

## 复合储能参与电能量及辅助服务市场的运行策略

朱宗耀<sup>1</sup>, 王秀丽<sup>1</sup>, 吴雄<sup>1</sup>, 宋祯子<sup>1</sup>, 陈先龙<sup>1</sup>, 黄阮明<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海市 200233)

**摘要:** 在新能源占比快速扩大及电力市场化的双重背景下, 充分挖掘功率型电储能与能量型氢储能的互补特点, 并使其协同参与电能量市场及辅助服务市场, 不仅可以使复合储能的收益最大化, 也可对电力系统的安全运行提供有效支撑。首先, 在分析电能量市场、旋转备用市场与基于调频表现的调频辅助服务市场运行规则的基础上, 结合电储能及氢储能的运行特点提出了聚合分布式电储能与氢储能的复合储能多市场运行策略。然后, 基于聚合运行时各分布式储能的贡献度, 利用Shapley值法进行收益分配。最后, 通过算例仿真验证了所建模型的有效性。结果表明, 与分布式电储能与氢储能独立运行相比, 合作运营可带来更大收益, 同时通过联合参与辅助服务市场获得的收益显著高于仅参与电能量市场。

**关键词:** 复合储能; 电储能; 氢储能; 旋转备用市场; 调频辅助服务市场

### 0 引言

分布式储能作为灵活调节资源, 对于促进新能源消纳具有重要作用<sup>[1-2]</sup>, 然而当前储能投资成本仍然较高, 仅通过峰谷电价差套利对于成本回收及盈利较为困难<sup>[3]</sup>。因此, 面向高比例新能源电力系统的运行需求, 聚合数量众多且具有一定闲置率的分布式储能参与电力辅助服务市场, 不仅可以保障电网的安全运行, 还可以丰富储能的盈利模式。

近年来, 储能资源如何参与辅助服务市场逐步成为研究热点<sup>[4-5]</sup>, 其中, 电化学储能由于其灵活快速的调节能力, 可对电力系统的可靠运行提供支持。文献[6]基于双层模型建立了储能系统联合参与电能量市场与备用市场的最优运行策略。文献[7]建模验证了储能在促进风电消纳基础上进一步参与备用辅助市场的可行性。文献[8-9]建模分析了储能在同时参与电能量与备用市场时系统负荷不确定性的影响。随着电解水制氢技术的成熟<sup>[10]</sup>, 氢储能系统在辅助服务市场的应用也逐步兴起。文献[11]设计了氢储能系统同时参与电能量市场与备用市场的交易策略。文献[12]研究了加氢站在向氢燃料汽车提供氢能的同时参与备用市场的可能性。

在频率调节市场, 传统的水电及火电调频机组存在一些固有的劣势<sup>[13]</sup>, 同时火电机组发电比例也

在逐步下降<sup>[14]</sup>。而电化学储能快速精确的响应能力, 使其参与调频市场成为可能<sup>[15-17]</sup>。文献[18]对比研究了储能参与电能量市场与调频市场时的收益及最优投资规划。文献[19-20]在考虑循环寿命的基础上提出了储能参与调频市场的运行策略。文献[21]建立了储能同时参与电能量市场、备用市场及调频市场的多市场调度方案。然而, 单一的调频容量价格难以公平合理地对不同调频资源进行补偿。为进一步促进储能等优质调频资源参与市场, 国外多个市场引入了基于调频效果的补偿机制。文献[22-23]对美国多个最新的调频辅助服务市场规则及补偿结算机制进行了详细介绍, 其中, 调频资源的性能表现评分与其最终收益密切相关。文献[24]则设计了评价调频资源表现的性能指标计算方法。

然而, 目前关于氢储能系统与电储能合作参与辅助服务市场鲜有研究。氢储系统由于电解槽与燃料电池面临最小启停时长、停机启动及爬坡等约束, 其快速响应能力不及电化学储能, 但氢储能系统具有能量密度大且节能环保的优势。氢储能作为能量型储能与功率型的电化学储能可形成优势互补<sup>[25-27]</sup>, 氢储能可以保证调整功率的持久性, 而电储能可弥补氢储能响应较慢的劣势。特别在基于性能表现结算的调频市场中, 电储能与氢储能通过合作作为一个整体既可以实现更强的灵活调节能力, 还可以保证较高的性能表现评分, 从而获得更大的收益。

基于上述讨论, 本文提出了聚合分布式电储能

收稿日期: 2022-09-15; 修回日期: 2023-05-22。

上网日期: 2023-07-24。

国家重点研发计划资助项目(2022YFB2403100)。

和氢储能的复合储能运营机制,建立了复合储能同时参与电能市场、旋转备用市场及调频市场的多市场运行策略模型。为保证合作运行时收益分配的公平性及激励相容性,基于聚合运行时各分布式储能的贡献度,采用Shapley值法进行收益分配。最后,通过仿真算例对所提模型的有效性进行了分析验证。

## 1 系统运营框架

图1所示为系统框图,首先通过聚合分布式电储能和氢储能形成复合储能系统,然后复合储能系统作为一个整体参与电能市场及辅助服务市场。由于目前分布式电储能数量庞大而氢储能的部署仍相对有限,考虑聚合的复合储能系统由一个氢储能系统和多个电储能共同组成,其中,氢储能由电解槽、压缩机、储氢罐和燃料电池组成。电解槽可利用电能生产氢气,氢气被压缩后存储于储氢罐中,而储氢罐内的氢气不仅可以供燃料电池发电,也可直接进行售卖获利。复合储能系统不仅可以参与电能市场,还可参与旋转备用市场及调频市场。参考美国PJM市场中电能市场与辅助服务市场联合优化出清规则,本文中市场参与主体复合储能系统在日前同时向电能市场、旋转备用市场和调频市场上报交易容量。需要注意的是,复合储能系统中单位调节容量同一时刻只能提供电能、旋转备用和调频服务中的一种,即在各市场上报的总功率不能超过自身容量,而复合储能系统在实时运行阶段最终的充、放电功率为各市场需履约功率的累加和。

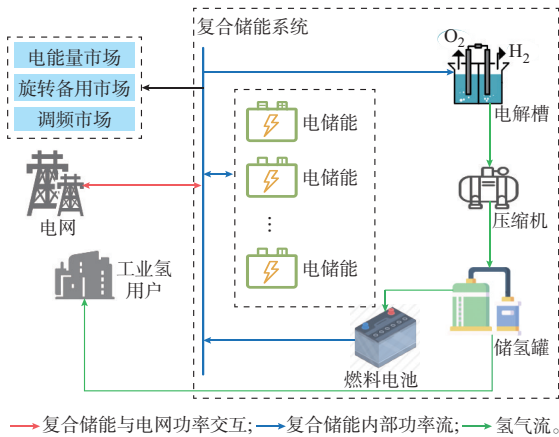


图1 系统框图  
Fig. 1 System framework diagram

本文中旋转备用市场收益由两部分组成:首先,根据备用价格及所报容量对备用容量收益进行结算;其次,对于实际调用的备用容量再依据日前电价进行结算。调频市场结算机制参考美国PJM市场

基于调频性能表现的定价机制<sup>[28]</sup>,由容量收益及里程收益两部分组成,其收益与调频资源的性能表现评分密切相关。在PJM市场中,调频信号每2s向调频资源发送一次,但性能表现评分是以小时为单位计算的。因此,出于经济结算方便的考虑,本文简化地采用小时级的调频信号和调频价格来计算调频收益<sup>[18-19]</sup>。

由于复合储能系统容量仍然有限,在各个市场其均作为价格接受者,在多个市场中根据不同市场的结算规则、预测的价格信息、调用信号及自身运行情况在不同市场进行最优的容量分配,从而实现收益最大化。

## 2 数学优化模型

### 2.1 目标函数

优化目标为复合储能系统总收益 $C^{\text{total}}$ 最高,系统总收益等于各市场的收益及售氢利润减去运行成本,即

$$\max C^{\text{total}} = \sum_{t \in T} (R_t^d + R_t^{\text{re}} + R_t^{\text{reg}} + R_t^h - C_t^{\text{op}}) \quad (1)$$

$$R_t^d = \pi_t^d P_t^d \Delta t \quad (2)$$

$$R_t^{\text{re}} = \pi_t^{\text{re}} P_t^{\text{re}} \Delta t + \pi_t^{\text{re}} P_t^{\text{r}} (\alpha_t^{\text{r}+} - \alpha_t^{\text{r}-}) \Delta t \quad (3)$$

$$R_t^{\text{reg}} = R_t^{\text{reg, cap}} + R_t^{\text{reg, perf}} \quad (4)$$

$$R_t^{\text{reg, cap}} = \pi_t^{\text{reg, cap}} P_t^{\text{reg}} S^{\text{reg}} \Delta t \quad (5)$$

$$R_t^{\text{reg, perf}} = \pi_t^{\text{reg, perf}} P_t^{\text{reg}} R_t^{\text{mil}} S^{\text{reg}} \Delta t \quad (6)$$

$$R_t^h = \pi_t^h h_t^{\text{sell}} \quad (7)$$

$$C_t^{\text{op}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} o^{\text{es}} (P_{i,t}^{\text{ch, ac}} + P_{i,t}^{\text{ds, ac}}) \Delta t + o^{\text{el}} P_t^{\text{el, ac}} \Delta t + o^{\text{tk}} (h_t^{\text{tk}+} + h_t^{\text{tk}-}) + o^{\text{fc}} P_t^{\text{fc, ac}} \Delta t \quad (8)$$

式中: $T$ 为时段集合; $\mathcal{I}$ 为分布式电储能集合; $R_t^d$ 、 $R_t^{\text{re}}$ 和 $R_t^{\text{reg}}$ 分别为复合储能在日前市场、旋转备用市场和调频市场的收益; $R_t^{\text{reg, cap}}$ 和 $R_t^{\text{reg, perf}}$ 分别为调频容量收益和里程收益; $R_t^h$ 和 $C_t^{\text{op}}$ 分别为售氢利润及系统的运行成本; $\Delta t$ 表示小时时段; $\pi_t^d$ 、 $\pi_t^{\text{re}}$ 、 $\pi_t^{\text{reg, cap}}$ 、 $\pi_t^{\text{reg, perf}}$ 和 $\pi_t^h$ 分别为日前电价、备用价格、容量价格、里程价格和氢气价格; $P_t^d$ 、 $P_t^{\text{re}}$ 、 $P_t^{\text{reg}}$ 和 $h_t^{\text{sell}}$ 分别为日前市场、备用市场、调频市场的报量和氢气售销量; $\alpha_t^{\text{r}+}$ 和 $\alpha_t^{\text{r}-}$ 分别为预测的正、负备用调用率, $\alpha_t^{\text{r}+}$ 、 $\alpha_t^{\text{r}-} \in [0, 1]$ 且 $\alpha_t^{\text{r}+} \alpha_t^{\text{r}-} = 0$ ;  $S^{\text{reg}}$ 和 $R_t^{\text{mil}}$ 分别为调频性能评分和里程调用率; $o^{\text{es}}$ 、 $o^{\text{el}}$ 、 $o^{\text{tk}}$ 和 $o^{\text{fc}}$ 分别为电储能、电解槽、储氢罐和燃料电池的单位运行成本,反映了各设备运行带来的寿命老化成本; $P_{i,t}^{\text{ch, ac}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{ds, ac}}$ 分别为电储能 $i$ 的实际充、放电功率; $P_t^{\text{el, ac}}$ 和 $P_t^{\text{fc, ac}}$ 分别为电解槽和燃料电池实际运行功率; $h_t^{\text{tk}+}$ 和 $h_t^{\text{tk}-}$ 分别为储氢罐氢气的输入和输出量。

式(2)用于计算复合储能系统的日前收益;旋

转备用市场收益由所报的备用容量收益和实际调用容量结算值两部分组成,如式(3)所示;式(4)表示调频收益由容量收益和里程收益两部分组成,具体由式(5)和式(6)分别计算求得;式(7)为售氢收益;式(8)用于计算整个系统的运行成本,分别由电储能、电解槽、储氢罐和燃料电池各部分运行成本共同组成。

## 2.2 约束条件

复合储能系统在日前市场、旋转备用市场和调频市场的报量主要由电解槽、燃料电池和电储能3个部分共同组成;而针对电储能具有充放电两种运行方式的情况对充放电的报量行为进行了解耦建模。系统各模块的运行约束具体如下:

### 1) 日前市场

日前市场报量为:

$$P_t^d = -P_t^{\text{el}} + P_t^{\text{fc}} - \sum_{i \in \mathcal{I}} P_{i,t}^{\text{ch}} + \sum_{i \in \mathcal{I}} P_{i,t}^{\text{ds}} \quad (9)$$

式中:  $P_t^{\text{el}}$ 、 $P_t^{\text{fc}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ch}}$  和  $P_{i,t}^{\text{ds}}$  分别为电解槽、燃料电池、电储能  $i$  充电和放电在日前市场的报量。

### 2) 旋转备用市场

旋转备用市场报量分正备用报量和负备用报量,可分别由式(10)和式(11)求得。而对于备用市场一般要求正、负备用相等,即均等于备用市场报量  $P_t^r$ ,如式(12)所示。

$$P_t^{r+} = P_t^{r,\text{el}+} + P_t^{r,\text{fc}+} + \sum_{i \in \mathcal{I}} P_{i,t}^{r,\text{ch}+} + \sum_{i \in \mathcal{I}} P_{i,t}^{r,\text{ds}+} \quad (10)$$

$$P_t^{r-} = P_t^{r,\text{el}-} + P_t^{r,\text{fc}-} + \sum_{i \in \mathcal{I}} P_{i,t}^{r,\text{ch}-} + \sum_{i \in \mathcal{I}} P_{i,t}^{r,\text{ds}-} \quad (11)$$

$$P_t^{r+} = P_t^{r-} = P_t^r \quad (12)$$

式中:  $P_t^{r+}$  和  $P_t^{r-}$  分别为整个复合储能系统的正、负备用;  $P_t^{r,\text{el}+}$ 、 $P_t^{r,\text{fc}+}$ 、 $P_{i,t}^{r,\text{ch}+}$  和  $P_{i,t}^{r,\text{ds}+}$  分别为电解槽、燃料电池、电储能  $i$  充电和放电的正备用,而  $P_t^{r,\text{el}-}$ 、 $P_t^{r,\text{fc}-}$ 、 $P_{i,t}^{r,\text{ch}-}$  和  $P_{i,t}^{r,\text{ds}-}$  则为对应的负备用。

### 3) 调频市场

调频市场报量可由式(13)求得,其中,电储能的调频报量由充放电两个过程的调频报量共同组成,如式(14)所示。此外,本文中调频市场采用基于调频资源调节性能的定价机制,因此,调频收益会受到调频资源性能评分的影响。电储能由于其灵活快速的调节能力具有显著的调频优势,而氢储能系统则会受最小开关机时长和爬坡启停等运行约束的影响。因此,为保证复合储能系统具有较高的调频性能评分,在调频市场进行报量时,需要使电储能的调频报量占总调频报量的一定比例以上,具体如式(15)所示。

$$P_t^{\text{reg}} = P_t^{\text{reg,el}} + P_t^{\text{reg,fc}} + \sum_{i \in \mathcal{I}} P_{i,t}^{\text{reg,es}} \quad (13)$$

$$P_{i,t}^{\text{reg,es}} = P_{i,t}^{\text{reg,ch}} + P_{i,t}^{\text{reg,ds}} \quad (14)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} P_{i,t}^{\text{reg,es}} \geq \gamma P_t^{\text{reg}} \quad (15)$$

式中:  $P_t^{\text{reg,el}}$ 、 $P_t^{\text{reg,fc}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{reg,es}}$  分别为电解槽、燃料电池和电储能  $i$  的调频报量;  $P_{i,t}^{\text{reg,ch}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{reg,ds}}$  分别为电储能  $i$  充、放电过程的调频报量;  $\gamma$  为电储能所占调频报量的最小比例。

### 4) 与电网功率交互

复合储能系统与电网的功率交互由电能市场交易量、备用市场调用量和调频市场响应量3个部分组成,即复合储能实时运行阶段最终的充、放电功率,具体如式(16)所示。式(17)则对储能系统与电网的功率交互上限进行了约束。

$$P_t^{\text{grid}} = P_t^d + \alpha_t^+ P_t^{r+} - \alpha_t^- P_t^{r-} + \beta_t^{\text{reg}} P_t^{\text{reg}} \quad (16)$$

$$|P_t^{\text{grid}}| \leq p_t^{\text{grid,max}} \quad (17)$$

式中:  $P_t^{\text{grid}}$ 、 $p_t^{\text{grid,max}}$  分别为复合储能系统与电网的功率交互及其上限,其中,当  $P_t^{\text{grid}}$  为正时表示储能系统放电,即向电网送电,  $P_t^{\text{grid}}$  为负则表示充电,即电网向储能系统输电;  $\beta_t^{\text{reg}}$  为单位时间内单位调频容量累计调用的调频功率比例,  $\beta_t^{\text{reg}} \in [-1, 1]$  且其正负分别表示正调频和负调频。

### 5) 电解槽

首先,电解槽在各市场的报量之和均需满足其最大和最小出力约束,从而保证实际运行时的可执行性,如式(18)和式(19)所示。

$$P_t^{\text{el}} - P_t^{r,\text{el}+} - P_t^{\text{reg,el}} \geq 0 \quad (18)$$

$$P_t^{\text{el}} + P_t^{r,\text{el}-} + P_t^{\text{reg,el}} \leq \bar{P}^{\text{el,max}} \quad (19)$$

式中:  $\bar{P}^{\text{el,max}}$  为电解槽运行功率的最大值。

其次,电解槽实际运行时还需满足最小开停机时长约束。式(20)用于计算电解槽实际运行时的功率值;式(21)约束了电解槽的功率上下限;而式(22)一式(24)则对电解槽的最小开停机时长进行了约束。

$$P_t^{\text{el,ac}} = P_t^{\text{el}} - \alpha_t^+ P_t^{r,\text{el}+} + \alpha_t^- P_t^{r,\text{el}-} - \beta_t^{\text{reg}} P_t^{\text{reg,el}} \quad (20)$$

$$\mu_t^{\text{el}} \bar{P}^{\text{el,min}} \leq P_t^{\text{el,ac}} \leq \mu_t^{\text{el}} \bar{P}^{\text{el,max}} \quad (21)$$

$$\mu_t^{\text{el}} - \mu_{t-1}^{\text{el}} \leq \mu_t^{\text{el}'} \quad \forall t \in [2, |\mathcal{T}|] \quad (22)$$

$$\sum_{k=t-U_T^{\text{el}}+1}^t \mu_k^{\text{el}'} \leq \mu_t^{\text{el}} \quad \forall t \in [U_T^{\text{el}}+1, |\mathcal{T}|] \quad (23)$$

$$\sum_{k=t-D_T^{\text{el}}+1}^t \mu_k^{\text{el}'} \leq 1 - \mu_{t-D_T^{\text{el}}}^{\text{el}} \quad \forall t \in [D_T^{\text{el}}+1, |\mathcal{T}|] \quad (24)$$

式中:  $\bar{P}^{\text{el,min}}$  为电解槽运行功率最小值;  $\mu_t^{\text{el}}$  为 0-1 变量,表示电解槽的运行状态;  $\mu_t^{\text{el}'}$  为电解槽的启停动作标志;  $U_T^{\text{el}}$  和  $D_T^{\text{el}}$  分别为电解槽的最小开、停机时



间;  $|\mathcal{T}|$  表示总时段数。

#### 6) 燃料电池

燃料电池在各市场的报量之和也需满足其出力约束限制,从而保证可执行性,如式(25)和式(26)所示。

$$P_t^{\text{fc}} + P_t^{\text{r,fc}+} + P_t^{\text{reg,fc}} \leq \bar{P}^{\text{fc,max}} \quad (25)$$

$$P_t^{\text{fc}} - P_t^{\text{r,fc}-} - P_t^{\text{reg,fc}} \geq 0 \quad (26)$$

式中:  $\bar{P}^{\text{fc,max}}$  为燃料电池运行功率的最大值。

燃料电池的实际运行功率如式(27)所示;式(28)则约束了其出力的上下限;类似于电解槽,式(29)一式(31)表示燃料电池的最小开停机时间限制;式(32)和式(33)分别表示燃料电池的爬坡、启动约束和减出力及停机约束。

$$P_t^{\text{fc,ac}} = P_t^{\text{fc}} + \alpha_t^{\text{r}} P_t^{\text{r,fc}+} - \alpha_t^{\text{r}} P_t^{\text{r,fc}-} + \beta_t^{\text{reg}} P_t^{\text{reg,fc}} \quad (27)$$

$$\mu_t^{\text{fc}} \bar{P}^{\text{fc,min}} \leq P_t^{\text{fc,ac}} \leq \mu_t^{\text{fc}} \bar{P}^{\text{fc,max}} \quad (28)$$

$$\mu_t^{\text{fc}} - \mu_{t-1}^{\text{fc}} \leq \mu_t^{\text{fc}'} \quad \forall t \in [2, |\mathcal{T}|] \quad (29)$$

$$\sum_{k=t-U_{\text{T}}^{\text{fc}}+1}^t \mu_k^{\text{fc}'} \leq \mu_t^{\text{fc}} \quad \forall t \in [U_{\text{T}}^{\text{fc}}+1, |\mathcal{T}|] \quad (30)$$

$$\sum_{k=t-D_{\text{T}}^{\text{fc}}+1}^t \mu_k^{\text{fc}'} \leq 1 - \mu_{t-D_{\text{T}}^{\text{fc}}}^{\text{fc}} \quad \forall t \in [D_{\text{T}}^{\text{fc}}+1, |\mathcal{T}|] \quad (31)$$

$$P_t^{\text{fc,ac}} - P_{t-1}^{\text{fc,ac}} \leq R_{\text{U}}^{\text{fc}} \mu_{t-1}^{\text{fc}} + S_{\text{U}}^{\text{fc}} (1 - \mu_{t-1}^{\text{fc}}) \quad \forall t \in [2, |\mathcal{T}|] \quad (32)$$

$$P_{t-1}^{\text{fc,ac}} - P_t^{\text{fc,ac}} \leq R_{\text{D}}^{\text{fc}} \mu_t^{\text{fc}} + S_{\text{D}}^{\text{fc}} (1 - \mu_t^{\text{fc}}) \quad \forall t \in [2, |\mathcal{T}|] \quad (33)$$

式中:  $\bar{P}^{\text{fc,min}}$  为燃料电池运行功率最小值;  $\mu_t^{\text{fc}}$  为 0-1 变量,表示燃料电池的运行状态;  $\mu_t^{\text{fc}'}$  为燃料电池的启停动作标志;  $U_{\text{T}}^{\text{fc}}$  和  $D_{\text{T}}^{\text{fc}}$  分别为燃料电池的最小开、停机时间;  $R_{\text{U}}^{\text{fc}}$  和  $R_{\text{D}}^{\text{fc}}$  分别为燃料电池的最大加出力和减出力速度;  $S_{\text{U}}^{\text{fc}}$  和  $S_{\text{D}}^{\text{fc}}$  分别为燃料电池的最大启动速度和关机速度。

#### 7) 电氢耦合约束

电解槽可以将电能转换为氢能,而燃料电池则可通过消耗氢能进行发电,两个过程的具体物理建模如下:

$$h_t^{\text{el}} = \frac{\eta^{\text{el}}}{L_{\text{HV}}} P_t^{\text{el,ac}} \Delta t \quad (34)$$

$$h_t^{\text{fc}} = \frac{P_t^{\text{fc,ac}}}{\eta^{\text{fc}} L_{\text{HV}}} \Delta t \quad (35)$$

式中:  $\eta^{\text{el}}$  和  $\eta^{\text{fc}}$  分别为电解槽效率和燃料电池发电效率;  $L_{\text{HV}}$  为氢气的低热值;  $h_t^{\text{el}}$  和  $h_t^{\text{fc}}$  分别为电解槽生成的氢气和燃料电池消耗的氢气。

#### 8) 储氢罐

储氢罐输入的氢气完全由电解槽提供,而输出的氢气由燃料电池消耗和直接售卖两部分组成,分

别如式(36)和式(37)所示;同时,储氢罐的输入、输出不能超过其上限,如式(38)和式(39)所示;式(40)表示储氢罐的压力计算方程,且储能罐的压力需要维持在一定范围内,如式(41)所示;式(42)表示整个调度周期前后储氢罐的压力水平需一致。

$$h_t^{\text{tk}+} = h_t^{\text{el}} \quad (36)$$

$$h_t^{\text{tk}-} = h_t^{\text{sell}} + h_t^{\text{fc}} \quad (37)$$

$$0 \leq h_t^{\text{tk}-} \leq \bar{H}^{\text{max,-}} \quad (38)$$

$$0 \leq h_t^{\text{tk}+} \leq \bar{H}^{\text{max,+}} \quad (39)$$

$$e_t^{\text{tk}} = e_{t-1}^{\text{tk}} + \frac{RT^{\text{tk}}}{MU^{\text{tk}}} (h_t^{\text{tk}+} - h_t^{\text{tk}-}) \quad (40)$$

$$e_t^{\text{tk,min}} \leq e_t^{\text{tk}} \leq e_t^{\text{tk,max}} \quad (41)$$

$$e_0^{\text{tk}} = e_T^{\text{tk}} \quad (42)$$

式中:  $\bar{H}^{\text{max,+}}$  和  $\bar{H}^{\text{max,-}}$  分别为储氢罐输入和输出上限;  $e_t^{\text{tk}}$  为储氢罐的压力;  $R$ 、 $T^{\text{tk}}$ 、 $M$  和  $U^{\text{tk}}$  分别为气体常数、罐内温度、氢气摩尔质量和储氢罐体积;  $e_t^{\text{tk,max}}$  和  $e_t^{\text{tk,min}}$  分别为罐内压力的上、下限;  $e_0^{\text{tk}}$  和  $e_T^{\text{tk}}$  分别为储氢罐在调度周期初始和结束时刻的压力值。

#### 9) 电储能

类似于电解槽和燃料电池,电储能能在各市场的报量也需满足其出力上下限约束,从而保证在实时运行阶段出现调用比例预测偏差时仍有裕量进行调整。本文对电储能的充放电过程进行了解耦建模,式(43)和式(44)、式(45)和式(46)分别表示各分布式电储能充电和放电过程在各市场联合报量的约束。

$$P_{i,t}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{r,ch}+} - P_{i,t}^{\text{reg,ch}} \geq 0 \quad (43)$$

$$P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{r,ch}-} + P_{i,t}^{\text{reg,ch}} \leq \bar{P}_i^{\text{es}} \quad (44)$$

$$P_{i,t}^{\text{ds}} + P_{i,t}^{\text{r,ds}+} + P_{i,t}^{\text{reg,ds}} \leq \bar{P}_i^{\text{es}} \quad (45)$$

$$P_{i,t}^{\text{ds}} - P_{i,t}^{\text{r,ds}-} - P_{i,t}^{\text{reg,ds}} \geq 0 \quad (46)$$

式中:  $\bar{P}_i^{\text{es}}$  为电储能  $i$  的最大充放电功率。

各分布式电储能的充放电功率可分别由式(47)和式(48)计算;充放电功率也需满足最大功率约束,如式(49)和式(50)所示;由于各电储能实际运行中不能同时进行充放电行为,采用式(51)进行约束;式(52)用于计算电储能  $i$  实时能量值;式(53)则表示电储能  $i$  内部能量值需维持在一定范围内;式(54)表示电储能  $i$  在调度周期首末能量状态需一致。

$$P_{i,t}^{\text{ch,ac}} = P_{i,t}^{\text{ch}} - \alpha_t^{\text{r}} P_{i,t}^{\text{r,ch}+} + \alpha_t^{\text{r}} P_{i,t}^{\text{r,ch}-} - \beta_t^{\text{reg}} P_{i,t}^{\text{reg,ch}} \quad (47)$$

$$P_{i,t}^{\text{ds,ac}} = P_{i,t}^{\text{ds}} + \alpha_t^{\text{r}} P_{i,t}^{\text{r,ds}+} - \alpha_t^{\text{r}} P_{i,t}^{\text{r,ds}-} + \beta_t^{\text{reg}} P_{i,t}^{\text{reg,ds}} \quad (48)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ch,ac}} \leq \mu_{i,t}^{\text{ch}} \bar{P}_i^{\text{es}} \quad (49)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ds,ac}} \leq \mu_{i,t}^{\text{ds}} \bar{P}_i^{\text{es}} \quad (50)$$

$$\mu_{i,t}^{\text{ch}} + \mu_{i,t}^{\text{ds}} \leq 1 \quad (51)$$

$$e_{i,t}^{\text{es}} = e_{i,t-1}^{\text{es}} + \left( \eta^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch,ac}} - \frac{P_{i,t}^{\text{ds,ac}}}{\eta^{\text{ds}}} \right) \Delta t \quad (52)$$

$$l_i^{\text{es,min}} \bar{E}_i^{\text{es}} \leq e_{i,t}^{\text{es}} \leq l_i^{\text{es,max}} \bar{E}_i^{\text{es}} \quad (53)$$

$$e_{i,0}^{\text{es}} = e_{i,T}^{\text{es}} \quad (54)$$

式中:  $\mu_{i,t}^{\text{ch}}$  和  $\mu_{i,t}^{\text{ds}}$  为 0-1 变量, 分别表示电储能  $i$  的充、放电状态;  $\eta^{\text{ch}}$  和  $\eta^{\text{ds}}$  分别为电储能的充放电效率;  $e_{i,t}^{\text{es}}$  为电储能  $i$  的能量值;  $\bar{E}_i^{\text{es}}$  为电储能  $i$  的容量;  $l_i^{\text{es,min}}$  和  $l_i^{\text{es,max}}$  分别为电储能  $i$  的最小、最大荷电状态;  $e_{i,0}^{\text{es}}$  和  $e_{i,T}^{\text{es}}$  分别为电储能  $i$  在调度周期首、末时刻的能量值。

最终, 复合储能参与多市场的优化模型如下:

$$\max_{x \in \mathcal{X}} C^{\text{total}}(x) \quad (55)$$

式中:  $x = \{x^{\text{offer}}, x^{\text{el}}, x^{\text{fc}}, x^{\text{tk}}, x^{\text{es}}\}$  为决策变量, 其中,  $x^{\text{offer}} = [P_t^{\text{d}}, P_t^{\text{r}}, P_t^{\text{reg}}, P_t^{\text{grid}}](\forall t \in \mathcal{T})$  为各市场的报量及与电网的实际功率交互,  $x^{\text{el}} = [P_t^{\text{el}}, P_t^{\text{r,el+}}, P_t^{\text{r,el-}}, P_t^{\text{reg,el}}, P_t^{\text{el,ac}}, h_t^{\text{el}}, \mu_t^{\text{el}}, \mu_t^{\text{el'}}](\forall t \in \mathcal{T})$  为电解槽相关决策变量,  $x^{\text{fc}} = [P_t^{\text{fc}}, P_t^{\text{r,fc+}}, P_t^{\text{r,fc-}}, P_t^{\text{reg,fc}}, P_t^{\text{fc,ac}}, h_t^{\text{fc}}, \mu_t^{\text{fc}}, \mu_t^{\text{fc'}}](\forall t \in \mathcal{T})$  为燃料电池相关决策变量,  $x^{\text{tk}} = [h_t^{\text{tk+}}, h_t^{\text{tk-}}, h_t^{\text{sell}}, e_t^{\text{tk}}](\forall t \in \mathcal{T})$  为储氢罐相关决策变量,  $x^{\text{es}} = [P_{i,t}^{\text{ch,ac}}, P_{i,t}^{\text{ch}}, P_{i,t}^{\text{r,ch+}}, P_{i,t}^{\text{r,ch-}}, P_{i,t}^{\text{reg,ch}}, P_{i,t}^{\text{ds,ac}}, P_{i,t}^{\text{ds}}, P_{i,t}^{\text{r,ds+}}, P_{i,t}^{\text{r,ds-}}, P_{i,t}^{\text{reg,ds}}, e_{i,t}^{\text{es}}, \mu_{i,t}^{\text{ch}}, \mu_{i,t}^{\text{ds}}](\forall t \in \mathcal{T}, \forall i \in \mathcal{I})$  为电储能相关决策变量;  $\mathcal{X} = \{x | \text{式(2)一式(54)}\}$  为  $x$  对应的可行域。

## 2.3 分布式储能收益分配及经济性分析

### 1) 分布式储能收益分配

针对聚合运行后各分布式储能的收益分配问题, 引入 Shapley 值法<sup>[29]</sup>, 在考虑各主体所做贡献的基础上, 将合作后的利润向各分布式储能主体进行分配。设  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  ( $n$  为集合  $N$  中分布式储能的个数) 为参与聚合的各分布式储能集合, 对于分布式储能  $m \in N$ , 其分配到的利润为  $\varphi_m$ , 计算方法如下:

$$\varphi_m = \sum_{s \subset S_m} \omega(|s|) [\nu(s) - \nu(s \setminus m)] \quad (56)$$

式中:  $S_m$  为集合  $N$  中包含分布式储能  $m$  的所有子集形成的集合;  $s$  为集合  $S_m$  的子集;  $|s|$  为集合  $s$  中分布式储能的个数;  $\nu(s)$  和  $\nu(s \setminus m)$  分别为子集  $s$  的运行利润和子集  $s$  中除去分布式储能  $m$  后的运行利润;  $\omega(|s|)$  为加权因子, 其计算方法如式(57)所示。

$$\omega(|s|) = \frac{(|s| - 1)!(n - |s|)!}{n!} \quad (57)$$

### 2) 分布式储能投资经济性分析

由于系统中不同设备的运行寿命年限不同, 因此, 将复合储能系统总投资成本等效折算为日投资成本, 从而与系统日运行收益对比以评估投资的经济性。折算后的复合储能系统日投资成本  $C^{\text{cap}}$  由电

储能和包含电解槽、储氢罐及燃料电池的氢储能系统共同组成, 具体计算公式如下:

$$C^{\text{cap}} = \kappa(y^{\text{es}})(c^{\text{cap}} \bar{E}^{\text{es}} + c^{\text{con}} \bar{P}^{\text{es}}) + \kappa(y^{\text{el}}) c^{\text{el}} \bar{P}^{\text{el,max}} + \kappa(y^{\text{tk}}) c^{\text{tk}} U^{\text{tk}} + \kappa(y^{\text{fc}}) c^{\text{fc}} \bar{P}^{\text{fc,max}} \quad (58)$$

式中:  $c^{\text{cap}}$  和  $c^{\text{con}}$  分别为电储能单位容量和功率的投资成本;  $c^{\text{tk}}$  为储氢罐的单位体积投资成本;  $c^{\text{el}}$  和  $c^{\text{fc}}$  分别为电解槽和燃料电池的单位功率投资成本;  $\bar{E}^{\text{es}}$  和  $\bar{P}^{\text{es}}$  分别为电储能的容量和最大充放电功率;  $\kappa(y^{\text{es}})$ 、 $\kappa(y^{\text{el}})$ 、 $\kappa(y^{\text{tk}})$  和  $\kappa(y^{\text{fc}})$  分别为将电储能、电解槽、储氢罐和燃料电池投资成本折算为日投资成本的对应折算系数, 具体计算方法如式(59)所示。

$$\kappa(y^{\phi}) = \frac{d(1+d)^{y^{\phi}}}{(1+d)^{y^{\phi}} - 1} \frac{1}{Y_d} \quad \phi \in \{\text{es, el, tk, fc}\} \quad (59)$$

式中:  $y^{\text{es}}$ 、 $y^{\text{el}}$ 、 $y^{\text{tk}}$  和  $y^{\text{fc}}$  分别为电储能、电解槽、储氢罐和燃料电池的寿命年数;  $d$  为贴现率;  $Y_d$  为一年中的总天数。

## 3 算例分析

### 3.1 仿真说明

本文通过一日前 24 h 时段的仿真算例来验证所提运行策略的有效性。电能量市场、旋转备用市场和调频市场价格分别参考美国得克萨斯州和 PJM 市场价格, 见附录 A 图 A1<sup>[19]</sup>。备用市场调用率及调频信号采用美国 PJM 市场公开的辅助服务市场运行数据<sup>[30]</sup>, 其中, 调频市场价格及其调用率分别为各小时内平均值和累加值<sup>[18]</sup>。调频性能评分参考 PJM 市场中储能参与调频市场时的历史评分统计数据, 取 0.95<sup>[31]</sup>。参与聚合的分布式储能包括 3 个电储能和一个氢储能, 3 个电储能的容量分别为 1、0.6、0.4 MW·h, 最大充放电功率分别为 0.5、0.3、0.2 MW。各分布式储能及建模仿真的其他相关已知参数见表 A1。本文所提模型为混合整数线性规划问题, 可通过 MATLAB 建模并调用 Cplex 商业求解器直接求解。

本文分别对复合储能系统的 4 种商业运营模式进行了对比分析, 具体如下: 模式 1 为仅参与电能量市场; 模式 2 为同时参与电能量市场与旋转备用市场; 模式 3 为同时参与电能量市场与调频市场; 模式 4 为同时参与电能量市场、旋转备用市场及调频市场。

### 3.2 储能系统收益

#### 1) 复合储能系统收益

表 1 展示了复合储能系统在不同运营模式下的利润对比。可以看出, 模式 1 即仅参与日前电能量

市场的总利润最低,在该模式下盈利主要通过售氢及峰谷价差套利。此外,4种模式下日前电能量市场收益均为负,这是由于复合储能系统中并无电源,因此,需要通过电能量市场大量购电进而参与辅助服务市场并售氢进行盈利。同时,由表1可得出以

下结论:1)储能系统通过参与辅助服务市场带来的收益远大于仅参与电能量市场;2)对比模式2和3可以看出,复合储能在调频市场中的收益大于旋转备用市场;3)同时参与电能量市场、旋转备用市场及调频市场可使复合储能系统利润最大化。

表1 不同运营模式下利润对比  
Table 1 Profit comparison of different operation modes

模式编号	日前收益/美元	备用收益/美元	调频收益/美元	卖氢收益/美元	运行成本/美元	总利润/美元
1	-171.34			285.00	73.22	40.42
2	-1 466.33	1 503.22		792.19	245.05	584.02
3	-1 418.99		2 292.50	1 323.18	404.15	1 792.53
4	-1 608.97	371.72	2 241.77	1 323.27	404.69	1 923.11

## 2)各分布式储能收益分配

表2所示为基于Shapley值法各分布式储能主体在不同运营模式下的利润分配。可以看出,不同运营模式下各分布式储能的利润之和与表1中对应的总利润相等。同时,对比各分布式储能在各模式下独立运营的利润,可以得出通过合作所获得的利润增长及增长率。由此看出,在参与辅助服务市场

的模式下,包括电储能和氢储能在内的各分布式储能利润均有所增长,这不仅证明了分布式储能聚合运营的优势,也证明了利润分配的合理性。在模式3下氢储能的利润增长率巨大,这主要是因为在与电储能合作后,氢储能的大容量优势为整个复合储能系统在调频市场的收益作出了较大的贡献,因而为其分配的利润更高。

表2 各分布式储能在不同运营模式下的利润分配  
Table 2 Profit distribution of distributed energy storage in different operation modes

模式编号	电储能1			电储能2			电储能3			氢储能		
	利润/美元	利润增长/美元	增长率/%	利润/美元	利润增长/美元	增长率/%	利润/美元	利润增长/美元	增长率/%	利润/美元	利润增长/美元	增长率/%
1	13.62	0	0	8.17	0	0	5.45	0	0	13.17	0	0
2	98.76	7.70	8.46	59.30	4.67	8.55	39.52	3.10	8.52	386.43	15.80	4.26
3	548.02	335.10	157.38	328.83	201.08	157.41	218.59	133.42	156.66	697.07	683.90	5 192.91
4	482.27	267.19	124.23	287.17	158.12	122.53	191.10	105.07	122.13	962.56	591.93	159.71

## 3.3 市场报量及运行策略

图2分别展示了复合储能系统在不同运营模式下的市场报量策略。图3则进一步展示了在模式4下复合储能系统在旋转备用市场及调频市场的实际响应量,分别等于备用及调频报量乘以备用调用率和调频信号。

由图2可见,对于参与辅助服务市场的3种运营模式绝大部分时段复合储能系统都从电能量市场进行购电以提供辅助服务。在模式1下储能系统仅参与日前电能量市场,结合图2电价曲线及表2收益情况可以看出,储能系统在电价较低时段购电存储至高价时段出售盈利,同时利用购买的低价电能生产氢气并售出。在模式2下储能系统在旋转备用市场的报量曲线并不与备用价格曲线一致,这是由于在进行备用报量时不仅需要考虑备用价格,还需要考虑各时段的备用调用率。而在模式3下各时段调频报量大体一致,这是由于调频市场收益显著大

于其他市场且调频收益的结算与调频调用率不直接相关,因此,复合储能系统在各时段尽量保证最大报量来实现收益最大化。其中,时段17和18由于处于电能量市场价格高点,储能系统进行了少量售电。

模式4下由于调频市场收益大于备用市场,大部分时段复合储能系统仅参与调频市场,而备用报量主要集中在时段3、7、16~18、23~24,原因如下:在时段16~18,备用价格及电能量市场价格均处于高位,同时备用调用率也为正,备用市场结算可获得较大收益;在时段3,虽然备用价格较低且调用率为负,但此时电能量市场价格几乎处于最低位,储能系统在此时参与备用市场可以较低成本从电网获得电能进而存储用于后续辅助服务;而在时段7和23~24进行备用报量时备用调用率为0,备用报量对复合储能系统的功率调度影响有限。

## 3.4 系统运行

图4所示为模式4下复合储能系统中各模块调

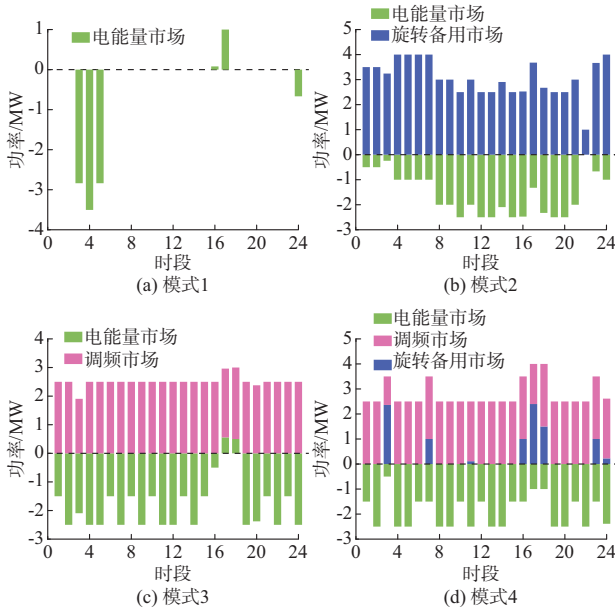


图2 不同市场参与模式下的最优报量策略  
Fig. 2 Optimal power trading strategies in different market participation modes

度运行图。结合表1可看出,各模块都在各自设备运行约束内工作,同时电解槽、燃料电池及电储能都没有满功率运行,这是由于报量约束的存在且实际备用及调频调用率未达到100%。

从图4(c)可看出,大部分时段下储能系统都进行了氢气的出售,而由于氢气的大量售出也导致燃料电池大部分时段以较低功率值运行,这是因为氢气的出售可以给储能系统带来较大的收益,这也可从表2中得到证实。而在时段16~18,燃料电池功率显著增大,这是由于该时段同时存在备用及调频报量且备用调用率为较高的正值,燃料电池需增加出力。此时,储氢罐也主要为燃料电池供气,从而减

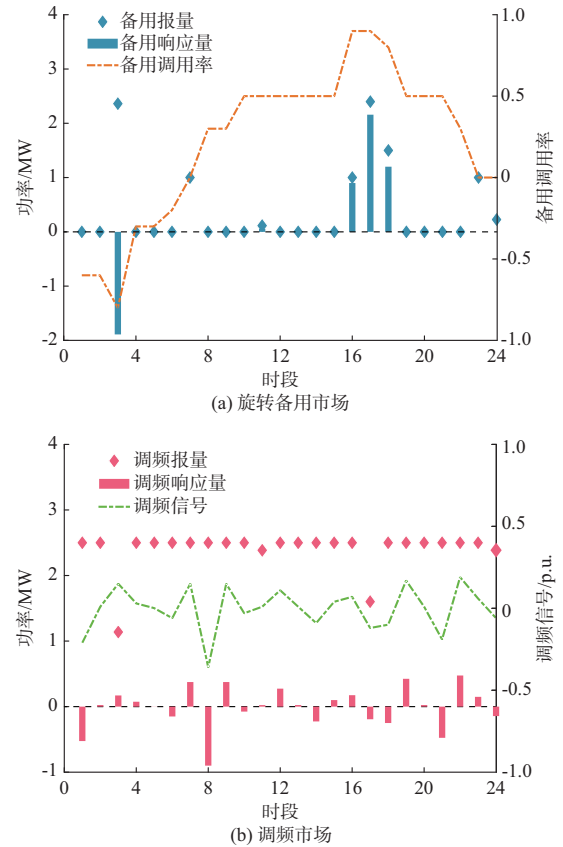


图3 不同市场的调用及响应量  
Fig. 3 Calls and responses in different markets

少了氢气的售卖。相比仅参与电能量市场的模式,额外参与备用和调频辅助服务市场也使得复合储能系统需要不断地进行响应。图4(d)为各分布式电储能总的充放电功率,频繁的充放电过程也侧面说明分布式储能参与辅助服务市场的同时提高了储能的利用率。

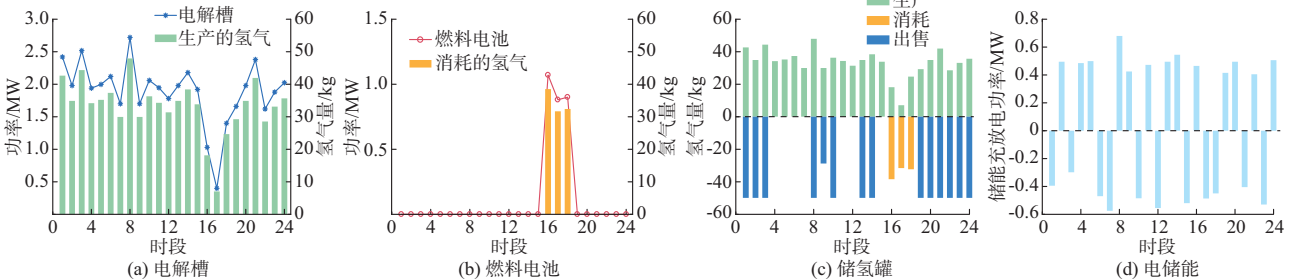


图4 复合储能系统调度运行  
Fig. 4 Dispatching operation of composite energy storage system

### 3.5 合作互补性分析

本节进一步对比分析了独立运行下的各分布式储能和合作模式下的复合储能各模式下的收益。其中,在电储能独立运行与复合储能合作运行情况下,由于电储能的快速响应能力,调频性能评分均为

0.95。氢储能独立运行时由于灵活性调节能力不及电储能,因此调频性能评分必然较低。但由于当前氢储能参与调频仍处于理论研究阶段,而调频性能评分是基于评分计算规则,根据调频机组的实际运行结果计算而得,尚无法直接获得氢储能的调频性



能评分。为此,本文根据文献[31]中其他各类调频机组的评分,对比氢储能与各类机组的技术特点,设置氢储能在独立运行时的调频性能评分为0.8。表3所示为不同储能参与主体在各运营模式下的利润对比。

表3 不同主体在各运营模式下的利润对比  
Table 3 Profit comparison of different entities in various operation modes

模式 编号	独立运行利润/美元				合作运行 利润/美元
	电储能1	电储能2	电储能3	氢储能	复合储能
1	13.62	8.17	5.45	13.17	40.42
2	91.06	54.63	36.42	370.63	584.02
3	212.92	127.75	85.17	13.17	1 792.53
4	215.08	129.05	86.03	370.63	1 923.11

通过表3可进一步得出以下结论:

1)各运营模式下,相比电储能和氢储能各自独立运行,合作运行后的复合储能可以获得更大的收益,这说明了电储能和氢储能可以形成优势互补。这是由于电储能的加入提高了复合储能的灵活调节能力,从而提高了调频性能评分。而氢储能的大容量优势使得复合储能可以在各市场进行更多的报量从而增加收益。

2)在独立运行情况下,各电储能在调频市场获得的收益要高于备用市场,这与电储能具有较高调频性能评分有关;而氢储能在备用市场获得的收益远大于在调频市场获得的收益,这主要由两点原因造成:一是氢储能利用旋转备用市场的结算规则可以在获得备用容量收益的同时以低价获得电能,进而通过电解槽制氢并售出获得大量利润;二是氢储能的调频性能评分相对电储能较低。因此,参与调频市场的意愿也没有电储能高。

### 3.6 敏感性分析

在模式4下复合储能的收益来源于多个市场,但由表1可以看出,其中,调频市场收益占比最大。而调频市场收益与复合储能系统的两个参数密切相关:1)进行调频报量时电储能的最小占比;2)复合储能系统参与调频市场的性能表现评分。为此,本文基于上述参数对复合储能系统总收益的影响进行了敏感性分析,如图5所示。

由图5可看出,随着调频报量时电储能最低占比要求的下降及复合储能系统性能评分的增高,系统的总收益明显增大。但实际应用时,由于在复合储能系统中电储能具有更好的调节能力,要获得更高的调频性能评分势必需要更大的电储能报量占

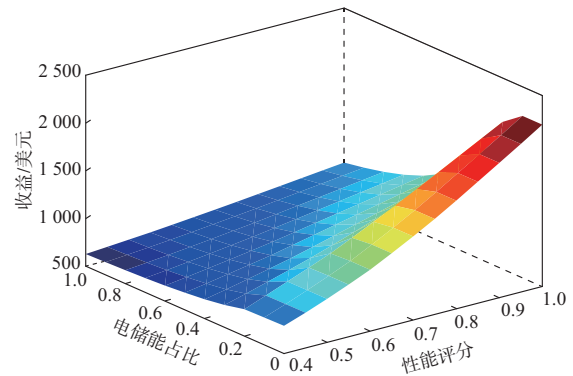


图5 复合储能收益敏感性分析  
Fig. 5 Sensitivity analysis of income for composite energy storage

比,而这又会降低总收益。因此,对于提高复合储能系统收益的目的来说,电储能调频报量最小占比与性能表现评分是互为矛盾的两个参数。在实际应用中,关于调频资源性能评分的计算,不同市场有不同的计算方法,复合储能参与方需要结合当地市场评分计算方法合理地安排电储能最小调频报量占比,从而实现收益最大化。

### 3.7 投资经济性分析

本节进一步分析了在考虑投资成本的情况下不同主体在各运营模式下的盈利情况。通过2.3节的投资成本计算公式可以计算出复合储能系统折算后的日投资成本为1 222.34美元,其中,各分布式电储能和氢储能系统的日投资成本分别为52.89、31.73、21.15美元和1 116.56美元,可看出氢储系统的投资成本远高于电储能系统。

为进行投资经济性分析,引入盈利率这一指标,其值等于参与市场主体的净利润除以其对应的日投资成本,若为正则表示盈利,为负则意味着亏损。净利润则等于3.2节表2中的利润减去对应的日投资成本,从而可以得到表4,即合作运行时考虑投资成本后不同储能主体在各运营模式下的经济性对比。通过表4可得出以下结论:

1)在考虑投资成本的情况下各分布式电储能通过参与辅助服务市场仍能实现盈利,尤其是在参与调频市场的场景下,其收益远大于投资成本。

2)氢储能系统即使参与多个市场其收益仍然不能覆盖投资成本,说明当前氢储能系统作为一个独立主体进行投资时仍不具有经济性。

3)复合储能系统在参与调频市场的场景下其收益不仅可以覆盖整体的投资成本,还可以实现较高的盈利率。在参与调频市场的场景下虽然盈利率相比仅电储能的情况明显减少了,但净利润显著增加了。这说明虽然目前氢储能系统仍不具有独立的投



资经济性,但通过与电储能合作形成复合储能系统则可实现双赢,从而使复合储能系统整体具有投资经济性。

表4 合作运行时不同主体在各运营模式下的投资经济性对比  
Table 4 Comparison of investment economy of different entities in various operation modes during cooperative operation

模式编号	电储能1			电储能2			电储能3			氢储能			复合储能		
	总利润/美元	净利润/美元	盈利率/%	总利润/美元	净利润/美元	盈利率/%	总利润/美元	净利润/美元	盈利率/%	总利润/美元	净利润/美元	盈利率/%	总利润/美元	净利润/美元	盈利率/%
1	13.62	-39.26	-74.24	8.17	-23.55	-74.24	5.45	-15.70	-74.23	13.17	-1103.38	-98.82	40.42	-1181.92	-96.69
2	98.76	45.87	86.73	59.30	27.57	86.89	39.52	18.37	86.87	386.43	-730.12	-65.39	584.02	-638.32	-52.22
3	548.02	495.13	936.16	328.83	297.10	936.36	218.59	197.44	933.54	697.07	-419.48	-37.57	1792.53	570.19	46.65
4	482.27	429.38	811.85	287.17	255.44	805.05	191.10	169.95	803.55	962.56	-154.00	-13.79	1923.11	700.77	57.33

#### 4 结语

随着新能源规模的不断增长,各类分布式储能技术也快速发展,其中,电化学储能当前发展最为迅速,氢储能则被看作是未来最有前景的储能技术之一。充分发挥分布式电储能与氢储能的特点以应对新能源波动性对电网的影响,同时丰富储能盈利方式以提高其收益具有重要研究意义。

本文结合电储能与氢储能运行特点,提出了聚合分布式储能形成复合储能系统,并同时参与电能量市场及辅助服务市场的多市场运行策略。此外,基于合作运行时各分布式储能的贡献度,采用Shapley值法进行了收益分配。研究表明,功率型电储能会更多地参与调频市场,而能量型氢储能系统则更偏向于旋转备用市场,同时得出了以下主要结论:

1)复合储能同时参与电能量市场、旋转备用市场及调频市场可以实现收益最大化,所获得的收益远大于仅参与电能量市场。

2)合作运行参与辅助服务市场的模式下,各分布式储能的收益均大于独立运行时的收益。

3)电储能与氢储能可以实现优势互补,合作模式下复合储能参与多市场获得的收益显著高于两者各自独立运营所获得的收益之和。

4)在基于调频表现结算的频率调节市场中,复合储能的性能评分与电储能的最小调频报量占比直接影响最终收益。而这两个参数又互相影响制约,因此,复合储能运营者需要结合具体评分计算方法合理地设置电储能最小调频报量占比才可使收益最大化。

5)在考虑投资成本的情况下,氢储能系统作为一个独立主体参与多市场仍不能实现盈利。但氢储能系统通过与电储能合作作为一个复合储能系统共

同投资并参与多市场则可实现盈利最大化,总利润不仅可以覆盖投资成本,还可以实现较高的盈利率。

由于复合储能系统中不同的电储能和氢储能容量占比会对最终收益产生影响,需要确定不同储能容量的最优占比,研究固定投资成本下不同储能的最优投资将是下一步的工作。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

#### 参考文献

- [1] 魏泓屹,卓振宇,张宁,等.中国电力系统碳达峰·碳中和转型路径优化与影响因素分析[J].电力系统自动化,2022,46(19): 1-12.  
WEI Hongyi, ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, et al. Transition path optimization and influencing factor analysis of carbon emission peak and carbon neutrality for power system of China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (19) : 1-12.
- [2] 任大伟,肖晋宇,侯金鸣,等.双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J].电网技术,2022,46(10):3831-3839.  
REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Construction and evolution of China's new power system under dual carbon goal[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831-3839.
- [3] STECKEL T, KENDALL A, AMBROSE H. Applying levelized cost of storage methodology to utility-scale second-life lithium-ion battery energy storage systems[J]. Applied Energy, 2021, 300: 117309.
- [4] 陈启鑫,房曦晨,郭鸿业,等.储能参与电力市场机制:现状与展望[J].电力系统自动化,2021,45(16):14-28.  
CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Participation mechanism of energy storage in electricity market: status quo and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 14-28.
- [5] 赵冬梅,徐辰宇,陶然,等.多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(5):

- 1776-1799.
- ZHAO Dongmei, XU Chenyu, TAO Ran, et al. Review on flexible regulation of multi-element distributed energy storage in distribution side of new power system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1776-1799.
- [6] NASROLAHPOUR E, KAZEMPOUR J, ZAREIPOUR H, et al. A bilevel model for participation of a storage system in energy and reserve markets [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(2): 582-598.
- [7] 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].*电力系统自动化*,2021,45(19):43-51.
- SONG Tianhao, LI Kejiang, HAN Xiaoqing, et al. Coordinated operation strategy of energy storage system participating in multiple application scenarios [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 43-51.
- [8] TANG Z, LIU Y K, WU L, et al. Reserve model of energy storage in day-ahead joint energy and reserve markets: a stochastic UC solution [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 372-382.
- [9] MIMICA M, SINOVIĆ Z, JOKIĆ A, et al. The role of the energy storage and the demand response in the robust reserve and network-constrained joint electricity and reserve market [J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 204: 107716.
- [10] 丁剑,方晓松,宋云亭,等.碳中和背景下西部新能源传输的氢综合能源网构想[J].*电力系统自动化*,2021,45(24):1-9.
- DING Jian, FANG Xiaosong, SONG Yunting, et al. Conception of electricity and hydrogen integrated energy network for renewable energy transmission in Western China under background of carbon neutralization [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(24): 1-9.
- [11] WU X, ZHAO W C, LI H Y, et al. Multi-stage stochastic programming based offering strategy for hydrogen fueling station in joint energy, reserve markets [J]. *Renewable Energy*, 2021, 180: 605-615.
- [12] KHANI H, EL-TAWHEEL N A, FARAG H E Z. Supervisory scheduling of storage-based hydrogen fueling stations for transportation sector and distributed operating reserve in electricity markets [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(3): 1529-1538.
- [13] 杨水丽,李建林,李蓓,等.电池储能系统参与电网调频的优势分析[J].*电网与清洁能源*,2013,29(2):43-47.
- YANG Shuili, LI Jianlin, LI Bei, et al. Advantages of battery energy storage system for frequency regulation [J]. *Power System and Clean Energy*, 2013, 29(2): 43-47.
- [14] 刘硕,于松泰,孙田,等.面向高比例可再生能源电力系统的容量补偿机制研究[J].*电网技术*,2022,46(5):1780-1789.
- LIU Shuo, YU Songtai, SUN Tian, et al. Capacity compensation mechanism for highly-proportional renewable energy power systems [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(5): 1780-1789.
- [15] 周校聿,刘尧,鲍福增,等.百兆瓦级储能参与电网双重辅助服务调度的联合优化模型[J].*电力系统自动化*,2021,45(19):60-69.
- ZHOU Xiaoyu, LIU Rao, BAO Fuzeng, et al. Joint optimization model for hundred-megawatt-level energy storage participating in dual ancillary services dispatch of power grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 60-69.
- [16] 张舒鹏,董树锋,徐成司,等.大规模储能参与电网调频的双层控制策略[J].*电力系统自动化*,2020,44(19):55-62.
- ZHANG Shupeng, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Bi-level control strategy for power grid frequency regulation with participation of large-scale energy storage [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(19): 55-62.
- [17] 刘佳婕,贾燕冰,陈浩,等.考虑实时调频需求的辅助服务市场机制及调度策略研究[J].*电网技术*,2022,46(4):1269-1278.
- LIU Jiajie, JIA Yanbing, CHEN Hao, et al. Market mechanism and scheduling strategy of ancillary services considering real-time frequency regulation requirements [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(4): 1269-1278.
- [18] WU X, ZHAO J, CONEJO A J. Optimal battery sizing for frequency regulation and energy arbitrage [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(3): 2016-2023.
- [19] HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(5): 2359-2367.
- [20] HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Cooperation of wind power and battery storage to provide frequency regulation in power markets [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3559-3568.
- [21] KAZEMI M, ZAREIPOUR H, AMJADY N, et al. Operation scheduling of battery storage systems in joint energy and ancillary services markets [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1726-1735.
- [22] 陈达鹏,荆朝霞.美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析[J].*电力系统自动化*,2017,41(18):1-9.
- CHEN Dapeng, JING Zhaoxia. Analysis of frequency modulation compensation mechanism in frequency modulation ancillary service market of the United States [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(18): 1-9.
- [23] 陈中飞,荆朝霞,陈达鹏,等.美国调频辅助服务市场的定价机制分析[J].*电力系统自动化*,2018,42(12):1-10.
- CHEN Zhongfei, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng, et al. Analysis on pricing mechanism in frequency regulation ancillary service market of United States [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(12): 1-10.
- [24] 林阿竹,柯清辉,江岳文.独立储能参与调频辅助服务市场机制设计[J].*电力自动化设备*,2022,42(12):26-34.
- LIN Azhu, KE Qinghui, JIANG Yuewen. Mechanism design of independent energy storage participating in FM auxiliary service market [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(12): 26-34.
- [25] BARELLI L, BIDINI G, CHERUBINI P, et al. How hybridization of energy storage technologies can provide additional flexibility and competitiveness to microgrids in the context of developing countries [J]. *Energies*, 2019, 12(16): 3138.
- [26] LAI S Y, QIU J, TAO Y C. Credit-based pricing and planning strategies for hydrogen and electricity energy storage sharing [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13

- (1): 67-80.
- [27] 刘士齐, 王军华, 乔锐勋, 等. 辅助服务市场中混合储能系统功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3515-3525.  
LIU Shiqi, WANG Junhua, QIAO Ruixun, et al. Power coordination control strategy of hybrid energy storage system in auxiliary service market[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3515-3525.
- [28] PJM manual 28: operating agreement accounting [EB/OL]. [2022-11-07]. <http://www.pjm.com/~media/documents/manuals/m28-redline.ashx>.
- [29] SINGH A, SETHI B K, SINGH D, et al. Shapley value method and stochastic Dantzig-Wolfe decomposition for decentralized scheduling of multimicrogrid [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 16(2): 2672-2683.
- [30] Ancillary services [EB/OL]. [2022-04-19]. <https://www.pjm.com/markets-and-operations/ancillary-services>.
- [31] LEE T. Energy storage in PJM: exploring frequency regulation market transformation [R]. Philadelphia, USA: Kleinman Center for Energy Policy, 2017.
- 朱宗耀(1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力市场、电力系统规划。E-mail: zzy\_xjtu@163.com
- 王秀丽(1961—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统规划及可靠性、电力市场。E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn
- 吴雄(1986—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 微电网优化运行、电力市场。E-mail: wuxiong@mail.xjtu.edu.cn
- (编辑 鲁尔姣)

### Operation Strategy for Composite Energy Storage Participating in Electric Energy and Ancillary Service Markets

ZHU Zongyao<sup>1</sup>, WANG Xiuli<sup>1</sup>, WU Xiong<sup>1</sup>, SONG Zhenzi<sup>1</sup>, CHEN Xianlong<sup>1</sup>, HUANG Ruanming<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Economic Research Institute of State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** On the dual background of the rapid expansion of the proportion of renewable energy and power marketization, fully exploiting the complementary characteristics of power-based battery energy storage and energy-based hydrogen energy storage and making them cooperatively participate in the electric energy market and ancillary service markets can not only maximize the benefits of composite energy storage, but also provide effective support to the safe operation of the power system. First, on the basis of analyzing the operation rules of the electric energy market, the spinning reserve market and the performance-based frequency regulation ancillary service market, combined with the characteristics of battery energy storage and hydrogen energy storage, a composite energy storage multi-market operation strategy of aggregating distributed battery energy storage and hydrogen energy storage is proposed. Then, based on the contribution of each distributed energy storage during the aggregation operation, the Shapley value method is used to allocate benefits. Finally, the effectiveness of the proposed model is verified by case simulation. The results show that, compared with the independent operation of distributed battery energy storage and hydrogen energy storage, the cooperative operation can bring greater benefits, and the revenue obtained by jointly participating in the electric energy and ancillary service markets is significantly higher than that obtained by only participating in the electric energy market.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2022YFB2403100).

**Key words:** composite energy storage; battery energy storage; hydrogen energy storage; spinning reserve market; frequency regulation ancillary service market

