

# 用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置优化方法

汪波

华电陕西综合能源有限公司, 陕西 西安 710016

DOI:10.61369/ETQM.2025100031

**摘 要：** 本文针对用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置问题，深入剖析用户侧储能与虚拟电厂需求响应的理论特性与协同关系，构建以经济效益最大化和响应效能最大化为目标的容量配置优化模型，并设计改进粒子群优化算法进行求解。通过算例分析验证模型与算法的有效性，量化关键参数对容量配置结果的影响，为用户侧储能在虚拟电厂需求响应中的合理配置提供科学依据与技术支持。

**关 键 词：** 用户侧储能；虚拟电厂；需求响应；容量配置；优化模型；改进粒子群优化算法

## Optimisation Method for Capacity Configuration of User-Side Energy Storage Participating in Virtual Power Plant Demand Response

Wang Bo

Huadian Shaanxi Comprehensive Energy Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016

**Abstract：** This paper addresses the capacity allocation issue of user-side energy storage participating in virtual power plant demand response. It thoroughly analyses the theoretical characteristics and synergistic relationship between user-side energy storage and virtual power plant demand response, constructs a capacity allocation optimisation model aimed at maximising economic benefits and response efficiency, and designs an improved particle swarm optimisation algorithm for solution. Through case study analysis, the effectiveness of the model and algorithm is verified, and the impact of key parameters on capacity configuration results is quantified, providing scientific basis and technical support for the reasonable configuration of user-side energy storage in virtual power plant demand response.

**Keywords：** user-side energy storage; virtual power plant; demand response; capacity configuration; optimisation model; improved particle swarm optimisation algorithm

## 引言

随着全球能源结构向低碳化、智能化转型，分布式能源的广泛接入对电网的稳定性与灵活性提出更高要求。虚拟电厂作为一种新型电力系统组织形式，通过聚合分布式电源、储能系统和可控负荷，实现资源的协同优化调度，在需求响应中发挥重要作用。用户侧储能作为虚拟电厂的关键组成部分，其容量配置的合理性直接影响虚拟电厂需求响应的效果与经济效益。目前，用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置研究仍存在优化目标单一、约束条件考虑不全等问题，亟需系统性的优化方法以提升虚拟电厂运行效能与经济价值，本文研究对推动能源互联网发展具有重要的理论与实践意义。

## 一、用户侧储能与虚拟电厂需求响应理论概述

### （一）用户侧储能特性分析

在技术层面，锂电池、铅炭电池、液流电池等常见用户侧储能设备各具特性。锂电池凭借较高的能量密度（100–265Wh/kg）、快速的响应时间（毫秒级）以及良好的循环寿命（2000–5000次），在用户侧储能领域广泛应用；铅炭电池充放电效率可达80%–85%，适用于对成本敏感且充放电频率较低的场景；液流

电池则以超长循环寿命（10000次以上）和大容量存储优势，在大规模储能项目中崭露头角。

运行特性方面，用户侧储能的充放电行为受多种因素影响。用户用电习惯决定了储能设备的充放电时段，如工商业用户在工作日白天用电高峰时段，储能倾向于放电以降低用电成本；分时电价政策驱动储能在谷电时段充电、峰电时段放电，实现峰谷电价套利；气候条件对分布式电源出力的影响，间接改变储能的运行模式，如光照充足时光伏出力增加，储能可优先充电<sup>[1]</sup>。

经济特性上，用户侧储能投资成本涵盖设备购置、安装调试等费用，锂电池储能系统单位容量投资成本约为1500–2000元/kWh。运行维护费用包括设备检修、电池更换等支出，约占投资成本的1%–3%/年。收益来源主要有参与电力市场需求响应获得的补偿、峰谷电价差收益以及政府补贴，合理配置容量可有效缩短成本回收周期。

## （二）虚拟电厂需求响应机制

需求响应是指电力用户根据价格信号或激励机制，调整自身用电行为，实现电力供需平衡的过程。在虚拟电厂中，需求响应类型多样，可中断负荷通过在特定时段减少或中断非关键负荷用电，快速响应电网需求；可转移负荷将部分用电从高峰时段转移至低谷时段；储能调节则凭借灵活的充放电特性，精准匹配电力供需。

虚拟电厂需求响应运作遵循规范流程。首先接收电网调度指令，明确需求响应的目标与要求；接着聚合用户侧的分布式电源、储能和可控负荷等资源，评估可调节能力；随后制定响应策略，确定各资源的调度计划；执行响应操作时，通过能量管理系统实时监控与控制资源运行；最后进行效果评估，分析响应的实际成效，为后续调度提供经验参考<sup>[2]</sup>。

虚拟电厂需求响应具有多方面价值。对电网而言，能够有效削峰填谷，缓解高峰时段供电压力，提升供电可靠性；对用户来说，可降低用电成本，如通过储能的峰谷电价套利实现电费节省；对市场主体，参与需求响应可获取额外收益，增强市场竞争力。

## （三）用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的协同关系

用户侧储能与虚拟电厂需求响应协同具备显著优势。储能的快速响应与灵活调节特性，增强了虚拟电厂需求响应的灵活性，使其能更迅速地应对电网波动；精准的充放电控制提升了响应精度，确保满足电网调度要求；同时优化了资源利用效率，实现储能与其他分布式资源的协同互补。

然而，协同过程也面临诸多挑战。用户侧储能分布广泛且分散，加大了虚拟电厂的聚合与管理难度；不同用户参与需求响应的意愿存在差异，部分用户因担心影响正常用电而参与积极性不高；信息交互滞后可能导致调度指令传达不及时，影响响应效果；此外，复杂的运行环境与多目标需求使得储能容量优化配置难度增大<sup>[3]</sup>。

# 二、用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置优化模型

## （一）目标函数构建

经济效益最大化目标综合考虑各项收支。用户侧储能参与需求响应可获得补偿收益 $R_{dr}$ ，利用峰谷电价差获取收益 $R_{pv}$ ，以及政府补贴收入 $R_{sub}$ ；成本方面则包括设备投资成本分摊 $C_t^{inv}$ 、运行维护成本 $C_t^{om}$ 和充放电损耗成本 $C_t^{loss}$ 。响应效能最大化目标以虚拟电厂需求响应满足度、响应及时性、响应精度等为指标构建。满足度衡量储能提供的响应电量与电网需求的匹配程度，响

应及时性关注从接收指令到执行响应的时间间隔，响应精度则体现实际响应电量与计划响应电量的偏差。采用线性加权法整合上述两个目标函数，得到综合优化目标函数：

$$MaxZ = \omega_1 \sum_{t=1}^T (R_{dr} + R_{pv} + R_{sub}) - \sum_{t=1}^T C_t^{inv} + C_t^{om} + C_t^{loss} + \omega_2 \sum_{t=1}^T E_{idr}$$

其中， $Z$ 为综合目标函数值； $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 为权重系数，且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ； $T$ 为总时段数； $R_{dr}$ 为 $t$ 时刻需求响应收益； $R_{pv}$ 为 $t$ 时刻峰谷电价差收益； $R_{sub}$ 为 $t$ 时刻政府补贴收入； $C_t^{inv}$ 为 $t$ 时刻投资成本分摊； $C_t^{om}$ 为 $t$ 时刻运行维护成本； $C_t^{loss}$ 为 $t$ 时刻充放电损耗成本； $E_{idr}$ 为 $t$ 时刻需求响应效能指标值。

## （二）约束条件设定

储能容量需满足最小和最大容量限制， $E_{min} \leq E_t \leq E_{max}$ ，确保储能能在合理容量范围内运行。充放电功率约束为 $-P_{max}^d \leq P_t \leq P_{max}^c$ ，防止功率超出设备额定范围。能量守恒约束通过 $E_t = E_{t-1} + \eta_c P_t^c \Delta t - \frac{P_t^d \Delta t}{\eta_d}$ 保证各时段能量变化符合充放电规律。需求响应任务约束要求储能提供的响应电量 $Q_{idr}$ 满足虚拟电厂需求 $Q_{dr}$ ，即 $Q_{idr} \geq Q_{dr}^{req}$ 。功率爬坡约束限制相邻时段充放电功率变化幅度， $|P_t - P_{t-1}| \leq \Delta P_{max}$ ，避免功率突变对设备造成损害。

# 三、用户侧储能容量配置优化算法设计

## （一）算法选择与改进思路

遗传算法、模拟退火算法、粒子群优化算法等智能算法在多目标优化问题求解中各有优劣。遗传算法通过选择、交叉、变异操作搜索最优解，但计算复杂度较高，收敛速度较慢；模拟退火算法基于热力学原理，能避免局部最优，但参数设置对结果影响较大；粒子群优化算法通过粒子间信息共享搜索最优解，具有收敛速度快、易实现等优点，但存在易陷入局部最优的问题。综合考虑，本文采用改进粒子群优化算法，从惯性权重和学习因子调整等方面进行改进，以提升算法性能<sup>[4]</sup>。

## （二）改进粒子群优化算法设计

动态惯性权重调整策略通过非线性变化公式实现。随着迭代次数增加，惯性权重 $\omega$ 逐渐减小，初期较大的惯性权重保证算法全局搜索能力，后期较小的惯性权重增强局部搜索精度，公式为：

$$\omega = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \times \left( \frac{iter}{iter_{max}} \right)^2$$

其中 $\omega_{max}$ 、 $\omega_{min}$ 为惯性权重最大值和最小值， $iter$ 为当前迭代次数， $iter_{max}$ 为最大迭代次数。自适应学习因子调整策略根据粒子分布状态动态调整学习因子 $c_1$ 和 $c_2$ 。当粒子分布较为分散时，增大 $c_1$ 以加强个体学习能力，促进粒子向自身历史最优位置移动；当粒子趋于集中时，增大 $c_2$ 以增强全局学习能力，引导粒子向全局最优位置靠拢。

算法流程如下：首先初始化粒子群，设定粒子数量、位置、速度、惯性权重和学习因子初始值等参数；然后计算每个粒子的适应度，即综合目标函数值；接着更新粒子的位置和速度，根据

动态惯性权重和自适应学习因子调整更新公式；再更新个体最优和全局最优位置；判断是否达到最大迭代次数或满足收敛条件，若不满足则返回计算适应度步骤，否则输出最优解<sup>[5]</sup>。

### （三）算法性能验证

选取标准测试函数 ZDT1、ZDT2 等对改进粒子群优化算法进行测试。与传统粒子群优化算法、遗传算法对比，从收敛速度、解的质量、稳定性等指标评估算法性能。通过多次重复实验，统计不同算法在各测试函数上的平均收敛代数、解集的超体积指标等。结果表明，改进粒子群优化算法在收敛速度和解的质量上均优于传统算法，具有更好的稳定性和寻优能力。

## 四、算例分析

### （一）算例基础数据

虚拟电厂需求响应场景设定如下：需求响应时段为工作日的 10:00–12:00 和 16:00–18:00，响应电量要求每次不低于 500kWh，补偿价格为 0.5 元 / kWh。用户侧储能选用锂电池，容量范围设定为 200–1000kWh，额定充电功率  $P_{max}^c=200\text{kW}$ ，额定放电功率  $P_{max}^d=200\text{kW}$ ，充放电效率  $\eta_c=\eta_d=0.9$ ，循环寿命 5000 次，单位容量投资成本 1800 元 / kWh。

电价数据采用分时电价政策，峰时段（10:00–15:00，18:00–22:00）电价 0.8 元 / kWh，平时段（7:00–10:00，15:00–18:00，22:00–23:00）电价 0.5 元 / kWh，谷时段（23:00–7:00）电价 0.3 元 / kWh。

改进粒子群优化算法参数设置为：粒子数量 30，最大迭代次数 100，惯性权重最大值  $\omega_{max}=0.9$ ，最小值  $\omega_{min}=0.4$ ，学习因子初始值  $c_1=c_2=2$ 。

### （二）容量配置结果

分别设定经济效益权重  $\omega_1$  为 0.3、0.5、0.7，响应效能权重  $\omega_2$  为 0.7、0.5、0.3，计算不同权重组合下的用户侧储能最优容量配置方案。当  $\omega_1=0.3$ ， $\omega_2=0.7$  时，最优储能容量为 600kWh，

充放电策略为谷时段（23:00–7:00）以 200kW 功率充电，两个需求响应时段（10:00–12:00 和 16:00–18:00）以 200kW 功率放电。

对比不同方案的经济效益和响应效能指标发现，随着经济效益权重增加，需求响应收益和峰谷电价差收益显著提升，但响应效能指标略有下降；反之，响应效能权重增加时，需求响应满足度和响应精度提高，经济效益有所降低。

### （三）敏感性分析

分析电价波动、需求响应补偿价格变化、储能投资成本变动、充放电效率改变等关键参数对容量配置结果的影响。通过改变各参数值，重新运行优化模型，计算容量配置结果的变化量。量化分析得到关键参数敏感性排序如表 1 所示：

表 1 不同关键参数对用户侧储能容量配置结果的敏感性系数排序表

参数名称	敏感性系数
需求响应补偿价格	0.82
峰谷电价差	0.75
储能投资成本	0.68
充放电效率	0.62

可见，需求响应补偿价格对容量配置结果影响最为显著，其提高时，为获取更多收益，储能容量倾向于增大；峰谷电价差、储能投资成本和充放电效率也对容量配置有不同程度影响。

## 五、结束语

本文系统研究了用户侧储能参与虚拟电厂需求响应的容量配置优化方法。通过理论分析明确用户侧储能与虚拟电厂需求响应的特性及协同关系，构建多目标优化模型并设计改进粒子群优化算法进行求解，经算例验证了模型与算法的有效性，揭示了关键参数对容量配置的影响规律。后续研究可进一步考虑更多不确定性因素，拓展模型在复杂场景下的应用，探索不同类型储能与虚拟电厂需求响应的协同优化策略。

## 参考文献

- [1] 肖凯. 考虑低碳需求响应的用户侧储能模式分析与优化 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13 (06): 1977–1979.
- [2] 黄莹. 虚拟电厂动态聚合及电碳协同决策方法研究 [D]. 华南理工大学, 2024.
- [3] 马少洁. 虚拟电厂与电动汽车用户的主从博弈定价策略 [D]. 陕西理工大学, 2024.
- [4] 冀瑞强. 基于博弈论的电力用户侧储能资源共享研究 [D]. 山东理工大学, 2024.
- [5] 李炯. 考虑需求响应的虚拟电厂多目标优化 [D]. 华北电力大学 (北京), 2024.