

计及不确定性新能源消纳的海量分布式灵活资源 虚拟电厂调控策略

孔月萍¹,陈宇沁¹,王国际²,刘述波²,王 蝶²

(1. 国网江苏省电力有限公司 营销服务中心,南京 210019;2. 江苏方天电力技术有限公司,南京 211102)

摘要: 新能源并网加剧了电力系统调峰压力,海量分布式灵活资源对虚拟电厂规划与调控至关重要。研究提出一种面向新能源不确定性的虚拟电厂模型:通过改进Transformer方法预测新能源出力,设计分布式资源聚合方案,并据此制定兼顾安全性与经济性的调控策略。基于地区真实数据与电网拓扑的验证表明,该方案有效支撑了新能源消纳与系统稳定运行。

关键词: 虚拟电厂;可再生能源;新能源消纳;优化调度策略;海量分布式灵活资源;Transformer;序列预测

Massive distributed flexible resource virtual power plant control strategy considering uncertain new energy consumption

KONG Yueping¹, CHEN Yuqin¹, WANG Guoji², LIU Shubo², WANG Die²

(1. Marketing Service Center, State Grid Jingsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 2. Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The peak sharing pressure on power systems is intensified by the integration of renewable energy, making massive distributed flexible resources regarded as crucial for virtual power plant (VPP) planning and operation. A VPP model addressing renewable energy uncertainty is proposed: an improved Transformer method forecasts renewable output, a distributed resource aggregation scheme is designed, and a corresponding control strategy balancing security and economy is developed. Validation using real regional data and grid topology is used to confirm that the scheme effectively supports renewable energy utilization and system stability.

Key words: virtual power plant; renewable energy; new energy consumption; optimized scheduling strategy; massive distributed flexible resources; Transformer; sequence prediction

0 引言

随着电力体制改革推进,虚拟电厂的研究越来越受到学者的关注^[1]。相比于传统的发电机组,虚拟电厂内部包含大量的新能源以及分布式灵活性资源^[2]。虚拟电厂的研究不仅能提高新能源消纳能力,还能为电网提供能量平衡、无功/电压支持、旋转备用、频率调节和阻塞管理等多类服务。然而,新型能源的间歇性和不确定性给虚拟电厂的调控策略带来了巨大挑战^[3]。

现有输电侧电力市场通常分为能量市场与辅助服务市场,而海量分布式资源因容量限制难以直接参与市场交易,需通过虚拟电厂进行聚合与代理。虚拟电厂作为一种跨地域的资源组织方式,在

促进新能源消纳与系统调峰方面具有重要意义。

本文针对含不确定性新能源的海量分布式灵活资源虚拟电厂展开研究,主要贡献如下。

(1) 提出一种新的预测算法:本文提出了一种基于Transformer架构改进的时序预测算法,本文所提算法根据历史数据可实现对于新能源发电的准确预测,所提深度学习模型可有效提高预测精度以及训练速度,以改善基于(long short-term memory, LSTM)预测方案的低准确性以及基于informer预测模型的低效训练等缺点。

(2) 提出了一种新的调控策略:能够在考虑新能源发电不确定性的情况下,优化虚拟电厂内部多种灵活资源调度的策略。通过应用先进的预测技术和优化算法,该策略能够动态调整虚拟电厂内各资源的运行状态,以应对新能源发电的不确定性和波动性。

(3) 构建了虚拟电厂模型并进行了仿真实验:本文构建了包含分布式能源、储能系统和可调节负荷的

收稿日期:2025-06-28;修回日期:2025-08-30

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(SGJSYF00LJS2310243)

虚拟电厂模型,并通过仿真实验验证了所提策略的有效性和优越性。仿真结果表明,本文提出的调控策略和市场出清方法能够显著提高新能源的消纳能力,优化虚拟电厂内资源的调度,提高系统的经济性和可靠性。

该研究为高比例新能源接入下虚拟电厂的调控提供了理论与技术支撑,有助于推动电力系统清洁化、智能化发展。

1 海量分布式灵活资源虚拟电厂结构

传统电力系统主要依赖电网调节实现供需平衡,而高比例可再生能源接入背景下,仅靠系统内部运行难以有效消纳新能源。虚拟电厂通过分层调度优化,可协同提升电网安全性与运行经济性,促进新能源消纳^[4]。本文基于现有研究,从源、网、荷、储多维度构建虚拟电厂模型,旨在提升新能源消纳能力、系统安全性与经济性。模型结构如图1所示。

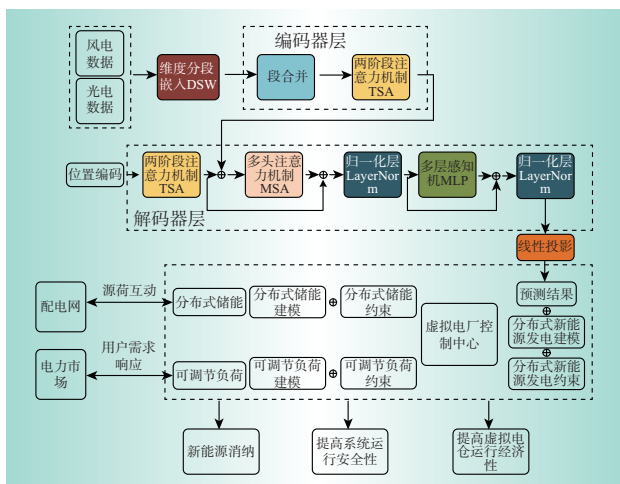


图1 计及不确定性新能源消纳的海量分布式灵活资源聚合虚拟电厂模型结构

Fig. 1 Massive distributed flexible resource aggregation virtual power plant model structure with uncertain new energy consumption

1.1 基于Transformer架构的不确定性新能源预测模型

Crossformer通过两阶段注意力机制,分别在维度与时间域建模变量交互与跨步依赖,实现了跨维度与跨时间的协同表征,提升了预测性能与泛化稳定性。

1.1.1 Crossformer

CrossFormer采用金字塔架构,包含四个阶段。每个阶段由跨尺度嵌入层和若干CrossFormer块构成。跨尺度嵌入层将嵌入数量减至1/4并倍增其尺寸,形成金字塔结构。CrossFormer块包含长短距离注意力与动态位置偏移机制。模型通过维度分段嵌入保留时序与维度信息,利用两阶段注意力捕获

跨时间与跨维度依赖,最终通过分层编解码器整合多尺度信息进行预测。

1.1.2 跨尺度嵌入层(cross-scale embedding layer, CEL)

跨尺度嵌入层通过四个不同大小的卷积核采样图像补丁,生成多尺度嵌入。为平衡计算效率,对大卷积核采用较低投影维度,小卷积核采用较高维度,在保持模型性能的同时显著降低计算开销。该设计在各阶段统一应用,有效控制整体计算成本。

1.1.3 CrossFormer块

每个CrossFormer块由长短距离注意模块(long-short distance attention, LSDA)与多层感知器(multi-layer perceptron, MLP)构成,其中短距(short-distance attention, SDA)与长距(long-distance attention, LDA)注意机制交替出现,并共享动态位置偏置(dynamic position bias, DPB)。各模块间均采用残差连接。

(1) 长短距离注意力(LSDA)。自注意力模块分为SDA与LDA。SDA将相邻的 $G \times G$ 嵌入分组处理,LDA则按固定间隔 I 对嵌入采样。分组后,二者分别在组内进行自注意力计算,使模块计算复杂度由 $O(S^4)$ 降至 $O(S^2G^2)$,其中 G 通常小于 S 。

(2) 动态位置偏差(DPB)。相对位置偏置(RPB)通过在注意力上添加偏置来指示嵌入物的相对位置,公式如下

$$A = \text{Softmax}(QK^T / \sqrt{d} + B)V \quad (1)$$

式中: $Q, K, V \in \mathbb{R}^{G^2 \times D}$ 分别为自注意力模块中的查询、键、值; $\sqrt{d}$ 为常数正规化器; $G^2 \times G^2$ 为RPB矩阵; $B_{i,j} = \hat{B}_{\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}}$, 其中 $\hat{B}$ 为一个固定大小的矩阵; $(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij})$ 为第 i_{th} 和 j_{th} 嵌入之间的坐标距离。

本文提出了一个基于MLP的模块DPB来动态生成相对位置偏差,即

$$B_{i,j} = \text{DPB}(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}) \quad (2)$$

DPB的结构由3个完全连接的层和ReLU激活函数组成。DPB的输入维数为2,即 $(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij})$, 中间层的维数设置为 $D/4$, 其中 D 为嵌入的维数。输出 B_{ij} 是一个标量,编码第 i_{th} 和 j_{th} 嵌入之间的相对位置特征。

1.1.4 层次编码器-解码器

在编码器的每一层(第1层除外)中,合并时域中相邻的两个向量得到新的层,并使用TSA捕获该层的依赖关系。在获得编码器输出结果后,解码器使用 $N+1$ 层 $(0, 1, \dots, N)$ 进行预测。对每层的输出进行线性投影,得到该层的预测结果,再对各层的预测结果求和得到最终预测结果如下

$$X_{i,d}^{(s),l} = W^l Z_{i,d}^{\text{dec},l} \quad (3)$$

$$X_{T+1,T+\tau}^{\text{pred},l} = \left\{ X_{i,d}^{(s),l} \mid 1 \leq i \leq \tau/L_{\text{seg}}, 1 \leq d \leq D \right\} \quad (4)$$

$$X_{T+1,T+\tau}^{\text{pred}} = \sum_{l=0}^N X_{T+1,T+\tau}^{\text{pred},l} \quad (5)$$

式中: $l=0,1,\dots,N$; $X_{i,d}^{(s),l} \in \mathbb{R}^{L_{\text{seg}}}$ 为 d 维预测结果中的第 i 段向量; $W^l \in \mathbb{R}^{L_{\text{seg}} \times d_{\text{model}}}$ 为可学习矩阵; $Z_{i,d}^{\text{dec},l}$ 为解码器的输出; $X_{T+1,T+\tau}^{\text{pred},l}$ 为第 l 层的预测结果; $X_{T+1,T+\tau}^{\text{pred}}$ 为最终预测结果。

1.2 海量分布式灵活资源的虚拟电厂调控模型

1.2.1 新能源发电装置模型与约束

新能源发电模型包括风电与光伏装置,二者均将风光资源转换为电能,但出力受天气因素影响具有显著不确定性,可视作可变出力的发电机。其出力约束为

$$0 \leq P_t^{\text{wind,solar}} \leq P_{t,\text{max}}^{\text{wind,solar}} \quad (6)$$

$$P_{t,\text{max}}^{\text{wind,solar}} = P_{t,\text{total}}^{\text{wind,solar}} - P_t^{\text{self}} \quad (7)$$

式中: $P_{t,\text{total}}^{\text{wind,solar}}$ 为新能源发电装置在 t 时刻全功率发电功率; P_t^{self} 为安装新能源发电装置用户在 t 时刻利用新能源发电电量的自用电; $P_{t,\text{max}}^{\text{wind,solar}}$ 为新能源发电装置在 t 时刻的最大上网功率。

1.2.2 储能装置模型与约束

储能装置在电力供需失衡时储放能量以平衡系统,广义储能模型表达式为。

$$E_{t+1}^s = E_t^s(1 - \delta^s) + (P_t^{\text{sc}} \eta^{\text{sc}} - \frac{P_t^{\text{sd}}}{\eta^{\text{sd}}}) \Delta t \quad (8)$$

式中: s 为能源种类; E_{t+1}^s 为 $t+1$ 时刻各类型储能充放能后的储能能量; E_t^s 为时刻 t 各类型储能充放能前的储能能量; δ^s 为各类型储能装置的能量损耗率; P_t^{sc} 、 P_t^{sd} 分别为 t 时刻各类型储能装置的充能、放能功率; η^{sc} 、 η^{sd} 分别为各类储能装置的充能放能效率。

储能装置充放能功率约束如式表示

$$P_{\min}^{\text{s,c/d}} \leq P_t^{\text{s,c/d}} \leq P_{\max}^{\text{s,c/d}} \quad (9)$$

式中: $P_{\min}^{\text{s,c/d}}$ 为各类型储能装置的最小充/放能功率; $P_t^{\text{s,c/d}}$ 为在 t 时刻时各类型储能装置在的充放能功率; $P_{\max}^{\text{s,c/d}}$ 为各类储能装置的最大充/放能功率。

储能装置储能状态约束表示如下

$$S_{\min}^{\text{soc}} \leq S_t^{\text{soc}} \leq S_{\max}^{\text{soc}} \quad (10)$$

式中: S_t^{soc} 为各类储能装置在时刻的储能状态; $S_{\min}^{\text{soc}}$ 、 $S_{\max}^{\text{soc}}$ 分别为各类储能装置的最小、最大储能状态。

储能装置周期容量不变约束表示如下

$$S_{\text{end}}^{\text{soc}} = S_{\text{begin}}^{\text{soc}} \quad (11)$$

式中: $S_{\text{begin}}^{\text{soc}}$ 和 $S_{\text{end}}^{\text{soc}}$ 分别为各类储能装置在优化调度周期开始和结束时刻的储能状态。

储能装置充能和放能的相关约束表示如下

$$L_{s-c} + L_{s-d} \leq 1 \quad (12)$$

式中: L_{s-c} 和 L_{s-d} 分别为不同能源种类的充能和放

能标志。

1.2.3 可调负荷模型与约束

可调负荷模型通过价格激励调节用电行为实现削峰填谷。在价格型需求响应中,可调峰率表征用户参与意愿与满意度。分为用电方式满意度 λ_{DR} 与用电支出满意度 θ_{DR} 两维度

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{DR,eff}} &= \frac{1}{2}(\lambda_{\text{DR}} + \theta_{\text{DR}}) \\ &= \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^T |\Delta L_i|}{\sum_{i=1}^T L_i} \right) + \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^T (Q_{i,\text{dr}} - Q_i)}{\sum_{i=1}^T Q_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ΔL_i 和 L_i 分别为用户用能调整前后的用电量变化和实际负荷需求量; $Q_{i,\text{dr}}$ 和 Q_i 分别为用户用能调整前后用户支出的电费。

柔性负荷 t 时刻的最大调峰功率为剩余可参与调峰的可中断负荷量,可以表示为

$$\Delta L_t^{\text{DR}} = \Delta L_t^{\text{DR,max}} - L_t^{\text{DR}} \quad (14)$$

式中: L_t^{DR} 为 t 时刻已参与需求响应的负荷量; $\Delta L_t^{\text{DR,max}}$ 为 t 时刻最大可参与响应负荷量。

其次,调峰持续时间指用户在响应 VPP 调峰指令时,从实际开始削减负荷到削减行为结束的时间。响应持续时间越长,代表调峰持久性越强。

$$\Delta T_t^{\text{DR}} = T_{\text{maxDR}} - T_t^{\text{DR}} \quad (15)$$

式中: T_t^{DR} 和 T_{maxDR} 为柔性负荷 t 时刻已持续中断时间和该用户的最大可持续中断时间。

对不同量纲、不同维度的调峰功率和持续时间维度进行归一化处理得柔性负荷的综合调峰能力计算公式为

$$\Delta PA_{\text{ps}}^{\text{DR}} = \sum_{i=1}^T \lambda_{\text{DR,eff}} \quad (16)$$

$$\Delta PA_t^{\text{DR}} = \sum_{i=1}^T \lambda_{\text{DR,eff}} (\Delta L_{i,N}^{\text{DR}} + \Delta T_{i,N}^{\text{DR}}) \quad (17)$$

式中: $\Delta L_{i,N}^{\text{DR}}$ 和 $\Delta T_{i,N}^{\text{DR}}$ 为归一化的负荷最大调峰功率和持续时间。

1.2.4 系统约束

计及新能源消纳的虚拟电厂在正常运行时需要满足电网、新能源、储能与可调负荷的功率平衡。电网、新能源、储能与可调负荷需要满足的功率平衡分别表示如下

$$P_{\text{new-energy}} + P_{\text{grid-buy}} + P_{\text{stor-r}} = P_{\text{stor-s}} + P_{\text{load}} + P_{\text{eg}} + P_{\text{eh}} \quad (18)$$

$$P_{\text{pv}} + P_{\text{wind}} = P_s + P_{\text{new-energy}} + P_{\text{new-ab}} \quad (19)$$

式中: 电网功率平衡表达式中 $P_{\text{new-energy}}$ 为新能源的上网功率; $P_{\text{grid-buy}}$ 为系统向主电网购买的功率,即外部主电网向该系统的供电功率; $P_{\text{stor-r}}$ 为系统中分布式储能的放电功率, $P_{\text{stor-s}}$ 为系统中分布式储

能的充电功率; P_{load} 为系统内海量分布式负荷功率; P_{eg} 为系统内线路上的损耗功率; P_{ch} 为系统内其他损耗; 新能源功率平衡表达式中 P_{pv} 为光伏发电装置的发电功率; P_{wind} 为风电装置的发电功率; P_s 为海量分布式新能源发电装置安装户主自用电; P_{new-ab} 为新能源发电弃电功率。

1.2.5 目标函数

虚拟电厂规划被建模为多目标资源优化问题,旨在兼顾以电网安全为主的安全性目标和以最小化日内运行成本为主的经济性目标。具体表示为

(1) 安全性目标。虚拟电厂通过聚合分布式资源促进新能源消纳,需确保电网各节点电压始终维持在合格范围内,即

$$U_{min}^i \leq U_t^i \leq U_{max}^i \tag{20}$$

同时,各节点除需要满足电压要求,还需满足频率要求,即

$$f_{min}^i \leq f_t^i \leq f_{max}^i \tag{21}$$

(2) 经济型目标。经济性目标则是以日内最小运行成本作为目标函数,一个周期内虚拟电厂总运行成本组成如下所示

$$\min F = \sum_{s=1}^S \theta_s (Cost_s^{grid-buy} + Cost_s^{Newom} + Cost_s^{respond} + Cost_s^{new-ab} + Cost_s^{ESS} + Cost_s^{carbon}) \tag{22}$$

式中: F 为虚拟电厂的总运行成本; $Cost_s^{grid-buy}$ 为系统向外购电成本; $Cost_s^{Newom}$ 为风光发电成本; $Cost_s^{respond}$ 为可调负荷参与需求响应补偿成本; $Cost_s^{new-ab}$ 为弃风弃光成本; $Cost_s^{ESS}$ 为储能充放电成本; $Cost_s^{carbon}$ 为参与碳市场成本。

2 算例分析

2.1 算例介绍

本研究基于标准 IEEE 33 节点配电网验证所提虚拟电厂调控策略。该网络为典型辐射状结构,含 32 条支路、5 条联络开关、32 个负荷及 1 个电源节点。系统中 5 条负荷支路接入新能源发电,2 条支路含 20 个分布式储能单元,4 条支路各接 10 个可调负荷,电源节点代表外部主网。新能源预测采用某风电场 12 个月历史数据。采用 Python 实现新能源预测, MATLAB 编写虚拟电厂调控策略,并基于 Matpower 完成 IEEE 33 节点配电网的潮流计算

2.2 不确定性新能源预测

图2中典型日光伏与风电出力曲线显示可再生能源存在显著不确定性。采用孤立森林算法剔除异常数据,并通过相关性分析确定输入特征:输出

序列长度对应预测时间步长。

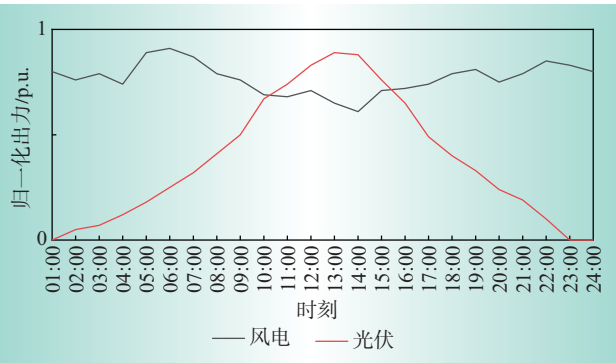


图2 某地区某典型日光伏、风电等可再生能源出力曲线
Fig. 2 Output curves of renewable energy such as photovoltaic and wind power in a typical day in a certain region

为验证所提预测模型的优越性,采用 Crossformer、Informer 与 LSTM 进行短期新能源出力预测,并对比各模型精度。训练结果表明,Crossformer 在 14 个 epoch 内达到最优,训练效率显著优于 Informer,且精度明显高于 LSTM。训练结果(mean squared error, MSE)和(mean absolute error, MAE)如表 1 所示。

表1 各时序预测模型训练结果

Table 1 Training results of each time series prediction model

	MSE	MAE	训练效率/(s·epoch ⁻¹)
Crossformer	0.309	0.341	456
Informer	0.327	0.359	2 334
LSTM	0.729	0.783	15

2.3 计及不确定性新能源的虚拟电厂调控策略

针对新能源不确定性,首先通过预测模型获取各时段出力数据,并基于电网潮流计算分析功率不平衡。随后以经济性为目标建立优化模型,生成虚拟电厂调控方案,并通过二次潮流校核确保系统安全。该双目标优化问题可采用线性规划算法高效求解。

本文所提到能源采购价格均采用分时价格机制,如表 2 所示。同时用户参与需求响应补偿电价规则如表 3 所示。各储能装置能量状态变化区间设置为 0.25~0.95,储能相关参数如表 4 所示。

表2 分时电价

Table 2 Time-of-use tariff

机制	时段	价格/(元·kWh ⁻¹)
配电网分时电价机制	00:00—08:00	0.86
	08:00—13:00	1.92
	13:00—18:00	1.34
	18:00—21:00	2.34
	21:00—24:00	1.14

表3 需求响应可中断负荷电量响应速度系数
Table 3 Demand response interruptible load power response speed coefficient

	提前通知时间	响应速度系数	响应类别	度电补贴	
				竞价最高限价/(元·kWh ⁻¹)	容量补贴/(元·kW ⁻¹)
日内	>4 h	1.0	约定需求响应	3.0	
	2~4 h (含4 h)	1.2	快上快下响应	3.6	
	1~2 h (含2 h)	1.4		4.2	
	0.5~1 h (含1 h)	1.6		4.8	
	0.5 h及以下	0.8	快上快下 (实时需求响应)	2.4	10

表4 储能装置相关参数
Table 4 Related parameters of energy storage device

类型	参数	价格/(元·kWh ⁻¹)
储电设备	能量损耗率	0.30
	充电效率	0.97
	放电效率	0.97

仿真结果表明：在电价较低时，系统将从电网购电以满足负荷需求并为储能充电；当新能源消纳困难时，虚拟电厂将启动优化调度以实现高效运行。

本研究探讨了虚拟电厂在新能源出力波动时的调控策略。当风光资源不足导致节点29、30、12、13分别出现100 kW、50 kW、20 kW、20 kW电力缺口时，系统通过优化调度维持稳定运行；而在新能源充沛且购电成本较低时，则重点实现富余能源的完全消纳。各时段VPP出力以及储能情况如图3所示。

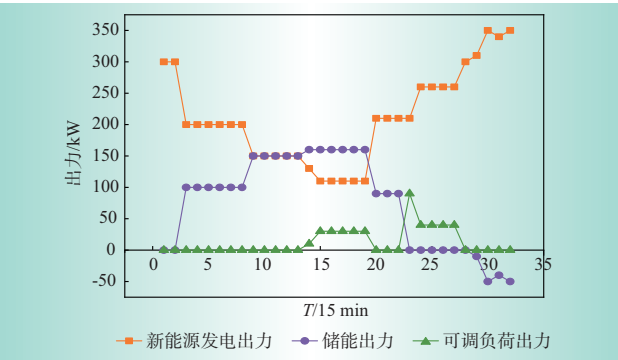


图3 各时段各场景下VPP出力及储能情况
Fig. 3 VPP output and energy storage in different time periods and scenarios

图3展示了多时段运行场景。储能优先响应消纳，可调负荷在储能耗尽后承担剩余负荷。各时间各场景下海量分布式灵活资源虚拟电厂收益如图4所示。

根据表5可知，虚拟电厂在复杂场景中有效维持了配电网安全运行，各节点电压均符合送电标准，系统安全稳定。

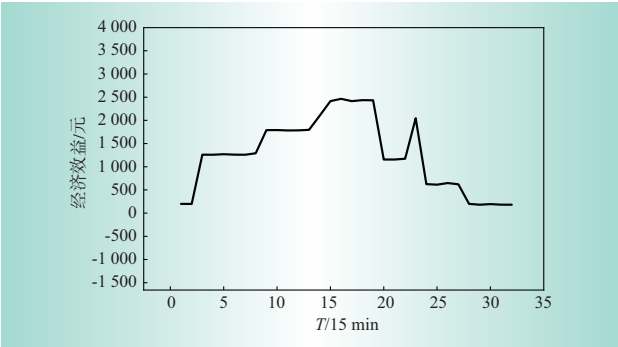


图4 各时间各场景下海量分布式灵活资源虚拟电厂收益
Fig. 4 Income of virtual power plant with massive distributed flexible resources under different scenarios at different times

由图4可以看出，虚拟电厂优化调度中，新能源优先被利用。当出力波动时，储能因成本较低率先响应消纳；储能能力耗尽后，由代价较高的可调负荷承担，此时经济效益增速显著提升。该策略在保障电网安全稳定运行的同时，实现了系统内部的经济效益。

3 结束语

针对新能源规模化并网带来的挑战，该研究构建了考虑新能源不确定性的虚拟电厂调控模型：提出改进Transformer的预测算法以提升新能源预测精度与训练效率；设计考虑不确定性的分布式资源协同调度策略；建立兼顾系统安全与经济运行的市场出清方法。通过实际案例验证了模型在促进新能源消纳与保障电网稳定方面的有效性。最后在仿真实验中得到以下结论

- (1) 所提出的先进预测算法提升了新能源发电预测精度与训练效率，有效增强了虚拟电厂运行策略的准确性与可操作性。
- (2) 构建的虚拟电厂运行机制充分考虑了各类分布式资源的运行特性，通过协同优化发挥资源互补优势，保障系统安全稳定。
- (3) 引入分时电价机制并结合优化调控策略，显著提高了虚拟电厂的经济效益，实现最优经济运行。

参考文献：

[1] 李扬,宋天立,王子健. 基于用户数据深度挖掘的综合能源服务关键问题探析[J]. 电力需求侧管理, 2018,20(3):1-5.

表5 各时段海量分布式灵活资源聚合虚拟电厂参与下的配电网的安全性研究

Table 5 Research on the safety of distribution network with the participation of virtual power plants with massive distributed flexible resource aggregation at different periods

场景	参数项	最小值	最大值
0 h 30 min—2 h 0 min	电压幅值	0.960 p.u. @ bus 18	1.050 p.u. @ bus 1
	电压相角	-0.66 deg @ bus 18	0.30 deg @ bus 30
	有功损耗		0.05 MW @ line 2-3
	无功损耗		0.03 MVar @ line 5-6
2 h 0 min—3 h 15 min	电压幅值	0.959 p.u. @ bus 18	1.050 p.u. @ bus 1
	电压相角	-0.68 deg @ bus 18	0.24 deg @ bus 30
	有功损耗		0.05 MW @ line 2-3
	无功损耗		0.03 MVar @ line 5-6
3 h 15 min—3 h 30 min	电压幅值	0.958 p.u. @ bus 18	1.050 p.u. @ bus 1
	电压相角	-0.72 deg @ bus 18	0.23 deg @ bus 30
	有功损耗		0.05 MW @ line 2-3
	无功损耗		0.03 MVar @ line 5-6
3 h 30 min—5 h 45 min	电压幅值	0.957 p.u. @ bus 18	1.050 p.u. @ bus 1
	电压相角	-0.76 deg @ bus 18	0.22 deg @ bus 30
	有功损耗		0.05 MW @ line 2-3
	无功损耗		0.03 MVar @ line 5-6
5 h 45 min—6 h 45 min	电压幅值	0.959 p.u. @ bus 18	1.050 p.u. @ bus 1
	电压相角	-0.71 deg @ bus 18	0.35 deg @ bus 30
	有功损耗		0.05 MW @ line 2-3
	无功损耗		0.03 MVar @ line 5-6
7 h—7 h 15 min	电压幅值	0.962 p.u. @ bus 18	1.050 p.u. @ bus 1
	电压相角	-0.68 deg @ bus 18	0.43 deg @ bus 30
	有功损耗		0.05 MW @ line 2-3
	无功损耗		0.03 MVar @ line 5-6
7 h 15 min—7 h 30 min	电压幅值	0.964 p.u. @ bus 18	1.050 p.u. @ bus 1
	电压相角	-0.50 deg @ bus 18	0.45 deg @ bus 30
	有功损耗		0.05 MW @ line 2-3
	无功损耗		0.03 MVar @ line 5-6
7 h 30 min—7 h 45 min	电压幅值	0.964 p.u. @ bus 18	1.050 p.u. @ bus 1
	电压相角	-0.52 deg @ bus 18	0.44 deg @ bus 30
	有功损耗		0.05 MW @ line 2-3
	无功损耗		0.03 MVar @ line 5-6

LI Yang, SONG Tianli, WANG Zijian. Research on key issues of integrated energy services based on user data deep mining [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(3): 1-5.

[2] 陈好,卫志农,胥峥,等. 电力体制改革下的多虚拟电厂联合优化调度策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):42-49,165.

CHEN Yu, WEI Zhinong, XU Zheng, et al. Multi-virtual power plant joint optimal scheduling strategy under power system reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 42-49, 165.

[3] 刘故帅,肖异瑶,贺禹强,等. 考虑新能源类型的电力系统多目标并网优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017,45(10):31-37.

LIU Gushuai, XIAO Yiyao, HE Yuqiang, et al. Multi-objective grid-connection optimization method of power system considering new energy types [J]. Power System

Protection and Control, 2017, 45(10): 31-37.

[4] 关轶文,张宸,张正,等. 计及多维源荷相关性和调峰能力的虚拟电厂规划[J/OL]. 电网技术,1-13[2024-07-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0140>.

GUAN Yiwēn, ZHANG Chen, ZHANG Zheng, et al. Meter and multidimensional source load correlation and load capacity of the virtual power plant planning[J/OL]. Power System Technology, 1-13[2024-07-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0140>.

作者简介：
陈宇沁(1991),男,江苏无锡人,高级工程师,主要从事负荷管理、虚拟电厂、智能用电等方面工作；
王国际(1989),男,江苏徐州人,工程师,主要从事负荷管理、虚拟电厂、客户侧能源管理等软件平台研发等方面工作。
(责任编辑 方德康)