

# “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价

邱伟强<sup>1</sup>,王茂春<sup>2</sup>,林振智<sup>1</sup>,杨莉<sup>1</sup>,王莲芳<sup>2</sup>,孙剑影<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 国网青海省电力公司,青海 西宁 810008)

**摘要:**在“双碳”目标的驱动下,共享储能作为结合储能技术与共享经济理念的一类新型商业模式,有潜力在新能源消纳场景中发挥重要的作用。但是,如何评价共享储能商业模式的发展运营状况,目前仍缺少统一的评价标准与方法。为此,首先分析了新能源消纳场景中共享储能商业模式的基本要素,设计了共享储能综合评价指标体系,并详细概述了指标体系中各指标的定义与内涵;然后,利用模糊层次分析法进行指标赋权,通过设计目标方案,采用改进逼近理想解排序法,实现了不同评价方案间的横向对比评价以及评价方案与目标方案间的纵向对比评价;最后,以某共享储能交易试点的实际数据为算例,分析验证了所设计指标体系能够有效反映共享储能的运营状况以及存在的问题和变化趋势。

**关键词:**共享储能;碳排放目标;新能源消纳;综合评价指标体系;模糊层次分析法;逼近理想解排序法;商业模式

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110017

## 0 引言

消耗化石能源会排放大量的二氧化碳气体,促使全球变暖并引发频繁的危害性天气,随着这一科学事实得到证实与认可,推进低碳战略、发展低碳经济已经成为各国发展的大趋势。我国提出“二氧化碳排放力争2030年前达到峰值,力争2060年前实现碳中和”的目标(下文简称为“双碳”目标),这将为实现全球可持续发展发挥建设性的作用。电力行业作为助力实现“双碳”目标的关键领域之一,其首要任务是推动能源低碳转型、构建以新能源为主体的新型电力系统。近年来,以风力发电和光伏发电为代表的新能源发电技术,因技术日益成熟、成本快速下降等,装机容量逐年递增。根据国际可再生能源机构IRENA(International Renewable Energy Agency)发布的数据,截至2020年底,全球风电与光伏装机总容量为1446 GW,在过去的10年内增长了4倍,呈现出高速发展的趋势。然而,由于风力发电、光伏发电技术具有波动性、随机性的特点,同时我国新能源装机存在布局不平衡、与电力负荷呈逆向分布的问题,大规模新能源接入电力系统会造成消纳能力不足、弃风弃光现象突出等问题<sup>[1-2]</sup>。随着新能源装机的进一步提升,现有的新能源消纳手段,包括电量外送、常规机组参与调峰等,将可能遭遇瓶颈,灵活性容量将逐渐耗尽,因此亟需进一步发展与挖掘灵活调节资源<sup>[3-5]</sup>。

储能作为一项新兴的电力技术,能够实现发用

电在时空上的解耦,缓解新能源发电与负荷用电之间的矛盾<sup>[6-7]</sup>。近年来,随着储能技术与工艺的成熟,储能制造成本大幅下降,以电化学储能技术为代表的储能系统已在电力系统中得到规模化的部署与应用,装机容量逐年攀升。但是,与高涨的储能项目建设热情相对的是储能商业模式的缺乏,有效的储能盈利方式暂未形成,储能资源存在严重的闲置现象<sup>[8]</sup>。在此背景下,将共享经济理念与储能技术相结合,所形成的共享储能模式将有潜力成为实现储能商业化的突破口<sup>[9-10]</sup>。目前,共享储能的商业模式已在微电网就地消纳<sup>[11-12]</sup>、社区储能服务<sup>[13-16]</sup>、平滑新能源出力<sup>[17]</sup>以及新能源调峰<sup>[18]</sup>等应用场景中进行了研究与实践,其可行性与经济性得到了验证与认可。其中,文献<sup>[18]</sup>提出了面向新能源消纳场景的共享储能运营模式,并根据青海省共享储能的市场交易情况,分析了共享储能交易的可行性。

由于现阶段共享储能处于前期研究与工程试点阶段,相关研究工作主要集中在运营模式、控制策略、交易方式等方面,但对于决策者而言,仍缺乏一套评价指标体系,用于帮助其了解共享储能的发展情况、运营状况、所存在的问题以及变化趋势。由于评价工作对于电力行业具有重要的价值与意义,目前已有不少关于共享储能在某些相关领域评价指标体系的相关研究<sup>[19-23]</sup>。文献<sup>[19]</sup>分析了电网低碳效益的形成机理与特征,构建了电网低碳效益评估模型,实现了不同输电网络与能量传输模式下的低碳效益量化分析;文献<sup>[20]</sup>基于市场力及市场主体的报价行为、市场出清和运行情况、市场社会效益3个层面,提出了电力调峰市场运行绩效评价指标体系;文献<sup>[21]</sup>针对电池储能系统的选型,提出了一种基于模糊-多准则决策方法的综合评估模型,并考虑了

收稿日期:2021-05-30;修回日期:2021-08-23

基金项目:国家电网公司科技项目(5419-202034054A-0-0-00)  
Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5419-202034054A-0-0-00)

评估过程中决策者与投资者的风险偏好。上述文献分别针对低碳电网、电力市场与储能技术应用,着重从模型机理、指标定义与评估方法3个方面进行了研究与分析,为共享储能综合评价指标体系的构建提供了借鉴与参考。

本文首先分析了“双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能的运行机理与特点,并根据发展态势与市场状态2个基本评价要素,设计了共享储能综合评价指标体系;然后,采用模糊层次分析法FAHP(Fuzzy Analytic Hierarchy Process)进行指标赋权,充分考虑赋权专家的主观能动性以及指标重要度比较过程中的模糊性;最后,采用改进逼近理想解排序法ITOPSIS(Improved Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)进行综合评价,通过引入目标方案,不仅能够进行不同评价方案之间的横向对比评价,还可以实现评价方案与目标方案之间的纵向对比评价,为决策者发展共享储能、助力实现“双碳”目标提供更加丰富的信息。

## 1 “双碳”目标下的新型电力系统与共享储能

### 1.1 “双碳”目标驱动下的新型电力系统及其发展瓶颈

“双碳”目标实际上是对全社会二氧化碳排放总量的控制计划,需要各行业领域共同承担。据统计,2020年电力行业的碳排放占全社会碳排放总量的30%以上,考虑到电能替代是交通、建筑、制造等领域降低行业碳排放的主要措施,因此实现电力行业的“双碳”目标将是实现全社会“双碳”目标的基础。

对于电力行业而言,其实现“双碳”目标的重要途径是建设以新能源为主体的新型电力系统,通过推动能源低碳转型,从源头上控制二氧化碳排放量。在此背景下,预计我国的新能源装机容量在碳达峰与碳中和这2个阶段将分别达到 $1.2 \times 10^9$ 、 $6 \times 10^9$  kW。但是,随着新能源接入比例的提升,新型电力系统也将面临新能源消纳等全新的问题。新能源消纳本质上是电力功率瞬时平衡的问题,新能源的波动性与随机性使得需要灵活调节资源进行即时匹配与跟踪,当灵活调节资源不足时,会导致弃风弃光现象。现阶段,通过火电机组灵活性改造、电网互联与电量外送、需求响应等手段所增加的新能源消纳电量空间已经不足以匹配新能源的增长速度。在此情况下,新型电力系统建设可能因消纳问题陷入发展瓶颈,阻碍实现“双碳”目标的进程。因此,亟需发展与挖掘增量灵活调节资源。

储能技术在存储电能方面具有其他电力技术无可替代的优势,突破了发电需要同步进行的局限性。随着新能源成为主体发电模式,储能技术具有

充足潜力成为一类灵活调节资源,实现对海量新能源电量的消纳。鉴于此,研究面向新能源消纳场景的储能技术及其商业模式将是突破新型电力系统发展瓶颈、助力实现电力行业“双碳”目标的重要支撑。

### 1.2 “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能商业模式

共享储能是储能技术与共享经济理念相结合的一类新型商业模式。共享储能的核心思想在于储能的所有权与使用权相分离,即储能设施的业主将处于闲置状态的储能资源的使用权以一定的价格租赁给储能服务的需求商,例如发电厂站、工商业用户与家庭用户。在储能的共享过程中,储能资源的利用率得到提高,业主获得了额外的收益,从而缩短了成本回收周期;购买储能资源使用权的需求商能够享受与交易标相对应的储能服务,包括消纳弃电量、电价管理以及提升电能质量,以辅助生产与生活,并从中获得超额利润。

提高新能源消纳水平是实现“双碳”目标的重要途径,同时也是现阶段共享储能商业模式最具发展潜力与落地条件的应用场景之一。一方面,随着“双碳”目标的持续推进,新能源消纳的压力进一步增大,共享储能可以为新能源消纳提供灵活调节资源,且市场需求旺盛,具有良好的商业前景。面向新能源消纳场景的共享储能典型框架如图1所示,共享储能设施能够与新能源场站在共享储能市场中进行交易,交易标的为弃电期间储能资源的使用权。当达成交易的新能源场站发生弃电时,共享储能设施将根据交易结果存储弃电量。此外,当共享储能设施存在闲置容量时,可以参与电力调峰辅助服务,电力调度机构将调用该部分容量消纳全网的弃电量。当电网处于负荷高峰或低发电出力时段时,共享储能设施将根据调度指令释放所存储的电量,完成弃电量的时空平移,实现该部分新能源电量的消纳。

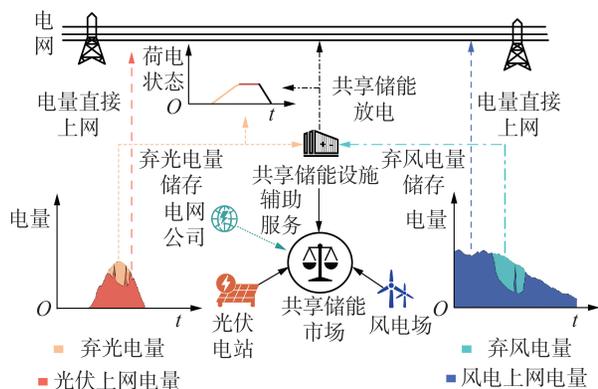


图1 面向新能源消纳场景的共享储能典型框架

Fig.1 Typical framework of shared energy storage towards renewable energy accommodation scenario

另一方面,随着电化学储能成本的快速下降,电源侧与电网侧储能系统的配置与部署速度明显加

快,将为共享储能商业模式在新能源消纳场景的推广提供充足的储能资源。以“新能源+储能”配置方案为例,附录A表A1总结了部分要求新能源发电项目配套储能设施省份的相关政策、目标对象与储能配置要求。由表可以看出,陕西、海南、山东、青海等省份通过竞争配置、平价上网等方式要求新建新能源项目均需配置一定比例的储能设施,而甘肃、宁夏对存量新能源项目也提出了储能配置要求。此外,独立运行的储能电站也在福建、青海等省份相继投产运行。

但是,相关部门的决策者如何对面向新能源消纳场景的共享储能商业模式进行宏观调控与推广,推动“双碳”目标的实现,仍缺乏相应的评价标准与系统的评价方法。因此,亟需构建能够全面评价新能源消纳场景中共享储能发展与运营状况的综合评价指标体系,为共享储能项目的投资建设、市场运营规则的修订与优化、激励与考核机制的调节提供决策参考。

## 2 共享储能综合评价指标体系

### 2.1 共享储能综合评价指标体系的基本框架

共享储能作为储能技术的一类商业模式,其发展状况实际上是指商业模式的发展状态与形势,即发展态势,包含收益情况、投资回报率、资源配置状态与社会效益等多个方面。所以,可以将发展态势作为共享储能商业模式的基本评价要素,用以表征共享储能的发展情况。此外,共享储能的运营需要市场作为储能资源共享的媒介。共享储能市场作为储能资源使用权的交易场所,是共享储能商业模式必不可少的一部分。因此,将共享储能市场的运营状况定义为市场状态,并认为市场状态是共享储能商业模式的另一个基本评价要素。

鉴于此,本文以“双碳”目标下新能源消纳场景的共享储能发展与运营状况为评价对象,包含发展态势和市场状态2类子目标,并且选取3层指标框架结构,构建共享储能综合评价指标体系如图2所示。该评价指标体系囊括了效益型、成本型、固定型3种指标类型,当效益型指标的数值越大、成本型指标的数值越小、固定型指标越趋近于某个数值时,表示相应指标的评价结果越好。

### 2.2 共享储能评价指标的概述与分析

#### 2.2.1 发展态势

发展态势子目标 $I_1$ 包含经济收益 $I_{11}$ 与低碳效益 $I_{12}$ 这2个次子目标。经济收益可以反映共享储能商业模式的收益情况,为共享储能项目的投资决策提供价值信息;低碳效益则通过新能源消纳水平与二氧化碳减排效果指标,表征新能源消纳场景中共享储能对“双碳”目标的影响与作用。

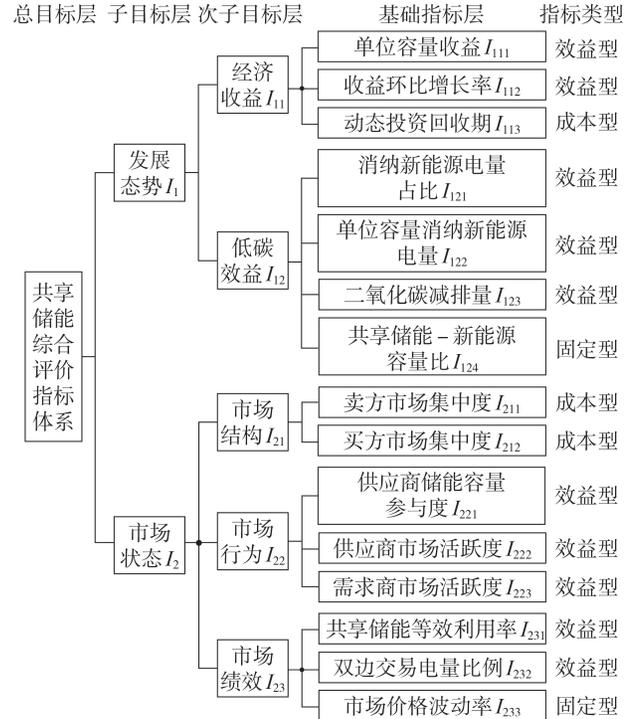


图2 共享储能综合评价指标体系

Fig.2 Comprehensive evaluation index system of shared energy storage

#### 1) 经济收益。

##### (1) 单位容量收益。

单位容量收益指标 $I_{111}$ 是指评价周期内单位容量的共享储能资源能够从共享储能交易中获得的收益,反映了共享储能模式下储能资源的平均收益水平,其计算公式为:

$$I_{111} = \frac{\sum_{i=1}^I R_i^T}{\sum_{i=1}^I \left( \sum_{t=1}^T Q_{it}^{ES} / \sum_{t=1}^T u_{it}^{ES} \right)} \quad (1)$$

$$R_i^T = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J E_{ijk}^B P_{ijk}^B + E_{it}^S p_{it}^S \right) \quad (2)$$

式中: $R_i^T$ 为储能设施 $i$ 的总收益; $I$ 为参与共享储能交易的储能设施总数量; $T$ 为评价周期的时段数量; $Q_{it}^{ES}$ 为 $t$ 时段储能设施 $i$ 参与共享储能市场的容量,一方面,评价周期内可能有储能设施新加入共享储能市场,另一方面,随着市场规则的进一步完善,将允许储能设施在保留满足自身需求容量的情况下,投入一定比例的闲置容量到共享储能市场,因此储能设施参与共享储能市场的容量将在评价周期内发生动态变化; $u_{it}^{ES}$ 为0-1变量,表示 $t$ 时段储能设施 $i$ 参与共享储能市场的状态,若参与则取值为1,若不参与则取值为0(需要说明的是,考虑到储能设施 $i$ 在该评价周期内均未参与共享储能市场,将存在 $\sum_{t=1}^T u_{it}^{ES} = 0$ 的情况,本文规定若储能设施 $i$ 在评价周期的开始时

段未参与共享储能市场,则用一个极小的正数代替  $Q_{it}^{ES}$ 、 $u_{it}^{ES}$  的初始 0 值,且有  $Q_{it}^{ES} \ll u_{it}^{ES}$ ;  $E_{ijk}^B$  为  $t$  时段储能设施  $i$  与需求商  $j$  通过第  $k$  种双边交易方式达成的储能电量;  $p_{ijk}^B$  为  $t$  时段储能设施  $i$  与需求商  $j$  采用第  $k$  种双边交易方式的交易价格;  $J$  为参与共享储能市场交易的需求商数量,包括  $J_{RES}$  个新能源场站需求商(编号为  $1-J_{RES}$ )和  $J-J_{RES}$  个化石能源电站需求商(编号为  $J_{RES}+1-J$ );  $K$  为共享储能市场中的双边交易方式数量,可能包括中长期协商交易、集中竞价交易、挂牌交易等多种双边交易方式;  $E_{it}^S$  为电力调度机构在  $t$  时段调用储能设施  $i$  参与调峰辅助服务的储能电量;  $p_{it}^S$  为电力调度机构在  $t$  时段调用储能设施  $i$  的交易价格。

(2) 收益环比增长率。

收益环比增长率指标  $I_{112}$  是指该区域共享储能在当前评价周期相比上一评价周期的收益增长率。为了降低单个评价周期内共享储能收益剧烈变化对评价结果的劣化影响,本文采用多个评价周期内的共享储能平均收益作为评价元素,其计算公式为:

$$I_{112} = \left[ \frac{\frac{1}{H^R} \sum_{h=1}^{H^R} \sum_{t=1}^T R_t^T (h^c + 1 - h)}{\frac{1}{H^R} \sum_{h=1}^{H^R} \sum_{t=1}^T R_t^T (h^c - h)} - 1 \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $h^c$  为当前评价周期;  $H^R$  为计算平均收益时所考虑的评价周期数量。收益环比增长率指标  $I_{112}$  可以直观地展示政策施行、市场规则修订以及储能设施投入运营等行为对共享储能整体收益的影响。

(3) 动态投资回收期。

动态投资回收期指标  $I_{113}$  是指在考虑货币时间价值的条件下,以当前评价周期共享储能项目的净现金流量现值抵偿原始投资现值所需要的时间,其计算公式为:

$$I_{113} = P_Y \quad (4)$$

$$\sum_{y=1}^{P_Y} (MQ_N I_{111} - C_y^{out})(1+i_c)^{-y} - C_0^{out} = 0 \quad (5)$$

式中:  $P_Y$  为动态投资回收期;  $i_c$  为基准收益率;  $M$  为一年内评价周期的总数量,当以 1 个月为评价周期时,  $M=12$ ; 为了使不同评价周期内共享储能商业模式的动态投资回收期具有可比较性,本文假设一个基准储能项目作为计算依据,  $Q_N$  为基准储能项目的容量;  $C_y^{out}$  为第  $y$  年基准储能项目的现金流出,并且假设第 0 年基准储能项目支出储能项目的建设费用(即  $C_0^{out}$ ),从第 1 年开始逐年支出储能项目的运维费用。其中,考虑到近年来储能成本呈现快速下降的趋势,根据参考算例数据月份中相似储能项目的中标信息设定储能项目的建设费用,并且假设运维费用为固定值。

2) 低碳效益。

(1) 消纳新能源电量占比。

消纳新能源电量占比指标  $I_{121}$  是指评价周期内该区域共享储能所消纳的新能源电量占总消纳电量的比例,其计算公式为:

$$I_{121} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_{RES}} E_{ijk}^B + E_{it}^{S,RES} \right)}{\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J E_{ijk}^B + E_{it}^S \right)} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $E_{it}^{S,RES}$  为储能电量  $E_{it}^S$  中的新能源电量部分;

$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_{RES}} E_{ijk}^B + E_{it}^{S,RES} \right)$  为评价周期内共享储能所消纳的新能源电量。消纳新能源电量占比指标  $I_{121}$  反映了共享储能资源在新能源消纳场景中的使用程度。

(2) 单位容量消纳新能源电量。

单位容量消纳新能源电量指标  $I_{122}$  是指评价周期内单位容量的共享储能资源所能消纳的新能源电量,其计算公式为:

$$I_{122} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_{RES}} E_{ijk}^B + E_{it}^{S,RES} \right)}{\sum_{i=1}^I \left( \sum_{t=1}^T Q_{it}^{ES} / \sum_{t=1}^T u_{it}^{ES} \right)} \quad (7)$$

单位容量消纳新能源电量指标  $I_{122}$  用于评估共享储能资源对新能源电量的平均消纳水平。

(3) 二氧化碳减排量。

二氧化碳减排量指标  $I_{123}$  是指评价周期内经共享储能放电上网的新能源弃电量替代火电机组发电所减少的二氧化碳排放量,其计算公式为:

$$I_{123} = K_{Carbon} \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \eta_i \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_{RES}} E_{ijk}^B + E_{it}^{S,RES} - E_{it}^{Self} \right) \quad (8)$$

$$K_{Carbon} = C_{St} f_0 \left( 1 + \beta + \frac{K_{Oxi} \alpha_D}{1 - \alpha_D} \right) \quad (9)$$

式中:  $E_{it}^{Self}$  为  $t$  时段储能设施  $i$  的自用电量;  $\eta_i$  为储能设施  $i$  的充放电效率;  $K_{Carbon}$  为二氧化碳减排系数;  $C_{St}$  为电力折标准煤系数;  $f_0$  为单位标准煤完全燃烧所产生的二氧化碳排放量; 新能源发电还能够减少传统发电过程中运输化石能源以及原煤遗撒氧化所产生的二氧化碳排放量<sup>[19]</sup>,  $\beta$ 、 $K_{Oxi}$  分别为运输能耗排放率、遗撒的原煤自然氧化率,  $\alpha_D$  为运输总遗撒率。根据文献资料,本文中  $C_{St}=0.1229 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,  $f_0=2.62 \text{ kg}$ ,  $\beta=2.45\%$ ,  $K_{Oxi}=5\%$ ,  $\alpha_D=2.5\%$ <sup>[19]</sup>。

(4) 共享储能-新能源容量比。

共享储能-新能源容量比指标  $I_{124}$  是指共享储能容量与新能源场站额定装机容量的比例,其计算公

式为:

$$I_{124} = \frac{\sum_{i=1}^I \left( \sum_{t=1}^T Q_{it}^{ES} / \sum_{t=1}^T u_{it}^{ES} \right)}{\sum_{j=1}^{J_{RES}} P_j} \quad (10)$$

式中:  $P_j$  为新能源场站  $j$  的装机容量。共享储能-新能源容量比指标  $I_{124}$  能够表征新能源消纳场景中共享储能作为低碳资源的配置情况,反映了共享储能可为新能源场站提供的新能源消纳能力。指标数值越大,表明可供调用参与新能源消纳的共享储能资源越多,但指标数值过大也说明共享储能存在资源过剩情况,过剩的共享储能资源不仅无法产生低碳效益,也违背了共享经济唤醒闲置资源的理念。因此共享储能-新能源容量比为固定型指标。

### 2.2.2 市场状态

市场状态子目标  $I_2$  根据结构-行为-绩效 SCP (Structure-Conduct-Performance) 产业分析架构进行指标构建,包含市场结构  $I_{21}$ 、市场行为  $I_{22}$  和市场绩效  $I_{23}$  这3个次子目标,用于评估共享储能市场的运营状况。

#### 1) 市场结构。

##### (1) 卖方市场集中度。

卖方市场集中度指标  $I_{211}$  反映了共享储能市场中供应侧的资源聚集程度。卖方市场集中度越高,表明供应侧成员行使市场力的能力越强。本文采用赫尔芬达尔-赫希曼指数 HHI (Herfindahl-Hirschman Index) 作为卖方市场集中度指标,其计算公式为:

$$I_{211} = \sum_{i=1}^I \left[ \frac{\sum_{t=1}^T Q_{it}^{ES} / \sum_{t=1}^T u_{it}^{ES}}{\sum_{i=1}^I \left( \sum_{t=1}^T Q_{it}^{ES} / \sum_{t=1}^T u_{it}^{ES} \right)} \right]^2 \times 10000 \quad (11)$$

当 HHI 的数值为 10000 时,该市场为完全垄断市场。一般情况下,HHI 数值小于 1800 的市场可被视为竞争较为充分的市场。

##### (2) 买方市场集中度。

买方市场集中度指标  $I_{212}$  反映了共享储能市场中需求侧资源的聚集程度。买方市场集中度同样采用 HHI 作为指标,其计算公式为:

$$I_{212} = \sum_{j=1}^J \left( P_j / \sum_{j=1}^J P_j \right)^2 \times 10000 \quad (12)$$

对于面向新能源消纳场景的共享储能市场而言,买方均为具有较大装机容量的发电场站,因此需求侧同样具有市场力。

#### 2) 市场行为。

##### (1) 供应商储能容量参与度。

供应商储能容量参与度指标  $I_{221}$  是指供应商参与共享储能市场的储能容量在其总装机容量中的占比,反映了供应侧储能资源的参与程度,其计算公式为:

$$I_{221} = \frac{\sum_{i=1}^I \left( \sum_{t=1}^T Q_{it}^{ES} / \sum_{t=1}^T u_{it}^{ES} \right)}{\sum_{i=1}^I Q_i^{IE}} \times 100\% \quad (13)$$

式中:  $Q_i^{IE}$  为储能设施  $i$  的装机容量。一般情况下,造成供应商储能容量参与度较低的原因主要有以下3点:①储能设施为配套项目的供应商时,需要为其生产与生活保留一部分的储能容量;②供应商试图通过持留的方式造成储能资源供应紧张的现象,在之后的市场竞价中取得更大的价格优势;③可能因为新能源消纳场景的期望收益较低,供应商将储能容量投入收益更高的市场(如峰谷价差套利或辅助调频)中。

##### (2) 供应商市场活跃度。

供应商市场活跃度指标  $I_{222}$  是指评价周期内参与共享储能市场交易的储能设施供应商占全部储能设施供应商的比例,其计算公式为:

$$I_{222} = \frac{I^{Act}}{I} \times 100\% \quad (14)$$

式中:  $I^{Act}$  为当前评价周期活跃的供应商数量,若供应商在当前评价周期至少进行过1次交易储能资源使用权的行为,则认为该供应商是活跃的。

##### (3) 需求商市场活跃度。

需求商市场活跃度指标  $I_{223}$  是指评价周期内参与共享储能市场交易的需求商占全部需求商的比例,其计算公式为:

$$I_{223} = \frac{J^{Act}}{J} \times 100\% \quad (15)$$

式中:  $J^{Act}$  为当前评价周期活跃的需求商数量,以需求商是否有购买储能资源使用权的行为判定其活跃状态。

#### 3) 市场绩效。

##### (1) 共享储能等效利用率。

共享储能等效利用率指标  $I_{231}$  是指共享储能资源的实际运行功率与参与市场功率的比例,其计算公式为:

$$I_{231} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (1 + \eta_i) \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J E_{ijk}^B + E_{it}^S \right)}{\sum_{i=1}^I \left( \sum_{t=1}^T P_{it}^{ES} / \sum_{t=1}^T u_{it}^{ES} \right) \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T u_{it}^{ES}} \times 100\% \quad (16)$$

式中:  $P_{it}^{ES}$  为  $t$  时段储能设施  $i$  参与共享储能市场的功率。共享储能等效利用率指标  $I_{231}$  反映了储能资源在共享储能市场中的利用程度。

(2) 双边交易电量比例。

双边交易电量比例指标  $I_{232}$  是指通过双边交易方式所交易的电量占总交易电量的比例,其计算公式为:

$$I_{232} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J E_{ijk}^B}{\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left( \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J E_{ijk}^B + E_{it}^S \right)} \quad (17)$$

该指标能够评估共享储能交易的市场化程度,反映了供需双方能否通过主动、灵活、自由选择的方式进行共享储能交易。

(3) 市场价格波动率。

市场价格波动率指标  $I_{233}$  是指评价周期内市场交易价格的波动程度,其计算公式为:

$$I_{233} = \frac{f_{\text{std}}(E_{ijk}^B P_{ijk}^B, E_{it}^S P_{it}^S)}{f_{\text{mean}}(E_{ijk}^B P_{ijk}^B, E_{it}^S P_{it}^S)} \times 100\% \quad (18)$$

式中:  $f_{\text{std}}(\cdot)$ 、 $f_{\text{mean}}(\cdot)$  分别为标准差函数、平均值函数,分别用于计算考虑交易电量加权的交易价格标准差与平均交易价格。该指标数值越大,表明交易价格发生不利变动或急剧波动,市场风险越大;指标数值过小,表明电网调度方式会显著影响交易价格,无法有效反映供需关系。

### 3 基于FAHP与ITOPSIS的共享储能综合评价方法

评价指标体系具有多层次、多指标的特点,本文基于FAHP与ITOPSIS提出了共享储能综合评价指标体系的决策分析方法。采用FAHP的原因在于:一方面,考虑到进行赋权评分的专家通常具有较高的专业素养,且可以通过分析行业现状、建设情况与政策导向对指标间的相对重要性有较为明确的认识,采用FAHP进行赋权可以充分发挥主动能动性;另一方面,由于共享储能正在高速发展,指标间的相对重要性可能将随着发展过程发生变化,而专家判断共享储能发展阶段的模糊性将影响到赋权的精确度。所以,FAHP可以通过模糊数反映专家在赋权过程中的模糊不确定性<sup>[24]</sup>。

共享储能综合评价方法的具体步骤如下。

1) 邀请  $S$  位专家采用 1—9 标度方法给出共享储能综合评价指标体系的模糊比较判断矩阵。假设有  $n$  个与上层指标相关联的本层指标,三角模糊数  $a_{drs} = (l_{drs}, m_{drs}, u_{drs}) (d, r = 1, 2, \dots, n; s = 1, 2, \dots, S)$  为专家  $s$  比较判断后所得指标  $d$  比指标  $r$  重要的模糊判断程度,其中  $m_{drs}$  为比较判断的最可能估计;  $u_{drs}$ 、 $l_{drs}$  分别为模糊数的上、下界,表示判断的模糊程度,  $u_{drs} - l_{drs}$  越大表示模糊程度越高。最后,构建  $S$  个模糊比较判断矩阵  $A_s$ :

$$A_s = [a_{drs}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} (l_{11s}, m_{11s}, u_{11s}) & (l_{12s}, m_{12s}, u_{12s}) & \cdots & (l_{1ns}, m_{1ns}, u_{1ns}) \\ (l_{21s}, m_{21s}, u_{21s}) & (l_{22s}, m_{22s}, u_{22s}) & \cdots & (l_{2ns}, m_{2ns}, u_{2ns}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1s}, m_{n1s}, u_{n1s}) & (l_{n2s}, m_{n2s}, u_{n2s}) & \cdots & (l_{nns}, m_{nns}, u_{nns}) \end{bmatrix} \quad (19)$$

可通过分析不考虑模糊程度的矩阵  $[m_{drs}]_{n \times n}$  的一致性实现模糊比较判断矩阵的一致性检验,具体过程见文献[25]。

2) 根据模糊比较判断矩阵计算指标权重。对于式(19)所示的模糊比较判断矩阵,指标  $d$  对其他指标的模糊综合程度  $V_{ds}$  为:

$$V_{ds} = \left( \sum_{r=1}^n \oplus a_{drs} \right) \otimes \left( \sum_{d=1}^n \oplus \sum_{r=1}^n \oplus a_{drs} \right)^{-1} = \left( \frac{\sum_{r=1}^n l_{drs}}{\sum_{d=1}^n \sum_{r=1}^n l_{drs}}, \frac{\sum_{r=1}^n m_{drs}}{\sum_{d=1}^n \sum_{r=1}^n m_{drs}}, \frac{\sum_{r=1}^n u_{drs}}{\sum_{d=1}^n \sum_{r=1}^n u_{drs}} \right) = (l_{ds}, m_{ds}, u_{ds}) \quad (20)$$

式中:  $\oplus$ 、 $\otimes$  分别为加法、乘法模糊算子;  $m_{ds}$  为指标  $d$  对其他指标的最可能估计;  $l_{ds}$ 、 $u_{ds}$  分别为  $m_{ds}$  的上、下界。根据三角模糊数的比较准则<sup>[24]</sup>,模糊综合程度  $V_{ds} \geq V_{rs}$  的可能性程度  $G_{drs}$  可以表示为:

$$G_{drs} = \begin{cases} 1 & m_{ds} \geq m_{rs} \\ \frac{l_{rs} - u_{ds}}{(m_{ds} - u_{ds}) - (m_{rs} - l_{rs})} & m_{ds} < m_{rs}, l_{rs} < u_{ds} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

进而可得第  $s$  位专家的指标权重  $W_s$  为:

$$W_s = [w_{1s}, \dots, w_{ds}, \dots, w_{ns}] \quad (22)$$

$$w_{ds} = \frac{\min_{r=1,2,\dots,n; d \neq r} \{G_{drs}\}}{\sum_{d=1}^n \min_{r=1,2,\dots,n; d \neq r} \{G_{drs}\}} \quad (23)$$

式中:  $w_{ds}$  为第  $s$  位专家给出的指标  $d$  的权重。

最后,综合  $S$  位专家的意见,得到最终的指标权重  $W$  为:

$$W = \sum_{s=1}^S \lambda_s W_s \quad (24)$$

式中:  $\lambda_s$  为第  $s$  位专家的意见权重,且有  $\sum_{s=1}^S \lambda_s = 1$ 。利用FAHP逐层求得各层指标相对于其上一层指标的指标权重,最后可以得到各基础指标相对于总目标层的综合权重。

3) 确定指标体系的理想解。首先,根据各指标的数值范围,确定最大值集  $I^{\max}$  与最小值集  $I^{\min}$ 。然后,确立共享储能的发展目标,由此设计目标方案,并决定目标方案的基础指标数值集  $I^{\text{tar}}$ 。传统的逼近理想解排序法 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 一般用于

多个备选评价方案的选优决策,正理想解与负理想解将从备选评价方案中选择<sup>[26]</sup>。由于共享储能的综合评价并不限于多个评价周期之间的相对优劣,决策者可能更关心现阶段共享储能状态与目标状态间的差距。因此,本文充分考虑决策者对共享储能的发展期望,设计目标方案,将其作为评价过程的参考基准,实现评价周期内共享储能状态与所设计目标状态间的纵向对比。一般而言,目标方案具有正向性,即评估目标方案可以得到良好的评价结果。另一方面,目标方案具有前瞻性与预见性,即评价方案的指标数值与目标方案的指标数值之间存在一定的差距。最后,确定各指标的正理想解与负理想解,构成共享储能综合评价指标体系的正理想方案与负理想方案。指标的正理想解与负理想解可以分别表示为:

$$I_x^{\text{Ideal}+} = \begin{cases} \max \left\{ I_x^{\text{tar}}, \max_{h=1,2,\dots,H} I_x^h \right\} & I_x \in \Omega_B \\ \min \left\{ I_x^{\text{tar}}, \min_{h=1,2,\dots,H} I_x^h \right\} & I_x \in \Omega_C \\ I_x^{\text{tar}} & I_x \in \Omega_F \end{cases} \quad (25)$$

$$I_x^{\text{Ideal}-} = \begin{cases} I_x^{\text{min}} & I_x \in \Omega_B \\ I_x^{\text{max}} & I_x \in \Omega_C \\ I_x^{\text{max}} f_{\text{if}}(I_x^{\text{max}} + I_x^{\text{min}} > 2I_x^{\text{tar}}) + \\ I_x^{\text{min}} f_{\text{if}}(I_x^{\text{max}} + I_x^{\text{min}} \leq 2I_x^{\text{tar}}) & I_x \in \Omega_F \end{cases} \quad (26)$$

式中: $I_x^{\text{Ideal}+}$ 、 $I_x^{\text{Ideal}-}$ 分别为指标 $I_x$ 的正理想解、负理想解; $I_x^{\text{max}}$ 、 $I_x^{\text{min}}$ 、 $I_x^{\text{tar}}$ 分别为 $I_x$ 的最大值、最小值、目标值,且有 $I_x^{\text{max}} \in I^{\text{max}}$ 、 $I_x^{\text{min}} \in I^{\text{min}}$ 、 $I_x^{\text{tar}} \in I^{\text{tar}}$ ;  $\Omega_B$ 、 $\Omega_C$ 、 $\Omega_F$ 分别为效益型指标、成本型指标、固定型指标集合; $I_x^h$ 为第 $h$ 个评价方案中指标 $I_x$ 的数值; $H$ 为评价方案总数量; $f_{\text{if}}(Y)$ 为条件函数,当条件 $Y$ 成立时取值为1,否则取值为0。

4)采用极差变换对各类型指标进行规范化,规范化后的指标将是取值范围为0~1的效益型指标。极差变换的表达式为:

$$I_x^{h,S} = \begin{cases} \frac{I_x^h - I_x^{\text{Ideal}+}}{I_x^{\text{Ideal}+} - I_x^{\text{Ideal}-}} & I_x \in \Omega_B \\ \frac{I_x^{\text{Ideal}-} - I_x^h}{I_x^{\text{Ideal}-} - I_x^{\text{Ideal}+}} & I_x \in \Omega_C \\ 1 - \frac{|I_x^{\text{Ideal}+} - I_x^h|}{D_x^{\text{max}}} & I_x \in \Omega_F \end{cases} \quad (27)$$

$$D_x^{\text{max}} = \max \left\{ I_x^{\text{Ideal}+} - \min_{h=1,2,\dots,H} \{ I_x^h \}, \max_{h=1,2,\dots,H} \{ I_x^h \} - I_x^{\text{Ideal}+} \right\} \quad x \in \Omega_F \quad (28)$$

式中: $I_x^{h,S}$ 为规范化后的 $I_x^h$ 指标; $D_x^{\text{max}}$ 为评价方案的指标数值与正理想解之间的最大距离。

然后,基于步骤2)得到的指标权重,计算各评价方案的加权规范化指标,其表达式为:

$$V_x^{h,S} = I_x^{h,S} \xi_x \quad I_x \in \Omega_X \quad (29)$$

式中: $V_x^{h,S}$ 为 $I_x^{h,S}$ 的加权规范化指标; $\xi_x$ 为指标 $I_x$ 相对于总目标层的综合权重; $\Omega_X$ 为指标体系中全部基础指标集合, $\Omega_X = \Omega_B \cup \Omega_C \cup \Omega_F$ 。

5)确定评价对象,计算各评价方案与正、负理想方案之间的欧氏距离,表达式分别为:

$$D_{\text{Euc}}^{h+} = \sqrt{\sum_{I_x \in \Omega_X} (V_x^{h,S} - V_x^{\text{Ideal}+,S})^2} \quad (30)$$

$$D_{\text{Euc}}^{h-} = \sqrt{\sum_{I_x \in \Omega_X} (V_x^{h,S} - V_x^{\text{Ideal}-,S})^2} \quad (31)$$

式中: $D_{\text{Euc}}^{h+}$ 、 $D_{\text{Euc}}^{h-}$ 分别为第 $h$ 个评价方案与正理想方案、负理想方案之间的欧氏距离; $V_x^{\text{Ideal}+,S}$ 、 $V_x^{\text{Ideal}-,S}$ 分别为加权规范化的正理想解、负理想解。值得一提的是,根据不同的指标集合,可以将子目标发展态势、次子目标经济收益等作为评价对象。

6)计算各评价方案与正理想方案的相对贴近度,其表达式为:

$$C_{\text{Re}}^{h+} = \frac{D_{\text{Euc}}^{h-}}{D_{\text{Euc}}^{h+} + D_{\text{Euc}}^{h-}} \quad (32)$$

式中: $C_{\text{Re}}^{h+}$ 为第 $h$ 个评价方案与正理想方案的相对贴近度,其值越大,表明该评价方案的状态越接近正理想方案,则方案越优。

## 4 算例分析

### 4.1 算例简述

本文以青海省某共享储能交易试点为算例进行仿真分析,以验证所提共享储能综合评价指标体系的可行性与适用性。青海省于2019年4月21日首次开展该共享储能交易试点,并于2019年6月启动了电力调峰辅助服务市场,其中,所交易与调用的共享储能资源由一座装机规模为50 MW / 100 MW·h的磷酸铁锂储能电站提供,该储能电站为配套储能项目。2020年12月,国内首座商业化运行独立储能电站参与该共享储能交易试点,储能电站的装机规模为32 MW / 64 MW·h。此外,截至2021年4月,青海省共享储能交易试点共有366座新能源场站参与,总装机容量为22.9 GW。目前,青海省电网调用储能参与调峰的价格为0.7元/(kW·h)。

本文评估的算例数据来源于青海省共享储能交易试点12个典型月的交易数据,包括供应商/需求商主体数据、价格申报数据、双边交易电量数据、电网调用电量数据。本文算例中将评价周期设定为单个自然月,因此算例数据形成了12个评价方案(对应典型月1—12)。此外,假设基准储能项目的装机规模为10 MW / 20 MW·h,基准收益率 $i_c = 3\%$ ,运维费用为120万元/a,基准储能项目建设价格等参数如附录A表A2所示。

### 4.2 基础指标计算与分析

根据共享储能综合评价指标体系中的指标计算

方法(即式(1)~(18)),对青海省共享储能交易试点的 12 个典型月交易数据进行计算,得到基础指标数值如附录 A 表 A3 所示。从表中可以看出,在 12 个典型月中,单位容量收益指标  $I_{111}$  呈现先下降后上升的趋势,说明共享储能收益明显受到季节的影响。进一步分析收益环比增长率指标  $I_{112}$  能够发现,典型月 1—7 的指标数值大多为负值,但从典型月 8 开始,共享储能总收益快速增加,其中典型月 9 的收益环比增长率高达 31.25%,除季节性因素外,这主要是因为商业化运行独立储能电站的投运使得青海省共享储能市场供应侧的储能资源大幅增加。此外,动态投资回收期指标  $I_{113}$  呈现整体下降趋势,这主要是受到近年来储能项目建设费用大幅下降的影响。在低碳效益方面,消纳新能源电量占比指标  $I_{121}$  的数值均为 100%,表明现阶段青海省共享储能资源全部用于消纳新能源电量,因此单位容量消纳新能源电量指标  $I_{122}$  的变化趋势与  $I_{111}$  一致。值得一提的是,共享储能能够带来显著的二氧化碳减排效益,12 个典型月的二氧化碳减排量指标  $I_{123}$  均在 400 t 以上,最高达到 1 130 t,这相当于 617.5 m<sup>3</sup> 树木的蓄积量。但是,共享储能-新能源容量比指标  $I_{124}$  的最大值仅为 0.75%,说明现阶段的青海省共享储能的规模与满足新能源消纳需求规模之间还存在较大的差距。

根据附录 A 表 A3 中指标  $I_{211}$ 、 $I_{212}$ 、 $I_{221}$ 、 $I_{222}$ 、 $I_{223}$ 、 $I_{231}$ 、 $I_{232}$ 、 $I_{233}$  的数值进一步分析市场状态可知:由于市场需求侧的新能源场站数量众多,装机容量分散,买方市场集中度指标  $I_{212}$  的数值远小于 1 800;与之相反,市场供应侧仅有 1~2 座储能电站,卖方市场集中度指标  $I_{211}$  的数值较大,但是用于消纳弃电量的共享储能资源在现阶段对于新能源场站而言不是必需品,青海省共享储能交易试点并没有成为事实上的卖方垄断市场。对于储能电站而言,青海省共享储能交易试点作为当前仅有的共享储能市场,使得供应商储能容量参与度指标  $I_{221}$  和供应商市场活跃度指标  $I_{222}$  数值均为 100%。由于电网的保底作用,电网调用储能调峰的价格无形中成为储能电站市场报价的基准价格,提高了新能源场站的交易门槛。此外,青海省潮流断面严重受限的情况也限制了部分新能源场站的参与。综上所述,现阶段青海省共享储能市场整体上处于缺乏竞争的状态,需求商市场活跃度指标  $I_{233}$  的最大数值仅为 3.81%,且呈现不断下降的趋势,这表明需求商的购买意愿逐渐减弱。在市场效益方面,储能电站在青海省现行交易规则下每个交易日仅能进行一充一放,且还会受到阴雨等天气的影响,因而共享储能等效利用率指标  $I_{231}$  数值较低,最大数值仅为 15%,尚未体现共享储能模式能够减少储能资源闲置的优势。由于需求商市场

活跃度较低,电网调用成为现阶段占据主导地位的共享储能交易方式,双边交易电量比例指标  $I_{232}$  数值较小,同时也抑制了市场价格波动率  $I_{233}$ ,市场的资源优化配置作用无法得到充分发挥。

从上述分析可以发现,基础指标数值需要通过专业知识与能力进行分析,才能有效评价目标对象的状态,直观性较差。此外,指标间的重要性难以把握,对整体的评价易受到个别次要指标数值的干扰。因此,本文采用 FAHP 和 ITOPSIS 相结合的方法对共享储能评价指标体系进行综合评价。

#### 4.3 基于 FAHP 的指标权重赋值

根据 FAHP 的步骤要求,邀请 3 位专家采用 1—9 标度三角模糊数对共享储能综合评价指标体系各层指标的相对重要性进行打分,形成模糊比较判断矩阵。4 个基础指标相对于次子目标低碳效益的模糊比较判断矩阵如附录 A 表 A4 所示。然后,根据式(20)~(23)计算 3 位专家的权重分别为 [0.397 5, 0.248 1, 0.333 0, 0.021 4]、[0.268 1, 0.195 0, 0.340 3, 0.196 6]、[0.276 6, 0.187 9, 0.301 7, 0.233 8]。假设 3 位专家的意见权重相等,则与次子目标低碳效益相关联的 4 个基础指标最终的权重分别为 0.314 1、0.210 3、0.325 0、0.150 6。限于篇幅,其余各层指标的模糊比较判断矩阵不再列出。最后,可以得到共享储能综合评价指标体系的指标综合权重,如表 1 所示。

表 1 基于 FAHP 的指标综合权重  
Table 1 Comprehensive weight of indices based on FAHP

子目标层		次子目标层		基础指标层	
指标	综合权重	指标	综合权重	指标	综合权重
发展态势	0.5370	经济收益	0.2148	单位容量收益	0.1134
				收益环比增长率	0.0300
				动态投资回收期	0.0714
		低碳效益	0.3222	消纳新能源电量占比	0.1012
				单位容量消纳新能源电量	0.0678
				二氧化碳减排量	0.1047
共享储能-新能源容量比	0.0485				
市场状态	0.4630	市场结构	0.0507	卖方市场集中度	0.0369
				买方市场集中度	0.0138
		市场行为	0.1431	供应商储能容量参与度	0.0318
				供应商市场活跃度	0.0159
				需求商市场活跃度	0.0954
		市场绩效	0.2692	共享储能等效利用率	0.0897
双边交易电量比例	0.1346				
市场价格波动率	0.0449				

从权重赋值结果可以看出,发展态势的权重较大,说明现阶段更加需要关注共享储能的发展情况,但共享储能市场的建设仍是重要的。在发展态势的

次子目标中,由于“双碳”目标的激励效果,低碳效益的权重更大。在市场状态的次子目标中,由于试点应用,市场结构在短期内不会发生较大的变化,故其权重值最小;此外,在市场规则与政策变化不大的基础上,市场行为也将保持稳定;相较而言,市场绩效更应在现阶段得到关注。

#### 4.4 基于ITOPSIS的综合评价结果

在本文所提ITOPSIS中,需要根据决策者对共享储能的发展期望,设计目标方案。因此,参照“双碳”目标,假设青海省共享储能的发展存在远景目标与短期目标。这2个目标的区别之处在于:远景目标中大部分指标的数值相较于短期目标中相应指标的数值具有更大的正向性。首先,根据指标定义确定各指标的数值范围,并采用专家会议法在共享储能当前发展与运营情况的基础上,考虑青海省共享储能的未来发展期望,确定远景目标与短期目标的指标数值,具体数值如附录A表A5所示。表中,对于数值范围标记“ $\infty$ ”符号的指标(如 $I_{111}$ ),根据定义,其最大值应为正无穷大,但考虑到计算的可行性,将正无穷大值用一个足够大的数值代替,该数值需要保证评价结果的稳定性,同时也需要具备可解释性。

然后,根据式(25)和式(26)确定不同目标下的理想解。远景目标下的理想解如表2所示。值得注意的是,收益环比增长率指标 $I_{112}$ 的正理想解为31.25%,大于远景目标的设定值20%,这是因为典型月9存在较大的收益环比增长率,超过了远景目标的设定值。由此可以看出,目标方案数值的设定应该更关注发展期望值,不应该因少数极端数值而影响目标方案设计的科学性。此外,ITOPSIS可以根据评价方案数值与目标方案数值之间的差异调节理想解,并且允许评价方案数值超出预期设定值,这样更贴合实际需求。短期目标下的理想解如附录A表A6所示。各基础指标的正、负理想解对比构成了指标体系的正、负理想方案。

表2 远景目标下共享储能评价指标的理想解

Table 2 Ideal solutions of shared energy storage evaluation indices under long-term target

指标	正理想解	负理想解	指标	正理想解	负理想解
$I_{111}$ / 元	30000	0	$I_{212}$	100	10000
$I_{112}$ / %	31.25	-100	$I_{221}$ / %	100	0
$I_{113}$ / a	5	100	$I_{222}$ / %	100	0
$I_{121}$ / %	100	0	$I_{223}$ / %	50	0
$I_{122}$ / (MW·h)	40	0	$I_{231}$ / %	40	0
$I_{123}$ / t	1000	0	$I_{232}$ / %	80	0
$I_{124}$ / %	5	100	$I_{233}$ / %	10	100
$I_{211}$	1800	10000			

最后,根据式(27)—(32)计算远景目标与短期目标下评价方案1—12(对应典型月1—12)的相对

贴程度,结果如图3所示。由图3(a)可以看出,远景目标方案的相对贴程度为0.9914,这是因为正理想方案中的收益环比增长率指标数值超过了远景目标设定值。因此,当目标方案的相对贴程度小于1时,意味着评价方案中存在指标数值超过目标方案设定值的情况。在12个评价方案中,评价方案1的相对贴程度最高,说明典型月1的共享储能状态在全部典型月中与远景目标最为接近,但是仍存在较大的差距,而评价方案5的相对贴程度最低。由图3(b)可以发现,评价方案1的相对贴程度从远景目标下的0.5039上升到在短期目标下的0.6559,说明相较于远景目标,该方案的共享储能状态更接近短期目标。

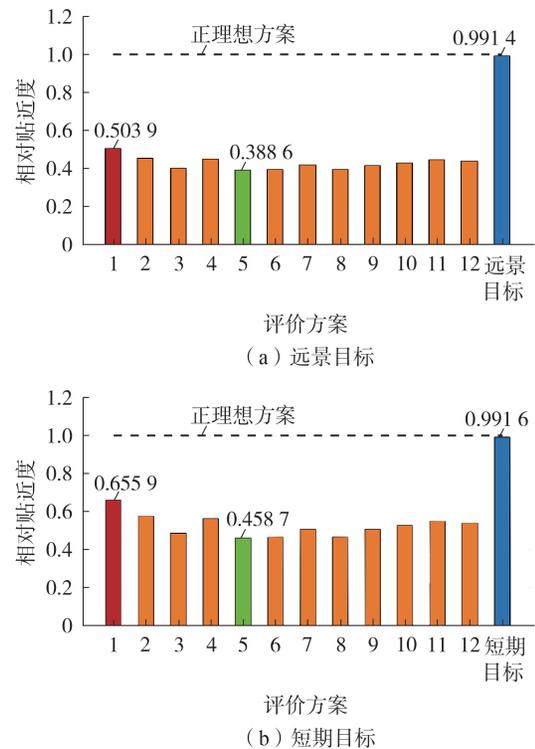


图3 基于ITOPSIS的不同目标下总目标层的相对贴程度

Fig.3 Relative closeness of total target layer under different targets based on ITOPSIS

为了进一步体现ITOPSIS相较于传统TOPSIS的优势,利用TOPSIS计算总目标层的相对贴程度,结果如图4所示。由图可以看出,TOPSIS能够横向比较各评价方案内共享储能发展与运营状况的相对优劣,但是无法反映共享储能所处状态与发展期望之间的差距。此外,与图3所示结果比较可知,利用TOPSIS计算的相对贴程度数值存在评价方案之间差距较大的情况,这是因为传统TOPSIS的正理想解与负理想解分别为从评价方案中选择的最优值与最劣值,正、负理想解之间的差值较小,造成相对贴程度的波动性增大。但是,相对贴程度的数值变化并不会影响各评价方案之间的相对优劣排序,这表明

ITOPSIS能够兼容传统TOPSIS的功能与性能。

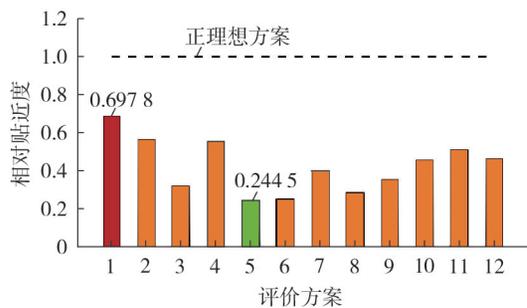


图4 基于传统TOPSIS的总目标层的相对贴适度

Fig.4 Relative closeness of total target layer based on traditional TOPSIS

上述算例分析结果表明:相较于传统TOPSIS,ITOPSIS通过设计目标方案不仅可以进行各评价方案之间的横向对比评价,还能够实现评价方案与目标方案之间的纵向对比评价,便于了解当前状态与发展期望之间的差距,为决策者提供更加准确的决策参考信息。

选择图3(a)中相对贴适度最大的评价方案1与相对贴适度最小的评价方案5,以及具有较大收益环比增长率的评价方案9,进一步分析其在远景目标下不同评价对象的相对贴适度,结果如表3所示。

表3 远景目标下评价方案的相对贴适度

Table 3 Relative closeness of evaluation schemes under long-term target

层级	评价对象	相对贴适度			远景目标
		评价方案1	评价方案5	评价方案9	
总目标层	综合评价	0.5039	0.3886	0.4154	0.9914
子目标层	发展态势	0.6315	0.4952	0.5482	0.9815
	市场状态	0.3978	0.2049	0.2151	1.0000
	经济收益	0.6315	0.4952	0.5482	0.9815
次子目标层	低碳效益	0.5642	0.5069	0.5641	1.0000
	市场结构	0.2714	0.2715	0.5887	1.0000
	市场行为	0.2917	0.2850	0.2839	1.0000
	市场绩效	0.4576	0.1408	0.1296	1.0000

由表3可以看出,在所选择的3个评价方案中,评价方案1除次子目标层的市场结构以外,其他评价对象的相对贴适度均最大,其中市场绩效的相对贴适度为0.4576,与其余2个评价方案市场绩效的相对贴适度相差较大,这主要是因为评价方案1的双边交易电量比例为44.05%,而评价方案1、9的双边交易电量比例仅分别为8.37%、3.03%。此外,比较各评价方案发展态势与市场状态的相对贴适度可以发现,市场状态的相对贴适度数值较小,说明现阶段青海省共享储能市场状态较差,并与目标方案之间存在明显的差距,这与4.2节基础指标的分析结果一致,证明了基于FAHP和ITOPSIS的综合评价方法

可以较为直观地反映共享储能的状态,基于本文所提方法,即使是对于对共享储能缺乏深入理解的决策者而言,其也能够根据相对贴适度数值对共享储能进行快速评估与分析。

## 5 结论

本文立足于共享储能的商业模式需兼顾产业发展与市场运营的特点,充分考虑“双碳”目标下共享储能的应用场景与价值,构建了面向新能源消纳场景的共享储能综合评价指标体系,并采用基于FAHP和ITOPSIS的综合评价方法,对青海省共享储能交易试点进行了评价研究,所得结论如下。

1)本文构建的评价指标体系、权重赋值方案以及综合评价方法能够在考虑共享储能不同阶段发展目标的前提下,对新能源消纳场景的共享储能发展与运营状况进行量化分析与比较,进而为宏观调控政策的制定、激励考核机制的设计和交易规则的修订提供参考。

2)基于青海省共享储能交易试点数据,验证了共享储能商业模式在新能源消纳场景下的可行性,表明其能够以产生低碳效益的方式助力“双碳”目标的实现。但分析评价结果可以发现,现阶段青海省共享储能的发展与运营状况仍与目标方案之间有着较大的差距:共享储能的资源规模较小,双边交易电量比例较低,市场活跃度与竞争性不足。未来青海省可以在提高共享储能的资源利用率、研究平衡合理收益与市场活跃的价格机制、设计形式多样的盈利模式以及制定市场的准入与激励政策等方面进行探索。

下一步将研究将共享储能商业模式在“双碳”目标各关键时间节点的发展与运营状况映射至目标方案指标数值的方法,进一步提升本文所提方法的实用性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] ERDIWANSYAH E, MAHIDIN T, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37-54.
- [2] 张敏, 王建学, 王秀丽, 等. 面向新能源消纳的调峰辅助服务市场双边交易机制与模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 84-91.  
ZHANG Min, WANG Jianxue, WANG Xiuli, et al. Bilateral trading mechanism and model of peak regulation auxiliary service market for renewable energy accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 84-91.
- [3] AKRAMI A, DOOSTIZADEH M, AMINIFAR F. Power system flexibility: an overview of emergence to evolution[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 987-1007.

- [4] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):1-8.
- [5] 陈青,吴明兴,刘英琪,等. 面向风电市场化消纳的现货电量-辅助服务联合运营机制[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):179-188.  
CHEN Qing, WU Mingxing, LIU Yingqi, et al. Joint operation mechanism of spot electric energy and auxiliary service for wind power market-oriented accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3):179-188.
- [6] NIKOOBAKHT A, AGHAEI J, SHAFIE-KHAH M, et al. Assessing increased flexibility of energy storage and demand response to accommodate a high penetration of renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2):659-669.
- [7] 朱西平,付迁,文红,等. 区块链视角下多能源主体储能优化配置模型[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):47-56.  
ZHU Xiping, FU Qian, WEN Hong, et al. Optimal allocation model of multi-energy entity energy storage from perspective of blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8):47-56.
- [8] 宋天昊,李柯江,韩肖清,等. 储能系统参与多应用场景的协同运行策略[J/OL]. 电力系统自动化. (2021-05-25)[2021-05-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210524.0852.002.html>. DOI:10.7500/AEPS20210129002.
- [9] LOMBARDI P, SCHWABE F. Sharing economy as a new business model for energy storage systems[J]. Applied Energy, 2017, 188:485-496.
- [10] WANG Yiting, QIU Weiqiang, DONG Ling, et al. Proxy signature-based management model of sharing energy storage in blockchain environment[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21):7502.
- [11] FLEISCHHACKER A, AUER H, LETTNER G, et al. Sharing solar PV and energy storage in apartment buildings: resource allocation and pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4):3963-3973.
- [12] MÜLLER S C, WELPE I M. Sharing electricity storage at the community level: an empirical analysis of potential business models and barriers[J]. Energy Policy, 2018, 118:492-503.
- [13] BAYRAM I S, ABDALLAH M, TAJER A, et al. A stochastic sizing approach for sharing-based energy storage applications [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3):1075-1084.
- [14] 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):3361-3371,3663.  
LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12):3361-3371, 3663.
- [15] ZHU H L, OUAHADA K. A distributed real-time control algorithm for energy storage sharing[J]. Energy and Buildings, 2021, 230:110478.
- [16] ZAIDI B H, BHATTI D M S, ULLAH I. Combinatorial auctions for energy storage sharing amongst the households[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 19:291-301.
- [17] 孙偲,陈来军,邱欣杰,等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. 全球能源互联网,2019,2(4):360-366.  
SUN Cai, CHEN Laijun, QIU Xinjie, et al. A generation-side shared energy storage planning model based on cooperative game[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4):360-366.
- [18] 董凌,年珩,范越,等. 能源互联网背景下共享储能的商业模式探索与实践[J]. 电力建设,2020,41(4):38-44.  
DONG Ling, NIAN Heng, FAN Yue, et al. Exploration and practice of business model of shared energy storage in energy Internet[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4):38-44.
- [19] 康重庆,周天睿,陈启鑫,等. 电网低碳效益评估模型及其应用[J]. 电网技术,2009,33(17):1-7.  
KANG Chongqing, ZHOU Tianrui, CHEN Qixin, et al. Assessment model on low-carbon effects of power grid and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(17):1-7.
- [20] 史晋鑫,史沛然,王佩雯,等. 华北区域电力调峰辅助服务市场分析 & 运行评估[J/OL]. 电力系统自动化. [2021-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.tp.20210817.0913.002.html>. DOI:10.7500/AEPS2021025003.
- [21] ZHAO Haoran, GUO Sen, ZHAO Huiru. Comprehensive assessment for battery energy storage systems based on fuzzy-MCDM considering risk preferences[J]. Energy, 2019, 168:450-461.
- [22] 孙彦龙,康重庆,陈宋宋,等. 低碳电网评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(17):157-162.  
SUN Yanlong, KANG Chongqing, CHEN Songsong, et al. Low-carbon power grid index system and evaluation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17):157-162.
- [23] 薛金花,叶季蕾,陶琼,等. 电力储能技术的适用性评价模型与方法研究[J]. 高电压技术,2018,44(7):2239-2246.  
XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Feasibility evaluation model and method of energy storage technologies in power system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7):2239-2246.
- [24] 徐铭铭,曹文思,姚森,等. 基于模糊层次分析法的配电网重复多发性停电风险评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):19-25,31.  
XU Mingming, CAO Wensi, YAO Sen, et al. Risk assessment of repeated multiple blackouts for distribution network based on fuzzy AHP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):19-25, 31.
- [25] 沈郁,熊永新,姚伟,等.  $\pm 110$  kV 特高压直流输电受端接入方式的综合评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):195-202.  
SHEN Yu, XIONG Yongxin, YAO Wei, et al. Comprehensive evaluation for receiving end connection scheme of  $\pm 110$  kV UHVDC power transmission[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8):195-202.
- [26] 孟建辉,赵彭辉,王毅,等. 基于TOPSIS算法的多VSG单元协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):72-79.  
MENG Jianhui, ZHAO Penghui, WANG Yi, et al. Collaborative control strategy of multiple VSG units based on TOPSIS algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9):72-79.

#### 作者简介:



邱伟强

邱伟强(1993—),男,福建长汀人,博士研究生,主要研究方向为共享储能、区块链技术(E-mail:qwqelectricity@zju.edu.cn);

王茂春(1982—),男,湖南武冈人,高级工程师,硕士,主要研究方向为调控管理(E-mail:840974042@qq.com);

林振智(1979—),男,福建莆田人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统态势感知、电力系统恢

复(E-mail:linzhenzhi@zju.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

## Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality

QIU Weiqiang<sup>1</sup>, WANG Maochun<sup>2</sup>, LIN Zhenzhi<sup>1</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, WANG Lianfang<sup>2</sup>, SUN Jianying<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

**Abstract:** Driven by the carbon peak and carbon neutrality target, SES (Shared Energy Storage), as a novel business mode combining energy storage technology and shared economy principle, has the potential to play an important role in the new energy accommodation scenario. However, how to evaluate the development and operation of SES business mode is still lack of unified evaluation standards and methods. Therefore, the basic elements of SES business mode in the new energy consumption scenario are analyzed, the comprehensive evaluation index system of SES is designed, and the definition and connotation of each index in the index system are summarized in detail. Then, the fuzzy analytic hierarchy process is used to assign weights to indexes, and the horizontal comparison evaluation between different evaluation schemes and the vertical comparison evaluation between evaluation scheme and target scheme are realized by designing target scheme and adopting improved TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution). Finally, the actual data of a SES trading pilot is taken as an example to analyze and verify that the designed index system can effectively reflect the operation status, existing problems and changing trends of SES.

**Key words:** shared energy storage; carbon emission target; new energy accommodation; comprehensive evaluation index system; fuzzy analytic hierarchy process; TOPSIS; business modes

(上接第 233 页 continued from page 233)

## Design and comprehensive evaluation of wind-thermal power coupling multi-energy system based on hydrogen energy

YUAN Tiejia<sup>1</sup>, GAO Lingyu<sup>1</sup>, XIE Yongsheng<sup>2</sup>, ZHOU Zhuan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract:** In order to improve the deep peak shaving limit of thermal power units and tap their potentials to improve the consumption capacity of new energy, a wind-thermal power coupling multi-energy system based on hydrogen energy is constructed. The design framework of wind-thermal power coupling multi-energy system is established, including design principle, system composition, evaluation index system, etc. The overall structure of wind-thermal power coupling multi-energy system supported by affluent wind power producing hydrogen is proposed. Considering the four influence factors of economy, energy utilization, “double carbon” target and reliability, the multi-scale evaluation index and its mathematical model of wind-thermal power coupling multi-energy system are proposed, and the weight proportion of each index is determined based on fuzzy analytic hierarchy process entropy weight method. Taking the structural design of the proposed wind-thermal power coupling multi-energy system in an area as an example, the effectiveness of the proposed method is verified, which provides a certain reference for practical engineering construction.

**Key words:** wind-thermal power coupling multi-energy system; peak shaving; hydrogen energy; system design; comprehensive evaluation

# 附录 A

表 A1 发布新能源发电项目配套储能设施政策的省份

Table A1 Provinces issuing policies on supporting energy storage facilities for new energy power generation projects

省份	时间	印发文件	目标对象	储能配置要求
甘肃	2021.03	《关于加快推进全省新能源存量项目建设工作的通知》	存量新能源项目	鼓励全省在建存量风光发电项目按河西 5 市配置 10%~20%、其他地区按 5%~10%配置配套储能设施，连续储能时长均不小于 2 h
陕西	2021.03	《关于促进陕西省可再生能源高质量发展的意见（征求意见稿）》	新建新能源项目	关中、陕北新增集中式风电、光伏发电项目按照不低于装机容量 10%配置储能设施，连续储能时长 2 h 以上，满足 10 a（5000 次循环）以上工作寿命
海南	2021.03	《关于开展 2021 年度海南省集中式光伏发电平价上网项目工作的通知》	新建新能源项目	申报项目同步配套建设设备规模 10%的储能装置
山东	2021.02	《2021 年全省能源工作指导意见》	新建新能源项目	新能源场站原则上配置不低于 10%储能设施
青海	2021.01	《支持储能产业发展的若干措施(试行)》	新建新能源项目	储能容量原则上不低于新能源项目装机量的 10%，储能时长 2 h 以上
宁夏	2021.01	《关于加快促进自治区储能健康有序发展的通知（征求意见稿）》	全部新能源项目	新能源项目储能配置比例不低于 10%、连续储能时长 2 h 以上
湖北	2020.06	《湖北省 2020 年度平价风电项目竞争配置工作方案》	新建风电项目	风储项目配备的储能容量不得低于风电项目配置容量的 10%

表 A2 基准储能项目的建设价格

Table A2 Construction price of benchmark energy storage project

典型月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
基准储能项目建设价格/ [元·(W·h) <sup>-1</sup> ]	1.91	1.84	1.79	1.75	1.7	1.67	1.63	1.58	1.55	1.53	1.49	1.45

表 A3 基础指标数值

Table A3 Values of basic indices

指标	数值											
	典型月 1	典型月 2	典型月 3	典型月 4	典型月 5	典型月 6	典型月 7	典型月 8	典型月 9	典型月 10	典型月 11	典型月 12
$I_{111}/\bar{\text{元}}$	15627	11797	10531	17114	9693	8788	9870	10067	11466	12925	14623	12814
$I_{112}/\%$	21.82	-7.97	-10.03	3.92	-5.33	-4.67	-20.35	13.04	31.25	26.93	19.84	3.46
$I_{113}/\text{a}$	10	14	15	8	15	17	14	13	11	9	7	8
$I_{121}/\%$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$I_{122}/$ (MW·h)	27.50	20.17	19.26	31.14	17.37	15.42	16.98	17.98	20.39	23.18	25.61	22.20
$I_{123}/\text{t}$	732.63	554.52	495.44	806.83	457.06	414.41	465.39	631.32	886.66	999.50	1130.5	988.16
$I_{124}/\%$	0.63	0.63	0.59	0.55	0.51	0.48	0.47	0.62	0.75	0.74	0.73	0.72
$I_{211}$	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	6269	5241	5241	5241	5241
$I_{212}$	154.97	154.97	171.95	167.27	150.61	140.06	134.90	130.70	127.56	125.06	121.45	118.86
$I_{221}/\%$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$I_{222}/\%$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$I_{223}/\%$	3.81	3.81	3.48	3.13	2.74	2.68	2.33	2.30	2.55	1.68	1.94	1.37
$I_{231}/\%$	13.36	10.27	9.21	14.94	8.67	7.52	8.63	8.70	9.88	12.40	12.50	11.24
$I_{232}/\%$	44.05	36.28	11.41	7.54	8.37	18.09	27.70	3.28	3.03	3.11	5.13	11.51
$I_{233}/\%$	0.65	0.39	0.35	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.77

表 A4 低碳效益指标的模糊比较判断矩阵  
Table A4 Fuzzy judgment matrix of low carbon benefit indices

指标	消纳新能源电量占比 $I_{121}$	单位容量消纳新能源电量 $I_{121}$	二氧化碳减排量 $I_{123}$	共享储能-新能源容量比 $I_{124}$
消纳新能源电量占比 $I_{121}$	(1, 1, 1)	(0.38, 0.5, 0.67)	(1.33, 2, 2.67)	(3.33, 4, 4.67)
	(1, 1, 1)	(0.4, 0.5, 0.75)	(0.33, 1, 1.5)	(2.33, 3, 3.75)
	(1, 1, 1)	(0.63, 1, 4)	(0.5, 1, 1.67)	(1.5, 2, 2.67)
单位容量消纳 新能源电量 $I_{121}$	(1.5, 2, 2.67)	(1, 1, 1)	(0.29, 0.33, 0.43)	(1.33, 2, 2.67)
	(1.33, 2, 2.5)	(1, 1, 1)	(0.27, 0.33, 0.4)	(0.2, 1, 1.6)
	(0.25, 1, 1.6)	(1, 1, 1)	(0.27, 0.33, 0.43)	(0.33, 1, 1.75)
二氧化碳减排量 $I_{123}$	(0.38, 0.5, 0.75)	(2.33, 3, 3.5)	(1, 1, 1)	(1.33, 2, 2.75)
	(0.67, 1, 3)	(2.5, 3, 3.67)	(1, 1, 1)	(1.5, 2, 2.67)
	(0.6, 1, 2)	(2.33, 3, 3.67)	(1, 1, 1)	(0.33, 1, 1.67)
共享储能-新能源 容量比 $I_{124}$	(0.21, 0.25, 0.3)	(0.38, 0.5, 0.75)	(0.36, 0.5, 0.75)	(1, 1, 1)
	(0.27, 0.33, 0.43)	(0.63, 1, 5)	(0.38, 0.5, 0.67)	(1, 1, 1)
	(0.375, 0.5, 0.67)	(0.57, 1, 3)	(0.6, 1, 3)	(1, 1, 1)

表 A5 共享储能评价指标的数值范围与目标方案数值  
Table A5 Value range of shared energy storage evaluation indices and index values of target scheme

指标	数值范围	远景目标数值	短期目标数值	指标类型
$I_{111}$ /元	$[0, 100000]_{\infty}$	30000	20000	效益型
$I_{112}$ /%	$[-100, 1000]_{\infty}$	20	30	效益型
$I_{113}$ /a	$[1, 100]_{\infty}$	5	7	成本型
$I_{121}$ /%	$[0, 100]$	100	100	效益型
$I_{122}$ /(MW·h)	$[0, 100]_{\infty}$	40	30	效益型
$I_{123}$ /t	$[0, 10000]_{\infty}$	1000	500	效益型
$I_{124}$ /%	$[0, 100]_{\infty}$	5	2	固定型
$I_{211}$	$(0, 10000]$	1800	3000	成本型
$I_{212}$	$(0, 10000]$	100	100	成本型
$I_{221}$ /%	$[0, 100]$	100	100	效益型
$I_{222}$ /%	$[0, 100]$	100	100	效益型
$I_{223}$ /%	$[0, 100]$	50	10	效益型
$I_{231}$ /%	$[0, 100]$	40	20	效益型
$I_{232}$ /%	$[0, 100]$	80	60	效益型
$I_{233}$ /%	$[0, 100]$	10	5	固定型

表 A6 短期目标下的理想解  
Table A6 Ideal solutions under short-term target

指标	正理想解	负理想解	指标	正理想解	负理想解
$I_{111}$ /元	20000	0	$I_{212}$	100	10000
$I_{112}$ /%	31.25	-100	$I_{221}$ /%	100	0
$I_{113}$ /a	7	100	$I_{222}$ /%	100	0
$I_{121}$ /%	100	0	$I_{223}$ /%	10	0
$I_{122}$ /(MW h)	30	0	$I_{231}$ /%	20	0
$I_{123}$ /t	500	0	$I_{232}$ /%	60	0
$I_{124}$ /%	2	100	$I_{233}$ /%	10	100
$I_{211}$	3000	10000			