基于粒子群算法的电力市场中的储能技术优化

马　静[1]　杨玉荣[1]　吕明月[1]　刘骁义[2]　何雪婷[3]　赵麒贺[4]
（1. 新疆电力交易中心有限公司　2. 青岛方天科技股份有限公司　3. 杭州洪略信息科技有限公司
4. 山东科技大学）

摘要：针对储能技术在电力市场中的优化策略进行研究。构建电力市场交易模型，涵盖光伏发电、热力发电及集中储能站等关键环节，明确各参与方的盈利模式及优化目标。利用粒子群优化算法（PSO），对光伏企业、热力发电企业和零售商之间的交易流程进行优化，重点分析储能系统在削峰填谷中的经济效益。通过单日电力市场的模拟实验，对比引入和未引入储能系统调峰填谷策略的收益变化，结果表明，储能系统的加入能够显著平滑发电量的波动范围，降低电价的剧烈波动，并改善发电企业和电力零售商的经济效益，缓解光伏发电的并网问题。储能系统的调节作用不仅提高了电力市场的稳定性，还推动了可再生能源的高效利用。通过对电力市场各环节的优化设计和验证，为未来储能技术的广泛应用和新能源市场的可持续发展提供了重要参考。

关键词：粒子群算法；新能源；电力市场；储能技术；策略优化

0 引言

近年来，随着全球能源危机和环境问题的日益严峻，发展清洁能源和实现能源可持续发展成为世界各国的共同目标[1]。在此背景下，储能技术作为一种关键的解决方案，受到各国政府和研究机构的高度重视。

在《关于加快推动新型储能发展的指导意见》中指出，实现碳达峰碳中和，努力构建清洁低碳、安全高效能源体系，是党中央、国务院作出的重大决策部署。对推动能源绿色转型、应对极端事件、保障能源安全、促进能源高质量发展、支撑应对气候变化目标实现具有重要意义[2]。

新能源发电并网难、对电网系统影响大[3]等问题随着能源转型升级进程的推动逐渐显现出来，对包括光伏发电、风力发电等新能源产生的能量进行存储的需求逐步扩大。储能技术在新能源电力市场交易中可以平衡电力供需，提高电网的稳定性和可靠性。目前对于电力市场中新能源储能技术主要采用储电、储氢和储热三种技术[4-5]。

但对于储能系统的有效参与需要满足一系列的实际需求，例如经济需求、技术需求和政策需求。目前国内外学者对储能技术在电力市场上的应用进行探索和研究。丁捷[6]针对目前电力储能经济性分析和评价方法研究存在的问题，从电力储能容量型价值和功率型价值两方面进行理论分析，并开展评价方法研究。

2025-08期电器工业杂志排版设计和印刷发排.indd 84　2025/7/30 下午3:38

李建林[7]基于当前采用“自投资 + 自运营”储能商业模式时投资方难以找准收益点的现象，对该商业模式进行分析，为后期储能产业的大规模商业化提供参考价值。Olmez，Mehmet Emre[8]讨论了该领域未来的研究方向，包括仿真模型在提高对储能与电力市场之间复杂关系的理解方面的潜力。Mulder，Sebastiaan[9]设计了一种算法来模拟储能电力购买策略，为储能持续时间和能量大小提供决策工具。但目前对于储能系统在电力市场交易中对各个交易角色经济收益的影响的研究仍不足，对于储能系统在电力交易中的运行模式不能提供较为优秀的策略指导。

本文旨在探讨电力市场上储能技术策略的优化，通过交易系统建模及优化，分析储能系统在电力市场上对各个交易角色经济收益的影响，为电力市场化改革和储能技术市场策略优化提供理论支持和实践指导。并提出优化储能策略的建议，以期为实现可持续能源发展贡献一份力量。

1 交易系统建模

在本研究中，发电企业主要参与电力零售市场交易。同时考虑了热力发电、光伏发电以及储能站在电力市场交易上的影响及其收益。因此，在本节中，为了明确交易各方的利益，开发了每个交易实体的盈利模式。

1.1 光伏发电收益

光伏发电的收益最大化可以表示为：

$$\max Y_{\mathrm{m}}=\sum_{t=1}^{T}\left(p_{t,\mathrm{m}}q_{t,\mathrm{m}}\Delta t-C_{t,\mathrm{m}}-C_{t,\mathrm{m,S}}\right) \tag{1}$$

式中，$p_{t,\mathrm{m}}$ 和 $q_{t,\mathrm{m}}$ 分别为 m 光伏企业根据零售商提供的 t 时段市场信息在现货能源市场上的时段报价和申报的电力计划；Δt 为 t 与（t-1）时段之间的间隔；$C_{t,\mathrm{m,S}}$ 为 t 时段内超出需求部分发电的储能成本；$C_{t,\mathrm{m}}$ 为 t 时段光伏单元的发电成本，其计算如（2）所示：

$$C_{t,\mathrm{m}}=a_{t,\mathrm{m}}(q_{t,\mathrm{m}}\Delta t)^2+b_{t,\mathrm{m}}q_{t,\mathrm{m}}\Delta t+d_{t,\mathrm{m}}+c_{\varepsilon}\rho_{t,\mathrm{m}}\varepsilon_{t,\mathrm{m}} \tag{2}$$

光伏单元的发电量大于零时，$a_{t,\mathrm{m}}$，$b_{t,\mathrm{m}}$ 和 $d_{t,\mathrm{m}}$ 为发电成本函数的系数，c_{ε}，$\rho_{t,\mathrm{m}}$，$\varepsilon_{t,\mathrm{m}}$ 为当光伏输出低于预期时的惩罚成本。

1.2 热力发电收益

热力发电的收益最大化可以表示为：

$$\max Y_{\mathrm{h}}=\sum_{t=1}^{T}\left(p_{t,\mathrm{h}}q_{t,\mathrm{h}}\Delta t-C_{t,\mathrm{h}}-C_{t,\mathrm{h,S}}\right) \tag{3}$$

式中，$p_{t,\mathrm{h}}$ 和 $q_{t,\mathrm{h}}$ 分别为热力发电厂在基于零售商提供的该时期市场信息给出的 t 时段的报价和发电计划；$C_{t,\mathrm{h,S}}$ 为 t 时段内超出需求部分发电的储能成本；$C_{t,\mathrm{h}}$ 为热力发电机在该时期 $q_{t,\mathrm{h}}$ 生产电能的成本，可以通过式（4）计算：

$$C_{t,\mathrm{h}}=a_{t,\mathrm{h}}(q_{t,\mathrm{h}}\Delta t)^2+b_{t,\mathrm{h}}q_{t,\mathrm{h}}\Delta t+d_{t,\mathrm{h}} \tag{4}$$

式中，$a_{t,\mathrm{h}}$、$b_{t,\mathrm{h}}$ 和 $d_{t,\mathrm{h}}$ 为当热力发电机的值大于零时发电成本函数的系数。

1.3 集中储能站收益

集中储能站的收益最大化可以表示为：

$$\max Y_{\mathrm{S}}=\sum_{t=1}^{T}\left(R_{t,\mathrm{spot}}+R_{t,\mathrm{ca}}-C_{t,\mathrm{S}}\right) \tag{5}$$

式中，$R_{t,\mathrm{spot}}$ 为集中储能站在 t 时段进入现货市场的存储电量收入；$R_{t,\mathrm{ca}}$ 为 t 时段发电厂提供的储能设施租赁费用；$C_{t,S}$ 为 t 时段内储能电站的运维成本。

1.4 零售商收益

在 t 期间，电力零售商与发电厂协商的价格差异为：

$$\begin{aligned}Bar(\sigma_1,\sigma_2)&=(Q_{t-1}-q_{t-1,\mathrm{m}}\Delta t-q_{t-1,\mathrm{h}}\Delta t)/\sigma_1\\&+(p_{t-1}q_{t-1,\mathrm{m}}\Delta t+p_{t-1}q_{q-1,\mathrm{h}}\Delta t-X_{t-1})/\sigma_2\end{aligned} \tag{6}$$

式中，$Q_{t\text{-}1}$ 为（t-1）时间段内的消耗；$X_{t\text{-}1}$ 为电力零售商在（t-1）期间的售电收入与购电成本之间的差额；σ_1，σ_2 为迭代步长。

在式（6）的基础上，光伏和火力发电公司的最终电价为：

2025-08期电器工业杂志排版设计和印刷发排.indd 85 2025/7/30 下午3:38

$$\tilde{p}_{t,\mathrm{m}} = p_{t,\mathrm{m}} + Bar(\sigma_1,\sigma_2) \quad (7)$$

$$\tilde{p}_{t,\mathrm{h}} = p_{t,\mathrm{h}} + Bar(\sigma_1,\sigma_2) \quad (8)$$

式中，$\tilde{p}_{t,\mathrm{m}}$，$\tilde{p}_{t,\mathrm{h}}$ 分别为光伏和火力发电厂的最终价格。

作为中间调节机构，电力零售商通过收集客户的电力需求来从发电企业购买电力，以维持发电与消费的平衡。收入计算如下：

$$\max Y_{\mathrm{L}} = \sum_{t=1}^{T} Y_{\mathrm{L}}^{t} \quad (9)$$

$$Y_{\mathrm{L}}^{t}(P^{t}) = P^{t}Q^{t} - (\tilde{p}_{t,\mathrm{m}}q_{t,\mathrm{m}} + \tilde{p}_{t,\mathrm{h}}q_{t,\mathrm{h}})\Delta t \quad (10)$$

式中，P^t 和 Q^t 分别为 t 时期的电价和总电力消耗；$Y_{\mathrm{L}}^{t}(P^{t})$ 为忽略零售商的运营成本时，在零售商提供 P^t 价格时的零售商在时间 t 的收入。

1.5 约束条件

1）光伏模块实际输出与预期输出之间的差异约束：

$$-a \leqslant \delta_{t,\mathrm{m}} \leqslant a \quad (11)$$

2）任何时间周期内的供电与需求平衡限制：

$$(q_{t,\mathrm{m}} + q_{t,\mathrm{h}})\Delta t = Q^{t} \quad (12)$$

3）电费消费成本限制：

$$0 \leqslant P^{t}Q^{t} \leqslant E^{t} \quad (13)$$

式中，E^t 为在 t 时间内的电费成本预测值。

2 优化算法及优化过程

2.1 粒子群优化算法

粒子群算法（Particle Swarm Optimization）[10]，缩写为 PSO，是由 J.Kennedy 和 R.C.Eberhart 等开发的一种进化算法（Evolutionary Algorithm，EA）。通过迭代寻找最优解，以适应度来评价解的品质。

2.2 模型优化流程

简单的交易系统由发电公司、电力零售商和消费者组成。

操作策略如下：

1）电力零售商计算电力需求值。光伏企业向电力零售商报告电力价格和数量，然后热力公司根据电力消耗的需求值报价。

2）电力零售商与发电企业就价格进行谈判，并获得发电企业的最终报价。

3）电力零售商决定电价。

4）计算发电企业、集中储能站、电力零售商的利益。

优化算法选择粒子群优化算法，参数优化流程如图 1 所示。

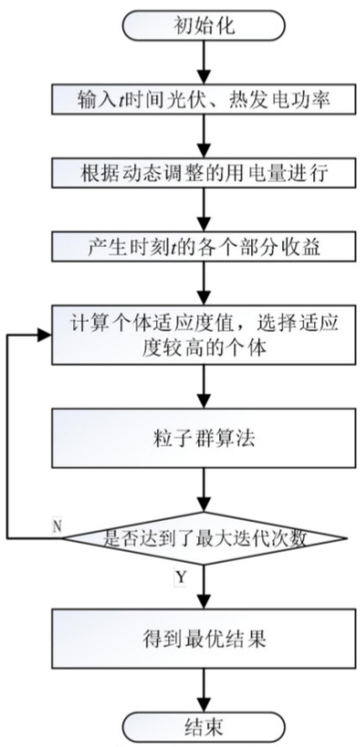

图 1　参数优化流程图

3 参数及算例结果

本节设计了考虑发电厂和集中储能站且仅考虑一个零售商的电力市场模拟示例，并分析在这种状态下的收入。

2025-08期电器工业杂志排版设计和印刷发排.indd 86　2025/7/30 下午3:38

3.1 模型使用数据

本文所采用的发电商主要包含光伏发电和热力发电，同时加入集中储能站。

在实际应用中，由于光伏发电并网困难，可能出现对电网系统的破坏，热力发电具有一定可控性，因此模拟中热力发电策略根据 t 时段以及 t-1 时段用电需求制定，以求在保证收益的情况下尽可能满足时段用电需求。

3.2 模拟参数设置

在本研究中，假设在 24h 内发电函数的参数保持恒定，并且光伏发电的成本高于热力发电。具体的参数设置详见表 1。

表 1　模拟参数设置

参数	设置值
光伏阵列总容量/MW	10
光伏面板太阳追踪模式	单轴追踪
光伏面板倾角	44
热力发电系数 $a_{t,\mathrm{h}}$	0.001
光伏发电系数 $a_{t,\mathrm{m}}$	0.0004
热力发电计划权重 w_1，w_2	0.5，0.5
迭代步长 σ_1，σ_2	1000，1000
实际输出与预测之间的偏差	±20%
光伏惩罚系数 C	12

3.3 模拟结果与分析

本文模拟了电力市场单日变化的两种情况，分别为：

1）不启用储能电站调峰填谷策略，仅通过热力发电和光伏发电当前时段生产电力满足用电负荷。

2）启用储能电站调峰填谷策略，将多余发电量储存起来，用于用电负荷的调峰填谷。

通过对比两种模拟策略的各角色收益变化，分析储能系统在电力市场中的经济效益作用。

如图 2 所示，在模拟过程中，对于未加入储能系统调峰填谷功能时，总发电呈现出随着用电负荷大幅度波动的现象，且在 9:00 左右光伏发电系统开始产出时出现较大发电量过剩的情况，如图 3 所示，这种情况会导致电价的较大波动，影响发电厂和电力零售商的收益，因此有必要在电力市场中引入储能系统。

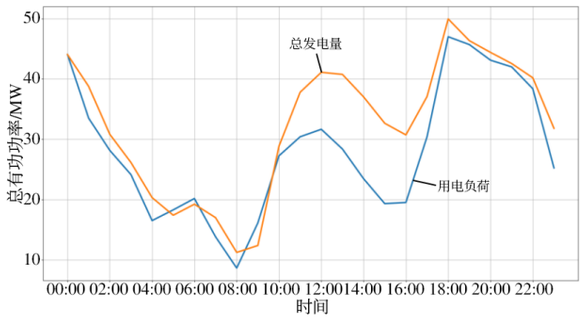

图 2　单日用电负荷及总发电能量

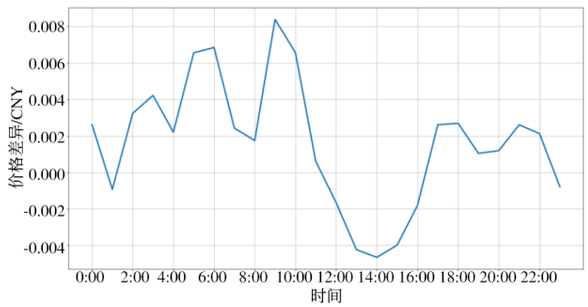

图 3　单日电力价格差异变化

随着储能站的加入，经过对电力入网策略的优化，采用调峰填谷的策略有效将发电量需求波动限制在 15MW 以内，如图 4 所示。

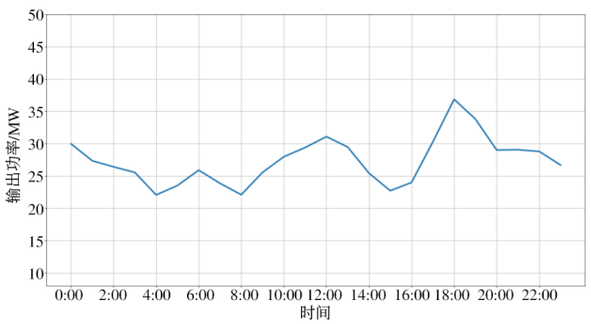

图 4　优化调峰填谷策略后的单日发电量需求

2025-08期电器工业杂志排版设计和印刷发排.indd 87　2025/7/30 下午3:38

如图 5 所示，采用优化后的调峰填谷策略后，热电发电厂的收益较未采用调峰填谷策略之前有较为明显提升，尤其在当日发电早期和傍晚用电高峰处，而对于光伏发电收益有所降低，分析认为是由于储能系统的加入，光伏发电的成本略微提高导致。

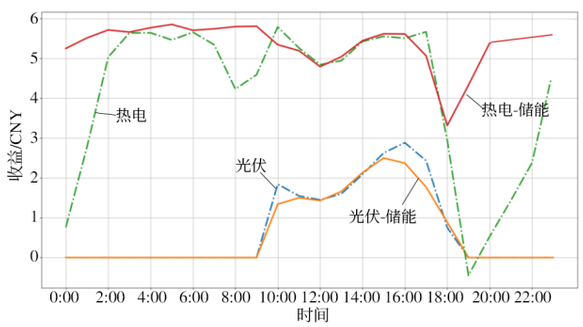

图 5　采用优化调峰填谷策略前后的单日发电厂收益

储能系统加入，并采用经过优化的调峰填谷策略后，如图 6 所示零售商收入阶段，光伏电力加入时，零售商的收入达到最高，符合对可再生能源的需求优先级。

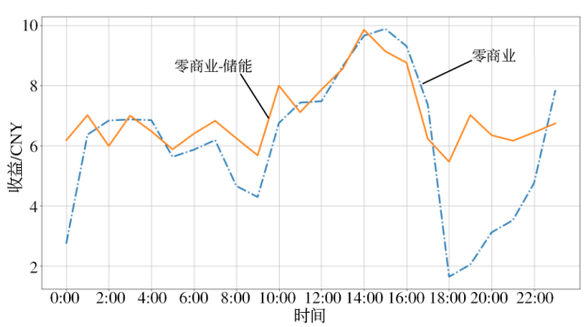

图 6　采用优化调峰填谷策略前后的单日零售商收益

4 结束语

本文研究了储能技术在电力市场中的优化策略，旨在通过构建交易系统模型和优化算法分析，为推动可再生能源发展和能源市场化改革提供理论依据与实践指导。

研究结果显示，储能系统的引入对电力市场的稳定性和经济性具有显著的促进作用。通过调峰填谷策略，不仅缓解了光伏发电并网难的问题，还优化了发电企业和零售商的收益结构，进一步推动了对可再生能源的消纳。然而，研究中仍存在一定不足，例如模型假设的简化可能无法完全反映真实电力市场的复杂性，储能技术的分析范围较为单一，优化算法的深度也有待提升。

未来，储能技术的研究可进一步拓展至多能源互补的综合储能系统，探索其在碳市场与电力市场联动中的作用，并结合区域性电力需求特性进行精细化优化。通过持续的研究与实践，储能技术将在全球能源结构转型和可持续发展中发挥更为重要的作用。

参考文献

[1] 朱彤．气候变化、能源转型与新型能源安全 [J]. 中国电力企业管理，2024（16）：50-55.

[2] 发展改革委能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见 [J]. 中华人民共和国国务院公报，2021（25）：43-46.

[3] 肖湘宁，罗超，廖坤玉．新能源电力系统次同步振荡问题研究综述 [J]. 电工技术学报，2017，32（6）：85-97.

[4] 王松岑，来小康，等．大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析 [J]. 电力系统自动化，2013，37（1）：3-8，30.

[5] 张智刚，康重庆．碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报，2022，42（8）：2806-2819.

（下转第 93 页）

2025-08期电器工业杂志排版设计和印刷发排.indd 88　2025/7/30 下午3:38