

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231638

考虑纳网系统和微网运营商电价机制的 主从博弈优化调度策略

邱明石, 陈俊儒, 刘牧阳, 王静

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 伴随清洁能源逐渐渗透到微电网(微网)和纳米电网(纳网)用能单元, 针对纳网-微网-主网之间的协同优化、清洁能源利用效率提升、清洁能源消纳促进以及用能经济性和可靠性等多方面的问题, 提出了一种基于多主体博弈的两阶段优化调度策略, 涵盖多元化交易和微网运营商电价机制。首先, 建立了具有各自显著用能特点的多元纳米电网负荷模型, 形成了支持多元纳米电网自主调度和纳网间电能交易的纳网系统模型。其次, 考虑到电能供需的多样性, 构建了不同供能场景下的微网运营商模型, 并引入主网与运营商的竞争机制。在这一博弈模型中, 微网运营商扮演领导者的角色, 而纳网系统则作为跟随者, 实现了一主一从的博弈均衡。通过优化微网运营商的出力方式, 激发了纳网系统的用能潜力。最后, 通过算例验证了所提出方案的合理性和有效性。该方案成功降低了纳网系统的运行成本, 提升了微网系统对清洁能源的消纳能力, 同时提升了综合收益的经济性。这一研究为微网和纳网的可持续发展提供了实用性和有效性的指导。

关键词: 多元化纳网; 供能场景; 主从博弈; 微网运营商; 微网系统; 纳网-微网-主网间协同优化

A master-slave game optimization scheduling strategy considering the electricity pricing mechanism of nanogrid systems and microgrid operators

QIU Mingshi, CHEN Junru, LIU Muyang, WANG Jing

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: With the gradual penetration of clean energy into microgrids and nanogrids, a two-stage optimization scheduling strategy based on multi-agent game theory is proposed to address various issues such as collaborative optimization among nanogrids, microgrids, and main grids, improvement of clean energy utilization efficiency, promotion of clean energy consumption, and economic reliability of energy use. This strategy covers diversified trading and microgrid operator pricing mechanisms. First, multiple nanogrid load models with significant energy consumption characteristics are established, forming a nanogrid system model that supports autonomous scheduling of multiple nanogrids and energy trading between them. Secondly, considering the diversity of electricity supply and demand, a microgrid operator model is constructed for different energy supply scenarios, and a competition mechanism between the main network and the operator is introduced. In this game model, microgrid operators play the role of leaders, while the network management system acts as followers, achieving a game equilibrium of one master and one slave. By optimizing the output methods of microgrid operators, the energy potential of nanogrid systems is stimulated. Finally, the rationality and effectiveness of the proposed scheme are verified through numerical examples. This scheme has successfully reduced the operating cost of the nanogrid system, improved the clean energy consumption capacity of the microgrid system, and increased economic efficiency. It provides practical and effective guidance for the sustainable development of microgrids and nanogrids.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52266018).

Key words: diversified nanogrid; energy supply scenarios; master-slave game; microgrid operators; microgrid system; collaborative optimization between nanogrids, microgrids, and main grid

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52266018); 源网荷储智慧能量管理关键技术研发自治区重点研发专项(2022B01016)

0 引言

在高比例分布式能源不断渗透至公共电网、微电网(微网)和纳米电网(纳网)的背景下,能源供给具有间断性和波动性的特点,需要合理的电能优化调度策略以确保供电稳定性,同时最大化消纳可再生能源。纳米电网作为微电网的子单元,是单个房屋、楼宇等中小型建筑的一种配电系统。通过利用现代通信技术和电力电子技术,纳米电网担任了生产者和消费者的双重角色,能够更好地满足用户的需求,处理动态的能源需求以及电力供需不匹配所带来的问题。

文献[1]基于当地分布式能源的要求,定义并阐述了一种基于纳米电网的分布式能源的体系结构,该结构分层命名并详细划分成中央电网、微电网和纳米电网。文献[2]提出了一种用于住宅纳米电网日前调度的分散式能源管理算法,在保护纳网用户隐私的情况下进行能源交换。文献[3]强调了新兴纳米电网在管理日益增长的分布式可再生能源和电池存储方面的重要作用,有助于建立一种新型的可再生能源汽车系统。文献[4]针对具有智能计量的小型电热发电系统(纳米电网),设计了一种基于能量稳态的新能源管理算法。通过供暖单元的作用来调节大房间内的温度,在降低能源成本的同时为居民提供温度舒适度。文献[5]定义了纳米电网是一种用于单户/中小型建筑的配电系统。纳米电网有潜力解决小规模可再生能源固有的间歇性和长回收期问题。文献[6]描述纳米电网是微电网的一个子集,为单个建筑或房屋供电,低压直流分布被称为直流纳米电网。文献[7]以具有纳米电网的住宅小区为研究对象,研究了电动汽车的出行特性,提出了一种预留放电机制,并在此基础上制定了天然气的最优调度策略。

目前,主要的研究方向是微网作为能源产销者连接负荷侧和公共电网进行优化调度。文献[8-11]分别从优化算法、模型预测、混合微网、能量追踪等不同方向,建立了多尺度的经济调度。然而,上述文献都未建立典型场景以解决适应调度过程中复杂天气情况带来的较大能量流动波动性问题。文献[12-16]在经济模型中分别添加了风电波动模型、氢能损耗模型、碳交易模型、可再生能源空间集群模型、前景理论的用户心理模型。从源荷网储不同侧面进行考虑,但考虑方面不够全面和整体,缺乏对“一体化”中的能量变化幅度、频率、阶段的归类,以制定不同策略从而实现可再生能源的最大消纳。文献[17]虽然建立了夏季冬季场景,但场景区分较为粗糙,只有冬季夏季典型场景,不够细化,未能

进一步提升经济性和调峰性能。

文献[18-21]分别从用户心理、分时电价差异、考虑 V2B 智慧充电桩群、虚拟电厂等不同方面建立了楼宇间电能共享的协调调度策略。然而,这些文献未建立楼宇集群之间的交易策略,可能导致楼宇间过度支持的情况,无法保证楼宇内部不同程度的用电舒适度需求。文献[22]建立了考虑需求响应的纳网双向定价斯坦伯格博弈模型,构建了时均收益下的纳网与公共管理中心间的能源双向交易策略,但缺乏对用电特性较为不同的纳米电网进行分类,形成纳米电网群内部的能量互补流动,降低各个纳网运营成本。文献[23]引入交易偏好的同步博弈方法,构建了点对点两阶段的竞价纳网交易模型,促进能源利用,但对实时数据准确度要求比较苛刻且需要多方实时参与,不适用于较大纳网。文献[24]提出了一种新的多目标优化模型,用于将一组具有局部储能装置的微电网/纳米电网有效集成到电网中。在该模型中,单个微电网/纳米电网可以在彼此之间以及与外部电网进行局部电力交换。然而,以上文献未将博弈和纳网之间的能量流动串联起来,形成一套更为经济、消纳能力出色、稳定性强的电能调度系统框架,部分文献只实现了部分纳网之间的局部能量串联,缺乏整体性能量调度。

基于以上的研究和分析,本文针对纳网、微网、主网之间的电能交互问题,提出了考虑多元化纳网交易和微网运营商电价机制的多主体下主从博弈两阶段优化调度策略。针对以上研究存在的清洁能源利用效率低、场景过于粗糙、电能流通缺乏整体性等问题以及空白,提出的解决方案如下:

1) 针对纳网之间缺乏电能交互的问题,首先根据纳网系统中的不同纳网的用电习惯进行区分,建立负荷变动型、舒适度需求型、需求响应型、盈利型纳网负荷模型,纳网之间采用固定分时电价的方式实现纳网之间的电能互补,同时也避免了电能共享会导致的部分纳网牺牲个体利益支持其他纳网的问题;

2) 针对微网新能源发电设备受天气影响较大、储能充放电需求参差多变的问题,依据不同天气场景和储能充放深度、频次等条件建立了不同供能场景,在不同的供能场景实现“源荷网储”协同优化运行;

3) 针对微网和纳网之间的利益冲突问题,建立起纳网、微网运营商各自的利益诉求调度模型,依托不同供能场景的限制参数,通过主从博弈从而达到 Stackelberg 均衡,得出纳网系统与微网运营商的帕累托解,最终保证微网系统电能交互经济、安全、稳定。

1 纳网-微网协同系统结构

本文对“纳网”进行了明确定义, 将其定义为具备自身用电模式的楼宇或小型主体, 这些纳网集合形成了一个完整的纳网系统。微网运营商在这一系统中扮演关键角色, 其设有较大规模的清洁能源发电设备和储能电站。纳网系统与微网运营商共同构成了微网系统, 而微网运营商则通过与主网进行电能流动, 形成了一个多层次的能量交易网络, 如图 1 所示。

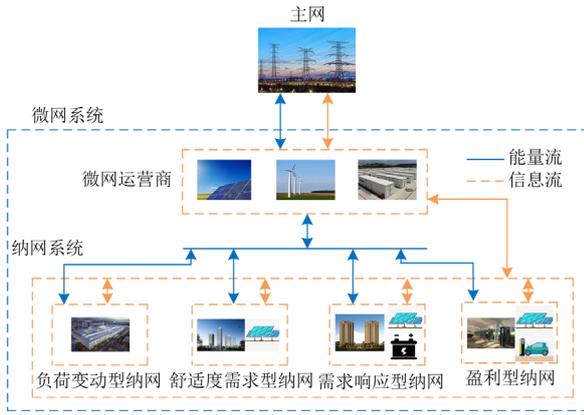


图 1 纳网-微网系统运行结构

Fig. 1 Nanogrid-microgrid system operating structure

微网系统由微网运营商与纳网系统(多个纳网构成)组成, 微网系统电能流动方式、电能价格需要微网运营商与纳网系统共同决定。微网运营商管理范围为清洁能源发电设备、集中式储能电站、微网系统母线, 纳网系统涵括不同调度需求的纳网运营商。微网运营商以清洁能源收益最优为目标, 纳网系统中的各纳网目标为运营收益最大化且成本最小化。引入主网供能与运营商竞争, 建立纳网系统与运营商主从博弈, 可以形成不同场景下的合理的微网电价。各纳网通过自主调度降低运营成本, 微网运营商通过灵活调节微网电价和收取主网代理费用, 形成双赢的局面。

在系统层级的考虑下, 本文着重研究由不同类型纳网组成的纳网系统、纳网系统与微网运营商构成的微网系统以及主网的三层级能量交易网络。本文将各类型纳网设置在具有明显用电差异特征的楼宇或小型主体。其中, 一部分纳网具有产、消双重属性, 其运营商会进行内部能量调度, 以确保在保障用户用电舒适度的前提下进行纳网间电能交易, 最大限度地利用可再生能源并降低纳网自身运营成本。在纳网系统中, 本文区分了不同类型的纳网,

包括负荷变动型纳网(代表生产类的工业属性楼宇)、舒适度需求型纳网(代表商业类型的楼宇)、需求响应型纳网(代表进行需求响应的居民楼宇类型建筑)以及盈利型纳网(代表停车充电一体化的运营商网络)。

4 种纳网主要区别在于: 负荷变动型纳网有着自己的调度运行方式, 可通过经济学模型进行模拟; 舒适度需求型纳网的可调度电能容量由该纳网经济性需求和用户满意度共同决定; 需求响应型纳网可调度电能容量由需求响应的用户数所决定; 盈利型纳网可调度容量由 V2G 用户的用能习惯和可调度车辆所决定。在微网系统中, 微网运营商扮演着获利中心和调度中心的角色。它们既要确保微网系统经济运行良好, 又要确保新能源发电尽可能地被纳网所消纳。

2 主从博弈机制下协同能量模型

本文提出了一种三层级网络两阶段能量优化调度模型, 在电能需求多动态、多场景、多特性的形式下, 设立了具有部分互补形式的纳米电网模型。基于复杂天气情况, 微网设置了多个不同电能容量的供能场景。

2.1 负荷变动型纳网系统负荷模型

在具有生产性质的建筑楼宇中, 生产经营主体对电价的变化表现出较高的敏感性, 因此他们会相应地调整生产速度和进度, 以降低成本并提升效率。从经济学的角度来看, 经常使用价格弹性来衡量价格变动对需求量的影响程度。在电力领域, 采用电量电价弹性矩阵^[24]可以宏观地描述电负荷的变动情况。对于负荷变动型纳网模型(PS 型), 其负荷模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{m}_\varphi = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1t} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{t1} & m_{t2} & \cdots & m_{tt} \end{bmatrix}, e_t = \frac{1}{1 + \varphi_t^{\text{mg}} - \varphi_{\text{ideal}}^{\text{mg}}}; \\ \Delta\varphi_h = \begin{bmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \Delta\varphi_2 \\ \vdots \\ \Delta\varphi_t \end{bmatrix} = k_{\text{mg}} \left(\begin{bmatrix} \varphi_1^{\text{mg}} \\ \varphi_2^{\text{mg}} \\ \vdots \\ \varphi_t^{\text{mg}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varphi_{\text{avg}}^{\text{mg}} \\ \varphi_{\text{avg}}^{\text{mg}} \\ \vdots \\ \varphi_{\text{avg}}^{\text{mg}} \end{bmatrix} \right) + \\ k_{\text{big}} \left(\begin{bmatrix} \varphi_1^{\text{big}} \\ \varphi_2^{\text{big}} \\ \vdots \\ \varphi_t^{\text{big}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varphi_{\text{avg}}^{\text{big}} \\ \varphi_{\text{avg}}^{\text{big}} \\ \vdots \\ \varphi_{\text{avg}}^{\text{big}} \end{bmatrix} \right) + k_{\text{ng}} \left(\begin{bmatrix} \varphi_1^{\text{ng}} \\ \varphi_2^{\text{ng}} \\ \vdots \\ \varphi_t^{\text{ng}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varphi_{\text{avg}}^{\text{ng}} \\ \varphi_{\text{avg}}^{\text{ng}} \\ \vdots \\ \varphi_{\text{avg}}^{\text{ng}} \end{bmatrix} \right); \\ \begin{bmatrix} p_1^{\text{load,ps}} \\ \vdots \\ p_t^{\text{load,ps}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 p_1^{\text{base},j} & & \\ & \ddots & \\ & & e_t p_t^{\text{base},j} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \alpha^{\text{ps}} \mathbf{m}_\varphi \Delta\varphi_h \right) \end{array} \right. \quad (1)$$

式中： m_ϕ 为弹性系数矩阵，用于反映电价变化幅度和用电量变化幅度的关联关系，对角元元素 m_{ii} 为自弹性系数，非对角元元素 m_{hi} 为交叉弹性系数^[25]，分别取0.2和-0.03； e_t 为 t 时刻微网电价对基础负荷的影响因子，影响基础用电负荷，其余纳网均一致； $\phi_{\text{ideal}}^{\text{mg}}$ 为纳网的理想微网电价； $\Delta\phi_h$ 为加权平均电价变化量； k_{ng} 、 k_{mg} 、 k_{big} 分别为纳网、微网、主网的电价权重系数； ϕ_t^{ng} 、 ϕ_t^{mg} 、 ϕ_t^{big} 分别为纳网、微网、主网 t 时刻的电价； $\phi_{\text{avg}}^{\text{ng}}$ 、 $\phi_{\text{avg}}^{\text{mg}}$ 、 $\phi_{\text{avg}}^{\text{big}}$ 分别为纳网、微网、主网的全天电价平均值； $p_t^{\text{load,ps}}$ 为 t 时刻PS型纳网总负荷； $p_t^{\text{base},j}$ 为 t 时刻纳网 j 基础用电负荷，此式中即 t 时刻PS型纳网基础用电负荷； α^{ps} 为PS型纳网可变动容量占比。

2.2 舒适度需求型纳网负荷模型

在商业类型的楼宇建筑过程中，电力服务需求较为严苛，用户的体验和舒适度是一项重要的影响因素。商业楼宇中用户体验的好坏程度主要受冷热负荷需求和充电桩的充电效率两种因素的影响。本文将模拟建立用户舒适度评价函数，该评价函数将在目标函数章节中进行详细介绍。人体对一定范围的温度变化感受程度较弱，在保证人体舒适的情况下，可以进行室温调节。本文的冷负荷主要是由空调制冷产生的。舒适需求将参考热舒适度的PMV^[25]指标，由舒适度指标确定可调节温度范围，通过温度调节范围可以得出模糊舒适度的冷负荷需求为

$$p_t^{\text{ac}} = \eta(S\mu(T_{\text{out},t} - T_{\text{in},t}) + CS/T(T_{\text{in},t} - T_{\text{in},t-T})) \quad (2)$$

式中： p_t^{ac} 为 t 时刻舒适度需求型纳网的空调负荷的总功率； η 为单位空调电制冷功能效率比，取3.2 kW/kJ； S 为供冷面积； μ 为单位供冷面积单位温差下的热量损失，取10.37 kJ/(m²·°C)； $T_{\text{in},t}$ 、 $T_{\text{out},t}$ 、 $T_{\text{in},t-T}$ 分别为 t 时刻室内外温度和 $t-T$ 时刻室内温度； C 为单位供冷面积下的热容，取163 kJ/(m²·°C)； T 为本文单位时间颗粒度。

本文考虑电动汽车充电功率为可调功率负荷，采用变频充电，因此充电功率并非固定不变。每辆充电汽车都具有自己的初始电量，充电时长由停入舒适度需求型纳网(FC型)的用户自行决定。每辆车都设定了充电功率的上下限，而充电功率和速率会直接影响用户体验，从而对舒适度需求型纳网的经济效益产生影响。其充电模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} p_{\min}^{\text{ev}} \leq p_t^{\text{ev},m} \leq p_{\max}^{\text{ev}} \\ S_{\text{oc,out}}^{\text{ev},m} = S_{\text{oc,in}}^{\text{ev},m} + \sum_{t=t_{\text{in}}^m}^{t_{\text{out}}^m} T\eta_{\text{ev}} p_t^{\text{ev},m} / p_{\text{cap}}^{\text{ev},m} & t \in [t_{\text{in}}^m, t_{\text{out}}^m] \\ p_t^{\text{ev}} = \sum_{m=1}^k p_t^{\text{ev},m} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $p_t^{\text{ev},m}$ 为第 m 辆车 t 时刻充电功率； p_{\max}^{ev} 、 p_{\min}^{ev} 分别为第 m 辆车充电功率上下限； t_{in}^m 为第 m 辆车初始充电时间； t_{out}^m 为第 m 辆车充电结束时间； $S_{\text{oc,out}}^{\text{ev},m}$ 为第 m 辆车 t_{out}^m 时刻的电量； $S_{\text{oc,in}}^{\text{ev},m}$ 为第 m 辆车 t_{in}^m 时刻的电量； η_{ev} 为充电效率； $p_{\text{cap}}^{\text{ev},m}$ 为第 m 辆车的电池容量； k 为 t 时刻充电汽车总数； p_t^{ev} 为 t 时刻FC型纳网的电动汽车进行充电的总功率。

考虑到舒适度纳网不可调节部分，则舒适度纳网整体负荷需求模型为

$$p_t^{\text{load,fc}} = e_t p_t^{\text{base},j} + p_t^{\text{ac}} + p_t^{\text{ev}} \quad (4)$$

式中： $p_t^{\text{load,fc}}$ 为 t 时刻FC型纳网总负荷； $p_t^{\text{base},j}$ 为 t 时刻纳网 j 基础用电负荷，此式中表示FC型纳网基础用电负荷。

2.3 需求响应型纳网负荷模型

考虑到需求响应型纳网(DR型)负荷种类较多，并且具备较灵活的负荷调节能力，因此可以通过智能能源管理系统来进行监测、控制和优化电力供应，动态地调整能源的分配和使用，提升纳网能源利用效率和经济性。该纳网将负荷类型分成基础负荷(不参与需求响应的用户负荷和不可调度负荷)、可柔性削减负荷(空调、冰箱等，响应时只削减部分不影响使用)、可中断可转移负荷(如电动汽车)、不可中断可转移负荷(洗碗机、洗衣机等)。

2.3.1 可削减负荷

假设参与可削减负荷需求响应的用户数量为 n_{cut} ，可削减负荷设备有 m_i 类，第 i 类设备的可削减负荷的时间范围为 $[t_a^i, t_b^i]$ ，则可削减负荷功率为

$$\begin{cases} p_t^{\text{cut}} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{m_i} p_{t,\text{cut}}^i = \sum_{i=1}^{m_i} n_{t,\text{cut}}^i p_{t,\text{base,cut}}^i & t_a^i \leq t \leq t_a^i + T \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{m_i} p_{t,\text{cut}}^i = \sum_{i=1}^{m_i} n_{t,\text{cut}}^i p_{t,\text{base,cut}}^i & t_b^i - T \leq t \leq t_b^i \end{cases} \\ 0 \leq p_{t,\text{base,cut}}^i \leq p_{\text{base,max}}^i & n_{\text{cut}} = \sum_{i=1}^{m_i} n_{t,\text{cut}}^i \end{cases} \quad (5)$$

式中： p_t^{cut} 为 t 时刻柔性削减负荷总负荷； $p_{t,\text{cut}}^i$ 为 t 时刻第 i 类设备的削减功率； $n_{t,\text{cut}}^i$ 为 t 时刻第 i 类设

备的参与削减负荷用户； $p_{t,base,cut}^i$ 为 t 时刻单位第 i 设备的削减功率； $p_{base,max}^i$ 为单位第 i 类设备的削减功率上限。

2.3.2 可中断可转移负荷

本文主要可中断可转移电负荷重点考虑电动汽车的充电负荷，电动汽车的负荷为开断负荷，充电过程可以随时中断，并且充电时间可以灵活调整。假设参与需求响应的用户数量为 n_{itr} ，可转移时间范围为 $[t_c, t_d]$ ，则可中断可转移负荷为

$$p_t^{itr} = \begin{cases} n_t^{itr} p_{t,base}^{itr} & t_c \leq t \leq t_d + T \\ \vdots \\ n_t^{itr} p_{t,base}^{itr} & t_c - T \leq t \leq t_d \end{cases} \quad (6)$$

$$n_t^{itr} \leq n_{itr} \quad p_{t,base}^{itr} = \{0, \pm p_{base,ev}\} \quad \sum_{t=t_c}^{t_d} p_t^{itr} = 0$$

式中： p_t^{itr} 为 t 时刻所有可中断可转移负荷； n_t^{itr} 为在 t 时刻进行中断转移的用户数量； $p_{t,base}^{itr}$ 为在 t 时刻单位电车的转移功率； $p_{base,ev}$ 为单位电车的额定充电功率。

2.3.3 不可中断可转移负荷

假设不可中断可转移负荷设备参与需求响应的用户数量为 n_{shift} ，不可中断可转移负荷设备有 m_3 类，第 i 类设备的转移时间范围为 $[t_e^i, t_f^i]$ ，则不可中断可转移功率为

$$p_t^{shift} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{m_3} p_{t,i}^{shift} = \sum_{i=1}^{m_3} n_{t,i}^{shift} p_{t,base,i}^{shift} & t_e^i \leq t \leq t_f^i + T \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{m_3} p_{t,i}^{shift} = \sum_{i=1}^{m_3} n_{t,i}^{shift} p_{t,base,i}^{shift} & t_f^i - T \leq t \leq t_e^i \end{cases} \quad (7)$$

$$p_{t,base,i}^{shift} = \{0, \pm p_{base,i}^{shift}\} \quad \sum_{t=t_e^i}^{t_f^i} p_{t,base,i}^{shift} = 0$$

式中： p_t^{shift} 为 t 时刻总的不可中断可转移功率； $p_{t,i}^{shift}$ 为 t 时刻第 i 类设备的可转移功率； $n_{t,i}^{shift}$ 为 t 时刻第 i 类设备的需求响应用户数； $p_{t,base,i}^{shift}$ 为在 t 时刻单位第 i 类设备的转移功率； $p_{base,i}^{shift}$ 为单位第 i 类设备的可转移功率。

考虑到需求响应纳网(DR 型)的基础负荷，则需求响应总体负荷模型为

$$p_t^{load,dr} = e_j p_{t,base,j} + p_t^{shift} - p_t^{cut} + p_t^{itr} \quad (8)$$

式中： $p_t^{load,dr}$ 为 t 时刻 DR 型纳网总负荷； $p_{t,base,j}$ 为 t 时刻纳网 j 基础用电负荷，此式中即 DR 型纳网基础用电负荷。

2.4 盈利型纳网负荷模型

在微网中往往会有充电汽车运营商，通常会和停车场进行结合。考虑到人的行为因素，根据人的行为将 V2G 充放电时间进行灵活调配。将用户的充电需求进行阶段性的实现，合理利用电价差值进行盈利，将 V2G 的类型分为灵活型、全天型、半天型。灵活型 V2G 充电负荷须实时满足；全天型 V2G 能够全天参与调峰，可供调度车辆为 n_{whole} ；半天型 V2G 只负责一段时间的调峰运行，可供调度车辆为 n_{half} 。盈利型纳网(PR 型)模型为

$$\begin{cases} -p_{i,base,cap}^{v2g} \leq p_{t,i,whole}^{v2g} \leq p_{i,base,cap}^{v2g} & t_0 \leq t \leq t_{24} \\ -p_{i,base,cap}^{v2g} \leq p_{t,i,half}^{v2g} \leq p_{i,base,cap}^{v2g} & t_{12} \leq t \leq t_{24} \\ p_{t,whole}^{v2g} = \sum_{i=1}^{n_{whole}} p_{t,i,whole}^{v2g} & p_{t,half}^{v2g} = \sum_{i=1}^{n_{half}} p_{t,i,half}^{v2g} \\ S_{oc,t,i,whole}^{v2g} = T \eta_{v2g} p_{t,i,whole}^{v2g} / p_{i,base,cap}^{v2g} + S_{oc,t-T,i,whole}^{v2g} \\ S_{oc,t,i,half}^{v2g} = T \eta_{v2g} p_{t,i,half}^{v2g} / p_{i,base,cap}^{v2g} + S_{oc,t-T,i,half}^{v2g} \\ \sum_{t=t_0}^{t_{24}} p_{t,whole}^{v2g} = 0 & \sum_{t=t_{12}}^{t_{24}} p_{t,half}^{v2g} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中： $p_{t,i,whole}^{v2g}$ 、 $p_{t,i,half}^{v2g}$ 分别为 t 时刻第 i 辆全天型 V2G 充放电功率、第 i 辆半天型 V2G 的充放电功率； t_0 、 t_{12} 、 t_{24} 分别表示 00:00、12:00、24:00； $p_{i,base,cap}^{v2g}$ 为第 i 辆 V2G 电池容量，为方便求解，设定盈利型纳网 V2G 容量大小均一致； $p_{t,whole}^{v2g}$ 、 $p_{t,half}^{v2g}$ 分别为 t 时刻全天型 V2G 总充放电功率、半天型 V2G 总充放电功率； $S_{oc,t,i,whole}^{v2g}$ 、 $S_{oc,t,i,half}^{v2g}$ 和 $S_{oc,t-T,i,whole}^{v2g}$ 、 $S_{oc,t-T,i,half}^{v2g}$ 分别为 t 时刻、 $t-T$ 时刻第 i 辆全天型 V2G、第 i 辆半天型 V2G 的荷电量； η_{v2g} 为 V2G 充放电效率。

考虑到需要即时满足的充电汽车负荷，则盈利型纳网总体负荷模型为

$$p_t^{load,pr} = p_{t,agile}^{v2g} + p_{t,whole}^{v2g} + p_{t,half}^{v2g} \quad (10)$$

式中： $p_t^{load,pr}$ 为 t 时刻 PR 型纳网总负荷； $p_{t,agile}^{v2g}$ 为 t 时刻灵活型 V2G 负荷。

2.5 微网储能模型

微网内部由微网运营商进行能量管理，微网运营商实体由集中风电厂、光伏电厂和储能设备组成。微网运营商能够连接外部主网，与主网进行电能传输，进行不同时段的能量分配，在不同情境下形成微网系统的最低运行成本和微网运营商内部的最优利润。微网储能模型为

$$\begin{cases}
0 \leq p_t^{\text{es, ch}} \leq p_{\text{max}}^{\text{es, ch}}, 0 \leq p_t^{\text{es, dis}} \leq p_{\text{max}}^{\text{es, dis}} \\
b_t^{\text{es, ch}} = \{0, 1\}, b_t^{\text{es, dis}} = \{0, 1\}, b_t^{\text{es, ch}} + b_t^{\text{es, dis}} \leq 1 \\
S_{\text{oc}, t}^{\text{es}} = S_{\text{oc}, t-T}^{\text{es}} + b_t^{\text{es, ch}} \eta_{\text{ch, es}} p_t^{\text{es, ch}} T / p_{\text{cap}}^{\text{es}} - \frac{b_t^{\text{es, dis}} p_t^{\text{es, dis}} T}{\eta_{\text{dis, es}} p_{\text{cap}}^{\text{es}}} \\
p_{\text{climb, min}}^{\text{es, ch}} \leq p_t^{\text{es, ch}} - p_{t-T}^{\text{es, ch}} \leq p_{\text{climb, max}}^{\text{es, ch}} \\
p_{\text{climb, min}}^{\text{es, dis}} \leq p_t^{\text{es, dis}} - p_{t-T}^{\text{es, dis}} \leq p_{\text{climb, max}}^{\text{es, dis}} \\
S_{\text{oc}, 0}^{\text{es}} = S_{\text{oc}, \text{end}}^{\text{es}}
\end{cases} \quad (11)$$

式中: $p_t^{\text{es, ch}}$ 、 $p_t^{\text{es, dis}}$ 分别为 t 时刻运营商储能充电功率、放电功率; $p_{\text{max}}^{\text{es, ch}}$ 和 $p_{\text{max}}^{\text{es, dis}}$ 分别为运营商储能充电功率和放电功率的上限; $b_t^{\text{es, ch}}$ 为 0-1 变量, 值为 1 表示储能充电; $b_t^{\text{es, dis}}$ 为 0-1 变量, 值为 1 表示储能放电; $S_{\text{oc}, t}^{\text{es}}$ 、 $S_{\text{oc}, t-T}^{\text{es}}$ 分别为 t 时刻、 $t-T$ 时刻运营商储能的荷电量; $\eta_{\text{ch, es}}$ 、 $\eta_{\text{dis, es}}$ 分别为运营商储能充电效率; $p_{\text{cap}}^{\text{es}}$ 为运营商储能总容量; $p_{t-T}^{\text{es, ch}}$ 、 $p_{t-T}^{\text{es, dis}}$ 分别为 $t-T$ 时刻运营商储能充电功率、放电功率; $p_{\text{climb, max}}^{\text{es, ch}}$ 、 $p_{\text{climb, min}}^{\text{es, ch}}$ 和 $p_{\text{climb, max}}^{\text{es, dis}}$ 、 $p_{\text{climb, min}}^{\text{es, dis}}$ 分别为运营商储能充电爬坡上下限和储能放电爬坡上下限; $S_{\text{oc}, 0}^{\text{es}}$ 、 $S_{\text{oc}, \text{end}}^{\text{es}}$ 分别为运营商储能初始电量、最终电量。

3 纳网-微网协同策略、收益、约束模型

3.1 目标函数

由于纳网规模较小, 储能投资成本较高, 且成本回收周期相对较长, 安全稳定性较低。一些纳网仅配备光伏端, 仅有部分纳网安装了储能设备以实现全天电能的灵活调度。在纳网系统中, 各纳网之间进行电能交易, 以降低运行成本, 形成具有多元特性的纳网系统, 并设立统一的目标函数。为了对微网运营商进行约束, 将微网系统电价划分为主网(大电网)售电价格和微网运营商售电价格, 形成竞争机制。同时, 微网运营商可以购买一定额度的主网电能。因此, 将微网运营商目标函数、纳网系统满意度损失成本、未消纳清洁能源惩罚相结合, 构建微网系统整体收益模型。通过不断进行两阶段的电能优化调度, 最终实现微网系统整体综合收益的最大化。则微网系统的目标函数为

$$\begin{aligned}
C_{\text{ps}} &= \sum_{t=0}^{t=t_{24}} \left(p_{t,j}^{\text{g, big}} \varphi_t^{\text{g, big}} + p_{t,j}^{\text{g, mg}} \varphi_t^{\text{g, mg}} - p_{t,j}^{\text{s, mg}} \varphi_t^{\text{s, mg}} + \right. \\
&\quad \left. p_{t,j}^{\text{g, mg}} \varphi_t^{\text{g, mg}} - p_{t,j}^{\text{s, ng}} \varphi_t^{\text{s, ng}} \right) T \\
C_{\text{c}} &= \sum_{t=0}^{t=t_{24}} \left(p_{t,j}^{\text{g, big}} \varphi_t^{\text{g, big}} + p_{t,j}^{\text{g, mg}} \varphi_t^{\text{g, mg}} + p_{t,j}^{\text{g, ng}} \varphi_t^{\text{g, ng}} - p_{t,j}^{\text{s, ng}} \varphi_t^{\text{s, ng}} - \right. \\
&\quad \left. p_{t,j}^{\text{s, mg}} \varphi_t^{\text{s, mg}} + p_{\text{pv}, t, j} \varphi_{\text{pv}} + \lambda_{\text{fc}}^{\text{ac}1} (p_{t, \text{best}}^{\text{ac}} - p_t^{\text{ac}}) + \right. \\
&\quad \left. \lambda_{\text{fc}}^{\text{ac}2} \left(p_{t, \text{best}}^{\text{ac}} - p_t^{\text{ac}} \right)^2 + \lambda_{\text{fc}}^{\text{ev}1} (p_{t, \text{best}}^{\text{ev}} - p_t^{\text{ev}}) + \right. \\
&\quad \left. \lambda_{\text{fc}}^{\text{ev}2} \left(p_{t, \text{best}}^{\text{ev}} - p_t^{\text{ev}} \right)^2 \right) T
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{\text{dr}} &= \sum_{t=0}^{t=t_{24}} \left(p_{t,j}^{\text{g, big}} \varphi_t^{\text{g, big}} + p_{t,j}^{\text{g, mg}} \varphi_t^{\text{g, mg}} + p_{t,j}^{\text{g, ng}} \varphi_t^{\text{g, ng}} - p_{t,j}^{\text{s, ng}} \varphi_t^{\text{s, ng}} - \right. \\
&\quad \left. p_{t,j}^{\text{s, mg}} \varphi_t^{\text{s, mg}} + p_{\text{pv}, t, j} \varphi_{\text{pv}} + p_t^{\text{cut}} \varphi_t^{\text{cut}} + p_t^{\text{shift}} \varphi_t^{\text{shift}} + \right. \\
&\quad \left. p_t^{\text{itr}} \varphi_t^{\text{itr}} + \lambda_{\text{dr}}^{\text{cut}1} p_t^{\text{cut}} + \lambda_{\text{dr}}^{\text{cut}2} (p_t^{\text{cut}})^2 + \right. \\
&\quad \left. \lambda_{\text{dr}}^{\text{shift}1} p_t^{\text{shift}} + \lambda_{\text{dr}}^{\text{shift}2} \left(p_t^{\text{shift}} \right)^2 + \lambda_{\text{dr}}^{\text{itr}1} p_t^{\text{itr}} + \lambda_{\text{dr}}^{\text{itr}2} (p_t^{\text{itr}})^2 \right) T \\
C_{\text{pr}} &= \sum_{t=0}^{t=t_{24}} \left(p_{t,j}^{\text{g, big}} \varphi_t^{\text{g, big}} + p_{t,j}^{\text{g, mg}} \varphi_t^{\text{g, mg}} + p_{t,j}^{\text{g, ng}} \varphi_t^{\text{g, ng}} - p_{t,j}^{\text{s, ng}} \varphi_t^{\text{s, ng}} - \right. \\
&\quad \left. p_{t,j}^{\text{s, mg}} \varphi_t^{\text{s, mg}} + p_{\text{pv}, t, j} \varphi_{\text{pv}} + p_{t, \text{whole}}^{\text{v}2\text{g}} \varphi_t^{\text{v}2\text{g}} + p_{t, \text{half}}^{\text{v}2\text{g}} \varphi_t^{\text{v}2\text{g}} \right) T \\
C_{\text{mg}} &= \sum_{t=0}^{t=t_{24}} \left(\sum_j^4 p_{t,j}^{\text{g, mg}} \varphi_t^{\text{g, mg}} + \varphi_{\text{ac}} \sum_j^4 p_{t,j}^{\text{g, big}} + p_t^{\text{s}} \varphi_t^{\text{s, bg}} - \right. \\
&\quad \left. p_t^{\text{g}} \varphi_t^{\text{g, bg}} + \sum_j^4 p_{t,j}^{\text{g, big}} \varphi_t^{\text{g, big}} - p_t^{\text{v}} \varphi_{\text{pv}} - \right. \\
&\quad \left. p_t^{\text{w}} \varphi_{\text{pw}} + (p_t^{\text{es, ch}} - p_t^{\text{es, dis}}) \varphi_{\text{es}}^{\text{opc}} + \frac{\varphi_{\text{es}}^{\text{install}}}{24 \times 365 \times N_{\text{es}}} \right) T \\
C_{\text{mgs}} &= C_{\text{mg}} - C_{\text{ng}} - C_{\text{loss}} = \\
C_{\text{ng}} &- \sum_{t=0}^{t=t_{24}} \frac{1}{2} (\lambda_{\text{ng}}^1 \varphi_t^{\text{g, mg}} \varphi_t^{\text{g, mg}} + \lambda_{\text{ng}}^2 \varphi_t^{\text{g, mg}}). \\
&\quad \left(p_t^{\text{load, ps}} - p_t^{\text{base, ps}} + e_i p_t^{\text{base, fc}} - p_t^{\text{base, fc}} + e_i p_t^{\text{base, dr}} - p_t^{\text{base, dr}} \right) + \\
&\quad \left(p_{t, \text{best}}^{\text{ac}} - p_t^{\text{ac}} \right)^2 + \left(p_{t, \text{best}}^{\text{ac}} - p_t^{\text{ac}} \right) + \left(p_{t, \text{best}}^{\text{ev}} - p_t^{\text{ev}} \right)^2 + \\
&\quad \left(p_{t, \text{best}}^{\text{ev}} - p_t^{\text{ev}} \right) + \left(p_t^{\text{shift}} \right)^2 + \left| p_t^{\text{itr}} \right|^2 + \left| p_t^{\text{cut}} \right|^2 + \left(p_t^{\text{shift}} + p_t^{\text{itr}} + p_t^{\text{cut}} \right) \right) T - \\
\lambda_{\text{loss}} &\sum_{t=0}^{t=t_{24}} \sum_{j=1}^4 (p_{t,j}^{\text{s, mg}} + p_t^{\text{s}}) T
\end{aligned} \quad (12)$$

式中: C_{ps} 、 C_{c} 、 C_{dr} 、 C_{pr} 、 C_{mg} 、 C_{mgs} 分别为 PS 型纳网、FC 型纳网、DR 型纳网、PR 型纳网、微网运营商和微网系统的目标函数; C_{ng} 为纳网系统满意度损失成本; C_{loss} 为未消纳清洁能源惩罚; $p_{t,j}^{\text{g, big}}$ 、 $p_{t,j}^{\text{g, mg}}$ 、 $p_{t,j}^{\text{g, ng}}$ 分别为 t 时刻纳网 j 从微网代理购得的主网功率、从微网运营商购得的功率、从其他纳网购得的功率; $p_{t,j}^{\text{s, mg}}$ 、 $p_{t,j}^{\text{s, ng}}$ 分别为 t 时刻纳网 j 出售至微网的功率、出售至其他纳网的功率; $\varphi_t^{\text{g, big}}$ 、 $\varphi_t^{\text{g, mg}}$ 、 $\varphi_t^{\text{g, ng}}$ 分别为 t 时刻纳网购电的主网电价、微网电价、纳网电价; $\varphi_t^{\text{s, mg}}$ 为 t 时刻纳网售微网运营商电价; $p_{\text{pv}, t, j}$ 为 t 时刻纳网 j 光伏的功率; p_t^{v} 、 p_t^{w} 分别为 t 时刻微网光伏、微网风机的功率; p_t^{g} 、 p_t^{s} 分别为 t 时刻微网从主网购电、售电功率; φ_{ac} 为微网运营商代理主网收益系数; φ_t^{cut} 、 φ_t^{shift} 、 φ_t^{itr} 分别为 t 时刻可削减负荷、可中断可转移负荷、不可中断可转移负荷的补贴价格; $\lambda_{\text{fc}}^{\text{ac}1}$ 、 $\lambda_{\text{fc}}^{\text{ev}1}$ 、 $\lambda_{\text{dr}}^{\text{cut}1}$ 、 $\lambda_{\text{dr}}^{\text{itr}1}$ 、 $\lambda_{\text{dr}}^{\text{shift}1}$ 、 λ_{ng}^1 分别为一次项满意度损失系数; $\lambda_{\text{fc}}^{\text{ac}2}$ 、

λ_{fc}^{ev2} 、 λ_{dr}^{cut2} 、 λ_{dr}^{irr2} 、 λ_{dr}^{shift2} 、 λ_{ng}^2 分别为二次项满意度损失系数； λ_{loss} 为未消纳清洁能源损失惩罚系数； φ_t^{v2g} 为 t 时刻 V2G 调度补贴； φ_{pv} 、 φ_{pw} 分别为光伏、风机的发电成本； $\varphi_t^{g,bg}$ 、 $\varphi_t^{s,bg}$ 分别为 t 时刻微网运营商购主网电价、售主网电价； $\varphi_{es}^{install}$ 为储能一次安装费用； N_{es} 为储能使用年限； φ_{es}^{opc} 为储能度电成本； $p_{t,best}^{ev}$ 、 $p_{t,best}^{ac}$ 分别为 t 时刻 FC 型纳网理想电车负荷和理想空调负荷。

3.2 约束条件

每一个纳网具有不同的电能需求运作方式，从自身运行环境特点进行考虑，内部能源设备组成也不一样。

3.2.1 纳网、微网能量系统电能平衡

$$\begin{cases} p_t^{load,ps} = p_{t,j}^{g,big} + p_{t,j}^{g,mg} + p_{t,j}^{g,ng} - p_{t,j}^{s,mg} - p_{t,j}^{s,ng} \\ p_t^{load,fc} = p_{t,j}^{g,big} + p_{t,j}^{g,mg} + p_{t,j}^{g,ng} + p_{pv,t,j} - p_{t,j}^{s,mg} - p_{t,j}^{s,ng} \\ p_t^{load,dr} = p_{t,j}^{g,big} + p_{t,j}^{g,mg} + p_{t,j}^{g,ng} + p_{pv,t,j} - p_{t,j}^{s,mg} - p_{t,j}^{s,ng} \\ p_t^{load,pr} = p_{t,j}^{g,big} + p_{t,j}^{g,mg} + p_{t,j}^{g,ng} + p_{pv,t,j} - p_{t,j}^{s,mg} - p_{t,j}^{s,ng} \\ p_t^v + p_t^w + p_t^g + p_t^{es,dis} + \sum_{j=1}^4 p_{t,j}^{s,mg} = \\ p_t^s + \sum_{j=1}^4 p_{t,j}^{g,mg} + \sum_{j=1}^4 p_{t,j}^{g,big} + p_t^{es,ch} \end{cases} \quad (13)$$

3.2.2 纳网约束

为进行纳网间交易，每个纳网需同时求解，形成统一纳网系统目标。由于每个纳网运营成本不同，需通过式(14)建立购电之间的 0-1 约束。在清洁能源量高于基础负荷需求量时，才允许纳网售卖电能，防止出售电能的纳网购买主网及微网运营商电能支援其他纳网，使多纳网交易时只受纳网之间需求影响。一般情况，纳网富余清洁能源量远小于需求量，通常由具有多余清洁能源的纳网决定纳网间交易量，通过上述约束切断了各个纳网与运营商博弈时对纳网交易的影响。本文的竞争机制主要为纳网系统与微网运营商进行主从博弈，同时运营商依据各纳网基础负荷需求设定各纳网购运营商电能上限。这相当于每个纳网与运营商单独博弈，纳网间互不影响。最终形成交易时独立、博弈时统一的纳网系统。

$$\begin{aligned} 0 &\leq p_{t,j}^{g,big} \leq p_{t,j}^{g,big,max} \alpha_{t,j}^{buy} & 0 &\leq p_{t,j}^{s,ng} \leq p_{t,j}^{s,ng,max} \alpha_{t,j}^{sell} \\ 0 &\leq p_{t,j}^{g,mg} \leq p_{t,j}^{g,mg,max} \beta_{t,j}^{buy} & 0 &\leq p_{t,j}^{s,mg} \leq p_{t,j}^{s,mg,max} \beta_{t,j}^{sell} \\ 0 &\leq p_{t,j}^{g,ng} \leq p_{t,j}^{g,ng,max} \gamma_{t,j}^{buy} & 0 &\leq p_{t,j}^{s,ng} \leq p_{t,j}^{s,ng,max} \gamma_{t,j}^{sell} \\ \alpha_{t,j}^{buy} &= \{0,1\} & \alpha_{t,j}^{sell} &= \{0,1\} & \alpha_{t,j}^{buy} + \alpha_{t,j}^{sell} &\leq 1 \\ \beta_{t,j}^{buy} &= \{0,1\} & \beta_{t,j}^{sell} &= \{0,1\} & \beta_{t,j}^{buy} + \beta_{t,j}^{sell} &\leq 1 \end{aligned}$$

$$\gamma_{t,j}^{buy} = \{0,1\} \quad \gamma_{t,j}^{sell} = \{0,1\} \quad \gamma_{t,j}^{buy} + \gamma_{t,j}^{sell} \leq 1$$

$$p_{t,j}^{s,ng} (p_{pv,t,j} - p_t^{base,j}) \geq 0$$

$$p_{t,j}^{g,mg,max} = \frac{p_t^{base,j}}{\sum_{j=1}^4 p_{t,j}^{base,j}} \times (p_t^v + p_t^w + p_{es}^{set,max}) \quad (14)$$

式中： $\alpha_{t,j}^{buy}$ 、 $\alpha_{t,j}^{sell}$ 、 $\beta_{t,j}^{buy}$ 、 $\beta_{t,j}^{sell}$ 、 $\gamma_{t,j}^{buy}$ 、 $\gamma_{t,j}^{sell}$ 均为 t 时刻的 0-1 变量； $p_{t,j}^{g,big,max}$ 、 $p_{t,j}^{g,mg,max}$ 、 $p_{t,j}^{g,ng,max}$ 分别为 t 时刻纳网 j 购主网电能上限、购微网电能上限、购纳网电能上限； $p_{t,j}^{s,ng,max}$ 为 t 时刻纳网 j 出售至其他纳网功率上限； $p_{es}^{set,max}$ 为某供能场景下运营商储能释放功率上限。

3.3 供能场景设置

为防止微网运营商无限制升高电价，微网系统引入了运营商电价与主网电价形成竞争的机制。微网电能运营商作为微网能源中枢，收取部分代理主网售电费用的同时，主网通过限制其购买主网电量用于自身调度收益，以确保运营商电价的合理性。

由于风光发电具有波动性、随机性和不稳定性特点，造成储能系统的充放参差无序，多变的充放电深度和充放电次数进一步影响系统稳定性^[26]。此外，频繁的充放电操作可能导致储能系统过热或爆炸等安全性问题。在微网运营商确保安全性的前提下，充分利用可再生能源和储能系统，以实现运营商利润的最大化。

通过多次实验，建立了供能场景的指标，这些指标包括风光可支撑幅度、风光波动超限次数、储能充放电深度和储能充放电次数。

$$\begin{cases} \sum_{t=t_0}^{t=t_{24}} p_t^g \leq p_{all}^{g,max} \\ \rho = \frac{\sum_{t=t_0}^{t=t_{24}} (p_t^{load,ps} + p_t^{load,fc} + p_t^{load,dr} + p_t^{load,pr})}{\sum_{t=t_0}^{t=t_{24}} (p_t^v + p_t^w)} \\ \rho_{scene}^{ll} \leq \rho \leq \rho_{scene}^{ul} \\ k_{cross}^{set} \geq k_{cross} \frac{count}{scene} \rightarrow (p_t^v + p_t^w) - (p_{t-1}^v + p_{t-1}^w) \geq p_{ul}^{v,w} \\ \theta_t = \{0,1\} \quad b_t^{es} = b_t^{es,ch} - b_t^{es,dis} \\ \theta_t \leq |b_t^{es} - b_{t-T}^{es}| \leq 2\theta_t \\ k_{pes,min}^{set} \leq \sum_{t=t_0}^{t=t_{24}} \theta_t \leq k_{pes,max}^{set} \\ k_{pes,min}^{set}, k_{pes,max}^{set} \in \{x \mid x = N(0 \leq N \leq 7)\} \\ p_{max}^{es,ch} = p_{scene,max}^{es,ch} \quad p_{max}^{es,dis} = p_{scene,max}^{es,dis} \\ p_{min}^{es,ch} = p_{scene,min}^{es,ch} \quad p_{min}^{es,dis} = p_{scene,min}^{es,dis} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $p_{\text{all}}^{\text{g,max}}$ 为微网运营商的购主网电量上限； ρ 为风光可支撑幅度，衡量清洁能源发电量与电能需求量相对差距， $\rho_{\text{scene}}^{\text{ul}}$ 和 $\rho_{\text{scene}}^{\text{ll}}$ 分别为不同场景下的风光可支撑幅度上下限； k_{cross} 是整数，为风光波动超限次数，统计 t 时刻与 $t-T$ 时刻的风光总功率差值越过上限数值次数，作为供能场景部分区分依据， $k_{\text{cross}}^{\text{set}}$ 为不同场景的设定次数； $p_{\text{ul}}^{\text{v,w}}$ 为风光波动上限值； b_t^{es} 、 b_{t-T}^{es} 分别表示在 t 时刻、 $t-T$ 时刻运营商储能充放电状态，值为 1 表示充电，值为 -1 表示放电，值为 0 表示不充不放； θ_t 为 t 时刻的一个 0-1 变量，与 b_t^{es} 建立不等式约束，限制储能状态改变次数； $k_{\text{pes,max}}^{\text{set}}$ 和 $k_{\text{pes,min}}^{\text{set}}$ 分别为充放电状态改变次数的上下限，均为整数； $p_{\text{min}}^{\text{es,ch}}$ 、 $p_{\text{min}}^{\text{es,dis}}$ 分别为运营商储能充电功率和放电功率的下限； $p_{\text{scene,max}}^{\text{es,ch}}$ 、 $p_{\text{scene,min}}^{\text{es,ch}}$ 和 $p_{\text{scene,max}}^{\text{es,dis}}$ 、 $p_{\text{scene,min}}^{\text{es,dis}}$ 分别为各类场景下储能的充电功率上下限、放电功率上下限。

根据历史的风光数据来看，一般风光可支撑幅度为 $20\% \leq \rho \leq 80\%$ 。当 $k_{\text{cross}}^{\text{set}} > 2$ 且 $40\% \leq \rho \leq 60\%$ 时，纳网系统需求负荷与微网新能源会出现来回覆盖的情况，对储能的充放电会产生较大影响。若对储能充放不进行限制，会造成储能充放切换频繁和充放深度变化过大，对储能的寿命和安全都有较大影响。因此根据以上的指标，建立了风光高发、标准风光、风光低发、风光波动 4 种微网运营商供能场景。当 $\rho \geq 60\%$ 时为风光高发场景，储能充放次数会比较频繁，因此设定最高充放次数为 3，则 $k_{\text{pes,min}}^{\text{set}} = 0$ 、 $k_{\text{pes,max}}^{\text{set}} = 7$ ，风光发电稳定，储能没有波动性风险，较深的充放电深度有利于微利润，因此储能爬坡约束上限为最大充放电功率；当 $40\% \leq \rho < 60\%$ 且 $k_{\text{cross}}^{\text{set}} \leq 2$ 时为标准风光场景，储能充放特性和风光高发基本相同，因此储能充放电深度和次数与风光高发保持一致；当 $40\% \leq \rho < 60\%$ 且 $k_{\text{cross}}^{\text{set}} > 2$ 时，较大的波动对储能系统产生不良影响(附录 A 图 A2)，因此需要减少充放次数和降低充放电功率上下限，则 $k_{\text{pes,min}}^{\text{set}} = 0$ 、 $k_{\text{pes,max}}^{\text{set}} = 5$ ，此时通过降低充放电功率上下限，从而减小充放电值和减少状态频繁变化；当 $\rho < 40\%$ 时为风光低发场景，微网新能源不能很好地支撑负荷需求。波动性对储能影响微乎其微，储能充放电频次和深度的裕度较大，可利用主网的峰谷电价进行套利，增加收益，此时储能设置与风光高发一致。

3.4 多场景下主从博弈互动策略

本文构建了纳网-微网-主网两阶段调度博弈模

型，其互动博弈架构如图 2 所示，模型求解流程如图 3 所示。博弈模型分为领导者和追随者两大主体层级，它们之间的关系可描述为一种具有先后关系的交互迭代过程。微网运营商的目标是通过建立能源供应场景、制定售电价格、进行主网售能代理、管理新能源设备与储能设备出力等策略，实现日总利润最大化。这些策略直接影响纳网系统的行为和需求。纳网系统作为追随者，其目标是通过不同纳网间的能量交易、纳网自身调度以及对各类负荷的削减、转移和替代等策略，平衡用户用能满意度，实现系统自身购能成本的最小化。

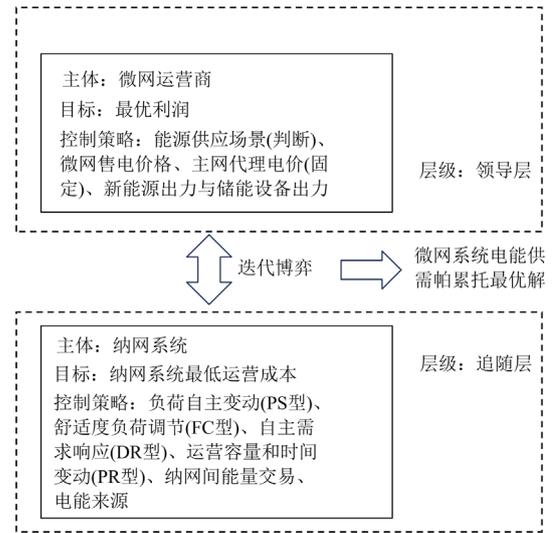


图 2 互动博弈示意图

Fig. 2 Interactive game diagram

阶段一：微网领导者层级确定供能场景、微网售能价格、主网代理售能价格(固定)。

阶段二：系统内纳网根据自身能源需求进行调度和相互交易，纳网系统完成调度并向微网提供自身能源需求策略。

阶段三：微网运营商根据能源供应场景条件和纳网系统能源需求策略，进行成本最优化的供能方式。

以上阶段交互迭代，直至达到纳什均衡，实现微网运营商利润和纳网运营成本的帕累托最优解。

本文博弈流程如下所述。微网运营商确定供能场景，同时运营商设定每个纳网购运营商电能额度上限(全部纳网购运营商电能上限总额由清洁能源发电与该场景储能充放最大容量决定)。各纳网购运营商电能额度上限之比，由各纳网基础负荷之比决定。其后，发布微网电价，各个纳网依据不同时段微网电价、主网电价、纳网电价、纳网内部清洁能源供应进行自主调度。各个纳网决定不同时段购

微网电量、购主网电量、出售或者购买纳网电量。博弈过程中纳网电价具有绝对优势, 因此电能需求较紧迫纳网优先购买纳网电能。某一时刻出售电能的纳网, 在该时刻下不能购买主网电能或运营商电能, 保证交易过程出售的电能为自主调度后多余的纳网电能。通过比较主网电价与微网电价, 各纳网通过最终调度决定各时刻购主网电量及购运营商电量, 各纳网实现自身运营成本最小化。

存在唯一 Stackelberg 均衡策略集须满足: (1) 领导者和跟随者的策略集是非空紧凸集; (2) 当领导者的策略给定以后, 所有跟随者均存在唯一最优解; (3) 当跟随者的策略给定以后, 领导者存在唯一最优解。

本文微网运营商首先确定供能场景, 混沌粒子群算法给出微网售电价, 微网代理主网电价为固定分时电价。纳网电价最具有价格优势, 博弈前即可确定纳网间电能交易量, 因此, 纳网间交易不影响主从博弈。对于纳网的满意度损失函数 $\lambda_1 x^2 + \lambda_2 x$ 为凸函数, 剩余微网系统目标及约束为连续且非空, 因此利用 CPLEX 求解出的策略集都是连续的非空紧凸集, 满足存在唯一 Stackelberg 均衡。图 3 为模型求解流程图。

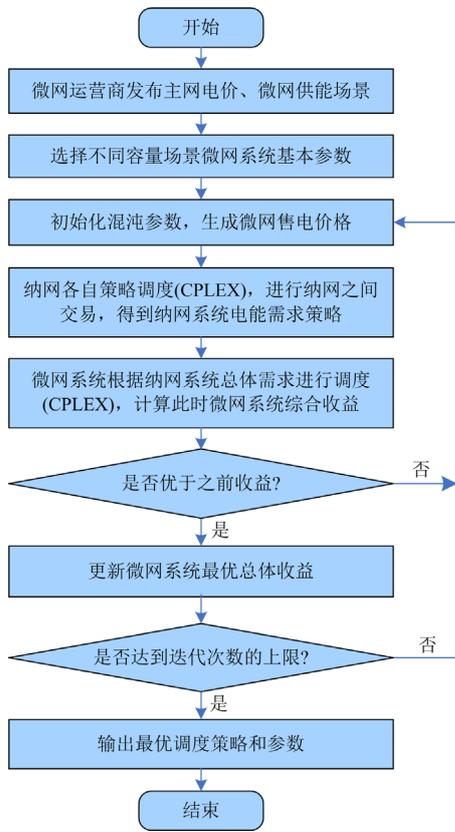


图 3 模型求解流程图

Fig. 3 Model solving flowchart

4 算例分析

本文算例仿真基于 MatlabR2021a 软件, 混沌粒子群算法嵌套 CPLEX 求解器对以上模型进行求解。计算机配置为 IntelCorei7- 10510U 处理器, 主频为 1.8 GHz, 内存为 32 GB。设置混沌系数为 2, 混沌粒子种群规模为 10, 进化次数为 80。伴随着迭代过程, 微网运营商的利润也逐步趋于平衡, 在迭代计算过程中, 当混沌粒子群优化算法经过 60 次迭代后, 优化过程逐渐趋于收敛。

微网系统包括纳网系统和微网运营商, 而微网运营商作为微网系统的关键组成部分, 拥有电能输送控制的功能。为了避免微网运营商垄断营收, 本文采取了一系列措施, 其中之一是建立竞争性的微网运营商电价(微网电价)和主网电价。微网系统中, 纳网系统通过微网运营商购买主网电能, 微网运营商购得的主网电能有一定的额度限制。在购电额度内, 微网运营商享有相对优惠的主网电价。然而, 一旦超过该额度, 微网运营商购电价将上升至微网运营商代理的主网电价水平。这个设计旨在防止微网运营商无限制地套利主网电能, 同时确保购电的公平性和合理性。

4.1 迭代结果

表 1 给出了在不同供能场景下迭代计算出的微网系统综合收益。当混沌粒子群算法经 45 次迭代后, 迭代结果随迭代次数变化较小或几乎不变, 优化过程趋于收敛, 体现出领导者与跟随者的收敛过程是一个相互博弈与妥协的过程。在不同供能场景下, 实现微网运营商与纳网系统利益逐步趋于一致, 释放了新能源潜力, 使得微网系统整体利润的增加趋于稳定。

表 1 微网综合收益表

Table 1 Microgrid comprehensive income statement

迭代次数	高发场景 收益/元	标准场景 收益/元	波动场景 收益/元	低发场景 收益/元
10	4872	3785	3976	2875
20	7694	6786	4896	4765
30	9766	8465	7688	5668
45	11 898	9198	8530	6597
60	11 898	9198	8534	6597

图 4 是经过微网运营商与纳网系统主从博弈得出的不同场景下微网运营商的最终微网售电价格。从博弈结果来看微网运营商电价对主网电价会有跟随性, 主网电价峰谷时段一般也是微网电价峰谷时段。主网电流通需借助微网运营商控制的网架结

构进行，微网运营商通过平衡微网电价与代理主网电价，从而影响纳网系统跟随者的调度策略。若微网电价高于主网代理电价，纳网系统优先购买主网电能，微网运营商倾向于将清洁能源存储于储能系统中，微网电价升高时，将存储电能售卖给纳网系统。其次，微网电能价格相对主网电价保持优势地位时，纳网系统倾向于向微网运营商购买清洁能源。微网运营商提升微网电价，此时各个纳网总体用能成本上升，各纳网通过自身调度减少该时刻用电量或者用电负荷时间段转移，平衡电价上升带来总体成本上涨；若微网运营商某时刻降低微网电价，各个纳网通过增加该时刻各类可调节负荷用量，用以减轻用能满意度成本损失。纳网系统与微网运营商通过主从博弈找到双方接受的最优帕累托解，显然博弈后的微网价格变化具有合理性。

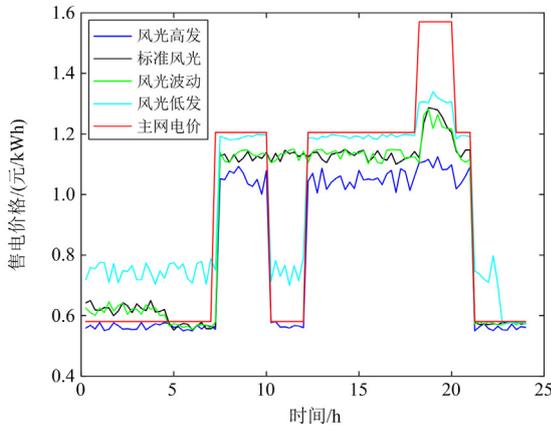


图 4 多供能场景微网系统售电价格

Fig. 4 Price of electricity sold by the microgrid system in multiple energy supply scenarios

4.2 算例对比

为了说明本文所提的优化策略的合理性和可行性，使用单一变量的方案控制原则，设立了 4 种对比方案如下。

方案 1：未建立供能场景、采用固定分时电价机制、未建立多种类纳网自身调度与纳网间交易。

方案 2：建立了供能场景、采用固定分时电价机制、未建立多种类纳网自身调度与纳网间交易。

方案 3：建立了供能场景和价格博弈机制、未建立多种类纳网自身调度与纳网间交易。

方案 4：建立了供能场景、价格博弈机制、多种类纳网自身调度与纳网间交易。

根据上述方案，设计实验评估不同优化方案，并制定相应的指标以展示优化效果。为较好地显示供能场景对能源利用的细化作用，对于未建立供能

场景的方案，求解结果也需要利用供能场景出现概率(高发为 20%、标准为 45%、波动为 20%、低发为 15%)进行加权，与建立了供能场景的方案进行综合对比。

根据以上方案，经过优化计算，求解出了各个方案下的各纳网综合成本、微网运营商综合利润、纳网系统满意度损失成本、微网系统综合收益、微网未消纳绿色能源电量、微网系统清洁能源利用率、可控负荷比等指标，如表 2 所示。

表 2 优化计算结果对比

Table 2 Comparison of optimized calculation results				
指标	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
PS 型纳网综合成本/元	10 798	10 774	10 761	10 634
FC 型纳网综合成本/元	10 908	10 896	10 881	9901
DR 型纳网综合成本/元	5293	5284	5270	4858
PR 型纳网综合成本/元	6742	6737	6730	5430
微网运营商综合利润/元	8473	8733	9312	10 585
纳网系统满意度				
损失成本/元	1783	1732	1614	1370
微网系统综合收益/元	6690	7001	7698	9215
微网系统未消纳绿色能源电量/kWh	3501	3294	1170	183
微网系统清洁能源利用率/%	86.4	87.3	95.1	99.2
可控负荷比/%	0	0	0	21.3

对比方案 1 与方案 2，方案 2 引入了微网供能场景，4 种纳网用能成本略微下降，但下降幅度有限。主要是因为固定分时电价的保守和不合理限制了纳网系统对运营商的电能需求。从数据来看，微网运营商收益增加了 260 元，微网系统综合收益增加了 311 元，同时有效地减少了微网系统未消耗的电能 207 kWh，纳网系统满意度损失成本减少了 51 元。对比方案 2 和方案 3，方案 3 中引入了电价博弈机制，使得 4 种纳网用能成本下降仍然受限。在博弈过程中，主要是纳网系统没有进行电能自主调度，而是被动地与微网运营商进行博弈。从数据来看，微网运营商收益增加了 579 元，纳网系统满意度损失成本减少了 118 元，微网系统未消纳绿色能源电量下降了近 64%，微网系统综合收益增加了 697 元。电价博弈机制有效地提升了微网系统的综合效益。

对比方案 4 与方案 3，负荷变动型纳网运营成本减少了 127 元，其调度设备较少且用能需求较多，成本下降幅度受限。其他类型纳网的运营成本下降趋势显著，微网运营商收益增加了 1273 元，微网系统综合收益增加了 1517 元，未消耗清洁能源减少了

987 kWh, 大幅提升了清洁能源的消纳能力。

从微网系统清洁能源利用效率层面, 通过建立供能场景, 加强了微网运营商在集中储能系统中对清洁能源传输能力的提升, 清洁能源消纳从 86.4% 提升至 87.3%。微网系统目标中引入纳网系统满意度损失成本、清洁能源未消纳惩罚, 建立纳网系统与微网运营商主从博弈机制, 清洁能源消纳从 87.3% 提升至 95.1%, 清洁能源利用效率大幅提升。最后, 不同的纳网模型形成纳网间交易和自主性调度机制, 将清洁能源利用率从 95.1% 提升至 99.2%, 同时将可控负荷进行框架化处理, 可控负荷占比提升至 21.3%, 增强了微网系统的稳定性。通过博弈与调度, 实现了纳网系统、微网运营商的多赢局面。

综上所述, 所提出的多主体下主从博弈两阶段优化调度策略在考虑多元化纳网交易和微网运营商电价机制方面是有效的。接下来, 进一步分析调度结果图, 以验证本文策略的合理性和可行性。

4.3 主从博弈优化结果分析

主网电价、微网电价和纳网电价的建立, 拓宽了各纳网的购电路径, 进一步提升了纳网的调度能力。各纳网用能时间峰谷、用能量大小有差异, 其差异是由各纳网不同用能设备、用能目标决定的。通过提出不同纳网模型, 能较细化地区分用能情况, 增强纳网自主调度精准性。在同一时刻, 部分纳网有富余电能, 部分纳网缺乏电能, 此时纳网间电能交易才能发生。通过不同的纳网模型可显著区分各纳网用能目标, 形成较为准确的各纳网不同时段可调度电能总量, 对各纳网进行最优化求解, 促进纳网间电能交易。

4.3.1 微网运营商博弈调度结果

图 5 为高发场景下不同时刻的微网运营商各部分电能流动情况。从全天时段观察, 微网运营商购能主要集中在主网电价低谷时段, 此时间段清洁能源供给不足以支撑纳网系统需求, 购主网电能进行弥补, 同时可在购能额度内获取代理费用。储能为主网前期低谷电价时(00:00—07:00), 存储部分清洁能源, 在微网电价较高时(07:00—10:30)放电进行套利。清洁能源富裕时, 储能大量充电, 微网电价高时段, 储能放电增强, 全天结束时释放电能至储能设置值。结合图 4 中的各场景微网电价, 可以发现, 在高发电量场景下, 微网运营商产生大量清洁能源, 利用储能较大的爬坡额度和较宽裕的充放次数, 增强能源输送能力。依靠显著的微网价格优势, 极大地刺激了纳网系统的能源消耗潜力, 避免了大量能源被弃掉或以较低价格卖给主网。

图 6 为标准场景下运营商电能流动结果。运营

商购能时间段与高发场景基本一致, 但购主网电量总量低于高发场景。前期电价低谷时段(00:00—05:00)和富余清洁能源时段(10:00—16:40), 储能将所有清洁能源进行存储, 电价较高时段(06:00—10:00)释放电能。相较于高发场景, 该场景用于储能的富余清洁能源较少且直接出售的清洁能源较少, 但储能传输的清洁能源量更多。结合图 4, 可以发现, 在标准场景中, 全天电能价格高于风光高发场景电能价格。在清洁能源不够充裕、微网运营商购主网电有一定额度的条件下, 为保证较好的电能收益, 运营商提升了各时段的微网电价, 但放弃与主网竞争前期低谷电价时段的微薄利润, 有效地降低了纳网系统对微网运营商的电能需求。

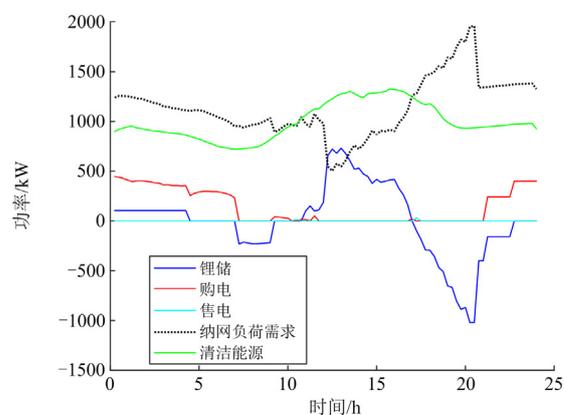


图 5 风光高发场景微网运营商电能流动

Fig. 5 Power flow of microgrid operators in the scenario of high wind and solar power generation

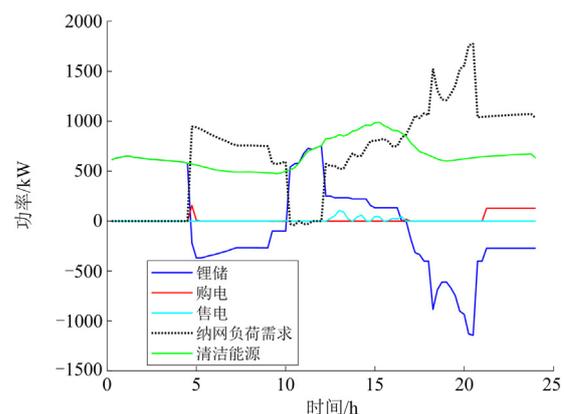


图 6 风光标准场景微网运营商电能流动

Fig. 6 Power flow of microgrid operators in the standard scenario of wind and solar power generation

图 7 为波动场景下不同时段各部分电能流动功率情况。由图 7 可知, 运营商购主网电能时间段趋于分散, 购主网电能主要集中在清洁能源与储能支

撑纳网系统用能不足时段。运营商储能存储电能主要集中在微网电价较低和有富裕充足清洁能源时段。相较于标准场景，该场景清洁能源参差变化较大，会出现清洁能源与纳网系统用能负荷交互覆盖的局面，会造成储能充放切换频繁，因此限制储能爬坡速率、减少储能充放次数。对比图 7 和图 6，可以发现储能爬坡能力有所下降，有较多的清洁能源出售。设定该供能场景，虽然损失一点经济性，但有效地保护了储能系统安全，延长了储能系统的寿命。对比图 4，可以发现在波动场景中，电价与标准场景电价变化基本一致，纳网系统电能需求明显降低，也可得出微网运营商电价的主要影响因素是清洁能源发电量和纳网系统能源需求量相对大小。

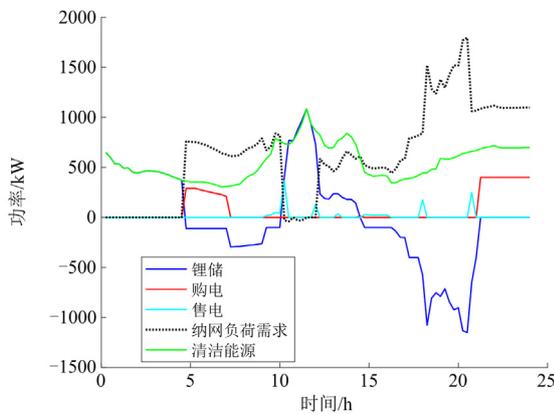


图 7 风光波动场景微网运营商电能流动

Fig. 7 Power flow of microgrid operators in wind and solar fluctuation scenarios

低发场景下运营商各部分电能流动情况如图 8 所示。微网运营商在全天的大部分时间都在购买主网电能，并将这些购买的电能主要用于储能。后期主网低谷电价时段(22: 30—24: 00)，微网运营商购买主网电能，用于支撑纳网系统用能。在前期主网电价较低时，储能系统存储清洁能源和购买的主网电能，微网电价较高时段(07: 00—10: 00、15: 00—21: 30)，储能系统释放电能用于套利。相较于标准场景，该供能场景对纳网系统供能量和供能时间段都明显减少，并且储能充放次数多于标准场景。微网运营商清洁能源供给不足的情况下，由图 4 可知，避开与主网低谷电价竞争的利润低廉时间段，进一步提升全天电价，最大限度地减少纳网系统能源需求量。

供能场景设置前后的清洁能源传输量结果如图 9 所示。对比方案 1 和方案 2，通过建立供能场景，在安全裕度内建立适用于高发、标准、波动、低发场景的储能约束范围，保证对储能寿命^[27]影响较小

的情况下，形成较合理的储能充放次数，能一定程度上提升清洁能源消纳量，增加运营商收益。

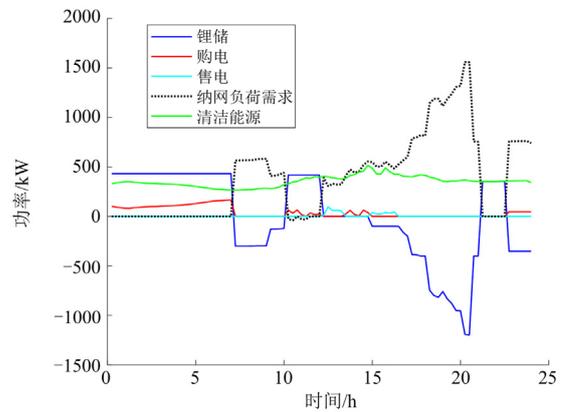


图 8 风光低发场景微网运营商电能流动

Fig. 8 Power flow of microgrid operators in scenarios of low wind and solar power generation

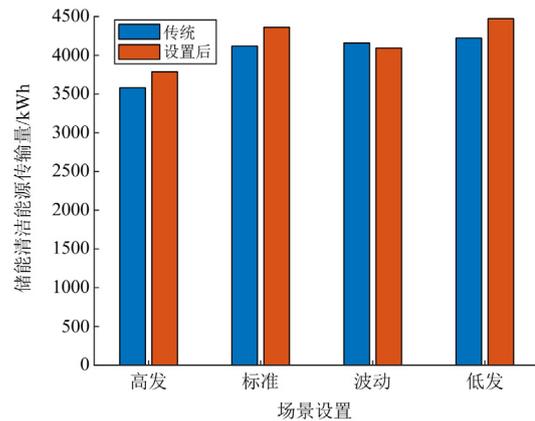


图 9 供能场景设置前后储能清洁能源传输量

Fig. 9 Energy storage and clean energy transmission before and after the energy supply scenario

不同方案清洁能源消纳结果如图 10 所示。对比方案 1、方案 2、方案 3，通过建立纳网与运营商之间的博弈策略，在不同的供能条件下，能够明显提升纳网整个系统的清洁能源消纳量。通过运营商与纳网系统的博弈，建立不同场景下的合理的微网电价，能有效激发纳网系统能源消费能力。引入主网运营商竞争能防止运营商无限制提升电价，在某些情况下微网运营商可保持相对主网优势的电价，增加其调度能力、灵活性，也增强微网系统安全稳定性。将纳网进行多元化分类，明确调度目标，赋予其有良好的自主调节能力，通过自主调度、博弈、引入主网电价、交易，有效降低其运营成本的同时增强了电能消费能力。

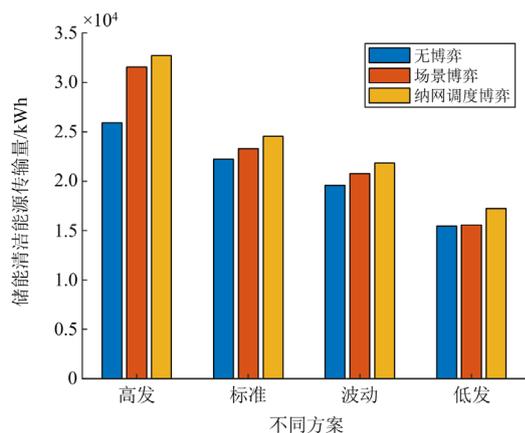
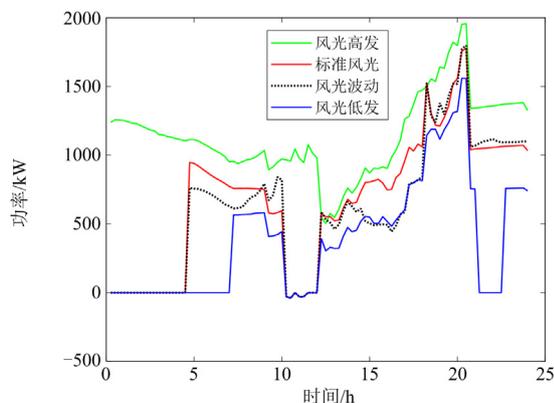


图 10 不同方案清洁能源消纳量

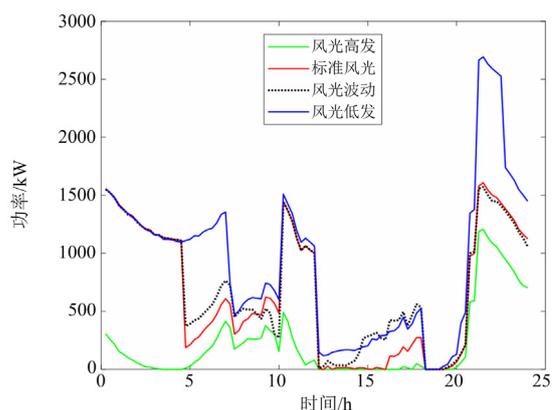
Fig. 10 Clean energy consumption in different scenarios

4.3.2 多场景纳网系统主网需求与多纳网交易分析

结合图 4, 对比图 11 纳网系统购主网功率与微网运营商功率图可得, 当主网电价优于微网运营商电价时, 纳网系统购买大量主网电能, 反之纳网系统购买微网运营商电能。其次, 对比不同场景, 风光高发场景下, 微网运营商清洁能源充足且微网运营商电价优势明显, 纳网系统优先购买微网清洁能源。在标准风光和波动风光场景之下, 相较于高发场景, 微网运营商电价在部分时段有所上升, 但仍具有价格优势, 纳网系统购电主要集中于微网运营商。各纳网通过自身调度减少购电量或调节用电时段, 导致纳网系统总体用电量有所下降。在低发场景中, 微网运营商电价高于主网电价的时段进一步增加, 使得纳网系统的总用电需求进一步降低, 对微网运营商电能需求也进一步降低, 此时纳网系统购入主网电能接近总电能需求的 50%。由此可见, 通过形成合理的微网运营商电价和纳网系统电能需求的主从博弈, 实现了清洁能源的高效利用, 使得微网系统整体收益最大化。



(a) 低发场景微网运营商电能流动



(b) 纳网系统购主网功率

图 11 纳网系统购主网功率与微网运营商功率图

Fig. 11 Diagram of nanogrid system purchasing main grid power and microgrid operator power

纳网之间的交易价格固定且低于微网运营商电价和主网电价, 因此对于交易纳网双方均有益。风光高发场景下纳网之间电力交换如图 12 所示, 在 07:00—13:30 时段, 盈利型纳网光伏发电功率逐步上升, 但内部负荷需求不足以消纳逐步上升的光伏功率, 舒适度需求型用能满意度损失成本高于其他需求纳网, 因此, 舒适度需求型纳网与盈利型纳网优先进行电能交易。而在负荷变动型纳网满意度损失成本较高时, 其优先进行纳网交易。在 12:00—13:30 时段, 富余清洁能源纳网增多, 每个纳网有交易上限约束和功率平衡约束, 因此负荷变动型纳网与舒适度需求型纳网可同时交易。不同类型纳网的电能需求具有差异性, 一些纳网具有光伏发电系统, 在光伏发电高峰时, 部分纳网存在无法消纳光伏能源的情况, 而另一些纳网供能紧张, 因此, 建立纳网之间的电能交易模式, 不同类型的纳网进行

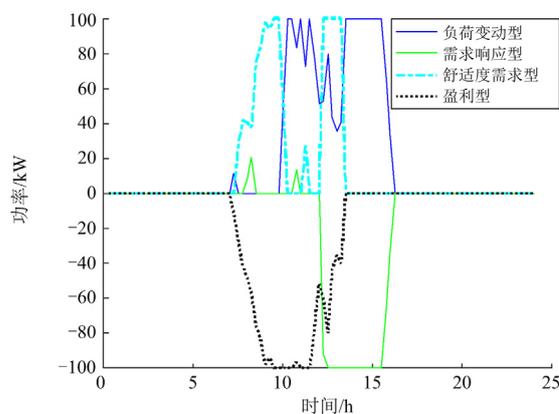


图 12 风光高发场景纳网之间电力交换

Fig. 12 Power exchange between nanogrids in high wind and solar power generation scenarios

自身调度，确定自身的交易功率，有助于降低交易纳网系统运行成本，提升电能利用效率。纳网交易主要针对各纳网能源供给与需求的错配，而场景对其影响较小，因此只采用风光高发场景下的纳网交易结果。

4.3.3 负荷变动型纳网

负荷变动型纳网是一种生产类型纳网，生产成本是决定性因素，因此受全天电价高低和不同时段电价波动的影响较大。观察图 13 所示的不同时段负荷波动幅度，不同时间段的总体电价(微网运营商电价和主网电价)变动剧烈程度越大，负荷变化量越大。在 18:00—20:00 时段，峰值电价与全天总体电价的叠加作用导致负荷变动型纳网的负荷缩减约 17%。在总体电价低谷时(00:00—07:00、10:30—12:00、21:30—24:00)，负荷变动型纳网变动后增加约 15% 的自身负荷功率。在剩余时段，负荷变动型纳网根据电价起伏的时间段调整自身负荷功率。当作为电能消费方与其他纳网交易时，整体上保证自己的生产效率的同时，最优化用电成本。在不同场景下，负荷变动型纳网的变动幅度略有差异，但具有一定的限度。其他场景下该纳网的负荷图由附录 A 图 A3 进行了展示。

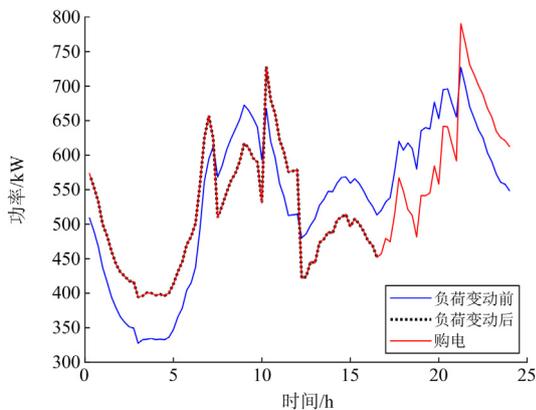


图 13 高发场景负荷变动型纳网平衡优化结果

Fig. 13 Balance optimization results of load-fluctuating nanogrid in high-power generation scenario

4.3.4 需求响应型纳网

本文中，需求响应型纳网仅专注于对一栋楼宇的用电负荷进行调度。需求响应型纳网储能的主要功能是存储多余的光伏电能并支撑需求响应型纳网的运行，而不参与纳网间电能交易。对于居住属性的楼宇，通过征集在不同时段愿意响应的用户数量，得出可调度的不同时间段的 3 种负荷类型的容量空间，即可削减负荷、可中断可转移负荷以及不可中断可转移负荷。需求响应型纳网功率平衡优化结果如

图 14 所示，电价低谷时段(00:00—07:00、21:30—24:00)纳网主要依靠购电以维持纳网正常用能需求。纳网光伏发电量达到峰值时，纳网无法消纳，优先进行纳网交易，将多余光伏电力储存起来。在 17:30—21:30 时段，光伏电量逐步下降，此时所有电价均较高，储能系统进行放电以支撑纳网需求，从而减少购电成本。需求响应型纳网在调度过程中全面考虑了储能系统的运用、电价波动、供能场景以及电能销售方等多个因素，从而显著增强了纳网用能的灵活性。这种综合性的考虑有助于纳网在不同情景下更加灵活地应对电力需求，使得系统更具弹性。

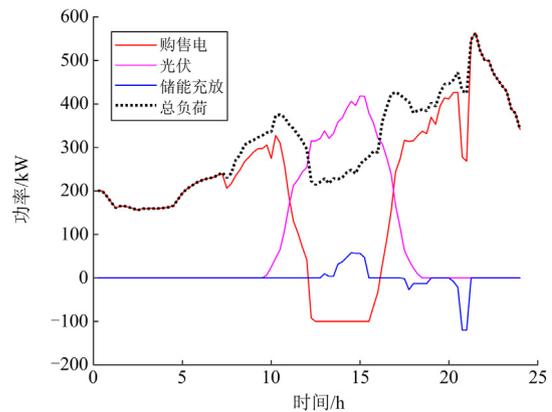


图 14 需求响应型纳网功率平衡优化结果

Fig. 14 Power balance optimization results of demand-responsive nanogrid

关于负荷的调整，削减负荷指的是直接减少该负荷需求的一部分，而转移负荷(可中断负荷、不可中断负荷)则是将用电的时间段进行调整，不改变负荷用量。图 15 中转移负荷的负值表示此时进行转移负荷，正值表示转移后补充负荷，全天转移负荷与补充负荷之和为 0。4 种场景需求响应型纳网可调负荷变化如图 15 所示，不可中断可转移负荷调整时间段为 10:00—24:00；可中断可转移负荷调整时间段为 10:30—16:00 和 18:00—24:00；可柔性削减负荷调整时间段为 07:00—21:30，正值为当前时间段削减负荷。在高发场景下的低谷电价时，柔性削减负荷、可中断可转移负荷、不可中断可转移负荷的调整均较小。在高发场景下的低谷电价时，侧重于提高用电满意度，储能充放深度较小。在标准场景和波动场景下的适中电价时，3 种需求响应负荷的调整增加。为了应对微网运营商电价的上升，可能会牺牲部分用户满意度，同时储能充放功率会加大，以提升纳网运行的经济性。在低发场景下的较高电价时，侧重于提高纳网运营的经济性，3 种需求响应接近响应容量的上限，同时储能充放的深度进一

步增加。这种不同场景应对策略, 既保证了用电满意度损失成本较小, 又提高了纳网运行的经济性, 能

够在多种电能供给条件下进行灵活应变。

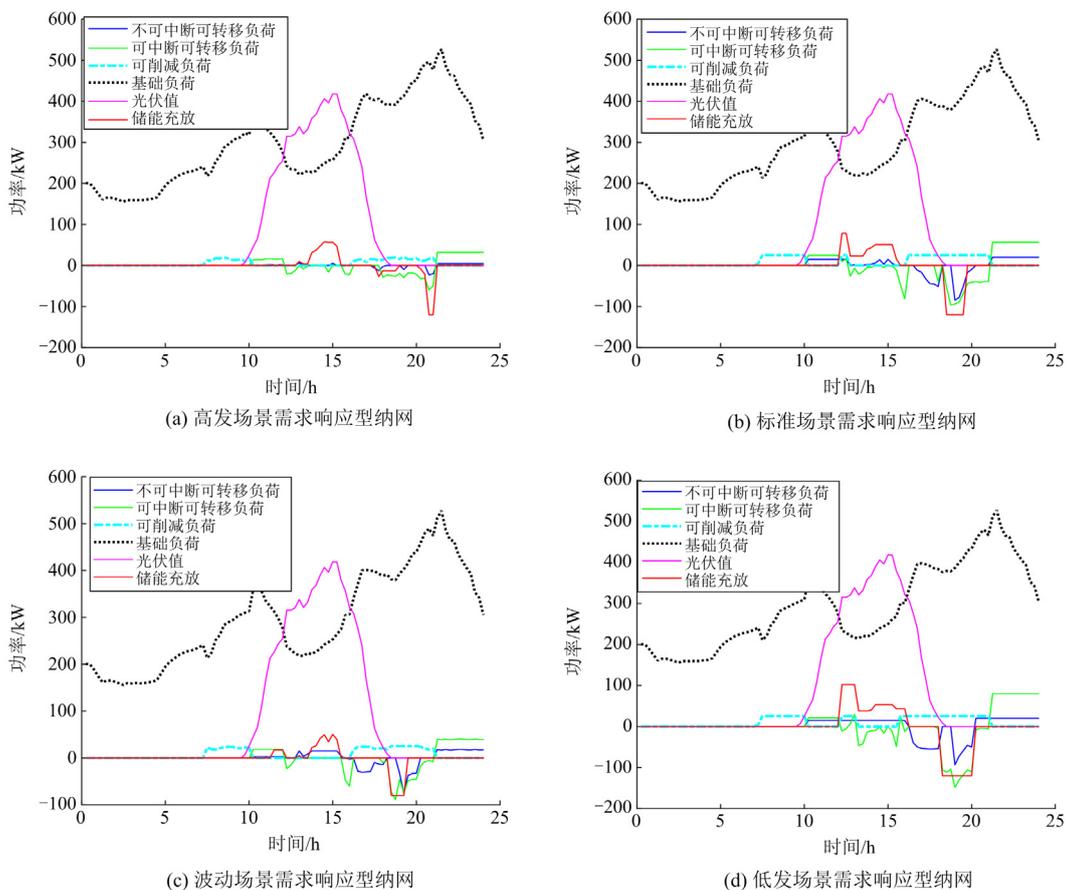


图 15 4 种场景需求响应型纳网可调负荷变化

Fig. 15 Adjustable load change of demand-responsive nanogrid in four scenarios

4.3.5 舒适度需求型纳网

舒适度需求型纳网功率平衡优化结果如图 16 所示。舒适度需求型纳网内部光伏系统只能支撑负荷需求的 40%~50%。空调制冷负荷需求约占总负荷需求的 40%, 在 11:00—18:00 时段呈现制冷负荷需求最大峰值。电动汽车负荷需求约占总负荷需求的 15%, 在 16:00—21:00 时段呈现需求最大峰值。空调制冷负荷需求与充电负荷均在 00:00—08:00 时段呈现制冷负荷需求低谷。通过空调制冷负荷及电动汽车负荷的用能满意度损失函数, 得到空调制冷负荷和电动汽车负荷调节范围, 依靠自身调度策略与纳网间交易策略, 使得在高峰时段和低谷时段能够有效地调整负荷需求, 以平衡用户的舒适度和系统运营的经济性。舒适度需求型纳网能够很好地与纳网系统进行互动, 作为纳网交易的电能消费者, 不仅能降低该纳网运营成本, 还能增加其他纳网收益, 明显提升了微网系统清洁能源消纳能力和整体收益。

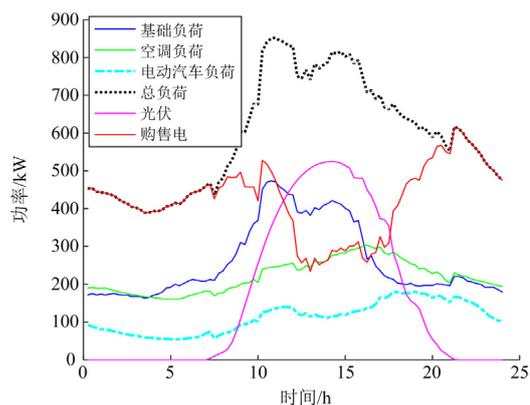


图 16 舒适度需求型纳网功率平衡优化结果

Fig. 16 Power balance optimization results of comfort-based demand nanogrid

4 种场景舒适度需求型纳网中的空调负荷需求和电车负荷需求变化如图 17 所示。在主网电价低谷时段(00:00—07:00、10:30—12:00、21:30—24:00),

舒适度需求型纳网能够以低廉的电价购买足够的电能。在上述时段，空调负荷和电车负荷均可达到理想负荷供给，受供电场景和微网运营商电价的影响较小。在负荷供给方面，高发场景下，在非电价低谷时段(07:00—10:30、12:00—21:30)，空调制冷负荷供给和汽车充电负荷供给接近理想负荷供给。标准和波动场景下，这两项负荷供给有下降趋势。

低发场景下，这两项负荷供给下降至其供给下限值。舒适度需求型纳网在电价低谷时段能够以较低的成本满足用户的需求。而在非电价低谷时段，其负荷供给受到供电场景和微网运营商电价的影响。通过博弈的方式实现了舒适度需求型纳网在经济性和用能满意度损失之间的动态平衡。

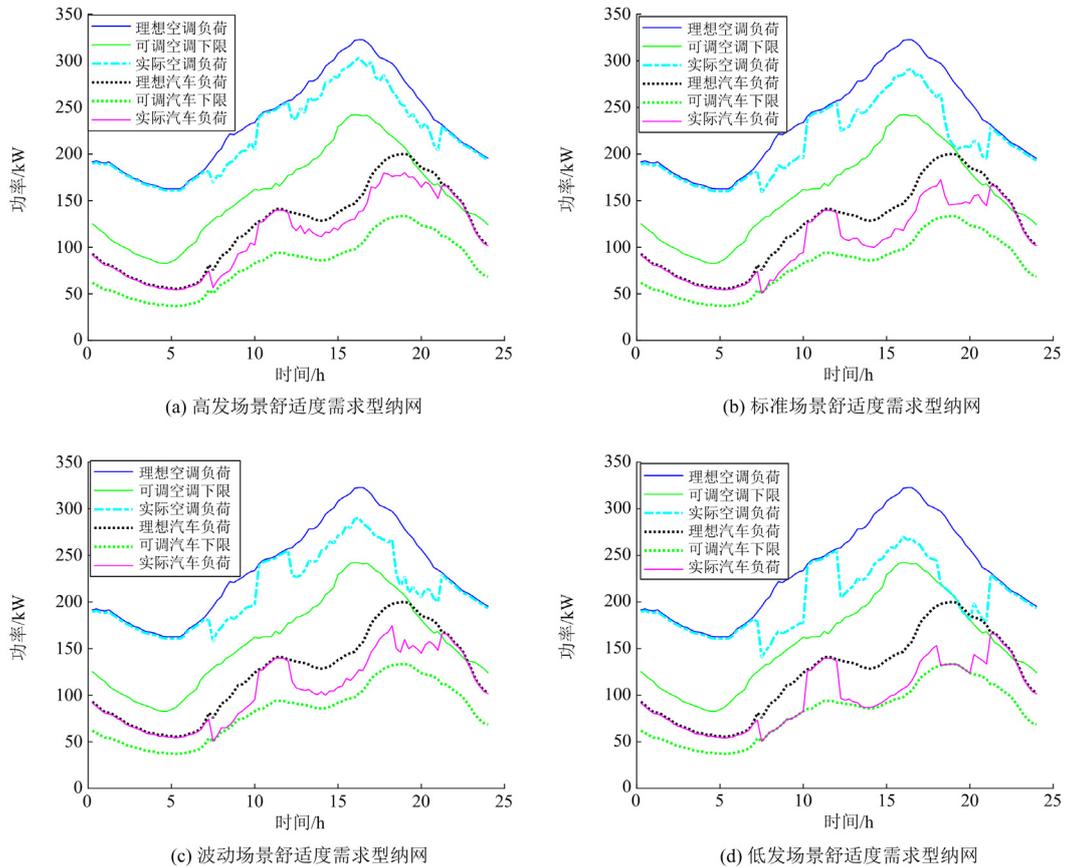


图 17 4 种场景舒适度需求型纳网可调负荷变化

Fig. 17 Adjustable load change of comfort-based demand nanogrids in four scenarios

4.3.6 盈利型纳网

此纳网用能特点为 V2G 集中充电，导致短时间内负荷剧增。然而，存在全天不出行车辆以及半天不出行车辆的情况，通过灵活调度电动汽车充电时间，利用峰谷差电价和双向能量传输，能够改变电能需求时段，从而降低纳网运营成本。

盈利型纳网功率平衡优化结果如图 18 所示，发现盈利型纳网光伏发电与用电需求存在错配。在这种情况下，通过纳网调度可以在富余电能时间段(例如 07:00—13:50)将多余的电能输送到其他有需求的纳网。如果其他纳网没有需求，还能够以成本价卖给纳网运营商。

对比图 18 和图 19，相较于未经调度的情况(总

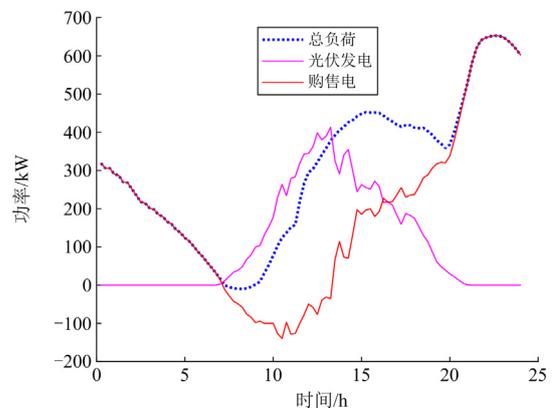


图 18 盈利型纳网功率平衡优化结果

Fig. 18 Power balance optimization results of profitable nanogrid

负荷需求与灵活型 V2G 曲线峰谷一致), 调度前的负荷需求峰值在 17:00 左右, 此时无论是主网电价还是微网运营商电价都相对较高。通过纳网调度, 将用电峰值推移至 21:50 左右的低谷电价时段, 依靠 V2G 放电维持纳网稳定性, 进一步有效降低了盈利型纳网的运行成本。此调度策略具有较好的灵活性和经济性, 使得纳网系统更适应电价波动, 纳网系统的用电需求与发电量更匹配, 同时降低了运营成本。

根据上述对比分析, 盈利型纳网通过自主调度, 将全天型 V2G 和半天型 V2G 的负荷需求时间段成功地调整到电价较低的时间段, 从而有效降低了微网运营成本, 增加了利润收入。通过对比 4 种场景

下的负荷变化情况, 可以观察到, 在高发场景下, 充足的电能和低廉的电价使得盈利型纳网的盈利空间受到一定压缩, V2G 全天放电时间和放电量接近 0。然而, 在 14:00—21:00 时段, 标准和波动场景下, 全天型 V2G 的调度电量相较于高发场景显著增加, 而低发场景则进一步提高了调度电量。由于全天型 V2G 和半天型 V2G 最终都需要充满电并且有一定的爬坡约束, 因此, 在低发场景下, 能够调度的负荷量达到了上限。该纳网通过自主调度、与其他纳网交易、与运营商博弈, 能够充分利用电价波动, 实现了清洁能源充足时充分消纳, 清洁能源不足时合理套利。

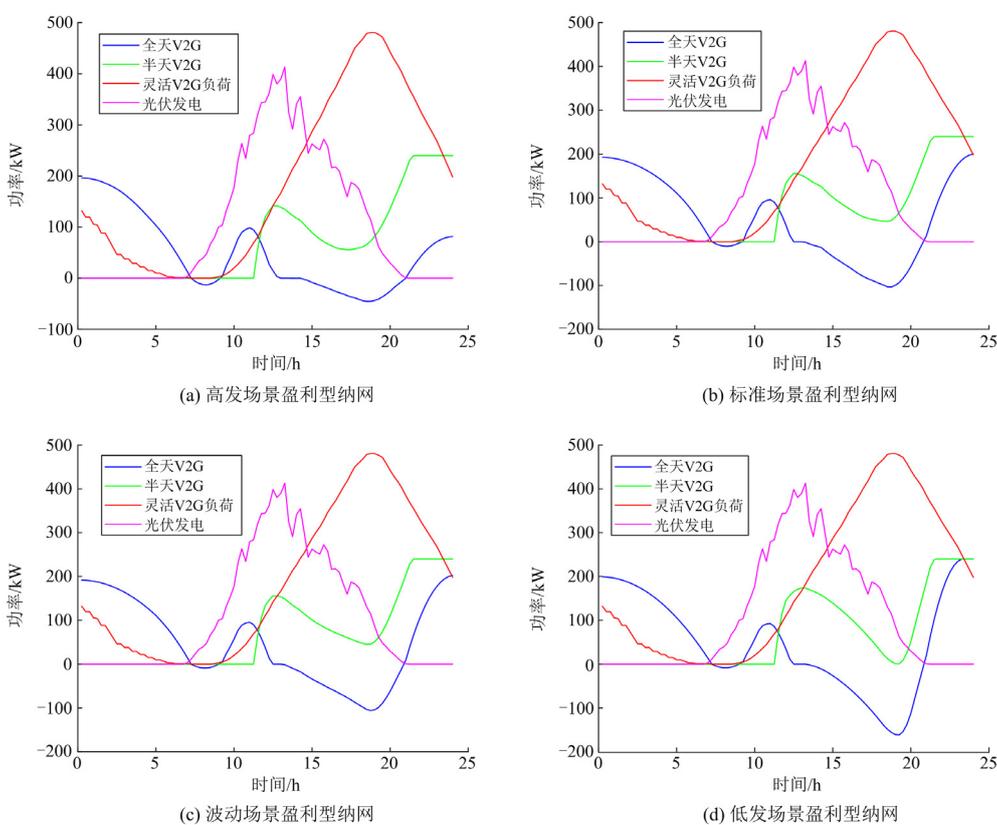


图 19 4 种场景盈利型纳网负荷变化

Fig. 19 Load change of profitable nanogrids in four scenarios

5 结论

本文提出一种考虑多元化纳网交易和微网运营商电价机制的多主体下主从博弈两阶段优化调度策略。以微网运营商为领导者, 纳网系统为跟随者, 求解微网系统内部的纳什均衡解。实现了纳网、微网、主网协同一体化调度, 形成了多元纳网系统、微网运营商交互下的最优收益。最后通过算例仿真, 主要得出以下结论。

1) 多元纳网模型通过自身调度并且进行纳网间电能交易, 能够显著提升纳网运行的经济性, 减少微网系统内部未消纳清洁能源, 提升微网系统运行的绿色经济性。

2) 引入微网供能场景, 较好地提升了储能在不同电能需求下的支撑能力, 延长了储能寿命, 增加了微网运营商的收益, 增强了微网系统清洁能源消纳能力。

3) 引入纳网系统与微网运营商主从博弈机制,

纳网系统用能成本显著降低，纳网系统用能满意度损失显著下降，增强了运营商与纳网系统的电能交互，进一步提升了微网系统清洁能源的自主消纳能力，同时具有显著削峰填谷效果。

附录 A

表 A1 不分场景微网固定分时电价

Table A1 Microgrid fixed time of use electricity price regardless of scenario

时间	电价/(元/kWh)
00:00—03:30、22:30—24:00	0.6
03:30—07:00、21:00—22:30	0.55
07:00—17:30	1.1
17:30—21:00	1.2

表 A2 微网系统内部设备容量

Table A2 Internal device capacity of microgrid system

设备	容量
运营商光伏	500 kWp
运营商风机	1000 kWp
运营商集中储能	5000 kWh
需求响应纳网光伏	500 kWp
需求响应储能	300 kWh
舒适度需求纳网光伏	600 kWp
盈利型纳网光伏	450 kWp

表 A3 分时电价表

Table A3 Time of use electricity price table

时间	微网运营商代理		纳网交易
	主网电价	运营商购主网达	电价
00:00—07:00	0.5802	0.4302	0.52
07:00—10:00	1.2053	1.0553	0.52
10:00—12:00	0.5802	0.4302	0.52
12:00—18:00	1.2053	1.0553	0.52
18:00—20:00	1.5705	1.4205	0.52
20:00—21:00	1.2053	1.0553	0.52
21:00—24:00	0.5802	0.4302	0.52

表 A4 文章内部参数表

Table A4 Internal parameter table of the article

参数	数值	参数	数值
k_{ng}	0.4	λ_{dr}^{itr2}	0.2
k_{mg}	0.5	λ_{dr}^{shift2}	0.2
k_{big}	0.1	λ_{ng}^2	0.03
λ_{tc}^{ac1}	0.002	λ_{loss}	0.25
λ_{tc}^{ev1}	0.0026	α^{ps}	0.2
λ_{dr}^{cut1}	0.003	η_{es}	0.95
λ_{dr}^{itr1}	0.002	n_{cut}	100
λ_{dr}^{shift1}	0.002	n_{itr}	100
λ_{tc}^{ac2}	0.24	n_{shift}	100
λ_{tc}^{ev2}	0.2	n_{whole}	40
λ_{dr}^{cut2}	0.35	n_{half}	60

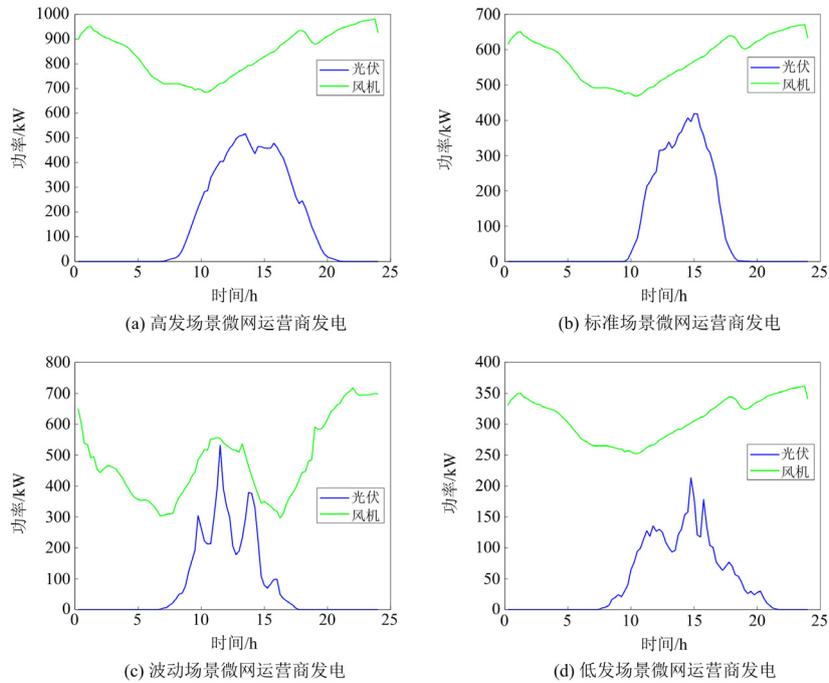


图 A1 4 种场景微网清洁能源电能图

Fig. A1 Clean energy of microgrid in the four scenarios

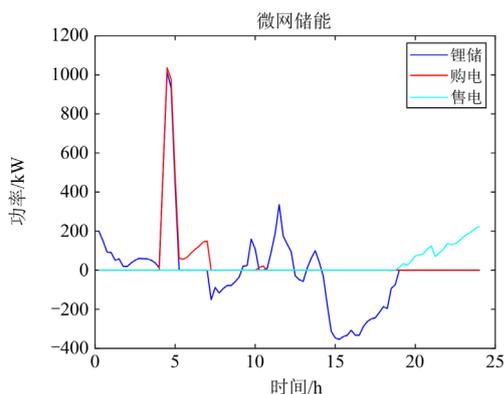
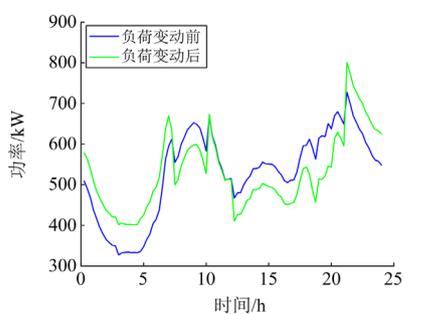
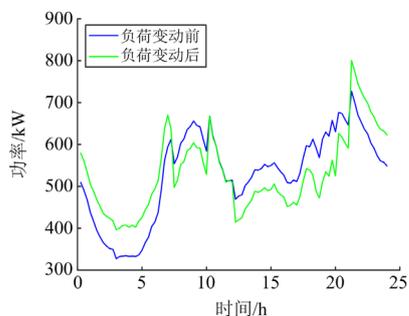


图 A2 风光波动对传统储能设置影响

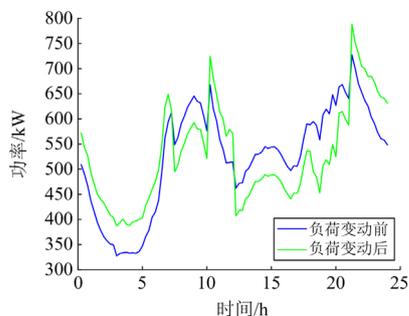
Fig. A2 The impact of wind and solar fluctuations on traditional energy storage settings



(a) 标准场景负荷变动型纳网变化前后负荷



(b) 波动场景负荷变动型纳网变化前后负荷



(c) 低发场景负荷变动型纳网变化前后负荷

图 A3 剩余 3 种场景负荷变动型纳网负荷变动图

Fig. A3 Load variation diagram of the remaining three scenarios in the nanogrid with load variation

参考文献

- [1] NORDMAN B, CHRISTENSEN K. DC local power distribution with microgrids and nanogrids[C] // 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), June 7-10, 2015, Atlanta, GA, USA: 199-204.
- [2] FARZANEH H, SHOKRI M, KEBRIAIEI H, et al. Robust energy management of residential nanogrids via decentralized mean field control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(3): 1995-2002.
- [3] JIN H, LEE S, NENGROO S H, et al. P2P power trading of nanogrids for power management in consideration of battery lifetime of ESS[J]. Energy and Buildings, 2023, 297.
- [4] YANINE F, SANCHEZ-SQUELLA A, BARRUETO A, et al. Energy homeostasis management strategy for building rooftop nanogrids, considering the thermal model and a HVAC unit installed[J]. Procedia Computer Science, 2022, 199: 10-17.
- [5] SANDGANI M R, SIROUSPOUR S. Energy management in a network of grid-connected microgrids/nanogrids using compromise programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(3): 2180-2191.
- [6] JOSEPH S C, MOHAMMED A A, DHANESH P R, et al. Smart power management for DC nanogrid based building[C] // 2018 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS), December 6-8, 2018, Thiruvananthapuram, India: 142-146.
- [7] XU M, LI C, CAI S, et al. Optimal scheduling strategy of nano-grid considering electric vehicle scheduled discharge[C] // 2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), August 1-4, 2021, Chengdu, China: 1490-1494.
- [8] 杨明杰, 胡扬宇, 千海霞, 等. 计及碳排放的综合能源配网日前与日内多时间尺度优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 96-106.
YANG Mingjie, HU Yangyu, QIAN Haixia, et al. Optimization of day-ahead and intra-day multi-time scale scheduling for integrated power-gas energy system considering carbon emission[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 96-106.
- [9] ZHAO B, WANG X, LIN D, et al. Energy management of multiple microgrids based on a system of systems architecture[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6410-6421.
- [10] 戴志辉, 陈冰研. 基于实时电价机制的微网多时间尺度能量管理研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 24-31.
DAI Zhihui, CHEN Bingyan. Research on multi-time scale energy management of micro-grid based on real-time pricing mechanism[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(2): 24-31.
- [11] 傅质馨, 李紫嫣, 朱俊澎, 等. 面向多用户的多时间尺度电力套餐与家庭能量优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 21-31.
FU Zhixin, LI Ziyang, ZHU Junpeng, et al. Multi-user multi-timescale power packages and home energy optimization strategies[J]. Power System Protection and Control, 2022,

- 50(11): 21-31.
- [12] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 22-31.
YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 22-31.
- [13] 初壮, 李秋雨, 王议坚. 基于非零和博弈的互联异构多微网系统电-热-碳优化调度策略[J/OL]. 电网技术: 1-13[2024-03-11]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1355.
CHU Zhuang, LI Qiuyu, WANG Yijian. Optimal dispatch of interconnected heterogeneous multi-microgrids system considering electricity-heat-carbon trades based on non-zero-sum game[J/OL]. Power System Technology: 1-13[2024-03-11]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1355.
- [14] 闫斯哲, 王维庆, 李笑竹, 等. 储能-机组联合调频的动态经济环境跨区灵活性鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 61-70.
YAN Sizhe, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, et al. Cross-regional flexible robust optimal scheduling in dynamic economic environment with joint frequency regulation of energy storage and units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 61-70.
- [15] 张爱枫, 刘或让, 王勇, 等. 计及深度调峰辅助服务与多典型日的年度发电计划优化模型[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(8): 20-31.
ZHANG Aifeng, LIU Huorang, WANG Yong, et al. Annual power generation plan optimization model considering deep peak regulation auxiliary services and multiple typical days[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(8): 20-31.
- [16] 于浩, 沈运帷, 林顺富, 等. 考虑用户心理的商业楼宇集群能量共享优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4423-4436.
YU Hao, SHEN Yunwei, LIN Shunfu, et al. Optimization strategies for energy sharing in commercial building clusters considering user psychology[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4423-4436.
- [17] 胡洁, 李培强, 林仕满, 等. 考虑分时电价差异性和基于主从博弈的智能楼宇集群能量共享方法[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4738-4750.
HU Jie, LI Peiqiang, LIN Shiman, et al. Energy-sharing method for smart building clusters considering differences of time-of-use prices and based on master-slave game[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4738-4750.
- [18] 余苏敏, 杜洋, 史一炜, 等. 考虑V2B智慧充电桩群的低碳楼宇优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 95-101.
YU Sumin, DU Yang, SHI Yiwei, et al. Optimal scheduling of low-carbon building considering V2B smart charging pile groups[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 95-101.
- [19] 杨秀, 胡晓龙, 孙改平, 等. 考虑电能共享的楼宇虚拟电厂协调优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 96-105.
YANG Xiu, HU Xiaolong, SUN Gaiping, et al. Coordinated optimization scheduling of building virtual power plant considering power sharing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 96-105.
- [20] 陈磊, 牛玉刚, 贾廷纲. 基于主从博弈的多微网能量调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 35-42.
CHEN Lei, NIU Yugang, JIA Tinggang. Multi-microgrid energy scheduling strategy based on master-slave game[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 35-42.
- [21] ZHANG Z, TANG H, HUANG Q, et al. Two-stages bidding strategies for residential microgrids based peer-to-peer energy trading[C]// 2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), May 5-8, 2019, Calgary, AB, Canada: 1-9.
- [22] MAHARJAN S, ZHU Q, ZHANG Y, et al. Dependable demand response management in the smart grid: a Stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 120-132.
- [23] SANDGANI M R, SIROUSPOUR S. Energy management in a network of grid-connected microgrids/nanogrids using compromise programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2180-2191.
- [24] HE S, GAO H, TIAN H, et al. A two-stage robust optimal allocation model of distributed generation considering capacity curve and real-time price based demand response[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 9(1): 114-127.
- [25] 周鑫, 韩肖清, 李廷钧, 等. 计及需求响应和电能交互的多主体综合能源系统主从博弈优化调度策略[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3333-3344.
ZHOU Xin, HAN Xiaoqing, LI Tingjun, et al. Master-slave game optimal scheduling strategy for multi-agent integrated energy system based on demand response and power interaction[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3333-3344.
- [26] 邵瀛杰. 考虑电池寿命的储能系统运行优化与综合配置研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
SHAO Yingjie. Optimal operation and configuration research on energy storage systems considering the battery lifetime[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [27] 张莲, 赵梦琪, 廖宗毅, 等. 计及多因素聚合储能寿命的微电网容量优化配置[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(1): 196-203.
ZHANG Lian, ZHAO Mengqi, LIAO Zongyi, et al. Optimal configuration of microgrid capacity for multi-factor polymerized energy storage life[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(1): 196-203.

收稿日期: 2023-12-23; 修回日期: 2024-03-12

作者简介:

邱明石(1998—), 男, 硕士, 研究方向为微网系统优化调度; E-mail: 1004579418@qq.com

陈俊儒(1991—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为并网变换器同步稳定性分析。E-mail: junru.chen@xju.edu.cn

(编辑 魏小丽)