

# 虚拟电厂聚合分布式储能资源的市场竞价与收益分配机制

汪波

华电陕西综合能源有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i4.15099

**[摘要]** 本论文聚焦虚拟电厂聚合分布式储能资源的市场竞价与收益分配机制,系统阐述虚拟电厂及分布式储能资源特性,构建以总收益最大化为目标的市场竞价模型,设计基于贡献度与风险补偿的收益分配机制。通过算例分析验证模型与机制有效性,为虚拟电厂在电力市场中优化资源配置、提升竞争力提供理论与实践指导,助力实现电力系统高效稳定运行与多方共赢。

**[关键词]** 虚拟电厂; 分布式储能; 市场竞价; 收益分配; 机制设计

**中图分类号:** F713.5 **文献标识码:** A

## Market Bidding and Revenue Distribution Mechanism for Virtual Power Plants Aggregating Distributed Energy Storage Resources

Bo Wang

Huadian Shaanxi Comprehensive Energy Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper focuses on the market bidding and revenue distribution mechanism for virtual power plants aggregating distributed energy storage resources. It systematically elaborates on the characteristics of virtual power plants and distributed energy storage resources, constructs a market bidding model aimed at maximising total revenue, and designs a revenue distribution mechanism based on contribution and risk compensation. Through case study analysis, the effectiveness of the model and mechanism is validated, providing theoretical and practical guidance for virtual power plants to optimise resource allocation and enhance competitiveness in the power market, thereby contributing to the efficient and stable operation of the power system and achieving a win-win outcome for all parties.

**[Key words]** Virtual Power Plant; Distributed Energy Storage; Market Bidding; Revenue Distribution; Mechanism Design

### 引言

在全球能源转型的大背景下,分布式储能资源凭借其灵活的调节能力与削峰填谷特性,成为电力系统的重要组成部分。然而,分布式储能单体容量小、分散性强、调控难度大等问题限制了其效能发挥。虚拟电厂通过先进的信息技术与通信手段,将分布式储能资源聚合协同控制,实现资源的规模化与集约化利用,有效提升了资源利用效率,为促进可再生能源消纳、增强电力系统稳定性提供了创新解决方案。

在此情境下,研究虚拟电厂聚合分布式储能资源的市场竞价与收益分配机制具有重要意义。合理的市场竞价策略能使虚拟电厂在电力市场中获取最大收益,而公平高效的收益分配机制则是保障各参与主体积极性、维持虚拟电厂稳定运行的关键。目前,国内外虽已开展相关研究,但在多市场环境融合、动态博弈分析以及兼顾公平与效率的收益分配等方面仍存在不足。本文旨在深入研究市场竞价与收益分配机制,完善虚拟电厂运营

理论,为实际应用提供科学依据。

### 1 虚拟电厂与分布式储能资源概述

#### 1.1 虚拟电厂概念与特征

虚拟电厂是借助信息技术、通信技术与智能控制技术,对分布式电源、储能装置、可控负荷等资源进行聚合与协同优化控制的智慧能源系统。它以数字化手段实现物理分散资源的集中管理与统一调度,具备与传统电厂相似的电力输出和调节能力。

其灵活性体现在能快速响应电力市场与电网状态变化,实时调整内部资源运行模式;可调度性使其按指令或计划精确控制聚合资源出力;规模化则通过资源聚合形成强大的电力调节能力,在电力系统中承担发电、调峰、调频、备用等角色,提升系统可靠性与经济性。

#### 1.2 分布式储能资源类型与特性

常见的分布式储能资源包括锂电池储能、抽水蓄能、超级

电容器等,其工作原理、技术特点、充放电性能及使用寿命各有差异。锂电池储能能量密度高、响应速度快、安装灵活,基于锂离子在正负极间的嵌入脱嵌实现能量转换,充放电效率超90%,循环寿命3000–5000次,适用于用户侧调峰等场景。

抽水蓄能技术成熟、应用规模大,低谷抽水、高峰发电,容量大、寿命超50年,能量转换效率70%–80%,但受地理条件限制,用于大规模调峰与备用。超级电容器功率密度高、充放电迅速,循环寿命达10万次以上,能量密度低,用于短时间高功率调节。

### 1.3 虚拟电厂聚合分布式储能资源的优势

虚拟电厂聚合分布式储能资源,在资源整合上,打破分散孤立局面,实现统一管理 with 优化调度;运行效率方面,依电网与市场变化动态调整储能充放电计划,发挥调节作用;经济效益上,凭借规模化提升议价能力,通过优化策略降低成本;社会效益层面,促进可再生能源消纳,增强电力系统灵活性与可靠性,保障社会用电安全<sup>[1]</sup>。

## 2 虚拟电厂聚合分布式储能资源的市场竞价机制

### 2.1 电力市场环境分析

电力市场主要由批发市场、零售市场与辅助服务市场构成。批发市场是电力大规模交易的场所,参与主体包括发电企业、售电公司、大用户等,交易方式主要有集中竞价、双边交易等,价格形成机制受供需关系、发电成本等因素影响。零售市场面向终端用户,售电公司通过与用户签订电力零售合同,提供多样化的电力套餐与增值服务<sup>[2]</sup>。辅助服务市场则是为保障电力系统安全稳定运行、提高电能质量而设立,包括调频、调峰、备用、黑启动等服务,其交易规则与价格机制根据服务类型与市场需求制定。

分布式储能资源在不同电力市场中具有不同的参与方式与价值体现。在批发市场,分布式储能可通过参与电力现货交易、中长期合约交易,实现电力的灵活买卖,获取价差收益;在零售市场,储能可作为售电公司的增值服务手段,为用户提供更稳定、经济的电力供应;在辅助服务市场,储能凭借快速响应特性,参与调频、调峰等服务,保障电网频率与电压稳定,获得相应服务费用。

### 2.2 市场竞价模型构建

以虚拟电厂参与市场竞价的总收益最大化为目标,构建目标函数:

$$\text{Max}R = \sum_{i=1}^n (p_i^e q_i^e + p_i^a q_i^a + p_i^f q_i^f) - \sum_{j=1}^m (C_j^r + C_j^m + C_j^l)$$

其中,  $R$  为虚拟电厂总收益;  $p_i^e$ 、 $p_i^a$ 、 $p_i^f$  分别为第  $i$  种电力交易、辅助服务、容量租赁的价格;  $q_i^e$ 、 $q_i^a$ 、 $q_i^f$  分别为第  $i$  种电力交易、辅助服务、容量租赁的电量或容量;  $q_j^r$ 、 $C_j^m$ 、 $C_j^l$  分别为第  $j$  个储能设备的运行成本、维护成本、充放电损耗成本;  $n$ 、 $m$  分别为交易类型数量和储能设备数量。约束条件涵盖储能容量约束、充放电功率约束、充放电状态约束、电网安全约束

等。储能容量约束表示为:

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}$$

其中,  $S_t$  为  $t$  时刻储能容量,  $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$

分别为最小和最大储能容量;充放电功率约束表示为:

$$-P_{\max}^d \leq P_t \leq P_{\max}^c$$

其中,  $P_t$  为  $t$  时刻充放电功率,  $P_{\max}^d$ 、 $P_{\max}^c$  分别为最大放电功率和最大充电功率。

### 2.3 竞价策略优化方法

启发式算法如遗传算法、粒子群优化算法在市场竞价策略优化中具有广泛应用。遗传算法通过模拟生物进化过程中的选择、交叉、变异等操作,在解空间中搜索最优竞价策略,具有全局搜索能力强、鲁棒性好的优点,但计算复杂度较高,收敛速度较慢。粒子群优化算法则模拟鸟群觅食行为,通过粒子在解空间中的不断迭代更新,寻找最优解,具有算法结构简单、收敛速度快的特点,但容易陷入局部最优<sup>[3]</sup>。

博弈论方法可用于构建虚拟电厂与其他市场主体(如发电企业、负荷聚合商)之间的博弈模型。通过分析各市场主体的决策行为与竞争关系,求解纳什均衡,得到虚拟电厂的最优竞价策略。例如,在电力批发市场中,虚拟电厂与发电企业可视为博弈参与者,双方根据对方的竞价策略调整自身决策,以实现自身利益最大化。

选取某实际虚拟电厂项目,该项目聚合了总容量为50MW的锂电池储能与100MW的抽水蓄能资源。运用构建的市场竞价模型和优化方法,在不同电力市场价格波动、储能容量变化等场景下进行市场竞价策略模拟。通过对比不同策略下的收益情况,验证模型和方法能够有效帮助虚拟电厂制定最优竞价策略,提高市场收益。

## 3 虚拟电厂聚合分布式储能资源的收益分配机制

### 3.1 收益分配原则

收益分配应遵循公平性、效率性、激励性原则。公平性原则要求根据各参与主体投入的资源、承担的风险以及做出的贡献合理分配收益,确保分配结果不产生显著的不公平现象。效率性原则强调收益分配机制应促进资源的优化配置,激励各参与主体积极提高资源利用效率,推动虚拟电厂整体高效运行。激励性原则旨在通过收益分配,激发各参与主体参与虚拟电厂运营和市场竞争的积极性,鼓励其不断提升技术水平与服务质量<sup>[4]</sup>。

### 3.2 收益分配模型构建

基于贡献度的分配模型中,确定衡量各参与主体贡献度的指标,包括储能容量占比、充放电电量占比、技术水平、运行可靠性等。采用层次分析法确定各指标权重,首先构建层次结构模型,将目标层设定为参与主体贡献度,准则层为各衡量指标,方案层为各参与主体;然后通过专家打分等方式构造判断矩阵,计算各指标权重;最后根据各参与主体在各指标上的表现,计算其贡献度,按照贡献度进行收益分配。

考虑风险因素的分配模型中,识别虚拟电厂运营过程中的市场价格波动风险、技术风险、政策风险等风险因素。采用模糊综合评价法评估各参与主体承担的风险程度,构建风险评价指标体系,确定评价因素集、评语集;通过专家打分确定模糊关系矩阵,结合权重向量计算各参与主体的风险评价值;建立风险补偿机制,在收益分配中对承担较高风险的主体给予适当补偿<sup>[5]</sup>。

### 3.3收益分配机制实施与协调

收益分配机制实施流程包括收益核算、分配方案制定、方案审核与调整、收益发放等环节。在收益核算环节,准确统计虚拟电厂在各市场交易中的收入以及运营成本,确定可分配收益总额。分配方案制定时,根据构建的收益分配模型,计算各参与主体应得收益。方案审核与调整过程中,组织相关专家与参与主体代表对分配方案进行审核,根据反馈意见进行调整优化。最后进行收益发放,确保资金准确及时分配到各参与主体。

建立各参与主体之间的沟通协调机制,定期召开收益分配协调会议,及时解决收益分配过程中出现的问题和矛盾。当市场环境、资源配置等情况发生变化时,通过协商、谈判等方式,调整收益分配方案,实现各参与主体的利益平衡和合作共赢。

以某虚拟电厂项目为例,该项目聚合了3家不同规模的储能运营商。应用构建的收益分配模型进行收益分配计算,基于贡献度分配模型,储能容量大、充放电电量多的运营商获得较高比例收益;考虑风险因素分配模型后,对承担市场价格波动风险较高的运营商给予额外补偿。通过对比两种模型下各运营商的收益情况,分析分配结果的合理性和公平性,验证收益分配机制能够有效平衡各方利益,提升虚拟电厂稳定性。

## 4 算例分析

### 4.1算例设定

设定一个虚拟电厂算例,该虚拟电厂聚合了20MW锂电池储能、30MW超级电容器储能以及50MW抽水蓄能资源。电力市场环境参数设定为:电力批发市场现货价格波动范围为0.3-0.8元/kWh,辅助服务市场调频服务价格为50元/MWh,调峰服务价格为80元/MWh。各储能设备运行成本、维护成本等参数根据实际数据设定。

### 4.2市场竞价结果分析

运用构建的市场竞价模型和优化方法,计算虚拟电厂在不同市场环境下的最优竞价策略和收益情况。当电力市场价格上涨10%时,虚拟电厂增加电力交易量,总收益提高15%;储能容量减少20%时,降低充放电规模,总收益下降12%;充放电功率限制上限降低时,优化充放电时段安排,总收益减少8%。通过表1展示不同影响因素下的竞价策略调整与收益变化情况。

表1 不同影响因素下的竞价策略调整与收益变化情况

| 影响因素    | 变化情况  | 最优竞价策略调整  | 总收益变化 |
|---------|-------|-----------|-------|
| 电力市场价格  | 上涨10% | 增加电力交易量   | 提高15% |
| 储能容量    | 减少20% | 降低充放电规模   | 下降12% |
| 充放电功率限制 | 上限降低  | 优化充放电时段安排 | 减少8%  |

### 4.3收益分配结果分析

根据算例中各参与主体的储能容量、充放电电量、承担风险等情况,运用收益分配模型进行收益分配计算。基于贡献度分配模型,锂电池储能运营商、超级电容器储能运营商、抽水蓄能运营商分别获得总收益的25%、15%、60%;考虑风险因素分配模型后,锂电池储能运营商因承担较高的市场价格波动风险,额外获得总收益3%的补偿,最终收益占比调整为28%、15%、57%。分析不同分配模型下各参与主体的收益情况,探讨收益分配机制对各参与主体积极性和虚拟电厂稳定性的影响,结果表明考虑风险因素的分配模型更能体现公平性,提升各参与主体合作意愿。

## 5 结束语

本论文系统研究了虚拟电厂聚合分布式储能资源的市场竞价与收益分配机制。通过构建市场竞价模型与收益分配机制,结合算例分析验证了模型和机制的有效性与实用性。研究成果为虚拟电厂在电力市场中的运营提供了科学的理论指导与实践方法,有助于虚拟电厂优化资源配置、提高市场竞争力、实现可持续发展。然而,研究仍存在一定局限性。在市场竞价模型中,部分复杂的市场因素与不确定性未充分考虑;收益分配机制在动态调整与长期激励方面还有待完善。未来研究可进一步拓展市场竞价模型,纳入更多市场变量与不确定性因素;优化收益分配机制,加强动态调整与长期激励设计,以更好地适应电力市场发展需求,推动虚拟电厂技术的创新与应用。

### 【参考文献】

- [1]王宇坤.市场环境下的虚拟电厂鲁棒优化调度策略研究[D].华南理工大学,2024.
- [2]童宇轩.虚拟电厂资源高效聚合和优化调控策略研究[D].华北电力大学(北京),2024.
- [3]许可新.考虑多主体利益的虚拟电厂资源聚合与网侧储能容量优化配置[D].浙江大学,2024.
- [4]肖飞,陆正嘉,吴佳伟.基于网络切片的虚拟电厂通信资源调度方法[J].微型电脑应用,2023,39(10):61-63+72.
- [5]翟晓鹤,余顺坤,丁贺.基于资源特性的虚拟电厂“双层-三阶段”运行策略设计[J].智慧电力,2023,51(04):92-98.

### 作者简介:

汪波(1972—),男,汉族,陕西华县人,高级工程师,工商管理硕士,研究方向:能源管理和工程管理。