

同行专家业内评价意见书编号: 20240858130

附件1

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院） 同行专家业内评价意见书

姓名: _____ 刘寅韬

学号: _____ 22160186

申报工程师职称专业类别（领域）: _____ 能源动力

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2024年03月28日

一、个人申报

（一）基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况

在研究生阶段学习了一系列与微电网技术及装备相关的课程，深入了解了储能技术与新型电力系统的相关内容。同时我积极参与了多项应用性课题研究，其中包括国网科技项目与企业合作项目，主要负责项目的整体规划和执行，确保项目的顺利进行。在课题研究过程中，成功应用了先进的技术手段，解决了电力系统中的技术难题，提高新能源-储能系统的运行经济性和效率。此外，我参与了户用光储系统能量管理的研究，通过优化算法和控制策略，提高了系统的能量利用效率和可靠性。这一技术的应用，为企业带来了显著的经济效益和环保效益。

研究过程中定位于电源侧多新能源场站建设共享储能和用户侧计及需量费用的光伏储能系统运行两个应用场景，提出共享储能控制策略和容量定价方法，保障各场站用户的投资收益，提出光储系统能量管理策略和收益评估方法，保障系统经济、安全运行。针对上述两部分研究内容分别进行了工程实践和应用。

2. 工程实践的经历

一、参与上海毅昊公司项目《储能EMS关键技术研究》，负责研究储能辅助新能源平抑发电功率波动的相关算法，并集成于相应储能系统中。

二、参与国网浙江经研院项目《清洁能源与储能汇集介入下的聚合效应与共享调控机制研究》，研究考虑多类型清洁能源联合预测的共享储能控制策略与优化方法，并集成于实际系统中验证算法。

三、参与浙江艾罗网络能源公司项目《户用光储EMS系统关键技术研发》，负责研究以家庭用能经济性为目标，考虑光伏功率限发特殊场景的家庭能量管理优化模型，滚动选择光储逆变器工作模式，并将该算法集成到实际系统中。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例

一、《储能EMS关键技术研究》项目

为避免风电自身为满足波动性指标导致的收益与利用效率大幅下降，在发电侧增加储能系统后，可有效平滑可再生能源输出的有功功率，当实时运行中出现风电爬坡场景时，可基于电化学储能系统快速响应与双向能量流动特性，实现对风电功率的消纳，有效平抑风电输出，提高并网规模。

为此：

1) 研究独立新能源场站自建储能系统时，储能系统与新能源场站的联合运行控制策略。通过滚动更新预测曲线，实现发电计划跟踪精度、平抑波动，减少弃风弃光等控制目标。

2) 多新能源场站-共享储能联合运行控制策略研究

研究多个新能源场站共享储能系统时，储能系统（含共享储能模式）与新能源场站的联合运行控制策略。通过滚动更新预测曲线，实现发电计划跟踪精度、平抑波动，减少弃风弃光等控制目标。

基于一阶低通滤波控制提出滤波时间常数实时优化模型，该模型以平抑波动所使用的储能容量最小为优化目标，以平抑控制指标和储能功率、容量限制为约束，通过滤波时间常数实时优化的储能系统平抑风电功率波动控制，引入储能能量状态的反馈控制和两个时间尺度指标的协调策略，可以满足多时间尺度新能源发电功率波动指标，同时减小储能的总体容量需求。

同时，研究平抑波动模块接口设计与使用方法，分为指令下发、初始赋值、优化控制与滚动

运行四个部分。其中，指令下发阶段，将从数据库表中读取目标新能源场站编号x、储能站编号y与模拟运行开始日期3个值；初始赋值阶段，从原有数据库中将开始时刻之前10min的风电功率写入influxDB中的表“Output_fluctuation”，作为初始联合发电功率值；优化控制阶段，从表“Output_fluctuation”中读取历史10min联合发电功率、当前时刻新能源发电功率、SOC值作为模块输入，基于2.2.3中的模型，通过粒子群算法得出优化结果，输出当前优化时段内储能充放电功率、联合发电功率、更新后的SOC值，并将其写入表“Output_fluctuation”中；滚动运行阶段，以1min为时间尺度，每分钟进行读取数据，调用平抑波动模块，将输出写入数据库的流程，随时间滚动向前运行。

二、《清洁能源与储能汇集介入下的聚合效应与共享调控机制研究》项目

基于汇集接入下清洁能源聚合模型与联合功率预测技术，在优先满足电网紧急调度的前提下，以具有电网主动支撑能力的清洁能源聚合发电单元为研究对象，以清洁能源-储能聚合发电单元的经济性指标优化、容量置信度与能源消纳率提高为目标，研究共享储能多场景多目标自主趋优控制策略，提出储能容量多功能、多时间尺度调度控制方法，实现清洁能源-

储能聚合发电单元在经济性和电网主动支撑性上的双重趋优。针对现阶段电源侧储能成本疏导的难点，提出了一种由新能源场站和储能运营商组成的“合作联盟”共享储能方案，储能可在满足合作联盟内部新能源场站的调控需求前提下，利用剩余容量参与电网辅助服务，解决了新能源场站建设储能意愿低的基础问题。同时，面向跟踪计划出力与电网二次调频的场景，量化分析了“合作联盟”共享储能相对于新能源自建储能在投资效益、资源利用有效性方面的差异，并提出基于Shapley值的储能容量定价方法，分析了“合作联盟”共享储能模式具备商业上的可行性。结果表明，“合作联盟”共享储能模式提升了储能的资源利用效率，且在收益分配方面更具公平性。

三、《户用光储EMS系统关键技术研发》项目

提出一种用户侧储能计及需量预测的能量管理策略和概率化收益评估方法。围绕居民用户选择电价套餐时缺乏对需量进行刻画的问题，提出一种基于长短期记忆网络的月度峰值负荷需量滚动预测方法，并采取月内预测修正以保证光伏储能系统调控需求；以用户需量电费以及电量电费最小为目标，提出了光储用户的能量管理模型，可用于包含需量电价或电量电价的多种电价模式；提出一种考虑预测不确定性的电价方案收益评估方法，通过核密度估计法表征负载和光伏功率的预测能力，并使用蒙特卡罗模拟生成大量场景并基于所提出的能源管理策略对不同的电价方案进行了概率经济评估，从而实现电价套餐的最优选择。同时依托某工业园区的光储系统测试实验室验证了所提方法的有效性。结果表明，该方法能有效提升光储系统在含需量电费的电价结构下的经济性并为用户提供有效的收益评估。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

| 成果名称 | 成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等] | 发表时间/授权或申请时间等 | 刊物名称/专利授权或申请号等 | 本人排名/总人数 | 备注 |
|--------------------------|---|---------------|--------------------------|----------|------|
| 基于合作联盟的电化学储能共享模式研究 | 核心期刊 | 2023年07月18日 | 电网技术 | 1/5 | |
| 适用于户用光储系统的储能能量管理方法 | 发明专利申请 | 2023年06月30日 | 申请号: CN11636550 7A | 2/4 | 导师一作 |
| 一种户用光储系统的储能运行模式滚动优化方法及装置 | 发明专利申请 | 2023年06月23日 | 申请号: CN 116316823A | 1/7 | |


2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况

| | |
|--|--|
| 课程成绩情况 | 按课程学分核算的平均成绩： 84 分 |
| 专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求) | 累计时间： 1.1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 90 分(要求80分及以上) |
| 本人承诺 | |
| 个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！ | |
| 申报人签名： 刘定超 | |



二、日常表现考核评价及申报材料审核公示结果

| | |
|--------------|--|
| 日常表现 考核评价 | 非定向生由德育导师考核评价、定向生由所在工作单位考核评价： <input checked="" type="checkbox"/> 优秀 <input type="checkbox"/> 良好 <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格 德育导师/定向生所在工作单位分管领导签字（公章）：  年 3 月 29 日 |
| 申报材料 审核公示 | 根据评审条件，工程师学院已对申报人员进行材料审核（学位课程成绩、专业实践训练时间及考核、学位论文、代表作等情况），并将符合要求的申报材料在学院网站公示不少于5个工作日，具体公示结果如下： <input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 不通过（具体原因：_____ 工程师学院教学管理办公室审核签字（公章）：_____ 年 月 日 |

浙江工业大学研究生院

攻读硕士学位研究生成绩单

| 学号: 22160186 | 姓名: 刘寅韬 | 性别: 男 | 学院: 工程师学院 | 专业: 电气工程 | 学制: 2.5年 | | | | | | |
|-------------------------|-----------------|-------------|---------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------|----|-----|----|-------|
| 毕业时最低应获: 26.0学分 | | 已获得: 27.0学分 | | 入学年月: 2021-09 | 毕业年月: 2024-03 | | | | | | |
| 学位证书号: 1033532024602195 | | | 毕业证书号: 103351202402600421 | | | | | | | | |
| 学习时间 | 课程名称 | 备注 | 学分 | 成绩 | 课程性质 | 学习时间 | 课程名称 | 备注 | 学分 | 成绩 | 课程性质 |
| 2021-2022学年秋季学期 | 研究生英语基础技能 | | 1.0 | 免修 | 公共学位课 | 2021-2022学年冬季学期 | 工程伦理 | | 2.0 | 79 | 公共学位课 |
| 2021-2022学年秋季学期 | 新能源发电与变流技术 | | 2.0 | 95 | 专业学位课 | 2021-2022学年秋季学期 | 研究生论文写作指导 | | 1.0 | 81 | 专业学位课 |
| 2021-2022学年秋季学期 | 计算机实时控制技术 | | 2.0 | 76 | 专业学位课 | 2021-2022学年冬季学期 | 研究生英语 | | 2.0 | 免修 | 公共学位课 |
| 2021-2022学年秋季学期 | 电力系统运行分析 | | 2.0 | 83 | 专业选修课 | 2021-2022学年春季学期 | 自然辩证法概论 | | 1.0 | 81 | 公共学位课 |
| 2021-2022学年秋季学期 | 现代控制理论 | | 3.0 | 89 | 专业学位课 | 2021-2022学年夏季学期 | 微电网技术工程实践 | | 4.0 | 85 | 专业学位课 |
| 2021-2022学年冬季学期 | 综合能源系统集成优化 | | 2.0 | 90 | 专业学位课 | 2021-2022学年春季学期 | 优化算法 | | 3.0 | 91 | 专业选修课 |
| 2021-2022学年秋季学期 | 中国特色社会主义理论与实践研究 | | 2.0 | 87 | 公共学位课 | | | | | | |

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。

2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2024-04-02

《电网技术》编辑部

录 用 通 知

刘寅韬，江全元，耿光超，郭凯杰，潘御钦先生/女士：

您好！

感谢您对《电网技术》的关心与支持，您投到本刊的稿件《基于合作联盟的电化学储能共享模式研究》（编号 DWJS23-0552，DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0552）已被本刊正式录用，请勿再投其他刊物。欢迎您继续投稿。

此致

敬礼



2023-07-11

地址：100192 北京清河小营东路 15 号 中国电力科学研究院
电话：010-82812532/82812543/82812523/82812981/82812982
传真：010-82812532 E-mail: pst@epri.sgcc.com.cn

基于合作联盟的电化学储能共享模式研究

刘寅韬¹, 江全元², 耿光超², 郭凯杰¹, 潘御钦²

(1. 浙江大学工程师学院, 浙江省 杭州市 310015, 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310007)

Research on the sharing model of electrochemical energy storage based on cooperative alliance

LIU Yintao¹, JIANG Quanyuan², GENG Guangchao², GUO Kaijie¹, PAN Yuqin²

(1. The Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, Zhejiang Province, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: With the confirmation of the strategic goal of "reaching the peak of carbon emissions by 2030, and achieving carbon neutrality by 2060", the construction of novel power systems has become a key sector in the country's major strategic layout during the "Fourteenth Five Year Plan" period. Therefore, the construction of energy storage facilities as a flexible resource regulation will constitute an important guarantee for the safe and stable operation of power systems. This article proposes a "cooperative alliance" shared energy storage solution consisting of new energy stations and energy storage operators to address the difficulties in reducing the cost of energy storage on the power supply side at present. Energy storage utilizes surplus capacity to participate in grid auxiliary services while meeting the regulatory needs of new energy stations within the cooperative alliance, solving the basic problem of low energy storage willingness in the construction of new energy stations. At the same time, in the scenario of tracking the planned output and secondary frequency regulation of the power grid, simulation and quantitative analysis were conducted to compare the differences in investment efficiency and resource utilization efficiency between the "cooperative alliance" shared energy storage and the self built energy storage of new energy. Based on the proposed Shapley value based energy storage capacity pricing method, the commercial feasibility of the "cooperative alliance" shared energy storage model was analyzed.

KEY WORDS: Novel power system, Shared energy storage, Track generation schedule, AGC, Shapley value

摘要: 随着“双碳”战略的确定, 新型电力系统建设已成为“十四五”期间国家重大战略布局的关键环节, 而作为灵活性调节资源的储能配套建设将构成电力系统安全稳定运行的重要保障。针对现阶段电源侧储能成本疏导的难点, 提出了一种由新能源场站和储能运营商组成的“合作联盟”共享储能方案, 储能在满足合作联盟内部新能源场站的调控需求前提下, 利用剩余容量参与电网辅助服务, 解决了新能源场站建设储能意愿低的基础问题。同时, 面向跟踪计划出力与电网二次调频的场景, 量化分析了“合作联盟”共享储能相对

于新能源自建储能在投资效益、资源利用有效性方面的差异, 并提出基于 Shapley 值的储能容量定价方法, 分析了“合作联盟”共享储能模式具备商业上的可行性。

关键词: 新型电力系统, 共享储能, 跟踪发电计划, 二次调频, Shapley 值;

0 引言

在“双碳”战略的指引下, 风、光等新能源在电网中的渗透速率越来越快, 亟需更多灵活性资源为电网安全、稳定、经济运行提供频率支撑。储能作为一种优质灵活性资源, 在电网二次调频、辅助新能源跟踪发电计划提高消纳能力等方面都具有很大优势。但当前在电源侧中, 新能源配比建设的储能大多为独立自建, 存在资源利用效率低的问题。同时, 由于此类储能质量不可控、容量小的特点, 存在控制局限性问题^[1-4]。为此, 在电源侧产生了共享储能概念^[5-6], 旨在将多个新能源场站所需储能聚合在一起以实现更加灵活地调配和更高的收益, 并采用合适的方法完成收益分配满足多方利益。因此, 结合电源侧多个新能源场站信息, 从共享储能辅助新能源跟踪发电计划、参与二次调频及共享分配模式等方面明确合作联盟的共享模式具有重要意义。

国内外学者针对储能辅助新能源场站跟踪发电计划以及共享储能参与调频的问题展开了大量研究, 但较少涉及电源侧储能同时考虑多场站跟踪计划出力与电网二次调频的控制策略。文献[7-8]提出了电源侧储能辅助新能源场站跟踪发电计划的控制策略, 但没有考虑共享储能对新能源互补特性的有效利用。文献[9]提出在新能源汇集站配置共享储能, 并与新能源场站储能协同进行跟踪计划出力的调控, 但并未考虑储能参与电网调频的应用场景。文献[10]提出了储能联合需求侧资源跟踪可再生能源发电曲线的策略, 但同样没有涉及电网侧的

应用场景。文献[11-12]考虑储能在承担多个新能源机组一次调频义务的前提下，提供二次调频等服务，但是其考虑的一次调频应用场景对储能荷电状态(state of charge, SOC)影响较小。文献[13-14]则分析了风电场与光伏电站在运行过程中的互补特性，但没有考虑跟踪计划出力的应用场景。因此，目前对电源侧共享储能的研究较少涉及同时考虑多场站跟踪计划出力与电网二次调频的控制策略。

共享储能的商业模式与收益分配问题^[15-16]需考虑合作方的公平性与经济性。文献[17]提出一种基于虚拟储能共享的新型商业模式，可以降低储能容量和用户安装成本。文献[18-21]针对用户侧共享储能场景，基于核仁法、纳什谈判等博弈方法进行公平性分配。文献[22]提出基于改进 Shapley 值法，考虑联盟内各微电网成员位置不同导致的线路损耗不同，从而研究共享储能配置与成本分摊问题。但是现有的商业模式及收益分配策略多集中在用户侧共享储能，对于电源侧共享储能的商业模式与收益分配问题研究较少。

针对上述问题，本文在电源侧面向包含多个新能源场站与储能的合作联盟，提出一种同时考虑多场站跟踪计划出力和参与二次调频的储能控制策略以及基于 Shapley 值的合作联盟收益分配方法。首先在合作联盟内部针对多个新能源场站的跟踪计划需求，采用功率汇聚的方式实现储能多用户的共享。然后在满足内部跟踪计划需求的前提下，在滚动运行中基于优化控制获得未来一小时二次调频的申报容量参与辅助服务市场，实现储能多重应用场景下的共享。最后基于 Shapley 值法对共享的额外收益进行再分配，保证各方收益均高于独立自建储能。

1 基于合作联盟的共享模式

1.1 共享储能合作联盟的构建

电源侧共享储能的运行与收益分析需要考虑风光等多种自然资源的互补性，从而构建以新能源场站与储能运营商为主体的合作联盟，图 1 展示了共享储能合作联盟关系及这种合作联盟模式所需要获得的外部政策环境支持。储能运营商与多个新能源场站之间进行容量交易以辅助新能源并网，考虑各场站的功率互补以及各自对储能资源的消耗，通过 Shapley 模型进行收益分配，剩余储能容量作为灵活性调控资源参与电力市场，其中增加辅助服务品种包括引入转动惯量、爬坡等服务^[23-25]。同时电网通过自我调节能力更强的新

能源-共享储能合作联盟，获得相对集中、有效、可控的灵活性调节资源，更高效地实现新型电力系统的发电与供电平衡。

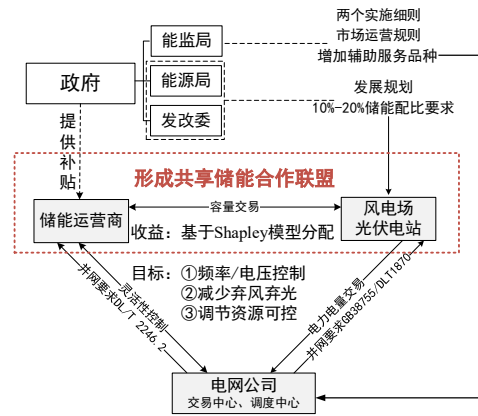


图 1 共享模式下的合作联盟关系

Fig. 1 Cooperative alliance relationship in the context of the sharing economy mode

1.2 合作联盟中的成员及参与联盟方式

1.2.1 新能源场站

无需独立自建储能，维护储能物理设备，可减少项目建设资金一次性投入。通过“共享储能”主体提供的“容量”服务，实现减少弃风弃光、平抑波动、计划跟踪，及满足电网一次调频、自动发电控制（Automatic Generation Control, AGC）的控制要求。合作联盟模式将联盟内各新能源场站聚合后视作一个类似于电源聚合商的整体，电网根据相应规则进行集中考核。

1.2.2 储能运营商

通过对多个新能源场站提供“共享”容量服务，实现考虑储能全生命周期成本与各新能源场站出力波动的多时间尺度双层收益分配。鉴于风、光新能源具有“时空互补性”，“共享储能站”满足共享对象的储能资源总需求容量，将少于新能源独立配置的储能资源。

基于电化学储能的全生命周期综合成本设计容量交易的月度费用，作为长时间尺度的容量交易标准。共享交易周期结束后，基于风光互补的特性进行效益分摊，通过对比互补后的考核偏差电量以及各自自行建设相同比例储能条件下的考核偏差电量，刻画各个新能源场站在互补状态下的贡献比例，并将共享后获得的多余收益依据此比例返还给各新能源场站，作为短时间尺度的交易方式。最终达到各场站共享储能收益均高于自建储能的收益的效果，同时此分配方式充分考虑了各场站对储能的差异化需求。

除提供容量服务外,共享储能站还能通过参与电网调频等辅助服务获得收益。由于储能的调频有效性远高于常规机组^[26-27],故在调频辅助服务市场,储能具有明显的竞争优势。

2 合作联盟共享模式的运行机制

电化学储能合作联盟共享模式与新能源独立自建储能运行机制上存在较大差异。通过对合作联盟内新能源场站与储能的集中控制与收益分配,形成合作联盟共享模式的运行机制,利用新能源场站出力的时空互补特性使储能资源利用的有效性明显高于独立配置,且可以降低新能源场站对于储能物理设备的维护工作量,同时“容量购买”服务也可提升新能源场站运营的经济性,减少合作联盟内新能源发电的波动性。

2.1 多运行目标下的合作联盟共享储能控制方法

2.1.1 合作联盟共享储能辅助新能源跟踪发电计划

在同一合作联盟内,一定数量的新能源场站部署在不同的地理位置,由于风光等自然资源具有时空互补性,共享储能合作联盟的发电波动性以及计划偏差都将大大降低。

将合作联盟内各新能源场站规定配置一定比例的储能进行集中建设与运营,同时将各场站的计划跟踪曲线与新能源发电曲线也分别进行聚合,形成共享模式的基本框架。

首先需要分析共享模式与新能源场站单独运营模式的跟踪发电计划效果。基于储能辅助新能源跟踪发电计划出力问题^[7-9],同时考虑实际的电网相关并网发电规定与储能自身运行特性进行模型构建。设计优化目标为合作联盟运行过程中所需成本最小,即新能源-储能联合发电功率与所有新能源场站出力计划的偏差最小,并考虑储能运行的度电成本。目标函数如式(1)所示:

$$\min_{P_{\text{ass}}^t, P_{\text{batt}}^t} F_{\text{ess}} = \sum_{t=1}^T (\lambda_s P_{\text{ass}}^t + \lambda_p P_{\text{batt}}^t) \Delta t \quad (1)$$

式中, F_{ess} 为目标函数; T 为优化的总时段数; P_{ass}^t 为 t 时刻新能源储能联合功率还需被考核的功率值; P_{batt}^t 为 t 时刻储能的充放电功率; λ_s 为联合发电功率计划偏差惩罚系数; λ_p 为储能全寿命周期下的运行成本系数。

需考虑的相关约束如式(2)-(8)所示。

1) 跟踪发电计划出力的考核约束:

$$P_{\text{NE_fc}}^t - P_{\text{batt}}^t - P_{\text{ass}}^t \leq (1+m)P_{\text{plan}}^t \quad (2)$$

$$P_{\text{NE_fc}}^t - P_{\text{batt}}^t + P_{\text{ass}}^t \geq (1-m)P_{\text{plan}}^t \quad (3)$$

式中, $P_{\text{NE_fc}}^t$ 为超短期新能源预测功率; m 为联合发电曲线偏离计划曲线可免于考核的限制比例,一般取 2%。

同时需考虑的相关约储能约束如式(4)-(8)所示:

2) 储能功率约束:

$$P_{\text{batt}}^t \geq \max(-P_{\text{max}}, \frac{E * \text{SOC}_{\text{min}} - E^{t-1}}{\Delta T \eta_c}), P_{\text{batt}}^t < 0 \quad (4)$$

$$P_{\text{batt}}^t \leq \min(P_{\text{max}}, \frac{(E * \text{SOC}_{\text{max}} - E^{t-1}) \eta_d}{\Delta T}), P_{\text{batt}}^t \geq 0 \quad (5)$$

式中, P_{max} , SOC_{max} 和 SOC_{min} 分别为储能的额定功率、允许的最大和最小荷电状态; P_{batt}^t 为第 t 时段的储能介质充放电功率,正值表示充电,负值表示放电,单位是 MW; η_c 和 η_d 为储能装置的充电和放电效率, E 为储能最大容量。

3) 储能充放电约束

$$E^t = \begin{cases} E^{t-1} + P_{\text{batt}}^t \Delta T \eta_c, P_{\text{batt}}^t \geq 0 \\ E^{t-1} + P_{\text{batt}}^t \Delta T / \eta_d, P_{\text{batt}}^t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, E^t 为储能介质的当前时段 t 结束后的电量,单位是 MWh; ΔT 为计算窗口时长,单位是小时。

考虑储能的使用寿命,使其荷电状态保持在合理的取值范围内:

$$E * \text{SOC}_{\text{min}} \leq E^t \leq E * \text{SOC}_{\text{max}} \quad (7)$$

考虑到新能源场站的实际运行场景,新能源场站和储能的联合功率 $P_{\text{NE,bat}}^t$ 不大于新能源场站额定容量:

$$0 \leq P_{\text{NE,bat}}^t \leq P_{\text{NE,rom}} \quad (8)$$

式中, $P_{\text{NE,rom}}$ 表示新能源场站额定容量。

另外,根据“电力并网运行管理规定”要求,需要自建的储能容量通常为新能源装机容量的一定比例,因此自建储能模式下,配置储能的功率与容量如式(9)所示:

$$\begin{cases} P_{\text{max}} = \gamma P_{\text{NE,rom}} \\ E / P_{\text{max}} = 2 \end{cases} \quad (9)$$

式中, γ 表示规定的新能源建设储能容量的比例,一般为 10%-15%,储能充放电时长一般为 2 小时。

共享储能模式^[13]下,配置储能的功率与容量如式(10)所示:

$$\begin{cases} P_{\text{max}} = \gamma \sum_{i=1}^N P_{\text{NE,rom}}^i \\ E / P_{\text{max}} = 2 \end{cases} \quad (10)$$

式中, N 表示参与共享的风光电站个数; $P_{\text{NE,rom}}^i$ 表示参与共享的第 i 个风光电站的装机容量。

2.1.2 合作联盟共享储能参与电网二次调频

由于二次调频场景下储能的频繁动作会对储能使用寿命造成一定影响,因此综合全寿命周期下的成本,二次调频容量申报以小时为时间尺度进行

申报, 本文提出一种考虑未来一小时跟踪计划场景的优化结果, 并基于储能剩余功率与 SOC 确定未来一小时的调频可申报容量 P_{ap} 的方法, 如式(11)-(14)所示。同时, 剩余容量继续进行跟踪计划出力的滚动运行。

$$P_{m1} = P_{\max} - \max(|\tilde{P}_{\text{batt}}|) \quad (11)$$

$$P_{m2} = (\text{SOC}_{\max} - \max(\tilde{K}_{\text{SOC}})) * E / t_a \quad (12)$$

$$P_{m3} = \min(\tilde{K}_{\text{SOC}}) - \text{SOC}_{\min} * E / t_a \quad (13)$$

$$P_{ap} = \min(P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}) * (1 - q) \quad (14)$$

式中, \tilde{P}_{batt} 为未来 1 小时优化结果的储能功率序列; P_{m1} 为考虑功率上限的储能未来 1 小时充放电功率的上限值; P_{m2} 为考虑储能 SOC 上限的储能未来 1 小时充放电功率的上限值; P_{m3} 为考虑储能 SOC 下限的储能未来 1 小时充放电功率的上限值; t_a 为申报调频时段长度, 即一小时; \tilde{K}_{SOC} 为未来 1 小时优化结果的 SOC 序列; q 为预留的储能裕量, 取 5%。

共享储能参与二次调频^[11-12]的收益计算方式如式(15)-(17)所示:

$$C = C_1 + C_2 \quad (15)$$

$$C_1 = \sum_t^{t+nT} c_{ic} P_{ap} T \quad (16)$$

$$C_2 = \sum_t^{t+nT} \sum_{j=1}^T c_{ip} P'_{AGC} \quad (17)$$

式中, C 为二次调频收益, C_1 为调频容量收益, C_2 为调频里程收益; c_{ic} 为调频容量收益系数; n 为合作联盟计费周期内参与的调频小时数; c_{ip} 为调频里程系数; P'_{AGC} 表示 t 时刻电网 AGC 信号; j 为参与调频的一小时内的时段数。

在运行时间段内, 合作联盟自建储能的考核电量与考核费用如式(18)和(19)所示:

$$Q_{\text{ast}}^t = \sum_{i=1}^N P'_{\text{ass},i} \Delta t \quad (18)$$

$$\omega_{\text{as},t} = \sum_{i=1}^T \lambda_{\omega} Q_{\text{ast}}^t \quad (19)$$

式中, Q_{ast}^t 为合作联盟内所有新能源场站 t 时段的考核电量; $P'_{\text{ass},i}$ 为合作联盟内 t 时段的新能源场站 i 考核总考核功率; $\omega_{\text{as},t}$ 为合作联盟内所有新能源场站一段时间 T 内的考核费用; λ_{ω} 表示单位电量的考核费用。

在运行时间段内, 合作联盟聚合运行下的聚合功率如式(20)所示:

$$P'_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N P_i^t \quad (20)$$

式中, p_i^t 表示新能源场站 i 在 t 时刻的功率。

以同样的跟踪计划出力优化方法运行, 考核电量与考核费用计算方法同上。

2.2 基于建设成本的容量定价分析

合作联盟共享储能可减少各方的必要成本并增加联盟的总体收益, 因此定价时需要考虑储能运营者的建设与运营成本以及联盟内各新能源场站的出力偏差与对储能的实际需求。综合考虑以上因素, 提出一种合作联盟共享储能双层定价方法, 合作联盟各方收益如图 2 所示。

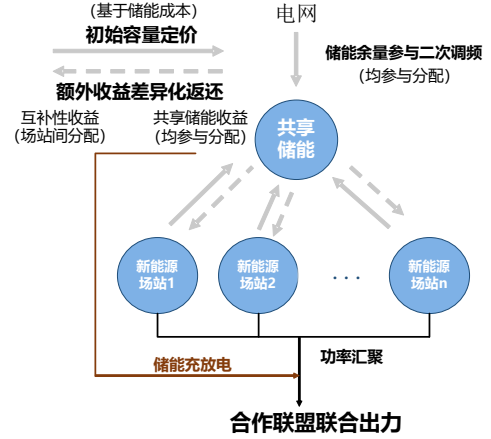


图 2 合作联盟各方收益

Fig. 2 The benefits for each party in cooperative alliance

一方面, 基于储能全寿命周期下的成本, 制定合作联盟内的初始容量定价, 各场站基于自身需配置的储能容量购买价格相对稳定的初始容量服务, 从而保证储能运营者的利益。另一方面, 基于共享模式下的优化控制策略, 对比新能源场站自建储能模式下的经济效益, 充分考虑风光互补特性的影响, 采用 Shapley 值法对联盟额外收益进行分配返还。两者结合, 形成各场站的容量租赁费用。

2.2.1 基于全寿命周期成本的初始容量定价

共享模式下, 作为“容量服务”潜在购买方的新能源场站需要评估不同模式的建设成本, 涵盖储能站全生命周期内的各项成本, 如储能系统建设成本、功率转换损耗、运行成本、回收残值和其他附加成本等, 再确定统一的购买“容量服务”的合同定价。

根据储能的类型、建设容量和最大存储电量等参数, 通过式(21)可以得到投资储能电站的近似年成本。

$$W_{\text{sh0}} = (c_p P_{\max} + c_c E) \frac{\tau(1+\tau)^y}{(1+\tau)^y - 1} \quad (21)$$

式中, W_{sh0} 为运行周期内储能电站的年投资成本; c_p 和 c_c 均为考虑了储能各项成本后的综合系数, 其中 c_p 为配置功率的成本系数, 电化学储能站一般取 80-150 万元/MW, c_c 为配置容量的成本系数, 电化学储能站一般取 150-230 万元/MW; τ 为年折现率;

y 为储能电站使用年限即投资周期。

共享储能通过提供容量服务并收取风电场、光伏电站初始容量服务费用来覆盖自身的建设成本,因此将合作联盟内单位合同周期的储能成本作为初始容量定价,式(22)表示共享模式下储能在合同周期 T 内所等效的投资成本。

$$W_{sh,T} = \frac{W_{sh0}}{T_0 / T} \quad (22)$$

式中, $W_{sh,T}$ 为共享模式下合同周期 T 内所等效的总投资成本; T_0 为共享储能在当前运行条件下的年运行时长。

合作联盟中新能源场站 i 在合同周期内需要付出的储能初始容量费用 W_{io} 如式(23)所示。

$$W_{io} = \frac{P_{NE,rom}^i T}{\sum_{i=1}^N P_{NE,rom}^i T} W_{sh,T} \quad (23)$$

在合同开始前,以初始容量定价的模式进行交易,形成一种“定金式”的容量交易,是新能源场站对共享储能运营商投资成本的分摊。

2.2.2 基于 Shapley 值的收益返还分配方法

对于共享储能提供方来说,卖出容量服务的收益应该能够基本覆盖所建设的对等容量成本。而对于新能源场站来说,购买容量服务的费用,应该低于其自建规定比例储能所需花费的成本,因此在初始容量定价的基础上,需差异性返还利益以满足新能源场站利益,同时形成一定的奖惩机制,促进联盟成员的合作积极性。

在合作联盟总考核电量明显下降即发电收益提高的前提下,针对额外减免的考核费用以 Shapley 值模型分配给各个场站,既可以保证收益超过自建储能,又能同时考虑到联盟风光互补性中各成员的贡献度,体现“按劳分配”的原则。

基于多用户下总跟踪计划出力考核电量的减少量,计算每种不同组合下的考核电量减免值作为子集收益,并利用优化模型得出共享前后考核电量的差值,如式(24)所示。

$$\nu(\mathcal{G}) = \lambda_k \left(\sum_{t=1} p_{k0,\mathcal{G}}^t \Delta t - \sum_{t=1} p_{ks,\mathcal{G}}^t \Delta t \right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

式中, $\nu(\mathcal{G})$ 为新能源场站集合 \mathcal{G} 参与共享后的效益, λ_k 为超过跟踪新能源发电计划误差外的电量单位考核费用, $p_{k0,\mathcal{G}}^t$ 为 t 时刻不采用共享储能模式下该场站的考核功率, $p_{ks,\mathcal{G}}^t$ 为 t 时刻采用共享模式下该场站的考核功率。

Shapley 值计算方式如式(25)–(26)所示。

$$\sigma_i = \sum_{s \in S_i} w(|s|) [\nu(s) - \nu(s \setminus i)], \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

$$w(|s|) = \frac{(N - |s|)! (|s| - 1)!}{N!} \quad (26)$$

式中, σ_i 为表征新能源场站对合作联盟的依赖度,依赖性越高则 σ_i 越大; s_i 为集合 S 中包含新能源场站 i 的所有子集; $|s|$ 为集合 s 中的元素个数; $w(|s|)$ 为加权因子; $\nu(s)$ 为新能源场站集合 S 中所有包括新能源场站 i 的集合的效益 $\nu(\mathcal{G})$ 之和; $\nu(s \setminus i)$ 为新能源场站集合 S 中除去新能源场站 i 后可取得的效益; N 为参与共享的新能源场站个数。

基于以上对合作联盟的依赖度,通过是否采用共享模式情况下辅助新能源跟踪发电计划后的考核电量费用之差表征共享储能效率,提出一种返还收益值 W_{ir} 计算方法,利用式(27)–(28)可计算新能源场站 i 的返还收益值 W_{ir} 。

$$\Delta W_o = \lambda_k \left(\sum_{t=1} p_{k0}^t \Delta t - \sum_{t=1} p_{ks}^t \Delta t \right) = \Delta W_{comp} + \Delta W_{ess} \quad (27)$$

$$W_{ir} = \Delta W_{comp} \frac{\frac{1}{\sigma_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i}} + \Delta W_{ess} \frac{\frac{1}{\sigma_i}}{\sum_{i=1}^{N+1} \frac{1}{\sigma_i}} \quad (28)$$

式中, ΔW_o 为采用共享储能前后考核费用差值; p_{k0}^t 为 t 时刻采用共享模式下的考核总功率; p_{ks}^t 为 t 时刻不采用共享储能模式下的各场站考核总功率; ΔW_{comp} 为由于新能源互补考核费用减少的值; ΔW_{ess} 为由于共享储能作用考核费用减少的值; σ_i 为新能源场站与共享储能共同参与分配时第 i 个参与者对合作联盟的依赖度。

合同周期内新能源场站 i 在双层定价模式下储能容量费用 W_i 可用式(29)表示。

$$W_i = W_{io} - W_{ir} \quad (29)$$

由此,可以研究得出“合作联盟”共享储能与新能源场站的成本分摊比例与容量电价模型,形成储能运营商-新能源场站“共赢”的方案。

3 算例分析

采用欧洲 elia 数据集中比利时的若干风电场、光伏电站的实时发电功率、新能源发电计划以及功率预测等数据,选取五个风电场、五个光伏电站作为内待选的成员形成共享储能“一对多”运行的“合作联盟”进行相应的测算。各新能源场站额定容量均为 100MW,在新能源自建储能按 10% 功率^[28],充放电时长为 2h 的总容量配额进行分析,即 10MW/20MWh,而合作联盟共享储能按照区域内新能源总容量的 10% 功率,充放电时长为 2h 的总容量配额进行计算。

通过向第三方建设的储能购买容量构建交易模式,分析风光互补条件下跟踪计划出力场景的共

享储能收益情况、“合作联盟”共享储能的定价机制与各成员的收益情况以及储能参与二次调频的收益情况。

3.1 跟踪计划出力场景下的共享储能收益分析

根据该地区两个额定容量为 100MW 的风电场、光伏电站某典型日的发电功率与发电计划, λ_s 取 0.46 元/kWh, λ_p 取 0.42 元/kWh, 据此进行仿真分析, 验证合作联盟模式下储能的作用。由于存在风光互补性, 风光电站在配置相同容量的储能后, 能够提高储能利用效率, 延长储能使用时间, 使风光联合出力更为接近计划曲线。该风电场与光伏电站共享可验证互补特性, 其一天的出力互补特性如图 3 所示。

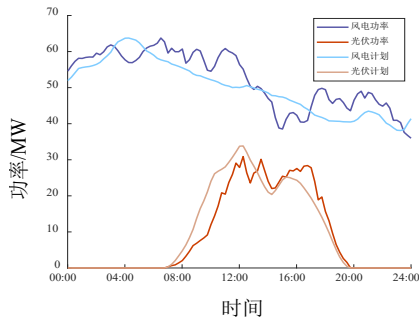


图 3 某日新能源场站实际功率与计划曲线

Fig. 3 The actual power and the planned curve of a certain day in a renewable station

风电场在傍晚至中午以及夜晚时段功率较大, 也往往会超过计划值产生较大的计划偏差; 而光伏在晚上无弃光, 同时往往在下午会超过发电计划产生较大的计划偏差, 因此风光具有一定的互补性, 叠加后偏离计划值会明显减小, 对储能资源的需求同样会减小。在各配 10MW, 20MWh 储能的情况下, 储能在新能源发电超过计划曲线时充电, 在新能源发电低于计划曲线时进行放电, 基于优化模型使新能源-储能联合出力对各自的计划曲线进行跟踪。自建储能模式与共享储能模式下运行的储能 SOC 如图 4 所示, 本来在独立使用储能 SOC 都达到限制, 而共享储能模式下 SOC 会仍有余量, 说明新能源场站对储能能量的利用效率更高。

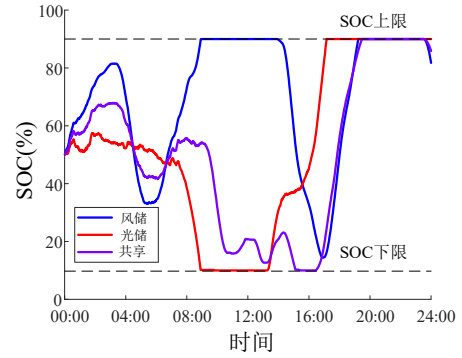


图 4 自建储能与共享模式储能 SOC 对比

Fig. 4 SOC comparison between self-built energy storage and shared-mode energy storage

对比风电或光伏以及共享模式三种场景下完全满足计划曲线对储能功率的需求, 其中储能功率需求为正表示充电, 反之表示放电。对于光伏而言, 早上与晚上对储能资源没有需求, 储能基本被闲置; 对于风电而言, 全天有相当多的计划偏差需要储能补足, 但面临储能容量不足的问题。因此, 共享后可以用更大的储能容量在早上满足更多风电对计划跟踪的要求, 同时当风电实际出力低于计划值而光伏实际出力高于计划值时, 多余的光伏可以与风电形成有效的补充, 减少对储能资源的需求, 反之亦然。

单独新能源配置储能与多场站共享储能在同一控制策略下运行, 得到两种模式下风电与光伏当天仍偏离计划曲线的功率值的对比如图 5 所示, 图中考核功率表示储能优化控制策略下, 风电场/光伏电站在合理偏差范围外还需要被考核并惩罚的功率。

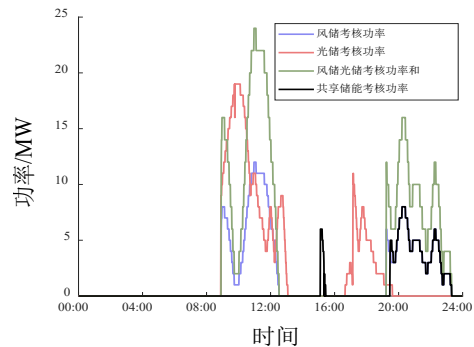


图 5 不同模式下新能源场站仍需考核功率

Fig. 5 Renewable energy stations need to assess power under different modes

可见, 相比新能源场站配置 10MW 容量的独立储能, 共享储能可以减少仍需被考核的总电量, 其中考核电量的具体对比值如表 1 所示。

由于 2 个 10MW, 20MWh 的储能电站所需建设成本往往高于 1 个 20MW, 40MWh 的储能电站, 且储能站的场地成本与储能利用效率较高, 合作联盟模式明显在经济性上更有优势。

同时对比图 6 的可申报调频容量, 当天共享模式能有更多余量可以参与电网二次调频。

表 1 自建 10MW 储能与共享储能偏差电量对比

| Table 1 Comparison of deviation quantities between self-built 10MW energy storage and shared energy storage | | | |
|---|-------------|--------------|------------|
| | 风电场 自建储能 | 光伏电站 自建储能 | 共享储能 模式 |
| 考核电量/MWh | 41.26 | 55.31 | 17.53 |

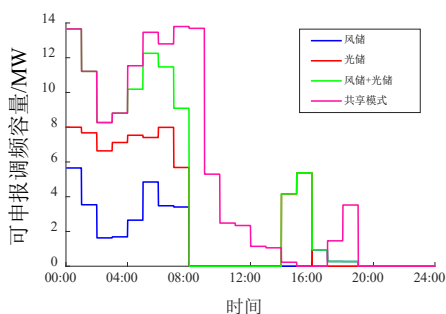


图 6 自建储能与共享模式可申报调频容量对比

Fig. 6 Comparison of the declared frequency regulation capacity between self-built energy storage and shared-mode energy storage

基于风光互补特性, 针对新能源场站调控需求的共享储能优势更大, 当合作联盟中存在多个风电场与光伏电站时, 可以得到同样的结论。

选取十个风光电站为研究对象, 以某月的数据为例, 在储能辅助新能源跟踪发电计划的应用场景下, 每个新能源场站使用额定容量 10% 的自建储能可跟踪发电计划, 但每个新能源场站仍存在偏离计划需考核的电量从 750MW 到 3706MW 不等。

基于跟踪发电计划的储能出力响应对十个新能源场站功率进行聚合运行, 该月通过自建储能与建设共享储能的计划偏差电量对比结果如表 2 所示, 共减少了偏差电量超过 10000MWh, 进一步证明共享储能的经济效益。

表 2 不同模式某月总考核电量对比

| Table 2 Comparison of total assessed electricity quantities in different modes for a certain month | | | |
|--|---------|---------|------|
| | 各场站自建储能 | 合作联盟无储能 | 共享储能 |
| 总考核电量 /MWh | 16335 | 11661 | 4984 |

3.2 合作联盟定价机制及分配方式

根据以上结论, 选取五个风电场、光伏电站作为合作联盟。每个场站的容量为 100MW, 共享储能规格为 50MW/100MWh。基于式(21)与表 3 中常

用储能系统成本参数, 可知十年全寿命周期下, 储能电站投资成本约为 2.99 亿元, 设置 2.5 万元/(MW·月)的储能容量服务费用能覆盖自建储能的成本, 该费用即初始容量定价。

对合作联盟内的新能源场站来说, 储能服务租赁费用与自建储能在全寿命周期下基本一致, 但整个合作联盟需要被考核的电量减少, 获得了相较于自建储能的额外收益, 因此需要对各新能源场站进行差异化的收益返还。

表 3 储能系统成本参数

| Table 3 Parameters of energy storage system cost | | | | |
|--|-----------|-----------|--------|--------|
| 参数 | c_p /万元 | c_e /万元 | τ | y /年 |
| 取值 | 80 | 180 | 6% | 10 |

在合作联盟总考核电量明显下降的前提下, 将这部分额外收益以激励形式返还给各个场站。激励由两部分构成, 原场站自建储能可减少的考核费用, 以及共享模式多余可减少考核费用, 以一定比例分配给各个场站。该比例是基于当月新能源出力并将考核电量减少量进行 Shapley 值分配。其中, 各种组合下是否采用共享储能模式的当月考核电量减少值如附录 A 所示, 基于 Shapley 值的收益分配比例如图 7 所示, 其中新能源场站 1 为风电场, 新能源场站 2~5 为光伏电站, 且容量均为 100MW。

根据“两个细则”, 考核电量费用按照上网电价最大值计算, 在储能租赁费用与自建储能一致的前提下, 各个新能源场站使用自建储能的收益与共享模式分配后的等效考核电量对比, 各新能源场站在共享储能商业模式下考核费用都有一定程度下降。

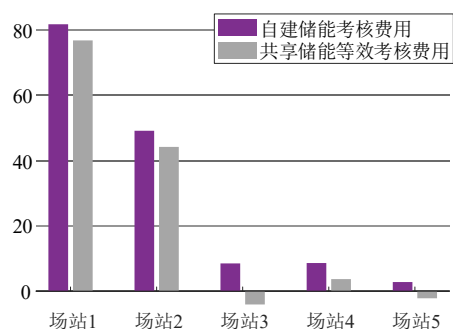


图 7 新能源场站自建储能与共享收益对比

Fig. 7 Comparison of the self-built energy storage and shared-mode energy storage benefits in renewable stations

本文 Shapley 分配方法与核仁法分配收益的方式以及各场站自建储能的一月发电收益结果对比如表 4 所示, 从表 4 数据可知, 相比于自建储能模式, 共享储能整个合作联盟的考核费用部分总收益

提高了 14.17%。

可以发现，按电量比例分配后，新能源场站 1 发电量较多，会获得过多的收益，发电量较小的新能源场站 3、4、5 甚至不如自建储能的收益。

表 4 不同分配模式下的各场站总收益

Table 4 Total revenue of different allocation modes for each station

| 新能源场站 | 自建储能 (万元) | 共享储能 (万元) | | |
|---------|-----------|-----------|-------|------------|
| | | 按电量分配 | 核仁法 | Shapley 分配 |
| 新能源场站 1 | 796.5 | 943.5 | 831.9 | 813.2 |
| 新能源场站 2 | 143.0 | 206.5 | 227.7 | 228.1 |
| 新能源场站 3 | 433.0 | 466.4 | 496.3 | 503.7 |
| 新能源场站 4 | 661.2 | 719.6 | 728.2 | 720.7 |
| 新能源场站 5 | 235.4 | 254.7 | 306.6 | 330.3 |

事实上，每个场站的收益分配比例应该与其历史功率和计划的偏差有较强的相关性。采用 Shapley 值分配法可以很好的解决这一问题，总收益比未采用双层定价法提高 5.38 万元。同时，该方法分配后的收益标准差比按电量分配下降 56.9 万元，比核仁法下降 10.7 万元，可更加体现分配公平。以新能源场站 1 为例，由附录 A 的考核电量差值可知，各种含该场站的组合中，实际功率曲线与计划曲线偏差较大，考核电量较多，对储能的需求较大，故 Shapley 分配模型的结果是使其在多余收益分配比例最低，分配合理。具体地，其收益分配占比相比按电量分配法与核仁法分别下降了 13.9% 和 2.4%。因此，相较于核仁算法，Shapley 值法对贡献值更大的场站的激励更强，更能促进联盟内新能源场站的良性竞争。

Shapley 值分配过程应用于收益差异化返还阶段，即在合同周期结束后对合同内产生的数据进行处理，对计算的即时性要求较低，且合同周期往往较长，在周期内可以日为单位，对数据进行分析，计算不同的组合下的联盟收益，最后进行累加。另外，本文的应用场景为大型新能源场站配置共享储能，这些场站本是直接接入电网，通过共享储能使其形成合作联盟，还需考虑到地理位置与接入点等问题，因此一个合作联盟内的风光电站超过十个的可能性较低，现有算力已经足够对内部所有自己进行优化与分析。

在共享储能提高合作联盟内部整体经济性的同时，这种分配模式对跟踪计划曲线程度较高的用户存在奖励机制，对跟踪计划曲线程度较低的用户存在惩罚机制，是一个较为全面合理的分配模式，解决了以往分配模式缺乏合理科学依据的问题。

3.4 共享储能参与二次调频策略及收益分析

同时，第三方独立运营的储能电站能通过新能源场站的储能容量服务费用涵盖建设与运行成本，并获得收益。在满足新能源场站需求前提下，通过适时响应辅助服务的方式获得增量收益，加快成本回收周期，取得利润。

以一个小时为调频容量申报时间尺度，针对下一个小时的跟踪计划出力场景下储能资源需求，决定下一小时二次调频容量的申报，在实际运行中进行实时滚动优化，典型日的应用如图 8 所示。

风光聚合后，可以发现不影响跟踪计划出力的前提下，储能在中午前有较多时间与资源可以参与二次调频。

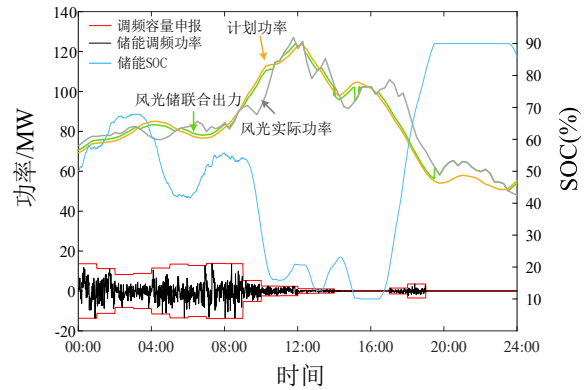


图 8 余量储能参与电网二次调频

Fig. 8 The participation of surplus energy storage in grid secondary frequency regulation

二次调频的相关收益参数包括容量成本与里程成本，取容量成本为 15 元/(MW·h)，里程成本取为调频里程价格最大值 12 元/MW，可计算得当日的调频里程收益为 27566.6 元，调频容量收益为 1871.5 元。

当日的调频总收益为 29438 元，结合储能对考核电量减少的贡献，根据所得分配比例计算得其总收益为 34469 元，因此共享储能在通过容量服务租赁的方式收回成本外，还能有一定的调频收益获得经济性提升。

4 结论

本文针对现阶段作为灵活性调节资源的当前电源侧储能发展困境，提出了合作联盟共享储能方案，同时对于合作联盟的容量服务机制以及储能参与电力市场的方式进行了详细的分析。证明了建立总容量相同的储能电站，“合作联盟”共享储能的跟踪计划效果远超自建储能，因此共享储能模式可大大提高资源的利用效率；通过构建合

作联盟的方式, 新能源场站使用与自建储能相同的容量费用, 可以获得更高的经济收益; 储能电站在消纳成本的同时, 还可以参与二次调频获取利益。因此电网也获得了更为清洁自治的发电单元, 获得友好可控的电能。而通过基于 Shapley 值的分配方式, 不仅实现每个场站在共享模式下的经济性提升, 还对联盟内部场站自身的跟踪计划能力形成激励, 促进新能源场站在预测等技术上的提升。

此外, 由于本文在电源侧储能参与电网侧服务中仅考虑 AGC 响应的应用场景, 且对共享储能的优化配置研究较简单, 故下一步可对合作联盟共享储能在不同配置方案下的运行安全性、经济性进行深入研究, 同时可挖掘储能运营商参与更多电网辅助服务以获得超额收益的可能性, 为共享储能的商业化运营提供决策依据。

参考文献

- 童家麟, 洪庆, 吕洪坤, 等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J]. 华电技术, 2021, 43(07): 17-23.
TONG Jialin, HONG Qing, LV Hongkun, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology[J]. Huadian Technology, 2021, 43(07): 17-23(in Chinese).
- 刘英军, 刘亚奇, 张华良, 等. 我国储能政策分析与建议[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(04): 1463-1473.
LIU Yingjun, LIU Yaqi, ZHANG Hualiang, et al. Energy storage policy analysis and suggestions in China[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(04): 1463-1473(in Chinese).
- 王静, 刘文霞, 李守强, 等. 计及机组降损收益的电源侧电池储能调频/调峰经济效益评价方法[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4236-4245.
WANG Jing, LIU Wenxia, LI Shouqiang, et al. A method to evaluate economic benefits of power side battery energy storage frequency/peak regulation considering the benefits of reducing thermal power unit losses[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4236-4245(in Chinese).
- B. Li, X. Mo, B. Chen. Direct control strategy of real-time tracking power generation plan for wind power and battery energy storage combined system[J]. IEEE Access, 2020, 11(7): 147169-147178.
- 闫东翔, 陈玥. 共享储能商业模式和定价机制研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 178-191.
YAN Dongxiang, CHEN Yue. Review on business mode and pricing mechanism for shared energy storage[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 178-191(in Chinese).
- 邱伟强, 王茂春, 林振智, 等. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 244-255.
QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 244-255(in Chinese).
- SUN K, LI K J, PAN J, et al. An optimal combined operation scheme for pumped storage and hybrid wind-photovoltaic complementary power generation system[J]. Applied Energy, 2019, 242: 1155-1163.
- SHI J, WANG L, LEE W J, et al. Hybrid energy storage system (HESS) optimization enabling very short-term wind power generation scheduling based on output feature extraction[J]. Applied Energy, 2019, 256: 113915.1-113915.10.
- 东亚光, 李凤婷, 王森. 跟踪计划出力的新能源场站与汇集站储能协调运行策略[J/OL]. 电网技术: 1-14[2023-04-02].
<https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD640BVEy1QDIKaUXv7EysL5jhptubWCXKcE8ykjn2pihtO50UGU9nzwW&uniplatform=NZKPT>
DONG Yaguang, LI Fengting, WANG Seng. Energy storage coordinated operation strategy of new energy station and collection station tracking planned output[J/OL]. Power System Technology, 1-14[2023-04-02] (in Chinese).
<https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD640BVEy1QDIKaUXv7EysL5jhptubWCXKcE8ykjn2pihtO50UGU9nzwW&uniplatform=NZKPT>
- 刘敦楠, 赵宁宁, 李鹏飞, 等. 基于“共享储能-需求侧资源”联合跟踪可再生能源发电曲线的市场化消纳模式[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2791-2802.
LIU Dunnan, ZHAO Ningning, LI Pengfei, et al. Market-oriented consumption model based on the joint tracking of renewable energy generation curve of “shared energy storage & demand side resources”[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2791-2802(in Chinese).
- 马昱欣, 胡泽春, 刁锐. 新能源场站共享储能提供调频服务的日前优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3857-3868.
MA Yuxin, HU Zechun, DIAO Rui. Day-ahead optimization strategy for shared energy storage of renewable energy power stations to provide frequency regulation service[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3857-3868(in Chinese).
- Y. Ma, Z. Hu, Y. Song. Hour-ahead optimization strategy for shared energy storage of renewable energy power stations to provide frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4):2331-2342.
- Papaefthymiou G, Dragoon K, Towards 100% renewable energy systems: uncapping power system flexibility[J]. Energy Policy, 2016(92): 69-82.
- Wu Feng, Jiang Zenan, Qian Junxia. Photovoltaic-wind joint power probability model based on multiple temporal and spatial scale[J]. IET Generation Transmission&Distribution, 2018, 12(20):4546-4550.
- ZHANG Wenyi, WEI Wei, CHEN Laijun, et al. . Service pricing and load dispatch of residential shared energy storage unit[J]. Energy, 2020,202.
- GIUSEPPE G, VITO C, VINCENZO G, et al. Battery second-life for dedicated and shared energy storage systems supporting EV charging stations[J]. Electronics, 2020, 9(6): 939.
- Jo J, Park J. Demand-side management with shared energy storage system in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid. 2020, 11(5): 4466-4476.
- ZHAO D, WANG H, HUANG J, et al. Virtual energy storage sharing and capacity allocation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2):1112-1123.
- YANG Y, HU G Q, SPANOS C J. Optimal sharing and faircost allocation of community energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4185-4194.
- 冯昌森, 沈佳静, 赵崇娟, 等. 基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(04): 85-93.
FENG Changsen, SHEN Jiajing, ZHAO Chongjuan, et al. Cooperative game-based coordinated operation strategy of smart energy community[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(04):

85-93(in Chinese).

- [21] S. Cui, Y. W. Wang, Y. Shi, et al. Community energy cooperation with the presence of cheating behaviors[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021,12(1): 561-573.
- [22] 李咸善, 解仕杰, 方子健, 等. 多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 44-51.
LI Xianshan, XIE Shijie, FANG Zijian, et al. Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 44-51(in Chinese).
- [23] M. Ben-Idris, M. Brown, M. Egan, et al. Utility-scale shared energy storage: business models for utility-scale shared energy storage systems and customer participation[J]. IEEE Electrification Magazine, 2021, 9(4): 47-54.
- [24] 国家能源局. 电力并网运行管理规定[EB/OL]. 中国: 国家能源局官方网站公示, 2021[2021-12-31].http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-2/21/c_1310391369.htm
National Energy Administration. Regulations on Management of Power Grid Connection Operation[EB/OL]. China: Official website of National Energy Administration, 2021[2021-12-31] (in Chinese). http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-2/21/c_1310391369.htm
- [25] 国家能源局. 电力辅助服务管理办法[EB/OL]. 中国: 国家能源局官方网站公示, 2021[2021-12-31].http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-2/21/c_1310391161.htm
National Energy Administration. Administrative measures for auxiliary power services[EB/OL]. China: Official website of National Energy Administration, 2021[2021-12-31] (in Chinese). http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-2/21/c_1310391161.htm
- [26] 刘坚. 适应可再生能源消纳的储能技术经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 397-404.
LIU Jian. Economic assessment for energy storage technologies adaptive to variable renewable energy[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11 (1): 397-404(in Chinese).
- [27] 何颖源, 陈永翀, 刘勇, 等. 储能的度电成本和里程成本分析[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(09):1-10.
HE Yingyuan, CHEN Yongchong, LIU Yong, et al. Analysis of cost per kilowatt-hour and cost per mileage for energy storage technologies[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38 (09): 1-10(in Chinese).
- [28] 郭凯杰, 耿光超, 江全元, 等. 计及超短期预测误差的风储系统跟踪计划出力控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(02): 326-333.
GUO Kaijie, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Output control strategy of wind storage system tracking plan considering ultra short term prediction error[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(02): 326-333(in Chinese).



刘寅韬

收稿日期: 2023年4月10日

作者简介:

刘寅韬(1999-), 男, 硕士, 研究方向为共享储能的商业模式及应用, E-mail: 22160186@zju.edu.cn;

江全元(1975-), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、新能源并网与储能技术应用, E-mail: jqy@zju.edu.cn;

耿光超(1985-), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统高性能计算、储能在电力系统中的应用, E-mail: ggc@zju.edu.cn。

附录 A

表 1 不同风光电场组合下使用共享储能的考核电量

| 风光电场共享储能组合 | 考核电量减少量/MWh |
|------------|-------------|
| 1 | 227.0911 |
| 2 | 96.83748 |
| 3 | 103.0524 |
| 4 | 143.0542 |
| 5 | 68.28981 |
| 1U2 | 362.8289 |
| 1U3 | 417.8468 |
| 1U4 | 360.3974 |
| 1U5 | 403.5187 |
| 2U3 | 138.1992 |
| 2U4 | 182.2543 |
| 2U5 | 90.64488 |
| 3U4 | 114.6431 |
| 3U5 | 139.1469 |
| 4U5 | 150.3702 |
| 1U2U3 | 498.6661 |
| 1U2U4 | 504.9226 |
| 1U2U5 | 488.0778 |
| 1U3U4 | 478.9794 |
| 1U3U5 | 528.0508 |
| 1U4U5 | 535.278 |
| 2U3U4 | 200.3839 |
| 2U3U5 | 137.4793 |
| 2U4U5 | 151.4741 |
| 3U4U5 | 134.3348 |
| 1U2U3U4 | 525.897 |
| 1U2U3U5 | 517.3182 |
| 1U2U4U5 | 511.6205 |
| 1U3U4U5 | 533.2634 |
| 2U3U4U5 | 179.712 |
| 1U2U3U4U5 | 511.563 |

Research on the sharing model of electrochemical energy storage based on cooperative alliance

LIU Yintao¹, JIANG Quanyuan^{2*}, GENG Guangchao², GUO Kaijie¹, PAN Yuqin²

(1.The Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, Zhejiang Province, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China)

KEY WORDS: novel power system; shared energy storage; track generation schedule; AGC; shapley value

Considering the integration of information from multiple new energy stations on the power supply side, it is of paramount significance to establish a collaborative alliance with a shared mode that explicitly encompasses various aspects such as shared energy storage assisting in tracking the power generation plan of new energy, participation in secondary frequency regulation, and shared allocation. Hence, this study introduces a cooperative alliance on the power supply side that encompasses multiple new energy stations and energy storage. It puts forth an advanced energy storage control strategy that simultaneously considers the tracking of power output plans across multiple stations and participation in secondary frequency regulation. Furthermore, a cooperative alliance revenue allocation method based on Shapley values is proposed.

The cooperative alliance is established with new energy stations and energy storage operators as the core entities. As shown in Fig.1, it illustrates the relationship of the shared energy storage cooperative alliance and highlights the external policy environment support required for this collaborative mode.

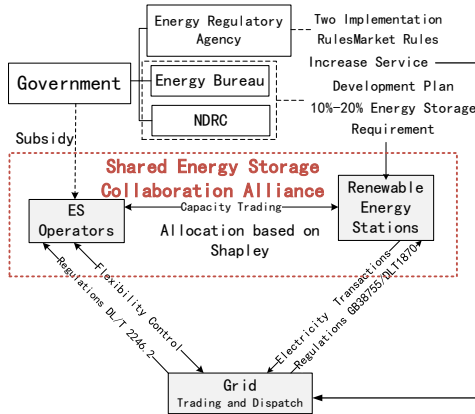


Fig. 1 Cooperative alliance relationship in the context of the sharing economy mode

In the context of the sharing economy mode, the cooperative alliance establishes a basic framework by requiring each new energy station within the alliance to allocate a certain proportion of energy storage for centralized construction and operation. Additionally, the

planned tracking curve of each station and the new energy generation curve are aggregated separately.

When there is surplus capacity in the shared energy storage system, it can participate in the ancillary service market of the power grid by submitting secondary frequency regulation declarations based on advanced capacity prediction, as shown in the following equation:

$$P_{m1} = P_{\max} - \max(|\dot{P}_{\text{batt}}|) \quad (30)$$

$$P_{m2} = (\text{SOC}_{\max} - \max(\tilde{K}_{\text{SOC}})) * E / t_a \quad (31)$$

$$P_{m3} = \min(\tilde{K}_{\text{SOC}}) - \text{SOC}_{\min} * E / t_a \quad (32)$$

$$P_{\text{ap}} = \min(P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}) * (1 - q) \quad (33)$$

Meanwhile, considering the construction and operation costs of the energy storage operator, as well as the output deviations of each new energy station within the alliance and their actual demand for energy storage, a two-tier pricing method for cooperative alliance shared energy storage is proposed. The profits of each party in the cooperative alliance are shown in Figure 2.

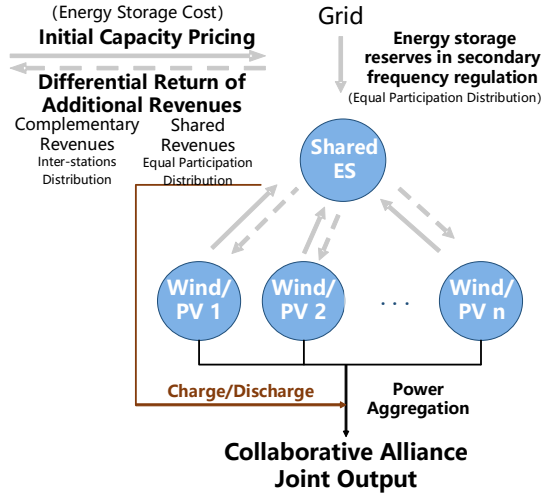


Fig. 2 The benefits for each party in cooperative alliance

Finally, the case study is based on five wind farms and five solar power plants as candidate members to form a cooperative alliance with energy storage for corresponding analysis. This validates the advantages of the sharing mode and the proposed allocation method.



310013

浙江省杭州市西湖区古墩路 701 号紫金广场 C 座 1506 室 杭州求是
专利事务所有限公司
刘静(0571-87911326-809)

发文日:

2023 年 03 月 09 日



申请号: 202310218862.0

发文序号: 2023030900392780

专利申请受理通知书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下:

申请号: 2023102188620
申请日: 2023 年 03 月 02 日
申请人: 浙江大学
发明人: 江全元, 刘寅韬, 耿光超, 孙玉玺
发明创造名称: 适用于户用光储系统的储能能量管理方法
经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:
权利要求书 1 份 3 页, 权利要求项数: 4 项
说明书 1 份 10 页
说明书附图 1 份 3 页
说明书摘要 1 份 1 页
专利代理委托书 1 份 2 页
发明专利请求书 1 份 5 页
实质审查请求书 文件份数: 1 份
申请方案卷号: 刘-231-24

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时, 可以向国家知识产权局请求更正。
2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 均应当准确、清晰地写明申请号。

审查员: 马青
联系电话: 010-62356655

审查部门: 初审及流程管理部



200101
2022.10

纸件申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 国家知识产权局专利局受理处收
电子申请, 应当通过专利业务办理系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。



510070

广东省广州市先烈中路 80 号汇华商贸大厦 1508 广州三环专利商标
代理有限公司
陈旭红(020-37616796)

发文日:

2023 年 02 月 22 日



申请号: 202310150194.2

发文序号: 2023022201178470

专利申请受理通知书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下:

申请号: 2023101501942

申请日: 2023 年 02 月 09 日

申请人: 浙江艾罗网络能源技术股份有限公司

发明人: 刘寅韬, 郭华为, 耿光超, 何大明, 江全元, 张奎, 李京珂

发明创造名称: 一种户用光储系统的储能运行模式滚动优化方法及装置

经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

权利要求书 1 份 3 页, 权利要求项数: 9 项

说明书 1 份 10 页

说明书附图 1 份 2 页

说明书摘要 1 份 1 页

专利代理委托书 1 份 2 页

发明专利请求书 1 份 5 页

实质审查请求书 文件份数: 1 份

申请方案卷号: H220812459

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时, 可以向国家知识产权局请求更正。

2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 均应当准确、清晰地写明申请号。

审查员: 杨艳

联系电话: 010-62356655

审查部门: 初审及流程管理部

