷分时电价前单一电价采取 0.550 元/kWh，	根据上述分析可求得峰谷分时电价的电量电价弹性矩阵：
2134.0-2641.03104.0 1475.01721.0-1971.0	1106.01324.01576.0-
M (4-34) 38	

从上式可知，自弹性系数为负数，互弹性系数为正数；此规律有效反映了用户基于价格激励的响应行为，当电价在当前时段时相对于过去时段有所上升时，

用户会对较高电价进行响应，减少当前时段下电量使用，则电价升高则当前时段电量降低，两者的趋势相反，此时价格弹性系数即为负数；当用户发现当前电价较高，为保持总电量相等，尽量不改变原有生产或生活计划；则会增加平、谷其他时段下的负荷，此时价格弹性系数为正。

根据电量电价矩阵，可得峰谷分时电价模型优化结果如表 4-4 所示：

表 4-4 峰谷分时电价优化时段电价波动电价 (元/MWh) 电量变化 (k Wh)	
峰时段	0.3477 741.42 -1154.24
平时段	-0.0142 542.19 165.49
谷时段	-0.2783 396.94 988.75

通过分析可以得出，实施峰平谷电价后，峰电价时段的电量降 1154.24kWh，  
平电价时段和谷电价时段会接收部分来自峰电价时段的负荷，其中平电价时段增加 165.49kWh，谷电价时段增加 988.75kWh；此类变动的负荷主要为可转移负荷。

在单位电价变化率下，由式 (4-34) 中的 M (3,1) 大于 M (2,1) ；可知谷电价的增加的电量高于平电价时段的电量，此用户响应行为也符合电力消费在经济学上的规律，即用户倾向于选择更低的价格，会被更低的价格所吸引；此特点也是执行峰

谷分时电价的现实基础。峰时段电价提高、电量降低，平时段、谷时段电价降低、电量增加，体现了用户对于电价的提高所带来的用户行为模式的改变；

从负荷曲线的角度，平抑了峰谷差；从用户的角度，因为用电负荷在时间上的转移，带来了用电成本的降低，此方法可以较为准确地描述符合用户对电价变动的响应方式。通过 MATLAB 仿真可以得到需求响应前后负荷曲线如图 4-3 所示，

从图中可以看出需求响应后峰谷差明显降低，验证了基于分时电价的需求响应对降低负荷侧峰谷差的有效性。

图 4-3 需求响应前后的负荷特性曲线 39

4.4.3 储能容量优化配置分析微电网的光伏发电容量已经确定，设定储能容量的上限为 2MWh，递增跨度为 0.2MWh，采用遍历算法求得不同储能容量下的微电网运行指标，分析储能配置对微电网各运行指标的影响。图 4-4 分别描述了随着储能容量的增加，系统的净利润、可再生能源消纳率以及电网出力和光伏弃电量的关系情况。从图 4-4 a)

可以看出，系统净利润率曲线呈现斜率平缓至逐渐陡峭的趋势，随着储能容量增加，储能带来的收益会抵消一部分储能成本，但随着储能容量过度增加时，储能带来的收益将只能抵消储能成本一小部分，导致系统净利润急剧下降。从图 4-4 b)

和图 4-4 c)可以看出在蓄电池容量一定范围内，随着储能容量增加，微电网的光伏消纳率指标逐步升高，因此向大电网购电量及光伏弃电量也都减少，电量都呈

现单调递减趋势，说明储能在此范围内，依然有助于提高光伏的消纳率。

a) 储能容量与系统净利润的关系

b) 储能容量与光伏消纳率关系 40

c) 储能容量与电量之间的关系图 4-4 不同储能容量下微电网的运行指标表 4-5 为不同方案下系统运行指标对比表。方案 1 为不考虑需求响应，也未配置储能系统；方案 2 为在方案 1 的基础上配置储能系统，不考虑需求响应；方案 3 为在方案 2 的基础上考虑峰谷分时电价下的需求响应。

表 4-5 不同方案下系统运行指标对比方案需求响应储能容量

(MWh)

电网出力

(k Wh)

弃电量

(k Wh)

光伏消纳率净利润

(万元) 1 0 0 2613.196 1112.561 0.742 302 2 0 0.82 2054.343 520.419 0.941 254 3 1 0.82 1897.243 489.342

0.962 261

方案 1 在无储能配置和不考虑需求响应条件下，也就是单纯的光伏发电系统

并网运行，该系统的净利润为正值，说明方案 1 在能够上网输送电量时，有光伏

补贴的条件下可以盈利，此时微电网运行指标中光伏的消纳率为 0.742，系统弃电量为 112 万度，光伏的消纳率较低，弃电量严重，可再生能源消纳率的目标有待提高。方案 2 在方案 1 的基础上增加 0.82MWh 的储能配置，也就是构成一个真正意义的微电网，与方案 1 相比：光伏弃电量减少约 59 万度，光伏消纳率提升至 0.941，达到了微电网提升光伏消纳率的目标；此时虽然光伏的补贴有所增加，从电网的外购电成本也有一定降低，由于目前储能的价格依然很高，因此微

电网系统的净利润下降 48 万元，也说明了光伏消纳率提高的目标与系统净利润

增加的目标无法同时达到最优。方案 3 与方案 2 相比，可以看出考虑需求响应后，

在不增加储能成本的条件下，系统的光伏消纳率有所提高，同时系统的净利润也有所增加；因此考虑需求响应下微电网的经济目标和环保目标都有所提高，在此基础上储能容量配置也得到了优化。

采用 NSGA-II 遗传算法对微电网储能容量双目标优化配置模型进行求解， 41

分别对需求响应前后进行计算，得到两种 Pareto 解集如图 4-5 所示。

图 4-5 Pareto 解集本文选取 3 个光伏消纳率指标，进行需求响应前后储能配置和净利润大小的对比分析，计算结果如表 4-6 所示。考虑需求响应后，相同光伏消纳率下，储能配置容量降低，同时系统净利润提高，需求响应下有效的优化了微电网的储能配置及经济性运行方式；但随着光伏消纳率提高，系统的净利润有所下降，这是由于储能系统目前的成本较高，促进光伏消纳所得的经济利润相对于增加的储能成本来讲相对较低，产生的经济效益还无法完全弥补配置成本，因此微电网的净利润随光伏消纳率的提高而有所降低；但从微电网生态效益及环保效益等间接收益的角度，提高光伏消纳率的综合效益更优。随着储能技术的发展，储能成本的降低会进一步扩大微电网的优势，使之成为促进可再生能源消纳系统的重要支撑。

表 4-6 储能配置及净利润对比分析运行指标光伏消纳率 0.932 0.954 0.961

需求响应前净利润（万元） 194 189 186

储能配置容量（k Wh） 966 1076 1125

需求响应后净利润（万元） 224 218 216

储能配置容量（k Wh） 954 1021 1103

4.5 本章小结本章首先确定微电网运行的评价指标，在此基础上建立微电网储能双目标优化配置模型，包括光伏消纳率及系统净利润两个目标函数和保证微电网稳定运行的各种约束条件；再对 NSGA-II 遗传算法进行介绍；最后通过一个微电网算例进行分析，具体包括峰谷时段的划分，基于此计算的电量电价弹性矩阵，需求响应后的负荷曲线，结果表明基于峰谷分时电价的需求响应可以有效改善负荷特性；进而分析储能配置对微电网各运行指标的影响，结果表明储能配置容量增加 42

会提高光伏的消纳率、降低系统利润率、降低电网外购电量和光伏的弃电量；采用 NSGA-II 算法求解微电网储能配置的双目标模型，对储能配置结果进行分析，

验证了模型和算法的合理性。 43

## 第 5 章结论与展望

5.1 结论分布式可再生能源大量接入电网将会影响系统的稳定性，微电网能够有效促进分布式可再生能源就地消纳，发挥可再生能源的清洁环保特点，弥补可再生能源出力不可控的缺点，目前微电网的核心是储能容量的配置，储能系统成本所占比



例依然较高；通过电价杠杆挖掘低谷电力市场，利用负荷侧响应优化负荷特性曲线。基于此背景，研究储能配置优化和需求响应关系，对微电网建设及运营决策都具有重要的现实意义。

本文的研究过程及主要结论如下：

(1) 基于价格弹性理论，利用价格杠杆挖掘低谷电力市场，提出动态分时电价机制，采用隶属度函数及模糊聚类分析方法进行研究，分析峰谷分时电价需求响应微电网经济效益和优化配置的影响。通过算例验证了需求响应能够有效促进可再生能源消纳，降低储能配置容量，提升微电网经济效益。

(2) 基于微电网能量流动方式研究，制定微电网并网运行策略，分析微电网运行的年成本、年收益、可再生能源消纳率三个评价指标，引入需求响应的影响，以微电网净利润及光伏消纳率为目标，考虑微电网稳定运行的约束条件，建立微电网储能优化配置的双目标模型。采用非劣排序遗传算法(NSGA-II)求得帕累托最优解集，得到微电网净利润和可再生能源消纳率优化目标相冲突，净利润越低则其可再生能源渗透率越高。

(3) 考虑需求响应并网型微电网优化配置研究，结果表明，一定范围内增加储能可以提高可再生能源的消纳率，光伏弃电量减少，同时对电网的冲击显著减少，有效解决了大规模分布式光伏的并网难题；需求响应有效改善了负荷特性，进一步缓解了光伏并网困难的境况，同时减少了储能配置容量，提高了微电网的经济效益。

5.2 展望微电网是分布式可再生能源的有效组织方式，是未来重要的供电形式；需求响应可以深度挖掘电力市场潜力，有效改善电力供需平衡，将逐步成为生产生活的常态。本文在考虑需求响应的基础上对微电网储能配置进行优化，取得了一些成果，但在以下方面仍有进一步研究的价值：

(1) 价格需求响中实时电价的动态性更强，经济效果更优，随着电力市场的进一步发展，采用该种方式可以进一步发挥电价的杠杆作用，系统配套设施更 44

加完善使这种电价机制普遍实施将成为可能。

(2) 可再生能源技术的发展将使更多类型的分布式电源在微电网中得到应用，需要对多种电源进行建模分析，微电网的逐步发展会带来更加多样化微电网组织形式，研究不同形式在各类场景下的应用。 45

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工报, 2014, 34(01): 57-70
- [2] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(01): 2-17
- [3] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工学报, 2020, 40(01): 1-18+369
- [4] 李建林, 马会萌, 袁晓冬等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375
- [5] Nick M, Hohmann M, Cherkaoui R, et al. On the optimal Placement of Distributed Storage Systems for Voltage Control in Active Distribution Networks[M]. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2012
- [6] Awad ASA, El-Fouly THM, Salama MMA. Optimal ESS Allocation and Load Shedding for Improving Distribution System Reliability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2339-2349
- [7] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲, 等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(08): 15-24
- [8] Coelho EAA, Cortizo PC, Garcia PFD. Small-signal stability for parallel connected inverters in stand-alone AC supply systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(2): 533-542
- [9] Barklund E, Pogaku N, Prodanovic M, et al. Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2346-2352
- [10] Iyer S V, Belur M N, Chandorkar M C. A generalized computational method to determine stability of a multi-inverter microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(9): 2420-2432
- [11] Diaz G, Gonzalez-Moran C, Gomez-Aleixandre J, et al. Composite loads in 46 stand-alone inverter-based microgrids—Modeling procedure and effects on load margin [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 894-905
- [12] 杨健. 考虑可再生能源随机性的微电网经济性与稳定性协调优化策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(08): 197-200
- [13] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89
- [14] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40
- [15] F. Liu, J. Liu, L. Zhou. A novel control strategy for hybrid energy storage system to relieve battery stress[C]. //IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2010: 929-934
- [16] Y. Nozaki, K. Akiyama, H. Kawaguchi, et al. Evaluation of an EDLC-battery hybrid stand-alone photovoltaic power system[C]. //Conference Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2000: 1634-1637
- [17] 钟永, 孙旭日, 张浩, 等. 风光互补微电网中混合储能系统的容量优化研究[J]. 华东电力, 2013, 41(08): 1622-1626
- [18] 江全元, 石庆均, 李兴鹏等. 风光储独立供电系统电源优化配置[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(07): 19-26
- [19] 于东霞. 风光互补发电系统容量配置及逆变器研究[D]. 扬州大学, 2018
- [20] 杨玉青, 牛利勇, 田立亭, 等. 考虑负荷优化控制的区域配电网储能配置[J].

电网技术, 2015(04):1019-1025

[21] Nick M, Hohmann M, Cherkaoui R, et al. On the optimal Placement of Distributed Storage Systems for Voltage Control in Active Distribution Networks[M]. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2012

[22] 吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10):3829-3836

[23] 薛美东. 微网优化配置和能量管理研究[D]. 浙江大学, 2015

[24] Macrae C, Ozlen M, Ernst A, et al. Locating and sizing energy storage systems for distribution feeder expansion planning[C]//TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference. IEEE, 2015: 1-6

[25] Nick M, Hohmann M, Cherkaoui R, et al. Optimal location and sizing of distributed storage systems in active distribution networks[C]// Powertech. IEEE, 2013: 1-6

[26] 杨晓东. 需求响应参与的微电网系统调控模型与方法研究[D]. 浙江工业大学, 47

[27] 李佳宇. 考虑需求响应的售电商购售电交易优化模型研究[D]. 华北电力大学(北京), 2020

[28] 董军, 张晓虎, 李春雪, 等. 自动需求响应背景下考虑用户满意度的分时电价最优制定策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(07):67-73

[29] 侯世英, 房勇, 孙韬, 等. 混合储能系统在独立光伏发电系统功率平衡中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(5):183-187

[30] 王建学, 张耀, 万筱钟. 光伏出力特性指标体系和分类典型曲线研究[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(05):8-12

[31] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松, 等. 基于寿命量化的混合储能系统协调控制参数优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(01):1-5

[32] J. W. Shim, Y. Cho, S. Kim, et al. Synergistic control of SMES and battery energy storage for enabling dispatchability of renewable energy sources[J]. IEEE Trans. Appl. Supercond, 2005, 15(2):1915-1918

[33] 王磊, 冯斌, 王昭, 等. 计及电池储能寿命损耗的风光储电站储能优化配置[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(05):1-6

[34] 孟洪民, 刘迪, 李强, 等. 考虑蓄电池健康的微电网群模型预测控制能量管理策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(06):88-95

[35] 梁宁, 邓长虹, 谭津, 等. 计及电量电价弹性的主动配电网多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12):44-50

[36] 程瑜, 翟娜娜. 基于用户响应的分时电价时段划分[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(09):42-46+53

[37] 王守文, 黄刚, 石懿, 等. 电动汽车峰谷分时电价方案的综合效益评估分析[J]. 价格理论与实践, 2017(10):68-71

[38] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15):127-134

[39] 孔强, 付强, 林亭君, 等. 基于成本效益分析的峰谷分时电价优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15):60-67

[40] 李沐珂, 张靠社. 计及分布式光伏发电的分时电价模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(04):74-78

[41] 黄剑平, 陈皓勇, 林镇佳, 等. 需求侧响应背景下分时电价研究与实践综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(09):178-187

[42] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型[J]. 电力系统自动化, 2005(20):14-18

[43] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22):3654-3663

[44] 孔晓磊. 计及需求响应的微型能源系统定价模型研究[D]. 燕山大学, 2019

[45] 李义荣. 考虑不确定性的需求响应建模及其在电力系统运行中的应用[D]. 东南大学, 2015

[46] 吉斌, 莫峻, 谭建成. 高比例光伏电能产消群电力需求响应机制设计[J]. 电网技术, 2018, 42(10):3315-3323

[47] 冯雷, 蔡泽祥, 王奕, 等. 计及负荷储能特性的微网荷储协调联络线功率波动平抑策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17):22-28

[48] 彭春华, 刘兵, 左丽霞, 等. 计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(05):60-68

[49] 陈晓露. 交互式智能电网的负荷预测与定价机制[D]. 上海交通大学, 2013.

[50] Daniel S K, Goran S. Factoring the elasticity of demand in electricity prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2):612-617

[51] Gupta Sandip, Ghose Tirthadip, Chatterjee Kalyan. Optimal coordination between PV smart inverters and different demand response programs for voltage regulation in distribution system[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 31(3)

[52] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(06):1709-1716

[53] Qiu Yibin, Li Qi, Huang Lanjia, Sun Cai, Wang Tianhong, Chen Weirong. Adaptive uncertainty sets-based two-stage robust optimisation for economic dispatch of microgrid with demand response[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(18)



[54] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16):1-8

[55] 曾嵘, 彭春华, 王奎, 等. 基于鸟群算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13):117-122

[56] 杨毅, 雷霞, 徐贵阳, 等. 采用 PSO-BF 算法的微电网多目标电能优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13):13-20

[57] 蒋猛, 黄宇, 廖伟涵, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的电-气-热综合能源系统多目标优化[J]. 发电技术, 2020, 41(02):131-136

[58] 郑夏, 马良. 一种多目标非线性优化的 NSGA-II 改进算法[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(07):47-53

指 标
疑似剽窃文字表述
1. 通过逐渐缩小阈值，最终得到聚类数为 3 时的分类结果，即将 24 个小时分为峰、平、谷三种时段，通过 MATLAB 实现这一过程，并令阈值从 1 开始以 10-5 的间距减小，直到聚类数为 3，得到负荷曲线基于模糊聚类法的峰平谷时段划分方案

说明：1. 总文字复制比：被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例

2. 去除引用文献复制比：去除系统识别为引用的文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

3. 去除本人文献复制比：去除作者本人文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例


4. 单篇最大文字复制比：被检测文献与所有相似文献比对后，重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比


5. 指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的


6. 红色文字表示文字复制部分;绿色文字表示引用部分;棕灰色文字表示作者本人文献部分

7. 本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责



 [amlc@cnki.net](mailto:amlc@cnki.net)

 <http://check.cnki.net/>

 <http://e.weibo.com/u/3194559873/>