



中国管理科学  
Chinese Journal of Management Science  
ISSN 1003-207X, CN 11-2835/G3

## 《中国管理科学》网络首发论文

题目： 动力电池梯次利用下风力发电企业储能电站租赁策略选择：容量计费还是两部制收费？  
作者： 宋明珍，马腾，孔令丞，谢家平  
DOI： 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2752  
网络首发日期： 2024-05-20  
引用格式： 宋明珍，马腾，孔令丞，谢家平. 动力电池梯次利用下风力发电企业储能电站租赁策略选择：容量计费还是两部制收费？[J/OL]. 中国管理科学.  
<https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2752>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.2752

# 动力电池梯次利用下风力发电企业储能电站租赁策略选择：容量计费还是两部制收费？<sup>①</sup>

宋明珍<sup>1,2</sup>，马腾<sup>1</sup>，孔令丞<sup>3,1</sup>，谢家平<sup>2,1</sup>

(1. 新疆财经大学工商管理学院(MBA 学院)，新疆 乌鲁木齐 830012；2. 上海财经大学商学院，上海 200433；3. 华东理工大学商学院，上海 200237)

**摘要：**配置储能电站有利于提升可再生能源电力的消纳水平，助力能源结构调整与双碳目标的实现，但储能租赁收费方式是否合理将会影响租赁规模。本文以风电为研究对象，考虑风力资源存在间歇性与高峰期电力需求存在随机波动的双重不确定性、政府对风电项目储能电站配置要求约束，引入动力电池梯次利用，针对储能使用新电池还是动力电池、租赁实行容量计费还是“容量+电量”两部制收费，组合形成四种租赁策略，研究基于分时定价下风电商利润最大化的储能电站租赁策略选择问题。研究发现：(1)当租赁总成本不高于同时考虑夜间概率与容量保持率的净火电价格时，四种租赁策略均存在最优租赁容量。(2)降低电池租赁等成本可以激励风电商增加租赁容量，存在使最优租赁容量取得最大值的容量保持率阈值。(3)单位租赁成本相对火电价格具备优势的租赁策略、消除容量保持率影响后单位租赁成本处于优势的电池策略，可以激励风电商扩大租赁规模。(4)政府储能电站配置约束对租赁策略的选择影响明显；利用动力电池能够增加容量租赁计费策略的占优空间；提高电量价格、在较低容量保持率下提高单位辅助成本时，容量租赁计费策略为最优选择。

**关键词：**容量决策；租赁策略选择；储能；动力电池梯次利用；双碳目标

**中图分类号：**F272 **文献标识码：**A

## 1 引言

为了积极应对全球气候变化对人类生存与发展带来的严峻挑战，世界主要经济体正积极推动本国碳达峰、碳中和目标(简称“双碳”目标)的实现。据博鳌论坛发布的《可持续发展的亚洲与世界——绿色转型亚洲在行动》，截止2021年12月底，已有136个国家制定了碳中和目标。为彰显应对气候变化的决心，我国于2020年提出“3060”双碳目标。目前，化石能源仍占据我国能源消费的主导地位，与欧美发达国家相比，我国实现碳中和目标面临减排量大、时间紧迫等诸多现实困难<sup>[1]</sup>，电力又是我国碳排放量最多的行业，亟待推进我国能源结构向以可再生能源为主、储能为辅的分布式能源体系转型，是我国“双碳”目标实现的关键<sup>[2]</sup>。国家能源局统计数据表明，我国在以风电、光伏为主的可再生能源发电方面，取得了快速发展。截止2021年底，我国风电、光伏装机容量达到6.34亿千瓦，近5年增长了1.8倍、

渗透率由13.7%上升至26.7%。而风电、光伏快速装机面临需求波动与可再生能源间歇性的双重影响，在发电侧配置储能电站、需求侧实施分时电价(即在用电高峰期与低谷期制定差异化电价)成为应对可再生能源电力峰谷供需矛盾的有效选择。为此，国家发改委和国家能源局印发《关于加快推动新型储能发展的指导意见》指出：要建设风光配套储能电站，完善分时电价(也称峰谷电价)政策。分时电价能够引导用户电力需求从高峰期向低谷期转移<sup>[3]</sup>，起到“削峰填谷”的作用<sup>[4]</sup>。

为了鼓励发电侧积极配置储能电站，青海、宁夏等多个省份出台了新增可再生能源发电项目按其容量比率配置储能电站等强制性考核政策。受制于储能电站一次性投资成本高等因素的影响，独立储能电站租赁模式逐渐受到市场青睐<sup>[5]</sup>。建设储能电站时，既可以使用新电池，也可以考虑梯次利用动力电池。尤其是随着我国新能源汽车动力电池退役高峰期的来临，退役动力电池梯次利用成为各个层面关注的焦点。在工信部等五部委联合印发的《新能源汽车动

基金项目：国家自然科学基金面上项目(72073044)；国家社会科学基金重点项目(20AJY008)；新疆高校人文社会科学基地(新疆企业发展研究中心)重点项目(XJEDU2023P001, XJEDU2024J094)。

通讯作者简介：谢家平(1963—)，男(汉族)，四川安岳人，上海财经大学商学院教授，博士，博士生导师，天池特聘教授，研究方向：运营与供应链管理，E-mail: jiaping@sufe.edu.cn。

力蓄电池梯次利用管理办法》中,鼓励研发适用于基站备电、储能等领域的梯次产品,鼓励采用租赁等便于梯次产品回收的商业模式。在实践层面,江苏南京江北储能电站成为国内首个梯次利用的电网侧储能电站,以上汽通用五菱、常能新能源等为代表的新能源整车及科技企业则积极从工商业储能、风光储充一体化等方面开展了有益探索。动力电池的储能梯次应用有助于缓解储能投资成本过高的问题<sup>[6]</sup>。从山东等省份实践来看,容量租赁是储能电站的主要租赁模式。容量租赁虽然能够保证储能电站租赁商获得稳定收益,但是由于可再生资源间歇性的存在,该模式会将容量利用率不足带来的租赁成本风险全部转嫁给发电商。这就需要引入收益共享契约来协调供应链成员间的利益冲突<sup>[7]</sup>,在一定程度上实现供应链协调与帕累托改进<sup>[8]</sup>。为了弥补纯容量租赁的不足,亟待基于收益共享理念构建两部制收费策略,即租赁商以较低的租赁成本出租储能电站,发电商根据储能电站实际放电量给予租赁商一定的电量收益分成。

总之,引入动力电池梯次利用进行储能电站租赁决策,亟待解决基于利润最大化的“租赁策略-电池使用”组合选择的如下科学问题:储能电站最优租赁容量是多少?选择单一的租赁容量计费还是融入储能收益共享的两部制收费策略?使用新电池还是动力电池?

与本研究相关的研究领域,包含可再生能源容量投资、分时定价、储能电站投资与租赁决策、动力电池梯次利用等方面。作为可再生能源电力特有属性,国内外学者通常考虑供需不确定性,研究可再生能源电力项目容量投资决策<sup>[9]</sup>、混合电力系统竞争性上网定价<sup>[10]</sup>等。相比上述研究成果,本文侧重引入动力电池梯次利用与两部制收费研究储能租赁决策。

关于分时定价的研究,通过设定用电高峰与低谷期的差异化电价,能够促使对电价敏感的电力需求转移<sup>[3]</sup>,起到“削峰填谷”的作用<sup>[4]</sup>。实施分时定价可以促进可再生能源投资<sup>[11]</sup>、提升电力系统效率<sup>[12]</sup>。定价模式(统一定价或分时定价)对不同类型可再生能源投资规模及碳排放水平的影响存在差异<sup>[13]</sup>。基于不同时期电价差异刻画高峰期与低谷期电力需求水平的分时定价研究架构,与储能电站在用电需求低谷期充电、用电高峰期放电的原理有相近之处,为本文储能电站充电与放电量的刻画提供了借鉴。

关于储能电站投资与租赁的研究。可再生能源电力间歇性下,储能容量投资与运营决策需考虑短期机组组合(unit commitment, UC)等因素<sup>[14]</sup>。技术进步提高了大规模储能经济上的可行性,但需要科学决策可再生能源发电和储能的最佳投资容量组合<sup>[15]</sup>。发电侧集中储能投资的灵活性较大,而需求侧储能往往成为投资阶段的首选<sup>[16]</sup>。分时定价会降低储能电站投资容量<sup>[17]</sup>。同时含有分布式与集中式储能系统可以降低微电网的经济成本<sup>[18]</sup>。稳定的容量租赁与辅助服务收益,使得独立储能电站已经具备商业投资价值<sup>[19]</sup>,围绕储能电站租赁的研究也逐渐成

为热点。储能电站租赁主体差异会影响电力质量与电价决策,发电商租赁模式能提供更高的电力质量和电价<sup>[20]</sup>;含多微电网租赁共享储能的配电网优化调度策略,有助于提高储能利用效率、促进新能源就地消纳<sup>[21]</sup>;可以基于纳什议价模型研究共享储能电站供应链(共享储能电站-用户-运营商)的服务定价及收益再分配机制<sup>[22]</sup>。通过主从博弈模型开展市场化定价,可以促进储能商与用户的利益共赢<sup>[23]</sup>。本文主要研究考虑风力资源的间歇性与电力需求不确定性下的发电侧储能电站租赁策略选择问题。

关于动力电池梯次利用的研究。主要聚焦储能系统容量配置、动力电池回收等主题。储能系统设计与容量配置方面,可以通过数字技术构建基于电池包或模组级重构的无损动力电池梯次利用储能系统方案<sup>[24]</sup>;应在兼顾退役动力电池时间尺度的基础上,优化配置由新电池与动力电池组成的混合储能系统容量<sup>[25]</sup>。动力电池回收与商业应用方面,整车企业的策略选择会影响相关企业承担延伸责任的积极性及良性动力电池回收网络的构建<sup>[26]</sup>。电池成本降低、峰谷电价及补贴政策等因素,会显著提升储能产业动力电池梯次利用的商业价值<sup>[27]</sup>。研究表明,储能系统梯次利用的动力电池容量保持率 $>0.6$ 时,相对新电池具有成本竞争优势<sup>[28]</sup>。本文则重点研究考虑动力电池梯次利用的租赁策略选择,有别于容量配置、回收模式等已有研究。

综上所述,已有文献较少涉及在风电供需均存在不确定性下,研究风电商储能电站租赁策略选择问题,同时考虑动力电池梯次利用与政府储能配置约束的文献更为匮乏。而该领域的研究能够为风电商储能电站租赁策略的选择提供决策依据。本文在研究思路与模型构建方面与Song等<sup>[17]</sup>具有相近之处,但存在明显差异,一是研究对象不同,本文主要研究风电商储能电站租赁策略,而非投资决策;二是研究情境不同,本文侧重研究考虑配置约束与动力电池梯次利用下的储能电站租赁策略,而非不同电力定价模式的影响。为此,同时考虑风电供需存在不确定性、动力电池梯次利用及政府储能电站配置约束,构建了基于风电商利润最大化的储能电站租赁策略选择模型。针对储能使用新电池还是动力电池(简称“旧电池”)、租赁实行容量计费还是“容量+电量”两部制收费,组合形成四种租赁策略,即nR策略(使用新电池、选择容量租赁计费)、nT策略(使用新电池、选择两部制收费)、sR策略(利用旧电池、选择容量租赁计费)、sT策略(利用旧电池、选择两部制收费)。基于每种策略进行了最优租赁容量决策优化,并从风电商利润最大化视角进行最优策略选择。

## 2 决策问题与函数设置

### 2.1 问题描述

风电商通过租赁储能电站,有助于解决可再生能源消纳及政府储能电站配置约束等问题。结合山东省、湖南省等地区的实践,风电商租赁储能电站时,

存在容量租赁计费、两部制收费等租赁策略，所租赁的储能电站存在使用新电池或利用动力电池两种电池使用策略，由此形成 nR、nT、sR、sT 四种组合策略。本文针对动力电池梯次利用与政府储能电站配置约束，考虑风力资源间歇性与高峰期电力需求存在随机波动的双重不确定性，以风电商利润最大化为目标，研究风电商的储能电站最优租赁容量及最优策略选择。<sup>[参数符号见附录 0]</sup>

## 2.2 函数设置

**基础设定：**风电站和储能电站等均存在较长的建设与运营周期，为此参考已有文献做法<sup>[13]</sup>，选择运营期内代表性一天，将其分为用电需求高峰期(简称日间，用  $i=H$  表示)和低谷期(简称夜间，用  $i=L$  表示)， $i \in \{H, L\}$ ，设定每期时长均为  $t$ 。

**电力价格：**用  $p_i$  表示  $i$  期的电价， $p_i \geq 0$ ，根据我国各省份实践，高峰低谷期电价存在一定比例关系，由此设定  $p_L = \theta p_H$ ， $\theta \in [0, 1]$  表示低谷期电价占高峰期电价比重，简称分时价格比重。

**需求函数：**结合电力需求特征及对电网公司调研，电力需求在低谷期相对平稳，而在高峰期存在波动性。结合调研结论及已有 Song 等<sup>[17]</sup>的做法，设定电力需求为关于电价的线性函数，高峰期电力需求函数为  $D_H(p_H) = A_H - \gamma p_H + \gamma p_L + \varepsilon = A_H - \gamma(1 - \theta)p_H + \varepsilon$ 、低谷期电力需求函数  $D_L(p_H) = A_L - \gamma p_L + \gamma p_H = A_L + \gamma(1 - \theta)p_H$ ，其中， $A_i$  为  $i$  期的电力市场规模，由于电力产品完全同质，因此，假设需求价格和交叉价格敏感系数均为  $\gamma$ ； $\varepsilon$  为高峰期电力需求随机因子， $\varepsilon \in [-\varepsilon_1, \varepsilon_2]$ ，服从累积分布函数为  $F(x)$ 、概率密度函数为  $f(x)$  的分布，且  $E(\varepsilon) = 0$ 。

**间歇性与电力供应：**借鉴 Aflaki 和 Netessine<sup>[29]</sup>的做法，设定  $u_i$  为时期  $i$  的风电间歇性因子，其为服从 0-1 两点分布的随机变量，记作  $u_i = [1, \rho_i; 0, 1 - \rho_i]$ ，表示  $i$  期风电站按照额定功率  $k$  (即风电站容量)发电的概率为  $\rho_i$ 、不工作的概率为  $1 - \rho_i$ ， $\rho_H$  与  $\rho_L$  分别简称日间与夜间概率。则  $i$  期风电供应量为  $u_i k$ 。储能电站存储夜间盈余电力并在日间进行放电，设定储能电站每天充放电 1 次，最大放电时长为 1 小时，设定  $k_s$  表示风电商租赁的储能电站容量。考虑政府对新建风电项目的储能电站最低配置要求约束，设定配置比例为  $\sigma$ ，即风电项目配置的储能电站容量应不低于  $\sigma k$ ，则风电项目应租赁的储能电站容量为  $\max(\sigma k, k_s)$ 。高峰期电力调度规则：电力供应次序为风电、储能电站、传统火电机组，前两种供应能力上限分别为  $t\rho_H k$ 、 $\max(\sigma k, k_s)$ ，不足部分由传统火电机组供应，如图 1 所示。

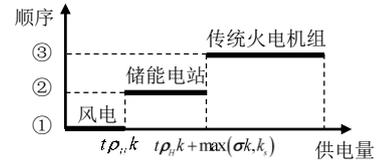


图 1 电力供应顺序

**成本函数：**包括风电站投资成本、外购火电价格及储能电站租赁成本。对于风电站投资成本，每日风电站投资成本函数为  $I(k) = \beta k$ ， $\beta$  表示每日风电站单位容量投资成本，由于风电运营成本较小，因此，将运营成本折算到单位投资成本中体现。设定外购火电价格为  $p_f$ 。对于储能电站租赁成本，设置不同策略组合下的租赁成本。

(1)使用新电池。容量租赁计费策略下，租赁成本与储能电站租赁容量呈线性关系，租赁成本函数  $C_n^R(k_n^R) = (c_{r1} + c_a) \max(\sigma k, k_n^R)$ ， $c_{r1}$  为每日储能电站电池单位容量租赁费(简称单位电池租赁费，下同)， $c_a$  为每日储能电站单位容量辅助成本(简称单位辅助成本，包含功率变换器等辅助设备租赁成本及运维成本)， $k_n^R$  为风电商储能电站租赁容量(简称租赁容量，下同)。两部制收费策略下，租赁成本由容量租赁成本与电量购置成本(储能电站实际放电量的购置成本)组成，容量租赁成本函数  $C_n^{T1}(k_n^T) = (c_{r2} + c_a) \max(\sigma k, k_n^T)$ ， $c_{r2}$  为该策略下单位电池租赁费， $k_n^T$  为租赁容量；电量购置成本  $C_n^{T2}(k_n^T) = p_b E \min((D_H - t u_H k)^+, \min((t u_L k - D_L)^+, \max(\sigma k, k_n^T)))$ ， $p_b$  为风电商按照储能电站发电量支付给租赁商的单位电量成本(简称电量价格)，则两部制收费策略下储能电站租赁总成本  $C_n^T(k_n^T) = C_n^{T1}(k_n^T) + C_n^{T2}(k_n^T)$ 。

(2)利用旧电池。假设新电池的容量保持率(表示实际可使用容量比率)为 1，旧电池的容量保持率为  $\tau$  ( $\tau < 1$ )，旧电池容量为  $k_s$ ，则旧电池的可用容量为  $\tau k_s$ 。旧电池应用于储能电站时，存在三部分成本：一是检测成本，区别于新电池，回收的旧电池需要进行安全性、容量、内阻、自放电等系列检测，以确定旧电池的容量保持率及安全性能<sup>[28]</sup>，该部分成本统称为检测成本，其成本函数为  $C_t(k_s) = c_t k_s$ ， $c_t$  表示平摊到每日的单位容量检测成本(简称单位检测成本)。二是电池租赁成本，其受容量保持率影响较大，综合考虑实践中动力电池回收成本与新电池价格比值、旧电池使用寿命等因素，并参考文献谢家平等<sup>[30]</sup>的做法，设定旧电池租赁成本函数为  $C_s(k_s) = c_r \tau k_s$ ，其中  $c_r$  表示旧电池租赁成本系数，可以理解为旧电池容量保持率为 1 的单位容量租赁成本，因此  $c_r$  与新电池的单位电池租赁费水平相等。三是辅助成本，同样包括功率变换器等租赁成本及运维成本等，与使用新电池成本水平相同。则利用旧电池的储能电站每日单位容量租赁成本函数  $C_s(k_s) = C_t + C_a + C_s$ 。容量租赁计费策略下总租赁成本函数  $C_s^R(k_s^R) = (c_r + c_a + c_{r1} \tau^2) \max(\sigma k, k_s^R)$ 。两部制收费策略下，

总租赁成本函数为  $C_s^r(k_s^r) = C_s^{r1}(k_s^r) + C_s^{r2}(k_s^r) = (c_1 + c_a + c_{r2}\tau^2)k_s^r + p_b E \min\left((D_H - tu_H k)^+, \min\left((tu_L k - D_L)^+, \tau \max(\sigma k, k_s^r)\right)\right)$ 。

结合实践, 当旧电池容量保持率非常高(如高于 90%)时, 通常新能源车主不会选择让旧电池退役, 而高价更换新电池; 当容量保持率较低(如低于 70%)时, 旧电池无法满足新能源汽车动力需求。因此, 实践中, 回收的动力电池容量保持率存在一定取值范围, 将其设定为  $\tau \in [\underline{\tau}, \bar{\tau}]$ , 该范围内的旧电池可以满足储能电站的性能要求。

由于两部制收费策略下, 储能电站租赁商能够获得稳定的容量租赁收益, 又可以获得由间歇性等带来的高额电量收益, 因此, 基于实践及各策略特点, 各成本参数存在如下关系  $c_{r1} > c_{r2} > c_a$ 、 $p_f > p_b > c_{r2}$ 。

### 3 决策模型

$$\max \pi_n^R(k_n^R) = E[p_H D_H] + \theta p_H D_L - \beta k - p_f E\left[D_H - tu_H k - \min\left((tu_L k - D_L)^+, \max(\sigma k, k_n^R)\right)\right]^+ - (c_{r1} + c_a) \max(\sigma k, k_n^R) \quad (1)$$

式中, 前两项分别为高峰期、低谷期的风电商电力销售收入, 第三项为风电站的投资成本, 第四项为火电采购成本, 第五项为储能电站租赁成本。求解储能电站最优租赁容量  $k_n^R$ , 得到定理 1。[证明过程详见附录 1.1]

**定理 1:** nR 策略下, 当  $k_n^R \leq \sigma k$  时,  $k_n^R = \sigma k$ ; 当  $k_n^R > \sigma k$ , 且每日单位容量租赁总成本满足  $c_{r1} + c_a \leq p_f \rho_L$  时, 存在储能电站最优租赁容量  $k_n^R$ , 使风电商利润  $\pi_n^R$  达到最大值,  $k_n^R$  满足式(2):

$$p_f \rho_H \rho_L F(G + k_n^R) = p_f \rho_L - c_{r1} - c_a \quad (2)$$

其中,  $G = tk - A_H + \gamma(1 - \theta)p_H$ 。

**性质 1:** 当最优租赁容量满足政府配置要求约束时, 每日储能电站单位容量租赁总成本  $c_{r1} + c_a$  应不高于考虑夜间概率的火电价格, 即存在上限  $p_f \rho_L$ , 否则不租赁储能电站而外购火电进行调峰为最优决策。

$$\max \pi_n^T(k_n^T) = E[p_H D_H] + \theta p_H D_L - \beta k - p_f E\left[D_H - tu_H k - \min\left((tu_L k - D_L)^+, \max(\sigma k, k_n^T)\right)\right]^+ - p_b E \min\left((D_H - tu_H k)^+, \min\left((tu_L k - D_L)^+, \max(\sigma k, k_n^T)\right)\right) - (c_{r2} + c_a) \max(\sigma k, k_n^T) \quad (3)$$

式中, 前两项分别为高峰低谷期的风电商电力销售收入, 第三项为风电站的投资成本, 第四项为火电采购成本, 第五项为储能电站电量购置成本, 第六项为储能电站容量租赁成本。求解储能电站最优租赁容量  $k_n^T$ , 得到定理 2。[证明过程详见附录 1.2]

**定理 2:** nT 策略下, 当  $k_n^T \leq \sigma k$  时,  $k_n^T = \sigma k$ ; 当  $k_n^T > \sigma k$ , 且每日单位容量租赁成本  $c_{r2} + c_a \leq (p_f - p_b)\rho_L$  时, 存在储能电站最优租赁容量  $k_n^T$ , 使风电商利润  $\pi_n^T$  达到最大值,  $k_n^T$  满足式(4):

高峰期需求量为  $D_H$ , 受风力资源间歇性的影响, 高峰期风力发电量为  $tu_H k$ 。储能电站高峰期可放电量为  $\min\left((tu_L k - D_L)^+, \max(\sigma k, k_s)\right)$ , 其中,  $(tu_L k - D_L)^+$  表示夜间风电盈余电力; 对应外购火电期望规模为  $E\left[D_H - tu_H k - \min\left((tu_L k - D_L)^+, \max(\sigma k, k_s)\right)\right]^+$ , 表示扣除风力发电量与储能电站放电量后的高峰期电力需求缺口。

#### 3.1 配置新电池的决策模型

##### 3.1.1 新电池容量租赁计费的最优决策

使用新电池的容量租赁计费 nR 策略下, 进行储能电站租赁容量  $k_n^R$  决策, 期望利润函数如下:

从风电商利润最大化视角看, 储能电站与火电具有替代关系, 储能电站相对外购火电具有成本优势是风电商愿意进行租赁的前提条件。由于风电不存在发电成本且风电商自用储能电站(即储能电站存储自有风电盈余电力, 作为风电的补充, 放电出售给消费者, 不存在价差收益), 则储能电站成本仅涉及租赁成本, 不涉及电力采购等成本。风力资源的间歇性, 导致风电站夜间无法满负荷发电, 夜间概率直接影响储能电站的储电规模。因此, 储能电站与外购火电进行成本比较时, 需要考虑夜间概率的影响。只有当单位容量租赁总成本不高于考虑夜间概率的火电价格时(存在上限  $p_f \rho_L$ ), 租赁储能电站才具有成本优势, 否则外购火电为最优选择。

##### 3.1.2 新电池两部制收费的最优决策

使用新电池的两部制收费 nT 策略下, 进行储能电站租赁容量  $k_n^T$  决策, 期望利润函数如下:

$$(p_f - p_b) \rho_H \rho_L F(G + k_n^T) = (p_f - p_b) \rho_L - c_{r2} - c_a \quad (4)$$

**性质 2:** 当最优租赁容量满足政府配置约束时, 每日储能电站单位容量租赁总成本  $c_{r2} + c_a$  应不高于考虑夜间概率的净火电价格(火电价格与储能电站电量价格差值  $p_f - p_b$ ), 即存在上限  $(p_f - p_b)\rho_L$ , 否则外购火电进行调峰为最优决策。

最优租赁容量满足政府配置约束时, 不同于 nR 策略, nT 策略下储能电站成本包含租赁成本与电量购置成本, 只有其总成本相对于外购火电具备优势时, 风电商才会在利润最大化目标下选择租赁储能

电站。不同于租赁成本按容量付费，储能电站电量购置成本是关于实际放电量的线性函数，其实际发电量同样受夜间概率的影响。将扣除储能电站电量价格后的火电价格称为净火电价格，可以用单位租赁成本与之进行比较。所以，只有当单位租赁成本不高于考虑夜间概率的净火电价格时，即存在上限  $(p_f - p_b)\rho_L$ ，两部制收费策略下租赁储能电站相对外

购火电才具有成本优势，此时，风电商会选择租赁储能电站而非外购火电。

### 3.2 动力电池梯次利用的决策模型

#### 3.2.1 梯次利用的容量租赁计费最优决策

采用旧电池进行容量租赁 sR 策略下，进行储能电站租赁容量  $k_s^R$  决策，期望利润函数如下：

$$\begin{aligned} \max \pi_s^R(k_s^R) = & E[p_H D_H] + \theta p_H D_L - \beta k - p_f E[D_H - tu_H k - \min((tu_L k - D_L)^+, \tau \max(\sigma k, k_s^R))]^+ \\ & - (c_i + c_a + c_{r1} \tau^2) \max(\sigma k, k_s^R) \end{aligned} \quad (5)$$

式中，前两项分别为高峰低谷期的风电商电力销售收入，第三项为风电站的投资成本，第四项为火电采购成本，第五项为储能电站租赁成本。求解储能电站最优租赁容量  $k_s^R$ ，得到定理 3。<sup>[证明过程详见附录 1.3]</sup>

**定理 3：** sR 策略下，当  $k_n^R \leq \sigma k$  时， $k_n^R = \sigma k$ ；当  $k_n^R > \sigma k$ ，且当每日储能电站单位容量租赁总成本  $c_i + c_a + c_{r1} \tau^2 \leq p_f \rho_L \tau$  时，存在储能电站最优租赁容量  $k_s^R$ ，使风电商利润  $\pi_s^R$  达到最大值， $k_s^R$  满足式(6)：

$$p_f \rho_H \rho_L \tau F(G + \tau k_s^R) = p_f \rho_L \tau - c_i - c_a - c_{r1} \tau^2 \quad (6)$$

**性质 3：** 当最优租赁容量满足政府配置约束时，每日储能电站单位容量租赁总成本  $c_i + c_a + c_{r1} \tau^2$  应不高于同时考虑夜间概率及容量保持率的火电价格，

$$\begin{aligned} \max \pi_s^T(k_s^T) = & E[p_H D_H] + \theta p_H D_L - \beta k - p_f E[D_H - tu_H k - \min((tu_L k - D_L)^+, \tau \max(\sigma k, k_s^T))]^+ \\ & - p_b E \min((D_H - tu_H k)^+, \min((tu_L k - D_L)^+, \tau \max(\sigma k, k_s^T))) - (c_i + c_a + c_{r2} \tau^2) \max(\sigma k, k_s^T) \end{aligned} \quad (7)$$

式中，前两项分别为高峰低谷期的风电商电力销售收入，第三项为风电站的投资成本，第四项为火电采购成本，第五项为储能电站电量购置成本，第六项为储能电站容量租赁成本。求解储能电站最优租赁容量  $k_s^T$ ，得到定理 4。<sup>[证明过程详见附录 1.4]</sup>

**定理 4：** sT 策略下，当  $k_n^R \leq \sigma k$  时， $k_n^R = \sigma k$ ；当  $k_n^R > \sigma k$ ，且每日储能电站单位容量租赁成本  $c_i + c_a + c_{r2} \tau^2 \leq (p_f - p_b)\rho_L \tau$  时，存在储能电站最优租赁容量  $k_s^T$ ，使风电商利润  $\pi_s^T$  达到最大值， $k_s^T$  满足式(8)：  
 $(p_f - p_b)\rho_H \rho_L \tau F(G + \tau k_s^T) = (p_f - p_b)\rho_L \tau - c_i - c_a - c_{r2} \tau^2$  (8)

**性质 4：** 当最优租赁容量满足政府配置约束时，每日储能电站单位容量租赁总成本  $c_i + c_a + c_{r2} \tau^2$  应不高于同时考虑夜间概率及容量保持率的净火电价格，即存在上限  $(p_f - p_b)\rho_L \tau$ ，否则外购火电进行调峰为最优决策。

同 nT 策略，sT 策略下储能电站租赁总成本同样由租赁成本与电量购置成本构成，二者分别与租赁容量及实际发电量呈线性关系，但是租赁成本构成与 nT 存在差异。此时，储能电站的实际可储电规模同时受夜间概率与容量保持率的影响。因此，只有当

即存在上限  $p_f \rho_L \tau$ ，否则外购火电调峰为最优决策。

不同于使用新电池的情形，sR 策略下用于梯次利用的动力电池容量保持率低于 1。储能电站租赁总成本由电池租赁成本、辅助成本与检测成本构成。使用旧电池进行储能时，实际储能规模同时受夜间概率及容量保持率的制约。因此，只有当储能电站单位容量租赁总成本不高于同时考虑夜间概率及容量保持率的火电价格(即存在上限  $p_f \rho_L \tau$ )时，sR 策略下租赁储能电站相对外购火电才具备成本优势，否则外购火电的调峰成本更低。

#### 3.2.2 梯次利用的两部制收费最优决策

采用旧电池的两部制收费 sT 策略下，进行储能电站租赁容量  $k_s^T$  决策，期望利润函数如下：

储能电站租赁成本不高于同时考虑夜间概率及容量保持率的净火电价格时，sT 策略下租赁储能电站相对外购火电才具备成本优势，风电商会选择租赁储能电站进行调峰。

在风电快速装机阶段，为扩大储能电站租赁规模以提升风电消纳水平，风电商应与储能商创新合作模式以降低储能电站租赁成本，积极协商开展两部制收费模式合作或开展动力电池梯次利用。依据定理 1 至定理 4、性质 1 至性质 4，得到结论 1。

**结论 1：** 为了扶持或优化储能配置，可以制定配套激励政策，实施技术研发税费返还或储能电站充放电补贴，以提升储能电站租赁相对外购火电的成本优势。

## 4 比较分析

### 4.1 性质分析

当风电商储能电站租赁容量不满足政府配置约束时，最优租赁容量均为常数，其大小与各参数无关；当满足比例要求时，最优租赁容量与各参数存在如下关系。

#### 4.1.1 风电间歇性对最优决策的影响

$$\begin{cases} \tau_1 > \tau_2 & c_{r1}/c_{r2} > p_f/(p_f - p_b) \\ \tau_1 \leq \tau_2 & c_{r1}/c_{r2} \leq p_f/(p_f - p_b) \end{cases} \quad (9)$$

**性质 5:** 储能电站最优租赁容量随日间概率  $\rho_H$  的增加而降低、随夜间概率  $\rho_L$  的增加而增加。<sup>[证明过程详见附录 2.1]</sup>

储能电站工作原理为用电低谷期存储盈余电力、用电高峰期放电以调节电力供需缺口。日间概率的增加会提高日间发电量，从而降低日间电力供需缺口及对储能电站调峰电力的需求量，进而降低了储能电站最优租赁容量。而夜间概率的增加会增加夜间盈余电力，需要扩大储能电站租赁容量以提高盈余电力的存储能力。由此，得到结论 2。

**结论 2:** 对于风力资源丰富的地区，低谷期电力盈余规模较大，风电商可以适度增加储能电站租赁容量。

#### 4.1.2 发电成本因素对最优决策的影响

发电成本因素涉及单位电池租赁成本  $c_{r1}$  与  $c_{r2}$ 、单位辅助成本  $c_a$ 、单位检测成本  $c_i$ 、火电价格  $p_f$ 、储能电站电量价格  $p_b$ 。

**性质 6:** 储能电站最优租赁容量与单位电池租赁成本、单位辅助成本  $c_a$ 、单位检测成本  $c_i$ 、电量价格  $p_b$  均呈单调递减关系，与火电价格  $p_f$  呈单调递增关系。<sup>[证明过程详见附录 2.2]</sup>

单位电池租赁成本、单位辅助成本、单位检测成本及电量价格的提高均会增加储能电站的租赁成本，从而压缩储能电站相对外购火电的成本优势，导致最优租赁容量的降低；火电价格的提高则相反，会增加储能电站成本优势，进而提高最优租赁容量。

#### 4.1.3 电价相关参数对最优决策的影响

电价相关参数涉及日间电价  $p_H$ 、分时价格比重  $\theta$  与需求价格敏感系数  $\gamma$ 。

**性质 7:** 储能电站最优租赁容量随日间电价  $p_H$  及需求价格敏感系数  $\gamma$  的增加而降低、随分时价格比重  $\theta$  的增加而增加。<sup>[证明过程详见附录 2.3]</sup>

提高日间电价及需求价格敏感系数会增加日间用电成本，降低分时价格比重会增加日间与夜间电价差值，二者均会扩大夜间用电的成本优势，会促使电力用户更大规模的电力需求由日间转移至夜间，有助于缓解日间电力供需矛盾，进而降低了储能电站最优租赁容量。由于分时电价与储能电站存在替代效应，依据性质 7 可以得到结论 3。

**结论 3:** 对于电力供不应求的地区，可以适当扩大峰谷电价差予以缓解。

#### 4.1.4 容量保持率对最优决策的影响

**性质 8:** 利用旧电池的两种策略下，(1)容量保持率存在分别使最优储能租赁容量  $k_s^{R*}$ 、 $k_s^{T*}$  取得最大值的阈值  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ ；(2)阈值  $\tau_1$  与  $\tau_2$  大小关系如式(9)

所示。<sup>[证明过程详见附录 2.4]</sup>

其中， $\tau_1 = p_f \rho_L [1 - \rho_H F(G + \tau k_s^R)] / [p_f \rho_H \rho_L k_s^R f(G + \tau k_s^R) + 2c_{r1}]$ ， $\tau_2 = \rho_L (p_f - p_b) [1 - \rho_H F(G + \tau k_s^T)] / [(p_f - p_b) \rho_H \rho_L k_s^T f(G + \tau k_s^T) + 2c_{r2}]$

当阈值低于其取值范围时，说明旧电池的容量保持率处于较高水平，利用旧电池的储能电站单位租赁成本会大幅上升，最优租赁容量随容量保持率的提升呈下降趋势，在其下限值处取得最大值。相反，当阈值高于其取值范围时，最优租赁容量在其上限处取得最大值。而当阈值属于容量保持率取值范围内点时，最优租赁容量最大值均在阈值处取得。

由式(9)可知，利用旧电池的两种策略下，容量保持率阈值大小受单位电池租赁成本比值与火电价格比值相对大小关系的影响，当单位电池租赁成本比值高于后者时，容量租赁计费下单位电池租赁成本不具备优势，需要更高的容量保持率弥补成本劣势，对应其容量保持率阈值高于两部制收费策略。相反，当  $c_{r1}$  相对于  $c_{r2}$  差值比率低于火电时，容量租赁计费策略所要求的容量保持率阈值会更低。由此，得到结论 4。

**结论 4:** 租赁旧电池储能存在容量保持率阈值，不宜盲目扩大储能租赁容量，应结合旧电池储能相对外购火电的成本优势进行权衡。

## 4.2 容量比较分析

当风电商储能电站最优租赁容量不满足政府最低配置比例约束时，四种策略下储能电站最优租赁容量均为  $\sigma k$ 。当最优租赁容量满足配置比例约束时，根据四种策略下的最优租赁容量表达式，容易得到如下大小关系：

### 4.2.1 基于最优租赁容量的租赁策略选择

**性质 9:** 相同电池使用下，不同租赁策略的最优租赁容量关系如式(10)所示。<sup>[证明过程详见附录 3.1]</sup>

$$\begin{cases} \textcircled{1} \begin{cases} k_n^{T*} > k_n^{R*} & \frac{c_{r1} + c_a}{c_{r2} + c_a} > \frac{p_f}{p_f - p_b} \\ k_n^{T*} \leq k_n^{R*} & \frac{c_{r1} + c_a}{c_{r2} + c_a} \leq \frac{p_f}{p_f - p_b} \end{cases} \\ \textcircled{2} \begin{cases} k_s^{T*} > k_s^{R*} & \frac{c_i + c_a + c_{r1}\tau^2}{c_i + c_a + c_{r2}\tau^2} > \frac{p_f}{p_f - p_b} \\ k_s^{T*} \leq k_s^{R*} & \frac{c_i + c_a + c_{r1}\tau^2}{c_i + c_a + c_{r2}\tau^2} \leq \frac{p_f}{p_f - p_b} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

$(c_{r1} + c_a)/(c_{r2} + c_a)$  与  $p_f/(p_f - p_b)$  的比较，可以理解为使用新电池的两种租赁策略下单位总租赁成本差异与考虑电量价格下火电价格差异大小关系。当  $(c_{r1} + c_a)/(c_{r2} + c_a) > p_f/(p_f - p_b)$  时，表示容量租赁计费策略下单位总租赁成本与两部制收费的差异相对火电采购成本处于劣势，即容量租赁的单位租赁成本偏高，导致该策略下会有更多的储能电站容量被火电替代，其最优租赁容量小于两部制收费策略，反之大于两部制收费策略。利用旧电池下最优租赁容量大小关系同使用新电池。

## 4.2.2 基于最优租赁容量的电池策略选择

**性质 10:** 相同租赁策略下, 不同电池使用的最优租赁容量关系如式(11)所示。<sup>[证明过程详见附录 3.2]</sup>

$$\textcircled{1} \begin{cases} k_s^R > k_n^R & c_{r1} > \frac{1}{\tau} \left( \frac{c_f}{1-\tau} + c_a \right) \\ k_s^R \leq k_n^R & c_{r1} \leq \frac{1}{\tau} \left( \frac{c_f}{1-\tau} + c_a \right) \end{cases} \textcircled{2} \begin{cases} k_s^T > k_n^T & c_{r2} > \frac{1}{\tau} \left( \frac{c_f}{1-\tau} + c_a \right) \\ k_s^T \leq k_n^T & c_{r2} \leq \frac{1}{\tau} \left( \frac{c_f}{1-\tau} + c_a \right) \end{cases} \quad (11)$$

容量租赁计费策略下, 当单位电池租赁成本占比偏高  $c_{r1} > [c_f/\tau(1-\tau) + c_a/\tau]$  时, 旧电池租赁成本优势更为明显, 利用旧电池下的最优储能租赁容量高于新电池, 反之, 使用新电池的租赁容量更高。两部制收费下最优租赁容量大小关系同容量租赁计费策略。依据性质 9 和性质 10 得到结论 5。

**结论 5:** 风电商针对同类电池情景, 容量计费租赁成本高时, 应选择两部制收费策略, 反之, 容量计费策略更具优势; 而对于同类租赁策略, 当单位电池租赁成本占比高时, 应尽量选择使用旧电池, 反之, 选择新电池。

## 5 案例分析

以湖南杨林 30MW 风电项目为例, 该项目位于湖南省湘潭市韶山市杨林乡, 是 2019 年重点建设项目, 规划总装机容量 30MW, 总投资金额约 3.5 亿元, 年设计发电量约 8000 万 MWh。分别在白翎村、磨石村各安装 7 台 2.5MW 和 5 台 2.5MW 的风力发电机组。湖南省积极实施分时电价政策与加快推动储能发展<sup>①</sup>, 以合理引导用户削峰填谷, 促进构建以新能源为主体的新型电力系统。推动储能发展方面, 积极构建“新能源+储能”发展机制, 鼓励风电等可再生能源发电项目通过租赁或配建的方式, 实现储能配置要求。以该案例为基础, 通过数值模拟的方式比较不同策略下风电商利润大小, 以规避表达式过于复杂无法直接比较的问题, 并从利润最大化视角进行策略选择。

### 5.1 案例参数设置

参数设置如表 1 所示。

表 1 参数取值

参数	参数符号	参数取值	数据来源	参数	参数符号	参数取值	数据来源
风电站容量(MW)	$k$	30	—	租赁计费/两部制收费下每日储能电站单位电池租赁成本(元/MWh)	$c_{r1} / c_{r2}$	180/60	依据(4)
每日风电站的单位投资成本(元/MW)	$\beta$	1600	依据(1)	每日储能电站单位容量辅助成本/检测成本(元/MWh)	$c_a / c_f$	40/10	文献[25]
高峰期电价(元/MWh)	$p_H$	660	依据(2)	政府要求的储能电站配置比例	$\sigma$	10%	依据(5)
分时价格比重	$\theta$	0.7	依据(2)	旧电池容量保持率	$\tau$	0.8	文献[25]
日间/夜间概率	$\rho_H / \rho_L$	0.3/0.33	依据(3)	火电价格(元/MWh)	$p_f$	800	依据(6)
电力需求的价格敏感系数	$\gamma$	0.02	依据(2)	储能电站电量价格(元/MWh)	$p_s$	400	依据(7)
高峰期/低谷期电力市场规模(MWh)	$A_H / A_L$	370/330	依据(3)	每个时期的时长(时)	$t$	12	—
电力需求随机因子上下限(MWh)	$\varepsilon_u / \varepsilon_l$	25/10	依据(2)	—	—	—	—

参数设置依据如下: (1)以风力发电机组、风力发电塔架、主变压器等核心设备使用年限 20 年为依据, 确定风电站生命周期为 20 年, 将该项目实际投资成本折算成每日单位投资成本。(2)依据国家发改委《关于进一步完善分时电价机制的通知》要求及湖南省具体做法, 确定高峰期电价、分时价格比重水平、需求价格敏感系数及随机因子上下限。(3)结合所在地区风电利用小时数、风电装机规模等数据, 并借鉴 Kók 等<sup>[13]</sup>与 Song 等<sup>[17]</sup>的方法, 折算出日间概率、市场规模参数取值。(4)参考国内主流储能电池技术参数, 确定储能电站生命周期内循环 5000 次, 每天循环 1 次, 对应折算出每日储能电站电池单位租赁成本<sup>②</sup>; 旧电池生命周期约为新电池的 50%, 其已经在电池租赁成本函数中体现, 故新旧电池均按 5000 次计算。(5)参考相关省份实践, 设定配置比例为 10%。(6)结合东北、西北等地做法, 设定火电参与调峰辅助

服务电价为 800 元/MWh<sup>③</sup>。(7)结合山东省做法及高峰低谷期电价水平进行设定。

电力需求是影响储能电站租赁决策的关键因素。由于最优储能租赁容量为隐函数, 为了探究需求不确定性对储能电站租赁决策的影响, 借鉴 Tishler 等<sup>[31]</sup>需求服从均匀分布, 本文用电高峰期的需求随机因子  $\varepsilon$  设定在  $[-\varepsilon_1, \varepsilon_2]$  上的均匀分布, 对应得到四种策略下的最优租赁容量及利润函数显性表达式, 作为案例分析的基础。

### 5.2 储能电站单位电池租赁成本影响

其他参数取值相同时, 给定单位电池租赁成本  $c_{r1} \in [100, 300]$ 、 $c_{r2} \in [30, 90]$ , 从风电商利润角度进行最优决策, 如图 2 与图 3 所示。

一是租赁策略选择。单位电池租赁成本的增加会降低该策略的竞争优势。使用新电池时, 如图 2(a)

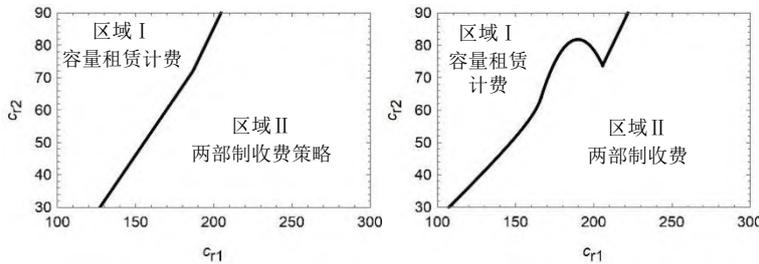
<sup>①</sup>湖南省发改委, 2021, 《关于进一步完善我省分时电价政策及有关事项的通知》(湘发改价调规〔2021〕848号), [http://fgw.hunan.gov.cn/xxgk\\_70899/c101588/c101602/202204/t20220429\\_23229845.html](http://fgw.hunan.gov.cn/xxgk_70899/c101588/c101602/202204/t20220429_23229845.html); 湖南省发改委, 2021, 《关于推动湖南省电化学储能发展的实施意见》(湘发改能源〔2021〕786号), <http://www.hnaepi.com.cn/newsinfo/2226672.html>  
<sup>②</sup>陕西省能源局, 2021, 《关于促进陕西省可再生能源高质量发展的意见》

见》, <http://sxsnjy.shaanxi.gov.cn/POLICY/cxwj/aiY7fa.htm>

<sup>③</sup>国家能源局东北监管局, 2019, 《东北电力辅助服务市场运营规则(暂行)》(东北监管市场发改价格〔2018〕220号), <https://guangfu.bjx.com.cn/news/20190116/956991.shtml>; 国家能源局西北监管局, 2019, 《西北区域省间调峰辅助服务市场运营规则(试行)》(西北监管市场发改价格〔2019〕1号), <https://www.doc88.com/p-30929040666211.html>

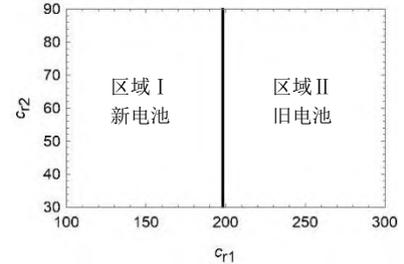
所示，当容量租赁计费策略下单位电池租赁成本  $c_{r1}$  处于较高水平(区域II)，两部制收费策略的成本优势更为明显，反之应选择容量租赁计费策略。利用旧电池时，如图2(b)所示，存在如下特征：第一，利用旧电池下两种租赁策略的等利润曲线斜率小于使用新电池，表示  $c_{r1}$  增加一定规模时， $c_{r2}$  只需较小规模的

增加便会使两部制收费策略失去优势，即利用旧电池增加了容量租赁计费策略占优空间；第二，受政府储能电站配置比例约束影响，利用旧电池下等利润曲线存在向上凸起区域，即政府配置比例约束削减了容量租赁计费策略的占优空间。



(a)使用新电池的租赁策略选择 (b)利用旧电池的租赁策略选择

图2 单位电池租赁成本对租赁策略的影响



容量租赁计费策略下电池策略选择

图3 单位电池租赁成本对电池策略的影响

二是电池使用选择。两部制收费策略下，风电商使用新电池的利润始终高于利用旧电池，两部制收费策略压缩了电池租赁成本占比，削弱了利用旧电池带来的成本优势。容量租赁计费策略下，如图3所示，电池使用选择仅受  $c_{r1}$  的影响。当  $c_{r1} \geq 198$  处于较高水平时，利用旧电池带来的成本节约一定程度上抵消租赁成本过高的影响，为最优选择；反之，应选择使用新电池。

(电量价格偏低)占优。

整体来看，当储能电站电量价格偏高时，两部制收费策略成本优势会下降，容量租赁计费策略具有优势，否则两部制收费策略具有优势。

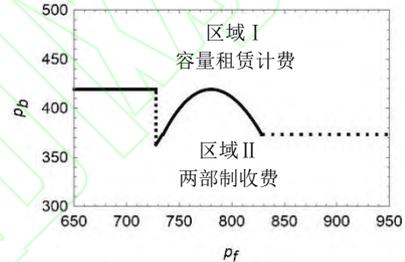
### 5.3 火电与储能电站电量价格的影响

其他参数取值相同时，给定火电价格  $p_f \in [650, 950]$ ，储能电站电量价格  $p_b \in [300, 500]$ ，从风电商利润角度进行最优决策，如图4与图5所示。

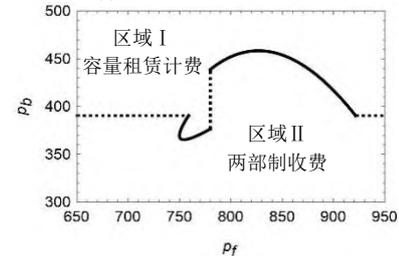
#### (1) 租赁策略选择

第一，使用新电池的租赁策略选择。如图4(a)所示，火电价格在处于较低  $p_f \in [650, 727.8]$  或较高  $p_f \in [828.3, 950]$  水平时，策略选择仅受电量价格  $p_b$  影响，两个区间内等利润曲线分别为  $p_b = 419.2$  与  $p_b = 373.3$ ，在等利润曲线的上方，较高的电量价格增加了两部制收费策略的成本水平，对应容量租赁计费策略占优。处于等利润曲线下方时应选择两部制收费策略。当  $p_f \in [727.8, 828.3]$  时，容量租赁计费策略下的最优租赁容量满足政府配置约束，而两部制收费策略不满足，等利润曲线呈向上凸起态势，容量租赁计费策略同样在等利润曲线上方占优。

第二，利用旧电池的租赁策略选择。如图4(b)所示，根据是否满足政府配置约束，分成四个区域，在左上侧区域(范围  $p_f \in [650, 780]$ ， $p_b \in [390.5, 500]$ )，两种策略下的最优租赁容量均不满足政府配置约束，偏高的电量价格增加了两部制收费策略下的风电商成本，容量租赁计费策略占优；在右下侧区域(范围  $p_f \in [780, 950]$ 、 $p_b \in [300, 390.5]$ )，均满足政府配置约束，偏低的电量价格增加了两部制收费策略成本优势；在左下侧及右上侧区域，仅某一策略满足政府配置约束，容量租赁计费策略均在所属区域右上角(该区域电量价格偏高)占优，两部制收费策略在左下角



(a)使用新电池的租赁策略选择



(b)利用旧电池的租赁策略选择

图4 火电与储能电站电量价格对租赁策略的影响

#### (2) 电池使用选择

第一，容量租赁计费策略下电池使用选择。如图5(a)所示，该策略不涉及电量价格，新旧电池的选择仅受火电价格影响。当火电价格  $p_f \in [650, 727.8]$  时，使用新旧电池的最优租赁容量均不满足政府配置约束，固定租赁容量下，利用旧电池具备成本优势，为最优策略。当火电价格  $p_f \in [780, 950]$  处于高位时，最优租赁容量均满足配置约束，此时，外购火电成本较高，应使用容量保持率较高的新电池，以减少火电采购量。当火电价格  $p_f \in [727.8, 780]$  处于中间水平时，使用新电池满足配置约束、利用旧电池不满足，火电价格存在阈值  $p_f = 751.1$ ，在火电价格小于阈值的区域II内，使用新电池可以获得更高利润，在大于阈值的区域III内，利用旧电池为更好选择。

第二，两部制收费策略下电池使用选择。如图5(b)所示，当电量价格  $p_b \in [300, 338]$  时，使用新旧电池

的最优租赁容量均满足配置约束； $p_b \in [373.2, 500]$ ，均不满足配置约束，两种情形下利用旧电池仅在电量价格相对较高而外购火电偏低的左上侧区域占优(区域II)；当 $p_b \in [338, 373.2]$ 时，使用新电池始终为最优选择。整体来看，两部制收费策略下，使用新电池优势明显。

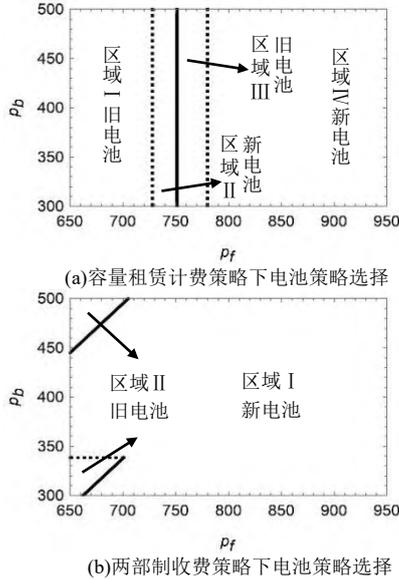


图5 火电与储能电站电量价格对电池策略的影响

#### 5.4 容量保持率与单位辅助成本影响

其他参数取值相同时，给定容量保持率 $\tau \in [0.6, 1]$ 、单位辅助成本 $c_a \in [20, 70]$ 时，从风电商利润角度进行最优决策，如图6所示。

##### (1) 租赁策略选择

使用新电池时，两部制收费策略始终优于容量租赁计费策略。使用旧电池时，如图6(a)所示，受政府配置比例影响，将容量保持率取值分为两段进行分析。第一，当容量保持率处于偏低区域 $\tau \in [0.6, 0.847]$ 时，在单位辅助成本 $c_a$ 偏高的区域I内，单位辅助成本占总租赁成本比例较高，此时，两部制收费策略下单位租赁成本增速高于容量租赁计费策略，容量租赁计费策略具有优势；在 $c_a$ 偏低的区域II内则相反，应选择两部制收费策略。第二，当 $\tau \in [0.847, 1]$ 时，两种租赁策略下最优租赁容量均不满足政府储能电站配置约束，租赁容量均为最低配置约束，此时，两种租赁策略下等利润曲线仅受容量保持率的影响，在容量保持率偏高的区域III( $\tau \geq 0.932$ )内，增加容量保持率带来的电池租赁成本增速会提高，电池租赁成本占比较低的两部制收费策略占据优势；在偏低的区域 $\tau \in [0.847, 0.932]$ 内，则相反，应选择容量租赁计费策略。

##### (2) 电池使用选择

两部制收费策略下，使用新电池始终优于利用旧电池。容量租赁计费策略下，如图6(b)所示，当 $\tau \geq 0.921$ 时，该策略下使用旧电池最优租赁容量不满足政府配置约束，旧电池低成本优势无法显现，选择使用新电池更具优势。在 $\tau \in [0.6, 0.921]$ 的区域内，等利

润曲线由使用新电池不满足政府配置约束与利用旧电池满足政府配置约束的风电商利润函数形成，此时使用新电池的租赁容量为固定值，当单位辅助成本 $c_a$ 偏高时(区域I内)，其租赁成本增加速度更快，应选择利用旧电池；反之，可以节约租赁成本，使用新电池为最优。

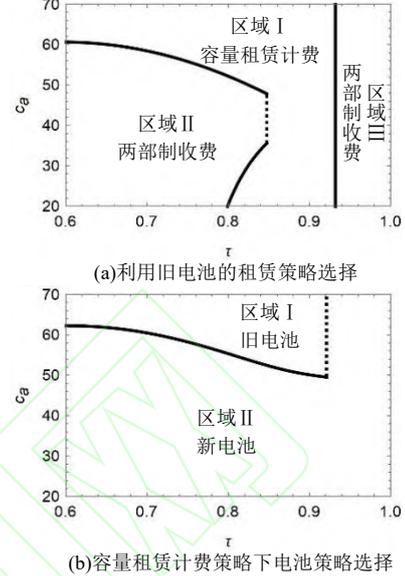


图6 容量保持率及单位辅助成本对租赁策略及电池策略的影响

由于最优策略选择主要受政府最低储能配置约束、容量保持率、储能电站租赁成本等因素的综合影响，结合案例分析结果得到结论6。

**结论6:** 租赁储能电站应遵照储能配置比例要求，选择以新电池为主、动力电池作为补充的组合策略，且积极引导建立完备的动力电池梯次利用体系，以满足其容量保持率要求。

## 6 结语

作为解决可再生能源间歇性的重要手段，在发电侧配置储能电站有助于提高可再生电力消纳水平。通过租赁方式可以解决储能电站初始投资金额过高的问题。本文在风电供需双重不确定情形下，同时考虑动力电池梯次利用与政府对储能电站配置约束，引入两部制收费策略，研究了风电商的储能电站租赁策略选择问题。得到如下结论：

第一，租赁容量优化模型求解发现，当租赁储能电站相对外购火电存在成本优势时，四种策略均存在最优租赁容量，且该容量受政府最低储能配置约束的影响。储能电站最优租赁容量随日间(夜间)概率的增加而降低(增加)，与单位电池租赁成本等成本参数呈单调递减关系，与火电价格呈单调递增关系，扩大峰谷电价差异会降低最优租赁容量；存在使最优租赁容量取得最大值的容量保持率阈值。

第二，容量租赁视角的最优策略比较发现，当容量租赁计费与两部制收费策略的单位租赁成本差值相对火电采购成本处于劣势时，两部制收费下的最优租赁容量更高。当单位电池租赁成本占比偏高时，使用旧电池会提升储能租赁容量。

第三,风电商利润最大化视角的最优策略比较发现,策略选择受政府最低储能配置比例约束影响明显,单位电池租赁成本的增加会降低对应租赁策略的竞争优势,利用动力电池能够增加容量租赁计费策略的占优空间,降低电量价格与单位辅助成本可以提升两部制收费的竞争优势,过高的容量保持率会降低动力电池成本优势,租赁储能电站应以新电池为主、旧电池作为补充。

本文重点研究了“一对一”风电商配套储能电站租赁策略选择问题,可以为风电商储能电站租赁决策及政府储能配置政策的制定提供参考。然而,并未考虑多个风电商在租赁储能电站时的竞争问题。伴随大型集中式独立储能电站的快速建设,拟分别针对分时定价与实时定价的“多对一”共享储能模式,拓展研究其租赁策略选择。

## 参考文献

- [1] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴.中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J].中国科学院院刊,2022,37(04):423-434.  
Yu G R, Hao T X, Zhu J X. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 423-434.
- [2] 范英,衣博文.能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J].管理世界,2021,37(08):95-105.  
Fan Y, Yi B W. Evolution, driving mechanism, and pathway of China's energy transition[J]. Journal of Management World, 2021, 37(08): 95-105.
- [3] Faruqui A, Sergici S. Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments[J]. Journal of Regulatory Economics, 2010, 38(2): 193-225.
- [4] 刘自敏,张昕竹,杨丹.纯分时定价与分时阶梯定价对政策目标实现的对比分析[J].数量经济技术经济研究,2015,32(06):120-134.  
Liu Z M, Zhang X Z, Yang D. Policy target achievement between pure time-of-use tariff and time-of-use tariff [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2015, 32(06): 120-134.
- [5] 刘静琨,张宁,康重庆.电力系统云储能研究框架与基础模型[J].中国电机工程学报,2017,37(12):3361-3371.  
Liu J K, Zhang N, Kang C Q. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3361-3371.
- [6] 李建林,李雅欣,吕超,等.退役动力电池梯次利用关键技术及现状分析[J].电力系统自动化,2020,44(13):172-183.  
Li J L, Li Y X, Lv C, et al. Key technology and research status of cascaded utilization in decommissioned power battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 172-183.
- [7] Pan K, Lai K K, Leung S, et al. Revenue-sharing versus wholesale price mechanisms under different channel power structures[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 203(2):532-538.
- [8] Arani H V, Rabbani M, Rafiei H. A revenue-sharing option contract toward coordination of supply chains[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 178(8): 42-56.
- [9] 孔令丞,李仲,梁玲,等.供需数量不确定下可再生能源发电容量投资决策[J].管理工程学报,2019,33(2):166-172.  
Kong L C, Li Z, Liang L, et al. Renewable energy source power capacity investment under uncertain demand and supply[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2019, 33(2): 166-172.
- [10] 谢家平,魏礼红,张为四等.风电与火电的竞争上网定价优化——碳约束政策的影响研究[J].管理科学学报,2022,25(06):100-126.  
Xie J P, Wei L H, Zhang W S, et al. Optimization of pricing strategies for competitive grid-connected wind power and thermal power: The impact of carbon constraint policies[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(06): 100-126.
- [11] Darghouth N R, Barbose G, Wiser R. The impact of rate design and net metering on the bill savings from distributed PV for residential customers in California[J]. Energy Policy, 2011, 39(9): 5243-5253.
- [12] Borenstein S. Effective and equitable adoption of opt-in residential dynamic electricity pricing[J]. Review of Industrial Organization, 2013, 42(2): 127-160.
- [13] Kök G, Shang K, Şafak Y. Impact of electricity pricing policies on renewable energy investments and carbon emissions[J]. Management Science, 2018, 64(1): 131-148
- [14] Cordera F, Moreno R, Ordoñez, F. Unit commitment problem with energy storage under correlated renewables uncertainty[J]. Operations Research, 2023, 71(6): 1960-1977.
- [15] Kaps C, Marinesi S, Netessine S. When should the off-grid sun shine at night? Optimum renewable generation and energy storage investments[J]. Management Science, 2023, 69(12): 7633-7650.
- [16] Wu O Q, Kapuscinski R, Suresh S. On the distributed energy storage investment and operations[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2023, 25(6): 2277-2297.
- [17] Song M Z, Kong L C, Xie J P. Capacity investment decisions of energy storage power stations supporting wind power projects[J].Industrial Management & Data Systems, 2023, 123(11):2803-2835.
- [18] 殷辉,陆信辉,周开乐.分布式与集中式储能并存的微电网负荷优化调度[J].中国管理科学,2023,31(02):118-128.  
Yin H, Lu X H, Zhou K L. Optimal load dispatch for microgrid with distributed and centralized energy storage systems[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(02): 118-128.
- [19] 封开,林佳荔,李绘等.独立储能电站在湖南的商业投资价值分析[J].储能科学与技术,2022,11(12):4077-4083.  
Feng K, Lin J L, Li H, et al. Commercial investment value analysis of independent energy storage power station in Hunan[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(12): 4077-4083.
- [20] 陈威,田永乐,马永开,等.可再生能源储能租赁模式对电力质量和电价决策的影响[J].中国管理科学,2024,32(01):309-318.  
Chen W, Tian Y L, Ma Y K, et al. Impact of leasing mode with renewable energy storage equipment on electricity quality[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(01): 309-318.
- [21] 李咸善,方子健,李飞,等.含多微电网租赁共享储能的配电网博弈优化调度[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6611-6625.

- Li X S, Fang Z J, Li F, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6611-6625.
- [22] 李建林,崔宜琳,马速良等.需求侧共享储能的运营模式优化及其经济效益分析研究[J].电网技术, 2022, 46(12): 4954-4969.
- Li J L, Cui Y L, Ma S L, et al. Operation mode optimization and economic benefit analysis of demand-side shared energy storage[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4954-4969.
- [23] 鲁明芳,李咸善,李飞,等.基于双层博弈优化的光伏电站集群储能租赁配置策略[J].中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5887-5898+6164.
- Lu M F, Li X S, Li F, et al. Strategy of energy storage leasing configuration of photovoltaic power station cluster based on bi-level game optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5887-5898+6164.
- [24] 李香龙,刘秀兰,郭晨,等.基于数字能量交换系统的动力电池无损梯次利用储能技术研究[J].中国电机工程学报,2022,42(16):5848-5857+6161.
- Li X L, Liu X L, Guo C, et al. Energy and economic efficiency of li-ion battery packs re-used in stationary energy storage application[J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(16):5848-5857+6161.
- [25] 李培强,李雄,蔡笋,等.风电场含退役动力电池的混合储能系统容量优化配置[J].太阳能学报,2022,43(5): 492-498.
- Li P Q, Li X, Cai S, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system with retired power batteries in wind farms[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(5): 492-498.
- [26] 谢隽阳,乐为,郭本海.基于生产者责任延伸的新能源汽车动力电池回收帕累托均衡[J].中国管理科学, 2022, 30(11): 309-320.
- Xie J Y, Le W, Guo B H. Pareto equilibrium of new energy vehicle power battery recycling based on extended producer responsibility[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(11): 309-320.
- [27] 张雷,刘颖琦,张力,等.中国储能产业中动力电池梯次利用的商业价值[J].北京理工大学学报(社会科学版), 2018, 20(06): 34-44.
- Zhang L, Liu Y Q, Zhang L, et al. Commercial value of power battery echelon utilization in china's energy storage industry[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2018, 20(06): 34-44.
- [28] 李建林,修晓青,刘道坦,等.计及政策激励的退役动力电池储能系统梯次应用研究[J].高压电技术, 2015, 41(8): 2562-2568.
- Li J L, Xiu X Q, Liu D T, et al. Research on second use of retired electric vehicle battery energy storage system considering policy incentive[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2562-2568.
- [29] Aflaki S, Netessine S. Strategic investment in renewable energy sources: the effect of supply intermittency [J]. Manufacturing and service operations management, 2017, 19(3): 489-507.
- [30] 谢家平,迟琳娜,梁玲.基于产品质量内生的制造/再制造最优生产决策[J].管理科学学报,2012,15(8):12-23.
- Xie J P, Chi L N, Liang L. Optimal manufacturing/remufacturing production decision based on endogenous product quality[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(8): 12-23.
- [31] Tishler A, Milstein I, Woo C. Capacity commitment and price volatility in a competitive electricity market[J]. Energy Economics, 2008, 30(4): 1625-1647.

## Under Cascade Utilization of Power Battery the Lease Strategy Selection of Energy Storage Power Station in Wind Power Enterprises: Capacity Charging or Two-part Charging ?

SONG Ming-zhen<sup>1,2</sup>, MA Teng<sup>1</sup>, KONG Ling-cheng<sup>3,1</sup>, XIE Jia-ping<sup>2,1</sup>

(1. School of Business Administration, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China;

2. Business College, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China;

3. School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** In achieving China's "dual carbon goals", it is urgent to promote the transformation of the energy structure towards a distributed energy system dominated by renewable energy. However, its intermittent existence has led to the consumption problem of renewable energy electricity (referred to as "green electricity"). With the rapid increase in the proportion of renewable energy, its consumption problem has become increasingly prominent. The configuration of energy storage stations in green electricity projects and the implementation of time-of-use electricity pricing policies are vital measures to solve the consumption problem of green electricity. However, the high cost of energy storage batteries has had a negative impact on the configuration of energy storage stations in green electricity projects. It can effectively alleviate the cost dilemma of energy storage by promoting the tiered utilization of power batteries (referred to as "old batteries") in the energy storage field and implementing a two-part charging model for energy storage leasing.

Therefore, this article uses wind power generation as an example, introducing the cascading utilization of power batteries and a two-part charging model. Regarding the use of new or old batteries and the choice of capacity rental or two-part charging, it designs four strategies: nR strategy (using new batteries, choosing capacity charging), nT strategy (using new batteries, choosing two-part charging), sR strategy (using old batteries, choosing capacity charging), and sT strategy (using old batteries, choosing two-part charging). At the same time, under the dual uncertainty of the intermittent wind resources and random fluctuations in peak electricity demand, considering the

government's constraints on the configuration of energy storage stations in wind electricity projects, it constructs leasing decision models of energy storage power stations for four strategies. In the construction of the decision model, it uses the intermittency factor  $u_i = [1, \rho_i; 0, 1 - \rho_i]$  to characterize the intermittency of wind power indicating that the probability of wind power projects generating electricity at rated power  $k$  is  $\rho_i$  in phase  $i$ , and the probability of not generating electricity is  $1 - \rho_i$ . It introduces a capacity retention rate  $\tau$  to measure the available capacity of power batteries. It sets the constraint ratio of government energy storage configuration as  $\sigma$ , so the capacity of energy storage stations that wind power projects should lease is  $\max(\sigma k, k_s)$ , where  $k_s$  is the leasing capacity of energy storage stations under profit maximization.

The specific research steps are as follows: Firstly, using the decision model, the optimal leasing capacity decision is determined for four strategies of energy storage power stations. Secondly, it analyzes the impact of key parameters such as wind power intermittency, generation cost, electricity price, and capacity retention rate on the optimal leasing capacity. It also sorts out the relevant properties and management insights. Finally, the paper compares the advantages and disadvantages of the four strategies from the perspectives of energy storage leasing capacity and maximizing profits for wind power enterprises.

Based on the above analysis, the research results of this article are as follows: (1) When the total lease cost is not higher than the net thermal power price that considering both nighttime probability and capacity retention rate, all four leasing strategies have optimal lease capacity. (2) Reducing the cost of battery leasing and other related can encourage wind power enterprises to increase their leasing capacity. A threshold of capacity retention rate can maximize the optimal lease capacity. (3) The leasing strategy in which the unit leasing cost is superior to the thermal power price and the battery strategy in which the unit leasing cost is superior after eliminating the impact of capacity retention rate can encourage wind power enterprises to expand the leasing scale. (4) The choice of leasing strategy is affected by the government's allocation constraints of energy storage power stations. Using the old battery can increase the dominant space of the capacity charging strategy. The capacity lease billing strategy is optimal when the electricity price increases and the extra unit cost increases at a lower capacity retention rate.

This article deepens the research on the decision-making of energy storage stations on the renewable energy generation side and the cascading utilization of power batteries. It can provide ideas and method references for the research of related topics such as energy storage leasing decision-making and shared energy storage decision-making, and it can also provide a basis for calculating power battery utilization rate. At the same time, continuing the practical problem of the high cost of energy storage power stations that this article intends to solve, further research can be conducted on topics such as technological innovation decision-making and mode selection for energy storage power stations.

**key words:** capacity decision; lease strategy selection; energy storage; cascade utilization of power battery; dual carbon goal

# 附录

## 附录 0 参数符号

附表 1 变量与参数注释

模型参数			
符号	含义	符号	含义
$p_H$	高峰期电价	$\theta$	分时价格比重
$D_i(\cdot)$	$i$ 期的电力需求函数	$A_i$	$i$ 期的电力市场规模
$\gamma$	电力需求/交叉价格敏感系数	$\varepsilon$	高峰期电力需求随机因子
$\tau$	旧电池容量保持率	$u_i$	$i$ 期风电间歇性因子
$\underline{\tau}/\bar{\tau}$	旧电池容量保持率的下限/上限	$\rho_i$	0-1 两点分布下 $u_i = 1$ 的概率
$k$	风电站容量	$\beta$	每日风电站单位容量投资成本
$C^R(\cdot)/C^T(\cdot)$	容量租赁计费与两部制收费下每日储能电站租赁总成本	$c_{r1}/c_{r2}$	容量租赁计费/两部制收费下每日储能电站电池单位租赁成本
$c_a/c_i$	每日储能电站单位容量辅助成本/检测成本	$\sigma$	政府要求的储能电站配置比例
$p_b$	储能电站电量价格	$p_f$	火电价格
$\pi$	利润函数	$t$	时期 $i$ 的时长
上下标			
$i$	$i = H$ 为高峰期, $i = L$ 为低谷期	*	最优决策
$n$	使用新电池	$R$	容量租赁计费策略
$s$	利用旧电池	$T$	两部制收费策略
决策变量			
$k_n^R$	nR 策略下储能电站租赁容量	$k_n^T$	nT 策略下储能电站租赁容量
$k_s^R$	sR 策略下储能电站租赁容量	$k_s^T$	sT 策略下储能电站租赁容量

## 附录 1 定理的证明

### 附录 1.1 定理 1 的证明

证明: 对于式(1), 当  $k_n^R \leq \sigma k$  时,  $k_n^{R*} = \sigma k$ 。当  $k_n^R > \sigma k$  时, 分别求式(1)中利润函数关于储能租赁容量  $k_n^R$  的一阶与二阶导数, 如下:

$$\partial \pi_n^R / \partial k_n^R = p_f \rho_L - c_{r1} - c_a - p_f \rho_H \rho_L F(G + k_n^R) \quad \partial^2 \pi_n^R / \partial (k_n^R)^2 = -p_f \rho_H \rho_L f(G + k_n^R) < 0$$

根据一阶导数条件(First Order Condition, 简称 FOC), 且二阶导数小于 0 时, 可以判断该利润函数是关于储能租赁容量  $k_n^R$  的凹函数。令一阶导数  $\partial \pi_n^R / \partial k_n^R = 0$ , 可以得到使利润最大化的最优储能租赁容量, 满足  $p_f \rho_H \rho_L F(G + k_n^{R*}) = p_f \rho_L - c_{r1} - c_a$ , 其中,  $G = tk - A_H + \gamma(1 - \theta)p_H$ 。

由于  $p_f \rho_H \rho_L F(G + k_n^R) \geq 0$ , 因此, 当  $c_{r1} + c_a \leq p_f \rho_L$  时, 存在最优的  $k_n^{R*}$  使得风电商利润  $\pi_n^R$  取得最大值,  $k_n^{R*}$  满足式(2), 得到定理 1。

### 附录 1.2 定理 2 的证明

证明: 对于式(3), 当  $k_n^T \leq \sigma k$  时,  $k_n^{T*} = \sigma k$ 。当  $k_n^T > \sigma k$  时, 证明过程同定理 1, 可以得到, 当  $c_{r2} + c_a \leq (p_f - p_b)\rho_L$  时, 存在最优租赁容量  $k_n^{T*}$  使得风电商利润  $\pi_n^T$  取得最大值,  $k_n^{T*}$  满足式(4)。

### 附录 1.3 定理 3 的证明

证明: 对于式(5), 当  $k_s^R \leq \sigma k$  时,  $k_s^{R*} = \sigma k$ 。当  $k_s^R > \sigma k$  时, 证明过程同定理 1, 可以得到, 当  $c_i + c_a + c_{r1}\tau^2 \leq p_f \rho_L \tau$  时, 存在最优租赁容量  $k_s^{R*}$  使得风电商利润  $\pi_s^R$  取得最大值,  $k_s^{R*}$  满足式(6)。

## 附录 1.4 定理 4 的证明

证明：对于式(7)，当  $k_s^T \leq \sigma k$  时， $k_s^{T*} = \sigma k$ 。当  $k_s^T > \sigma k$  时，证明过程同定理 1，可以得到，当  $c_i + c_a + c_{r2} \tau^2 \leq (p_f - p_b) \rho_L \tau$  时，存在最优租赁容量  $k_s^{T*}$  使得风电商利润  $\pi_s^T$  取得最大值， $k_s^{T*}$  满足式(8)。

## 附录 2 性质 5-8 的证明过程

### 附录 2.1 性质 5 的证明过程

证明：nR 策略下， $\partial^2 \pi_n^R / \partial k_n^R \partial \rho_H = -p_f \rho_L F(G + k_n^R) < 0$ 、 $\partial^2 \pi_n^R / \partial k_n^R \partial \rho_L = p_f [1 - \rho_H F(G + k_n^R)] > 0$ 。由 FOC 条件及隐函数定理，可得  $\frac{\partial k_n^R}{\partial \rho_H} = -\frac{\partial^2 \pi_n^R}{\partial k_n^R \partial \rho_H} / \frac{\partial^2 \pi_n^R}{\partial (k_n^R)^2}$ ，又  $\frac{\partial^2 \pi_n^R}{\partial (k_n^R)^2} < 0$ ，可以证明  $\frac{\partial k_n^R}{\partial \rho_H} < 0$ ，对应得到  $\partial k_n^R / \partial \rho_L > 0$ 。同理可以证明 nT 策略、sR 策略和 sT 策略下， $\partial k_n^T / \partial \rho_H < 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial \rho_L > 0$ 、 $\partial k_s^R / \partial \rho_H < 0$ 、 $\partial k_s^R / \partial \rho_L > 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial \rho_H < 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial \rho_L > 0$ 。得到性质 5。

### 附录 2.2 性质 6 的证明过程

证明：同性质 5，分别求四种策略下利润函数关于储能租赁容量与成本因素的二阶偏导数，并结合 FOC 条件及隐函数定理，可以得到  $\partial k_n^R / \partial c_{r1} < 0$ 、 $\partial k_n^R / \partial c_a < 0$ 、 $\partial k_n^R / \partial p_f > 0$ 、 $\partial k_n^R / \partial c_{r2} < 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial c_a < 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial p_f > 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial p_b < 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial c_{r2} < 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial c_a < 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial p_f > 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial p_b < 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial c_{r2} < 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial c_a < 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial c_i < 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial p_f > 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial p_b < 0$ ，性质 6 得证。

### 附录 2.3 性质 7 的证明过程

证明：同性质 5，分别求四种策略下利润函数关于储能租赁容量与电价参数的二阶偏导数，并结合 FOC 条件及隐函数定理，可以得到  $\partial k_n^R / \partial p_H < 0$ 、 $\partial k_n^R / \partial \gamma < 0$ 、 $\partial k_n^R / \partial \theta > 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial p_H < 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial \gamma < 0$ 、 $\partial k_n^T / \partial \theta > 0$ 、 $\partial k_s^R / \partial p_H < 0$ 、 $\partial k_s^R / \partial \gamma < 0$ 、 $\partial k_s^R / \partial \theta > 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial p_H < 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial \gamma < 0$ 、 $\partial k_s^T / \partial \theta > 0$ ，性质 7 得证。

### 附录 2.4 性质 8 的证明过程

证明：

(1)  $\partial^2 \pi_s^R / \partial k_s^R \partial \tau = p_f \rho_L [1 - \rho_H F(G + \tau k_s^R)] - \tau [p_f \rho_H \rho_L k_s^R f(G + \tau k_s^R) + 2c_{r1}]$ ，结合 FOC 条件及隐函数定理，令  $\partial^2 \pi_s^R / \partial k_s^R \partial \tau = 0$  时，可以得到容量保持率存在阈值  $\tau_1 = \frac{p_f \rho_L [1 - \rho_H F(G + \tau k_s^R)]}{p_f \rho_H \rho_L k_s^R f(G + \tau k_s^R) + 2c_{r1}}$ ，最优

储能租赁容量  $k_s^R$  与阈值关系如下：

- ①当  $\tau_1 < \underline{\tau}$  时， $\partial k_s^R / \partial \tau < 0$ ， $k_s^R$  在容量保持率下限值  $\tau = \underline{\tau}$  处取得最大值；
- ②当  $\underline{\tau} \leq \tau_1 \leq \bar{\tau}$ ，且容量保持率  $\tau \in [\underline{\tau}, \tau_1]$  时， $\partial k_s^R / \partial \tau > 0$ ；容量保持率  $\tau \in (\tau_1, \bar{\tau}]$  时， $\partial k_s^R / \partial \tau < 0$ ，

则容量保持率阈值属于其取值范围内点时， $k_s^R$  在其阈值  $\tau_1$  处达到最大值；

- ③当  $\tau_1 > \bar{\tau}$  时， $\partial k_s^R / \partial \tau > 0$ 。 $k_s^R$  在容量保持率上限值  $\tau = \bar{\tau}$  处取得最大值。

(2)  $\partial^2 \pi_s^T / \partial k_s^T \partial \tau = (p_f - p_b) \rho_L [1 - \rho_H F(G + \tau k_s^T)] - \tau [(p_f - p_b) \rho_H \rho_L k_s^T f(G + \tau k_s^T) + 2c_{r2}]$ ，同理可以得到容量保持率存在阈值  $\tau_2 = \frac{\rho_L (p_f - p_b) [1 - \rho_H F(G + \tau k_s^T)]}{(p_f - p_b) \rho_H \rho_L k_s^T f(G + \tau k_s^T) + 2c_{r2}}$ ，最优储能租赁容量  $k_s^T$  与阈值关系

如下：

- ①当  $\tau_2 < \underline{\tau}$  时， $\partial k_s^T / \partial \tau < 0$ ， $k_s^T$  在容量保持率下限值  $\tau = \underline{\tau}$  处取得最大值；
- ②当  $\underline{\tau} \leq \tau_2 \leq \bar{\tau}$ ，且容量保持率  $\tau \in [\underline{\tau}, \tau_2]$  时， $\partial k_s^T / \partial \tau > 0$ ；容量保持率  $\tau \in (\tau_2, \bar{\tau}]$  时， $\partial k_s^T / \partial \tau < 0$ ，

则容量保持率阈值属于其取值范围内点时， $k_s^T$  在其阈值  $\tau_2$  处取得最大值；

③当  $\tau_2 > \bar{\tau}$  时,  $\partial k_s^T / \partial \tau > 0$ 。  $k_s^T$  在容量保持率上限值  $\tau = \bar{\tau}$  处取得最大值。

综上所述, 最优储能租赁容量  $k_s^R$  与  $k_s^T$  分别在容量保持率阈值  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  处取得最大值。

(3)当  $k_s^R = k_s^T = k_s$  时,  $\tau_2 - \tau_1 = \frac{\rho_L [1 - \rho_H F(G + \tau k_s)]}{\rho_H \rho_L k_s f(G + \tau k_s) + 2c_{r1}/p_f} - \frac{\rho_L [1 - \rho_H F(G + \tau k_s)]}{\rho_H \rho_L k_s f(G + \tau k_s) + 2c_{r2}/(p_f - p_b)}$ , 容易

得到  $\frac{c_{r1}}{c_{r2}} > \frac{p_f}{p_f - p_b}$  时,  $\tau_1 > \tau_2$ , 否则  $\tau_1 \leq \tau_2$ 。

## 附录 3 性质 9-10 的证明过程

### 附录 3.1 性质 9 的证明过程

证明: 结合式(2)(4), 当  $\frac{c_{r1} + c_a}{c_{r2} + c_a} > \frac{p_f}{p_f - p_b}$  时, 由  $F(\bullet)$  为单增函数, 可得最优租赁容量  $k_n^{T*} > k_n^{R*}$ ,

否则  $k_n^{T*} \leq k_n^{R*}$ 。同理, 可证明利用旧电池下两种租赁策略的情形。

### 附录 3.2 性质 10 的证明过程

证明: 结合式(1)(3), 当  $c_{r1} > \frac{1}{\tau} \left( \frac{c_i}{1 - \tau} + c_a \right)$  时, 由  $F(\bullet)$  为单增函数, 可得容量租赁计费策

略下, 使用新电池与利用旧电池的最优租赁容量  $k_s^{R*} > k_n^{R*}$ , 否则  $k_s^{R*} \leq k_n^{R*}$ 。同理, 可证明两部制收费策略的情形。