

# 电力市场下虚拟电厂协同运行优化策略研究

李启道<sup>1</sup>, 郝瑗宇<sup>1</sup>, 邓学飞<sup>1</sup>, 刘榕冰<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>国网山西省电力公司, 山西 太原

<sup>2</sup>华北电力大学经济与管理学院, 北京

收稿日期: 2023年11月10日; 录用日期: 2023年11月21日; 发布日期: 2023年12月29日

## 摘要

构建清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统背景下, 新能源装机在全国发电总装机容量中占比不断提升, 其随机性、间歇性、波动性等特征不利于电力系统安全稳定。虚拟电厂可以高效聚合灵活性资源, 实现多类型资源调度优化, 有效挖掘灵活性资源调节能力进而促进新能源消纳。虚拟电厂处于从邀约型迈入市场化的转型期, 已有省份开展了虚拟电厂参与中长期+现货市场模式探索, 但对运行优化策略研究较少。本研究构建了现货市场下虚拟电厂运行优化模型, 并通过算例仿真验证了模型在电力市场环境下虚拟电厂内部资源调度需求方面的有效性。

## 关键词

电力市场, 虚拟电厂, 现货市场, 运行优化

# Research on Optimization Strategy of Virtual Power Plant Cooperative Operation in Power Market

Qidao Li<sup>1</sup>, Yuanyu Hao<sup>1</sup>, Xuefei Deng<sup>1</sup>, Rongbing Liu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan Shanxi

<sup>2</sup>School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing

Received: Nov. 10<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Under the background of building a clean and low-carbon, safe and abundant, economical and ef-  
\*通讯作者。

文章引用: 李启道, 郝瑗宇, 邓学飞, 刘榕冰. 电力市场下虚拟电厂协同运行优化策略研究[J]. 现代管理, 2023, 13(12): 1728-1739. DOI: 10.12677/mm.2023.1312219

efficient, supply-demand coordination, flexible and intelligent new power system, the installed capacity of new energy in the country's total installed capacity is constantly increasing, and its randomness, intermittence, volatility and other characteristics are not conducive to the security and stability of the power system. Virtual power plant can efficiently aggregate flexible resources, realize multi-type resource scheduling optimization, and effectively tap the adjustment ability of flexible resources to promote the consumption of new energy. The virtual power plant is in the transition from the invitation type to the marketization. Some provinces have carried out the exploration of the mode of virtual power plant participating in the medium and long term + spot market, but there are few researches on the operation optimization strategy. In this paper, a virtual power plant operation optimization model is constructed under the spot market environment, and the effectiveness of the model in the internal resource scheduling requirements of virtual power plants is verified by simulation examples.

## Keywords

Power Market, Virtual Power Plant, Spot Market, Operation Optimization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

“双碳”目标下,我国能源电力系统清洁低碳转型任务艰巨,如何在保障能源安全稳定供应的前提下逐步改善能源供给结构成为我国能源转型路径规划和相关战略制定的重要议题[1]。作为支持灵活性资源高效聚合重要手段的虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP) [2],能够对一定区域范围的分布式资源进行有效整合和统一调控[3],充分调动源、荷、储各侧主体参与电网调节的积极性,并结合电力市场的实时情况灵活调整电力供给,进而有效解决新能源发电的强随机性和波动性带来的可再生能源消纳问题,对于充分挖掘灵活性资源调节能力、挖掘分布式风光利用潜力、保障电网供需平衡具有重要意义[4]。

## 2. 国内外研究现状

当前,已有诸多国内外学者进行了关于虚拟电厂运营机制和市场竞价机制的研究,讨论了虚拟电厂运营的商业模式,旨在将虚拟电厂的概念实际化、具象化,为虚拟电厂参与到电力系统的实际运作打下了理论基础。文献[5]提出了基于泛在物联网背景下虚拟电厂的批发、零售两级市场的商业模式与典型交易组织模式。文献[6]综合考虑了市场出清过程、VPP运营利润和DER聚合商的利益,运用混合整数线性规划的方式构建了VPP三层分层框架。文献[7]以最大化VPP的利润为目标,提出了IBDR的多层次激励电价机制和VPP中组件的交互模型。文献[8]研究了虚拟电厂参与调峰市场的具体机制,建立了虚拟电厂参与调峰调度的多目标清算模型。文献[9]提出VPP参与电-碳联合市场的运行机制,构建了联合市场运行机制下多主体互动博弈的两阶段双层竞价策略模型。文献[10]深入分析了虚拟电厂在电力市场的交易机制,对电力市场中虚拟电厂的风险成本进行了建模。文献[11]针对虚拟电厂技术在能源市场交易策略方面的问题,综合需求响应与虚拟电厂技术,提出一种基于上下层双阶段的电-热能源市场交易策略。文献[12]设置虚拟发电厂与分布式可再生能源结合共同参与市场交易,在分析了电力市场的两种运行模式以及梳理了中长期市场的交易品种和模式的基础上,分析了中长期市场中常见的合同电力分解方法,建立了虚拟电厂的收益模型。文献[13]针对包含分布式电源的运营商、云储能运营商以及产消者聚合商等多

种运营主体的虚拟电厂，提出了基于合作博弈的多运营主体间电能交易机制，以实现 VPP 总运行成本最小。文献[14]在考虑电动汽车数量和风电机组出力的不确定性条件下，在同时考虑电动汽车电池放电损耗成本以及调节备用被实际调用比例的情形下，构建了虚拟电厂参与日前能量市场和调节市场的联合竞价策略的鲁棒优化模型。文献[15]以风电、储能、燃气轮机及需求响应负荷组成虚拟电厂为研究对象，考虑 VPP 内部风电出力不确定性以及聚合对象的调节能力，建立市场环境下 VPP 多类型资源鲁棒竞标模型。

同时，还有部分专家学者针对虚拟电厂内部的调度问题展开了充分研究。文献[16]兼顾多元互补的电源侧与综合考虑需求响应的负荷侧的双侧协调配合在考虑 VPP 经济性与可再生能源消纳的基础上，增加环保性目标，建立 VPP 源-荷协调多目标优化调度模型。文献[17]对 VPP 资源调度潜力精细化评估和优化调度进行了研究，研究虚拟电厂资源的类型并进行资源特性分析并研究含电动汽车的虚拟电厂的优化调度方法，提出考虑双重激励含 EV 的 VPP 优化调度方法，通过算例验证所提方法的优越性。文献[18]针对配电网中以电、热为代表的多类型负荷的快速增长，以及可控机组、储能装置、风机等分布式能源的协调调度问题，提出了考虑电热综合需求响应的虚拟电厂优化调度模型。文献[19]针对非完全信息条件下虚拟电厂内部多主体能量协同优化进行了相关研究，提出了基于贝叶斯博弈的虚拟电厂多主体协同优化方法。文献[20]对基本鸽群算法进行了改进，考虑了分布式电源的安装位置以及风电出力不确定性等问题，建立了虚拟电厂经济调度的双层优化策略。

上述文献深入讨论了虚拟电厂参与电能量市场的报价策略、调峰调频等辅助服务市场及碳市场运行模式和调度策略，但鲜有文献基于电力市场规则，研究现货市场下虚拟电厂市场化交易及内部运行调度优化策略。因此，以最大化虚拟电厂在 S 省电力市场中运行收益最大化为目标函数，建立了虚拟电厂协同运行优化模型，并基于算例仿真验证了所提模型方法的有效性，提出虚拟电厂参与电力市场的运行优化策略建议。

### 3. 虚拟电厂主体特性建模

#### 3.1. 虚拟电厂的基本结构

本文所研究的虚拟电厂指的是以省内电源侧、负荷侧、储能侧的满足技术要求的电力设备为聚合资源的虚拟电厂，主要由燃气轮机、分布式光伏、分布式风电、可控负荷及分布式储能组成(见图 1)。

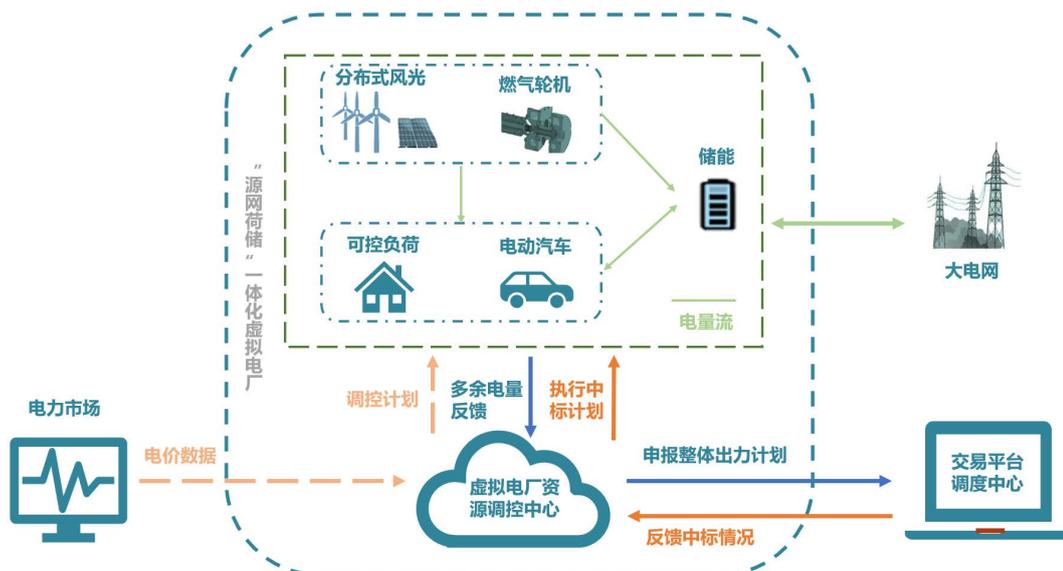


Figure 1. Virtual power plant architecture  
图 1. 虚拟电厂结构图

本文中设定虚拟电厂参与日前现货市场，其中风机和光伏优先满足内部用户负荷需求，燃气轮机和储能为风电和光伏发电提供备用，运营商基于内部电源出力预测、内部负荷预测、市场电价预测等信息，以自身收益最大化为目标对内部各主体进行协同调控，将各聚合单元的多余出力在日前市场售出，并在内部电源出力无法满足内部负荷需求时，从日前市场购电以维持其所代理的负荷及电源间的功率平衡。

### 3.2. 虚拟电厂主体特性建模

本文将火电、水电机组都归纳为常规机组，其在最大技术出力与最小技术出力之间可按照一定速率(爬坡率)调节输出功率，其在提供电力的同时也提供灵活性资源供给。储能装置具有电力吞吐功能，其放电时视为向上灵活性资源，相反充电时为向下灵活性资源。电力系统灵活性需求主要来自负荷与可再生能源，但在极端运行场景下，系统可以通过切负荷或弃风、弃光的方式提供灵活性。其中，切负荷提供的是上调灵活性资源，弃能(弃风、弃光)属于下调灵活性资源。

综上，灵活性资源供给主要由火电、水电等常规机组，储能装置，负荷和可再生能源机组组成。

由此得到系统灵活性供给模型：

$$F_{s,t} = F_c(t, \tau) + F_s(t, \tau) + F_r(t, \tau) + F_l(t, \tau)$$

式中， $F_c(t, \tau)$ 为常规机组提供的灵活性供给， $F_s(t, \tau)$ 为储能系统提供的灵活性供给， $F_r(t, \tau)$ 为可再生能源发电机组提供的灵活性供给， $F_l(t, \tau)$ 为负荷侧提供的灵活性供给， $F_{s,t}$ 表示 $t$ 时刻电力系统总的灵活性供给。

#### 1) 燃气轮机发电模型

微型燃气轮机作为虚拟电厂内的基本电能生产设备元件，能够平抑分布式风光机组的出力随机性，保障负荷侧的基本用电需求。因此，本文仅考虑微型燃气轮机产生的电功率，其任意时刻的天然气消费量以及电能输出功率表达式如下所示：

$$P_{mgt}(t) = GQ_{mgt,t} H_g \eta_{mgt}$$

式中， $P_{mgt}(t)$ 为 $t$ 时刻MGT的电能输出功率； $GQ_{mgt,t}$ 为 $t$ 时刻MGT的天然气消费量，单位为 $\text{m}^3$ ； $H_g$ 为天然气热值，单位为 $\text{kW}/\text{m}^3$ ； $\eta_{mgt}$ 为MGT的电能转换效率。

#### 2) 分布式光伏发电模型

分布式光伏发电指采用光伏组件，能够将太阳能直接转化为电能的光伏发电机组。其产生的电功率与太阳辐射强度近似成正比关系，所以分布式光伏发电功率也近似服从Beta分布，其概率密度函数如下：

$$f(P_{PV}) = \frac{1}{P_{PV,n}} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{P_{PV}}{P_{PV,n}} \right)^{\alpha-1} \left( 1 - \frac{P_{PV}}{P_{PV,n}} \right)^{\beta-1}$$

式中， $P_{PV,n}$ 表示分布式光伏机组的额定功率； $\Gamma(\cdot)$ 表示伽玛函数； $\alpha$ 和 $\beta$ 表示Beta分布的两个参数。

#### 3) 分布式风力发电模型

分布式风力发电通过风力推动涡轮机从而产生电能，其发电功率与风速密切相关。自然来风和风电出力相互间的关系可以用三次函数表示为：

$$P_w(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{in}, v > v_{out} \\ \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_{rated}^3 - v_{in}^3} g_R & v_{in} \leq v < v_{rated} \\ g_R & v_{rated} \leq v \leq v_{out} \end{cases}$$

式中， $g_R$ 表示风力发电机组的额定出力； $v$ 表示自然来风速度； $v_{in}$ 、 $v_{out}$ 和 $v_{rated}$ 表示切入、切出和额定

风速。

#### 4) 可控负荷需求响应模型

虚拟电厂聚合的可控负荷如大型工商业用户、居民用户、电动汽车等通过调整自身柔性负荷的使用时段或需求量从而参与需求响应。柔性负荷主要包括可平移负荷(Shiftable Load, SL)、可削减负荷(Cutable Load, CL)和可中断负荷(Interruptible Load, IL)三类。

在本节的需求响应框架下,将虚拟电厂内部的用户负荷分为两大类,即可调负荷和不可调负荷。其中不可调负荷(Non-Adjustable load, NAL)主要是指一些由于具有重大政治、经济意义,或者停电会造成重大损失、安全事故以及对用户生产生活造成较大程度影响,因而用电时段相对比较固定、对供电可靠性有极高的要求的且一般不作调整的负荷。可调负荷(Adjustable Load, AL)主要是指根据电价或激励政策,用户可以在不对自身生活造成不便的前提下,结合自身实际需求自主地调整负荷使用情况并以此来减少用能成本的负荷,包括柔性负荷中可参与需求响应调节的可平移负荷、可削减负荷及可中断负荷。

综合以上分析,用户在  $t$  时刻的用电负荷可表示为:

$$\begin{aligned} EL(t) &= EL_{nal}(t) + EL_{al}(t) \\ EL_{al}(t) &= EL_{sl}(t) - EL_{cl}(t) - EL_{il}(t) \end{aligned}$$

式中,  $EL(t)$  表示用户在  $t$  时刻的总用电负荷;  $EL_{al}(t)$  和  $EL_{nal}(t)$  分别表示时刻的可调负荷和不可调负荷量;  $EL_{sl}(t)$ 、 $EL_{cl}(t)$  和  $EL_{il}(t)$  分别表示时刻可平移负荷、可削减负荷及可中断负荷量。

#### 5) 储能输出功率模型

受蓄电池容量限制,在虚拟电厂调度运行过程中储能的充放电功率应当控制在一定范围内。同时,为保持储能稳定运行,设定储能任意时刻不可以同时进行充电和放电行为,故储能系统的输出功率为:

$$\begin{aligned} \lambda_{1,t} + \lambda_{2,t} &\leq 1, \lambda_{1,t}, \lambda_{2,t} \in \{0,1\} \\ P_{des}(t) &= P_{des,f}(t)\lambda_{2,t} - P_{des,c}(t)\lambda_{1,t} \end{aligned}$$

式中,  $\lambda_{1,t}$  和  $\lambda_{2,t}$  为 0~1 整数变量,分别表示  $t$  时刻的储能系统充放电状态;  $P_{des}(t)$  和  $P_{des,f}(t)$  分别表示储能系统  $t$  时刻的充放电功率;  $P_{des,c}(t)$  表示  $t$  时刻储能系统的等效出力。

## 4. 虚拟电厂协同运行优化模型

虚拟电厂参与日前市场时,主要考虑的收益来源为日前申报电量收益,主要考虑的成本为外本部购电成本和购气成本。以虚拟电厂整体在日前市场中扣除外部成本后的收益最大化为目标,建立虚拟电厂参与日前市场运行优化模型的目标函数如下:

$$F = \max \sum_{t=1}^{24} [u_t^{sell} \lambda^{sell}(t) Q_{sell}(t) - u_t^{pur} \lambda^{pur}(t) Q_{pur}(t) - C_{op}(t)]$$

式中,  $F$  表示虚拟电厂运行收益, (元);  $u_t^{sell}$  和  $u_t^{pur}$  分别表示虚拟电厂  $t$  时刻向日前市场售电和从日前市场购电的状态变量;  $\lambda^{sell}(t)$  和  $\lambda^{pur}(t)$  分别表示日前市场中  $t$  时刻的售电电价和购电价格, (元/kW);  $Q_{sell}(t)$  和  $Q_{pur}(t)$  分别表示日前市场中  $t$  时刻的售电量和购电量, (kW);  $C_{op}(t)$  表示购气成本, (元)。

其中, 购气成本计算公式如下:

$$C_{op}(t) = \frac{P_{mgt}(t)}{H_g \eta_{mgt}} C_{gas}(t)$$

式中,  $C_{gas}(t)$  表示  $t$  时刻天然气价格, (元/m<sup>3</sup>);  $\eta_{mgt}$  表示  $t$  时刻燃气轮机的电能转换效率, 本文取 28%;  $H_g$  表示天然气热值, 本文取 50 kW/m<sup>3</sup>。

## 1) 交易状态约束

虚拟电厂每个时段在日前市场的交易状态互斥，购电和售电只能取其一，约束条件如下所示。

$$\begin{cases} u_t^{sell} + u_t^{pur} \leq 1 \\ u_t^{sell}, u_t^{pur} \in \{0,1\} \end{cases}$$

式中， $u_t^{sell}$  和  $u_t^{pur}$  分别表示虚拟电厂  $t$  时刻向日前市场售电和从日前市场购电的状态变量，为 1 时表示处于该状态。

## 2) 负荷供需平衡约束

$$\begin{cases} Q_{sell}(t) = P_{pv}(t) + P_w(t) + P_{mgt}(t) + P_{des}(t) - EL(t) & u_t^{sell} = 1 \\ Q_{pur}(t) = EL(t) - P_{pv}(t) - P_w(t) - P_{mgt}(t) - P_{des}(t) & u_t^{pur} = 1 \end{cases}$$

$$EL(t) = EL_{nal}(t) + EL_{al}(t) \text{ 且 } EL(t) \geq EL_{nal}(t)$$

式中， $P_{pv}(t)$  表示  $t$  时刻光伏的申报出力，(kW)； $P_w(t)$  表示  $t$  时刻风机的申报出力，(kW)； $P_{mgt}(t)$  表示  $t$  时刻燃气轮机的申报出力，(kW)； $P_{des}(t)$  表示  $t$  时刻储能的申报出力，(kW)。

## 3) 燃气轮机运行约束

受燃气轮机的装机容量和本身性能的限制，MGT 的运行应该满足出力约束、爬坡约束，其具体约束表达如下：

$$\begin{aligned} P_{mgt,\min} &\leq P_{mgt}(t) \leq P_{mgt,\max} \\ -\Delta P_{mgt}^- &\leq P_{mgt}(t) - P_{mgt}(t-1) \leq \Delta P_{mgt}^+ \end{aligned}$$

式中， $P_{mgt,\max}$  和  $P_{mgt,\min}$  表示 MGT 的电输出功率的上下限； $\Delta P_{mgt}^+$  和  $\Delta P_{mgt}^-$  为 MGT 的发电出力的爬坡上下限。

## 4) 分布式风光出力约束

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_{pv}(t) \leq P_{pv}^{\max} \\ 0 &\leq P_w(t) \leq P_w^{\max} \end{aligned}$$

式中， $P_{pv}^{\max}$  和  $P_w^{\max}$  表示光伏和风力发电的出力上限。

## 5) 储能系统运行约束

$$\begin{aligned} g_{des,c,\min} \lambda_{1,t} &\leq P_{des,c}(t) \leq g_{des,c,\max} \lambda_{1,t} \\ g_{des,f,\min} \lambda_{2,t} &\leq P_{des,f}(t) \leq g_{des,f,\max} \lambda_{2,t} \end{aligned}$$

式中， $g_{des,c,\max}$  和  $g_{des,c,\min}$  分别表示  $t$  时刻储能系统的充电功率上下限； $g_{des,f,\max}$  和  $g_{des,f,\min}$  分别表示  $t$  时刻储能系统的放电功率上下限。

为保证储能系统的使用寿命，避免过度充放电使电池长时间处于空负荷或满负荷状态，对电池产生较大损害，需要对储能在任意时刻的荷电状态控制在一定的范围内，其具体约束表达如下：

$$\begin{aligned} SOC_{\min} &\leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \\ SOC(t) &= (1-\sigma)SOC(t-1) + \frac{P_{des,c}(t)\phi_{des,c}}{ESC} - \frac{P_{des,f}(t)\phi_{des,f}}{ESC} \end{aligned}$$

式中， $SOC(t)$  表示  $t$  时刻储能系统的荷电状态； $SOC_{\min}$  和  $SOC_{\max}$  表示储能系统允许的最低荷电状态和最高荷电状态，分别设定为 0.1 和 0.9； $\sigma$  表示储能的自放电率，设定为 0.02； $\phi_{des,c}$  和  $\phi_{des,f}$  分别表示储能的充电效率和放电效率，均设定为 0.98； $ESC$  表示储能系统的额定容量。

同时, 为保证储能在每个调度周期内的正常运行, 本文假定在任意一个调度周期内, 储能系统的初始荷电状态应与结束荷电状态相等, 荷电状态平衡约束可表示如下:

$$SOC(0) = SOC(nT), n \in \{1, 24\} \text{ 且 } n \text{ 为整数}$$

式中,  $SOC(0)$  表示储能系统的初始荷电状态, 设定为 0.5;  $SOC(t)$  表示  $t$  时刻的荷电状态。

#### 6) 需求响应相关约束

##### 1、需求响应状态约束

在每一时刻的削减或增加负荷的需求响应状态互斥, 约束条件如下所示。

$$\begin{cases} u_t^{dDR} + u_t^{uDR} \leq 1 \\ u_t^{uDR}, u_t^{dDR} \in \{0, 1\} \end{cases}$$

式中,  $u_t^{dDR}$  和  $u_t^{uDR}$  分别表示虚拟电厂用户侧主体  $t$  时刻削减或增加负荷的状态变量, 为 1 时表示处于该状态。

##### 2、需求响应量限制约束

虚拟电厂内部用户侧负荷中每时刻可调节负荷具有上限, 上限值为对应时刻原负荷需求的一定比例, 即

$$\begin{aligned} EL_{al}(t) &= r_{al}EL(t) + EL_{sl}(t) - EL_{cl}(t) - EL_{il}(t) \\ -r_{al}EL(t) &\leq EL_{sl}(t) - EL_{cl}(t) - EL_{il}(t) \leq r_{al}EL(t) \end{aligned}$$

式中,  $r_{al}$  表示  $t$  时刻可参加需求响应的可调节负荷占用户负荷的最大比例。

##### 3、可平移负荷约束

可调节负荷中的可平移负荷在每个调度周期内总响应削减量应该与总响应增加量相同, 且每时刻的响应量具有上限, 即

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^{24} EL_{sl}(t) &= 0 \\ -r_{sl}EL(t) &\leq EL_{sl}(t) \leq r_{sl}EL(t) \end{aligned}$$

式中,  $r_{sl}$  表示  $t$  时刻可平移负荷占用户负荷的最大比例;  $EL_{sl}(t)$  为正时表示负荷增加,  $EL_{cl}(t)$  为负时表示负荷削减。

##### 4、可削减负荷约束

可削减负荷在每时刻的响应量具有上限, 即

$$0 \leq EL_{cl}(t) \leq r_{cl}EL(t)$$

式中,  $r_{cl}$  表示  $t$  时刻可削减负荷占用户负荷的最大比例。

##### 5、可中断负荷比例约束

对于负荷整体而言, 可中断负荷只能占调度周期内总负荷的一定比例, 约束条件如下:

$$0 \leq \sum_{t=1}^{24} EL_{il}(t) \leq r_{il} \sum_{t=1}^{24} EL(t)$$

式中,  $r_{il}$  表示可中断负荷占用户总负荷的最大比例。

## 5. 算例分析

### 5.1. 算例设置

本节首先根据 S 省历史风电、光伏发电相关数据, 通过场景随机优化, 生成 N 个概率场景。其中场

景随机优化包括场景生成、削减和相关性聚类优化 3 部分。其次,以系统调度周期内总收益最大为目标,在满足常规约束与概率场景约束条件的前提下,针对典型风光预测场景,采用 matlab2020a 软件结合开源 Yalmip 工具箱对源网荷储一体化型虚拟电厂协同调控中的目标函数进行优化求解,获得系统内机组出力分配以及总收益最大的日前调度计划。

基于随机优化生成典型风光预测出力场景如图 2 所示,能充分体现 S 省风光实际分布特性,贴合实际风光波动特征。

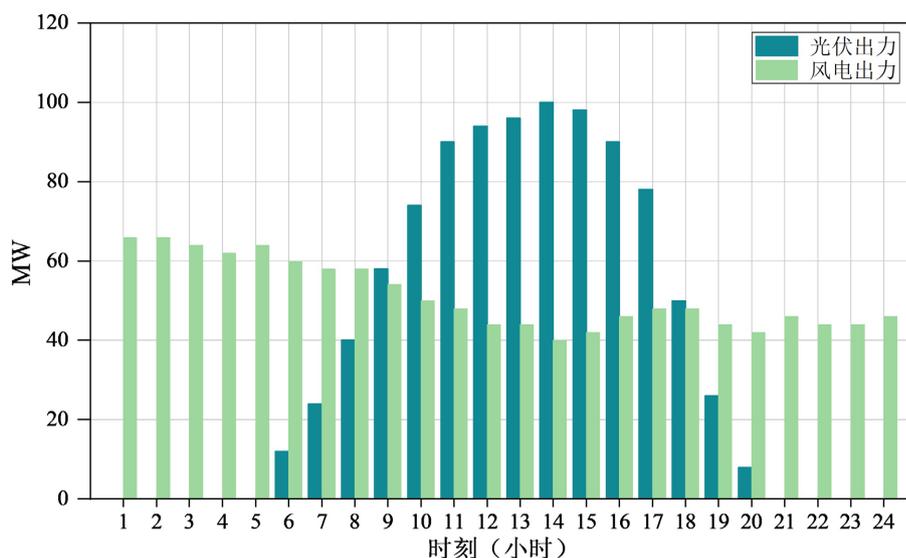


Figure 2. Typical landscape predictive output scenario

图 2. 典型风光预测出力场景

基于 S 省拟建虚拟电厂试点示范项目建设现状,设置虚拟电厂包含 1 个风电商、1 个光伏发电商、10 台 TAU5670 型燃气轮机、1 个储能系统和用户负荷,具体参数如表 1、表 2 和表 3 所示。

Table 1. Parameters of wind turbines and photovoltaic equipment

表 1. 风机、光伏设备参数

设备名称	装机容量(MW)
风机	100
光伏	100

Table 2. Parameters of gas turbine

表 2. 燃气轮机参数

最大输出功率(MW·h)	最小输出功率(MW·h)	向上爬坡率(MW·h)	向下爬坡率(MW·h)	天然气价格(元/m <sup>3</sup> )
5.67	2.5	3	3	3.96

Table 3. Parameters of energy storage

表 3. 储能参数

最大充电功率(MW·h)	最小放电功率(MW·h)	最大容量(MW·h)	充电效率	放电效率
30	30	120	0.98	0.98

在对虚拟电厂进行协同调控优化时,以用户侧实际用电负荷为变量,其中不可调负荷为固定值,基

于历史数据生成预测曲线如图 3 所示；可调负荷占总负荷的 35%，其中每时刻可平移负荷占总负荷的上限为 25%，每时刻可削减负荷占总负荷的上限为 10%，全调度周期内可中断负荷占总负荷的上限为 10%。

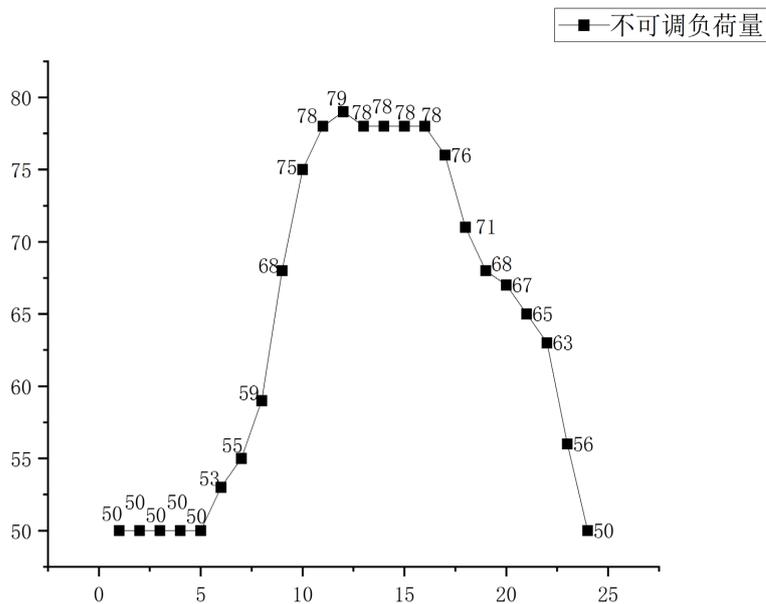


Figure 3. Non-adjustable load forecast curve  
图 3. 不可调负荷预测曲线

由于本文所研究的虚拟电厂中的燃气轮机、分布式风电、分布式光伏发电边际成本低，且容量相较于常规发电厂小很多，其报价对市场电价影响较小。因此，本文将虚拟电厂作为价格接收者参与电力市场，其购售电价均以日前市场统一出清价格为基准进行结算，即在优化阶段采用的出清电价为预测电价，参数如图 4。

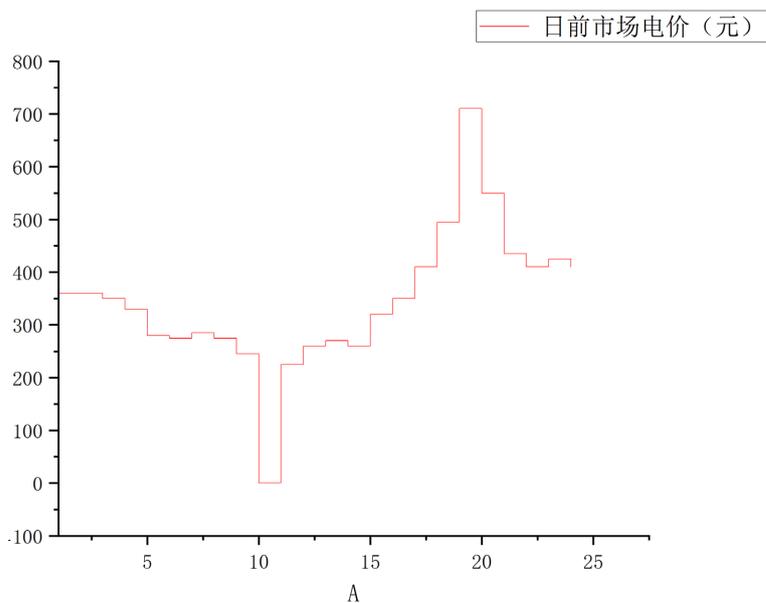


Figure 4. Day-ahead market clearing tariff forecast curve  
图 4. 日前市场出清电价预测曲线

## 5.2. 算例结果与分析

算例中虚拟电厂协同调控优化策略为风机、光伏优先满足虚拟电厂内部的用户负荷需求，其次出售给电力交易中心，即“自发自用、余量上网”，图5为虚拟电厂参与日前市场时的购售电情况及收入(收入小于0时为支出)。

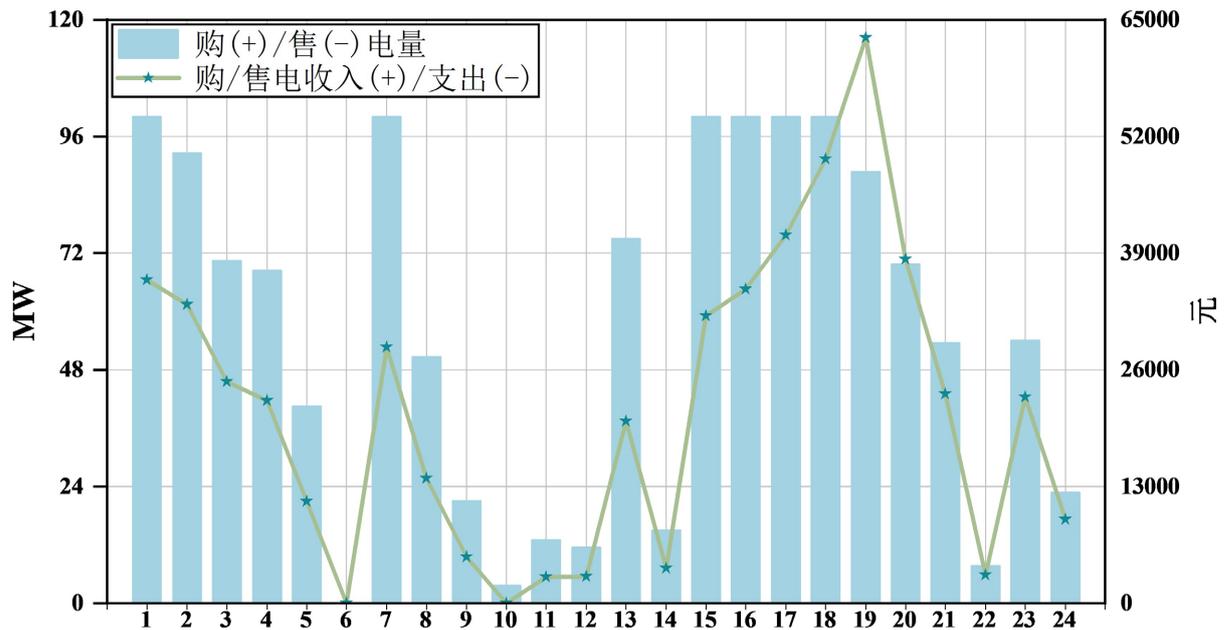


Figure 5. Electricity purchased/sold and income/expenditures in the day-ahead market

图 5. 日前市场购/售电量及收入/支出情况

其中，各时刻的需求响应情况如图6所示。

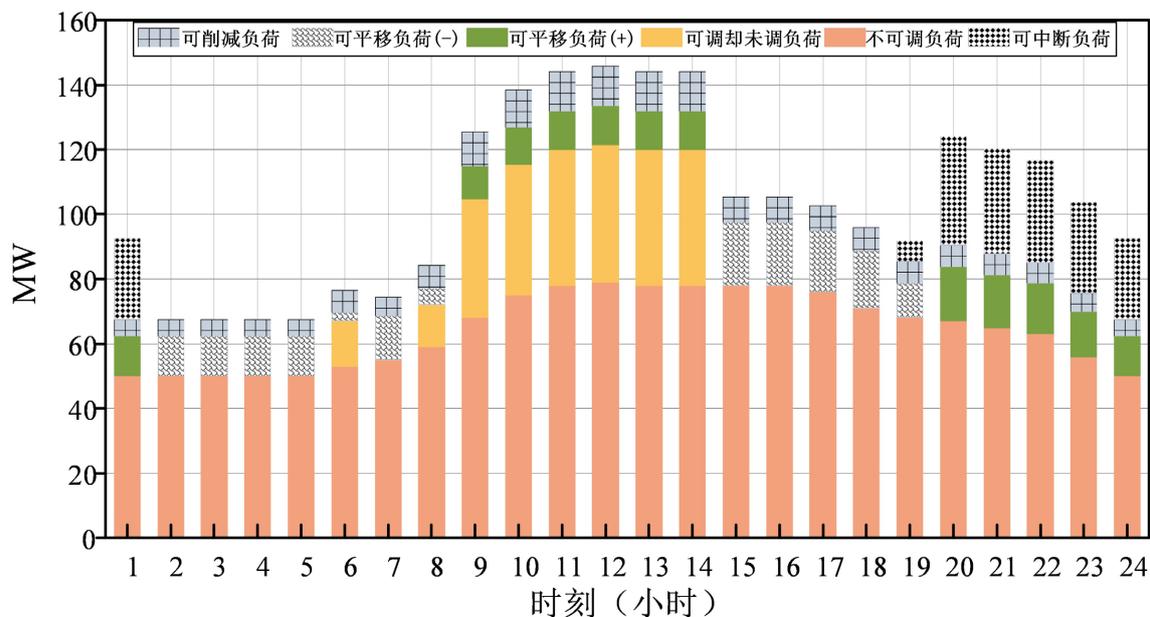


Figure 6. Demand response of source-grid-load-storage-integrated virtual power plants

图 6. 源网荷储一体化型虚拟电厂需求响应情况

虚拟电厂参与日前市场的各个设备的运行策略如图 7 所示。

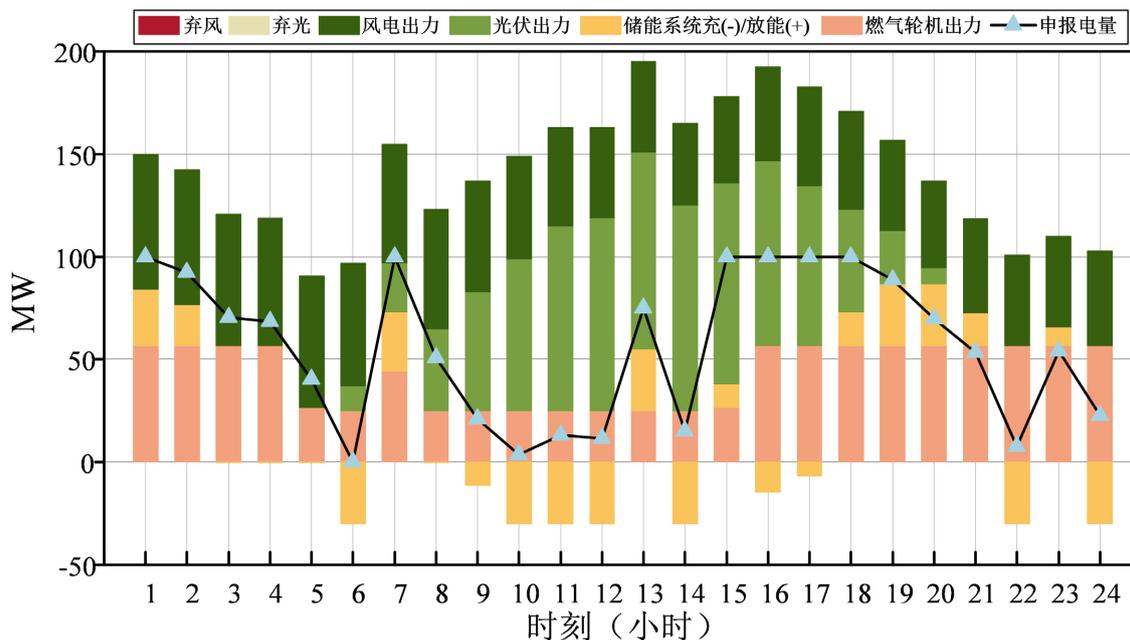


Figure 7. Operation strategy of source-grid-load-storage-integrated virtual power plants  
图 7. 源网荷储一体化型虚拟电厂运行策略

基于图 7，利用求和的方式可计算得到虚拟电厂进行协同调控后一个调度周期内的收益情况。在此算例中，对源网荷储一体化型虚拟电厂于日前市场申报 1357.96 兆瓦电能，收益 230,456.58 元。虚拟电厂通过开展协同调控，有效实现了发电侧与用户侧联动优化的目标，使虚拟电厂运营商及其内部主体获得更多收益的同时，还具有显著的削峰填谷效应。虚拟电厂充分调用系统内的可调节资源，通过需求响应引导用户侧配合发电侧的发电调度，减少弃能电量，通过燃气轮机的开机运行解决部分时段风光出力不足的问题，通过储能在电价较低的时间段执行充电策略，在电价较高的时间段执行放电策略，进行价差套利，使系统运营结果达到了最佳。

## 6. 结语

本文以由燃气轮机、分布式光伏、分布式风电、可控负荷及分布式储能五个主体组成的虚拟电厂为主要研究对象，以其在日前现货市场中运行收益最大化为优化目标，建立了虚拟电厂协同运行优化模型，并基于 S 省拟建虚拟电厂试点示范项目为算例，进行算例分析，有以下结论及建议。

1) 需求响应能够充分引导用户侧可控负荷配合虚拟电厂进行协同运行，进而有效实现削峰填谷，促进源网荷储友好互动，增强电网应急调节能力，缓解电力供需矛盾。因此，要保证现货价格的有效性，强化电价对用户用电的引导，为虚拟电厂套利争取空间的同时，提高价格信号对有调节能力的用户用电行为调节的激励作用，从用户侧助力电力系统安全运行。

2) 在虚拟电厂中引入燃气轮机和储能，能够有效解决内部可再生能源的消纳问题，减轻可控负荷的调节压力，实现发电侧和用户侧的良性互动，同时拓宽虚拟电厂参与电能量市场的上下限，进一步降低其协同调控计划执行过程中的不确定性，保证虚拟电厂的盈利能力。因此，要建设适当的响应调控机制以及增设配套储能设备，并基于贡献度进行利益分配模式优化，加大对起调节和备用作用的燃气轮机、储能等主体的利益分配及补贴。

3) 虚拟电厂作为发电机组、负荷和储能等多主体的聚合商,能基于自身情况灵活选择发电商、购电商等多种身份参与日前现货市场等多类型市场,盈利模式众多,经济效益较好,能够有效实现对分布式资源的聚合和调度,进而发挥促进新能源消纳、提高电力系统灵活性、助力电力系统电力电量平衡等方面的作用。因此,明确虚拟电厂的市场主体地位,制订公平完善的规则,清晰规定虚拟电厂的盈利模式与政策制度,最大限度允许、鼓励虚拟电厂拓展其他交易品种。

## 参考文献

- [1] 张金平,周强,王定美,等.“双碳”目标下新型电力系统发展路径研究[J]. 华电技术, 2021, 43(12): 46-51.
- [2] 陈春武,李娜,钟朋园,等. 虚拟电厂发展的国际经验及启示[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2258-2263.  
<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2013.08.032>
- [3] 袁沔齐,邹振宇,孙凯祺,等. 基于遗传算法和微分进化算法的分布式电源优化配置[J]. 中国电力, 2013, 46(1): 16-20.
- [4] 卫志农,余爽,孙国强,等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
- [5] 王宣元,刘敦楠,刘蓁,等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3175-3183.
- [6] Yi, Z., Xu, Y., Wang, H., et al. (2021) Coordinated Operation Strategy for a Virtual Power Plant with Multiple DER Aggregators. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **12**, 2445-2458. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2021.3100088>
- [7] Wang, C., Zhang, Z. and Qiao, J. (2022) Risk-Constrained Optimal Operation Strategy for Virtual Power Plants Considering Incentive-Based Demand Response. 2022 *IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*, Shanghai, 8-11 July 2022, 1094-1101. <https://doi.org/10.1109/ICPSAsia55496.2022.9949901>
- [8] Cui, Y., Xiao, F., Wang, W., et al. (2021) The Mechanism of Virtual Power Plant Participating in the Peak Regulation Auxiliary Service Market. 2021 *3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)*, Chengdu, 26-29 March 2021, 1010-1015. <https://doi.org/10.1109/AEEES51875.2021.9403008>
- [9] 张钧钊,姜欣,段世杰,等. 虚拟电厂参与电-碳联合市场运行的竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 108-118.
- [10] Wu, H., Liu, X., Ye, B. and Xu, B. (2020) Optimal Dispatch and Bidding Strategy of a Virtual Power Plant Based on a Stackelberg Game. *IET Generation, Transmission & Distribution*, **14**, 552-563.  
<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0493>
- [11] 陈刚,那广宇,王琛淇,等. 考虑综合需求响应和储能的双阶段虚拟电厂交易策略[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(1): 64-71.
- [12] Wu, Y., Wu, J. and De, G. (2022) Research on Trading Optimization Model of Virtual Power Plant in Medium- and Long-Term Market. *Energies*, **15**, Article 759. <https://doi.org/10.3390/en15030759>
- [13] 王帅,帅轩越,王智冬,等. 基于纳什议价方法的虚拟电厂分布式多运营主体电能交易机制[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 141-148.
- [14] 杨甲甲,赵俊华,文福拴,等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 92-102.
- [15] 韩帅,吴宛璐,郭小璇,等. 含多类型资源虚拟电厂鲁棒竞标模型研究[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 20-29.
- [16] 袁桂丽,贾新潮,陈少梁,等. 虚拟电厂源-荷协调多目标优化调度[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 105-112.
- [17] 姜喜燕. 虚拟电厂资源的精细化评估与调度优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [18] 江叶峰,熊浩,胡宇,等. 考虑电热综合需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. 电力建设, 2019, 40(12): 61-69.
- [19] 吴陈硕. 基于贝叶斯博弈的虚拟电厂多主体协同优化方法[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [20] 杨瑞. 基于改进鸽群算法的虚拟电厂经济优化调度研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.