

考虑风电不确定性和动态碳配额的虚拟电厂优化调度

范宏, 郑涵, 田书欣

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要:为实现电力系统低碳化发展与新能源有效消纳, 提出考虑风电不确定性和动态碳配额的虚拟电厂优化调度模型。首先, 构建了源-荷-碳捕集协同的低碳循环系统, 引入光热电站作为灵活性资源, 利用其光-热-电转化的储能特性为碳捕集系统提供能耗支撑。其次, 针对风电出力随机性, 采用基于曼哈顿距离的场景生成-削减方法构建典型场景, 并提出基于风电渗透率的动态碳配额修正机制, 建立随风电占比实时反向调整的碳配额模型。最后, 建立碳捕集电厂、光热电站与风电机组协同的虚拟电厂优化调度模型, 以系统运行成本最小化为目标进行全局寻优。算例仿真表明, 在实现运行成本最优化的同时, 联合优化模型能够大幅提升系统的风电消纳水平, 并有效降低碳排放量。

关键词: 虚拟电厂; 碳捕集; 优化调度; 不确定性

DOI: 10.19585/j.zjdl.202606003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimal dispatch of virtual power plants considering wind power uncertainty and dynamic carbon quotas

FAN Hong, ZHENG Han, TIAN Shuxin

(Faculty of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To promote low-carbon development of power systems and facilitate effective accommodation of renewable energy, this paper proposes an optimal dispatch model for virtual power plants (VPPs) that accounts for wind power uncertainty and dynamic carbon quotas. First, a low-carbon cyclical system coordinating generation, load, and carbon capture is established, introducing a concentrating solar power (CSP) plant as a flexible resource. Its energy storage characteristics of solar-thermal-electric conversion provide energy consumption support for the carbon capture system. Second, to address the stochastic nature of wind power output, a scenario generation and reduction method based on Manhattan distance is used to construct representative scenarios. A dynamic carbon quota adjustment mechanism based on wind power penetration is proposed, establishing a carbon quota model that adjusts in real time according to the proportion of wind generation. Finally, an optimal dispatch model for VPPs, coordinating carbon capture plants, CSP plants, and wind farms, is developed, with a global optimization performed to minimize total system operating costs. Case studies demonstrate that, while achieving operating cost optimization, the integrated optimal dispatch model significantly enhances wind power accommodation and effectively reduces carbon emissions.

Keywords: VPP; carbon capture; optimal dispatch; uncertainty

0 引言

为响应我国于2020年提出的“双碳”目标, 电力系统必须向“低碳、清洁、高效”的新型电力系统转型^[1-5]。VPP(虚拟电厂)通过信息交互技术, 能够实现对分布式发电、可调负荷等的聚合优化及调度管理, 从而实现对可再生能源消纳能力的提高^[6-11]。

目前, CCS(碳捕集)技术是改进传统火电机组碳排放的一种重要技术^[12], 将CCS技术与传统火电厂结合形成CCPP(碳捕集电厂), 助力高碳排放的火电厂实现低碳化转型并提高系统的可再生能源消纳率。大量学者已对CCS技术进行了深入研究, 文献[13-14]通过分析CCS装置的运行特性与仿真结果, 证明了CCS技术对降低碳排放的有效性。文献[15-16]在此基础上加入了压缩液态二氧化碳储能与电转气装置, 提高了能源利用率。文献[17]建立了CCS-风光-风热模型, 由热电厂

提供CCS能耗从而提高能源利用率,验证了风光-光热电站与CCS系统配合模型显著提高了系统的低碳化程度。然而,上述研究多采用固定碳排放因子,未能反映风光出力与负荷波动引起的实时变化,导致碳排放成本被高估或低估,从而影响系统运行的经济性与灵活性。碳配额通常由发电量与碳排放因子的乘积决定,因此选取固定碳排放因子忽略了系统在不同运行场景下对碳排放约束强度的差异化需求,使得配额机制难以发挥引导火电主动调峰的作用。

为解决此问题,学者们提出动态碳配额方法。文献[18]利用日净负荷峰谷差来修正碳配额系数,并与固定碳配额机组进行对比,验证了动态碳配额有利于减小碳排放量、提高消纳率。文献[19]在此基础上提出考虑动态碳配额的灵活CCPP-储能模型,以小时为时间尺度根据风电出力修正碳配额因子,调节各机组出力以实现低弃风率与运行经济性。但这些方法仍主要依赖传统火电厂提供CCS系统能耗,未能充分发挥可再生能源的协同潜力。

另一方面,分布式能源出力的随机性与波动性对VPP的优化调度结果具有重要影响。为了更精确地反映不确定性对系统运行经济性及碳排放水平的作用,学者们提出了多种处理策略,如鲁棒优化^[20]、机会约束规划^[21]以及场景生成与削减方法^[22]等。其中,鲁棒优化法以牺牲经济性换取系统运行的绝对安全,因此得出的调度结果往往过于保守。机会约束规划法在处理非正态分布的风电误差时,通常需要处理复杂的凸松弛函数,计算难度较大。相比之下,基于曼哈顿距离的场景生成-削减算法能够在兼顾场景多样性与代表性的同时有效降低计算复杂度,为风电随机出力建模及调度优化提供可靠技术支持^[23-24]。

在上述背景下,本文旨在解决上述模型中碳配额机制与源荷特性脱节、CCS能耗来源单一的问题,构建了一个含动态碳配额的VPP的CDER(热电联合优化模型),将CCPP、CSP(光热电站)与WT(风电机组)纳入统一调度框架。本文的创新工作主要体现在3个方面:一是构建了CSP辅助CCPP的内部低碳能量循环机制,区别于传统依靠火电自身供能的CCS模式,本文利用CSP电

站的时移储能特性为CCS系统提供能耗,不仅降低了火电等效煤耗,更通过“以热定电”解耦热电约束,提升了系统调峰能力;二是针对固定碳配额无法适应新能源波动的问题,建立风电出力占比与碳配额系数的映射函数,通过量化风电随机性对净负荷峰谷的影响动态调整配额约束,引导火电机组主动适应消纳需求;三是建立了多源协同的VPP低碳经济调度模型,将上述动态机制与风电场景削减方法相融合,实现了风电、光热、火电及CCS系统的全局协同优化,在保障经济性的同时显著降低了弃风率和碳排放量。

1 含CCS的VPP

1.1 VPP基本结构

如图1所示,VPP由协调服务中心、CDER组成。服务中心通过信息流向CDER传递分时电价和调度指令;CDER向服务中心递交申报电量和信息,同时在并网后为电网提供能源出力。CDER内部由风光电厂、CCPP、CSP组成,火电厂为电网提供火电净出力的同时,和风电机组、CSP共同为CCS系统提供CCS能耗。

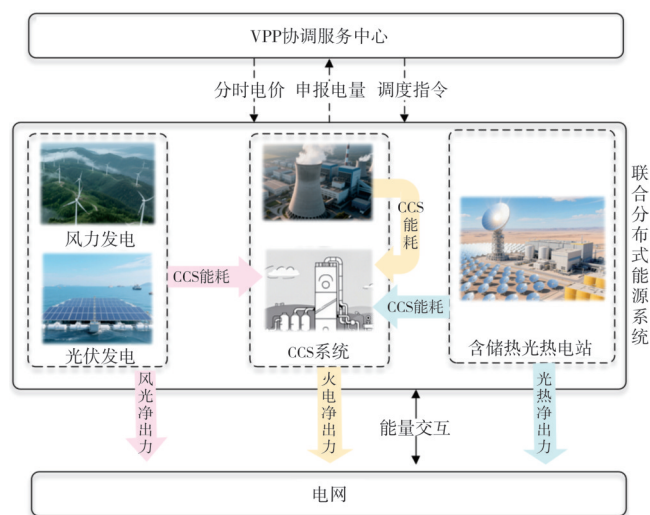


图1 VPP内部结构

Fig.1 Internal structure of the virtual power plant

1.2 VPP内部出力模型

本文通过构建风光出力、CCPP、CSP的数学模型来完善CDER内部能量转换。

1.2.1 风电机组模型

$$P_t^{\text{WT}}(v_t) = N^{\text{W}} \begin{cases} 0, 0 \leq v_t \leq v_i \\ P_r \times \frac{v_t - v_i}{v_r - v_i}, v_i \leq v_t \leq v_r \\ P_r, v_r \leq v_t \leq v_o \\ 0, v_o \leq v_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_t^{WT} 为 t 时刻的风电输出功率; v_t 为 t 时刻的风速; v_i 和 v_o 分别为切入、切出风速; v_r 和 P_r 分别为额定风速、额定功率; N^{W} 为风力发电机组数量。

风电机组的输出功率主要分为两部分, 一部分为 CCS 装置提供的能耗 $P_t^{\text{W-C}}$, 另一部分为电网提供的功率 $P_t^{\text{W-N}}$ 。

$$P_t^{\text{WT}} = P_t^{\text{W-C}} + P_t^{\text{W-N}} \quad (2)$$

1.2.2 CSP 模型

CSP 是 VPP 内部实现新能源消纳的重要环节。目前 CSP 按集热形式主要分为槽式、塔式、碟式以及菲涅尔式, 其中塔式 CSP 在我国应用较为广泛、经济性更好^[25]。

如图 2 所示, 塔式 CSP 内部由聚光集热、储热、发电 3 个环节通过导热流体进行能量交换而构成^[26]。在聚光集热环节, 由定日镜场和吸热装置吸收聚集太阳能, 通过导热流体传输到储热环节, 并在冷热罐之间实现能量交互及储放热变化。最后流入发电环节, 经汽轮机和发电机流入电网, 实现光-热-电能量转换。

$$P_t^{\text{SF,h}} = \eta_{\text{s-h}} S_{\text{SF}} D_t \quad (3)$$

式中: $P_t^{\text{SF,h}}$ 为吸热装置在 t 时刻所吸收的热功率; $\eta_{\text{s-h}}$ 为光-热转换的效率系数; S_{SF} 为定日镜的反射面积; D_t 为 t 时刻的太阳能直接辐照指数。

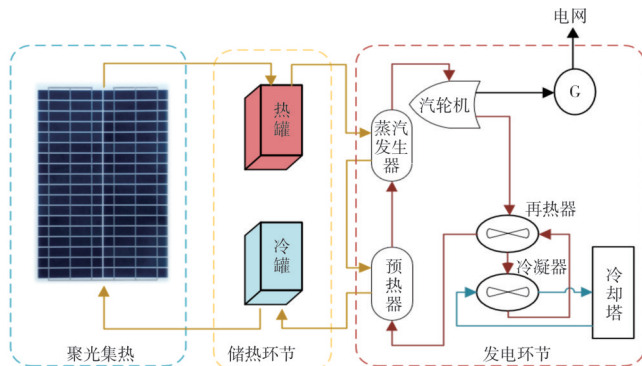


图 2 塔式 CSP

Fig.2 Tower-type CSP system

尽管太阳能辐照度同样具有不确定性, 但本文所建模型中的 CSP 配备了储热系统, 能够平抑光照波动并实现能量的时移利用。相比而言, 风电机组由于储能缓冲的缺乏, 其出力不确定性与反调峰特性对系统的冲击更为明显。因此本文重点研究风电机组出力的随机特征, 将 CSP 作为 VPP 内部的一种灵活资源参与协同优化。

光热转换可表示为:

$$P_t^{\text{SF,h}} = (P_t^{\text{csp,h}} + P_t^{\text{TS,cha}} - \eta_{\text{dis}} P_t^{\text{TS,dis}} + P_t^{\text{abn,h}}) \quad (4)$$

式中: $P_t^{\text{csp,h}}$ 为吸热装置吸收热能后直接供电的功率; $P_t^{\text{TS,cha}}$ 为 t 时刻的储热功率; η_{dis} 为放热效率; $P_t^{\text{TS,dis}}$ 为 t 时刻的放热功率; $P_t^{\text{abn,h}}$ 为 t 时刻的舍弃功率。

吸热装置吸收热量后, 可以在负荷高峰期直接为电网供电, 也能够通过热导体输送到储热装置。同时, 为了保证吸热装置稳定运行, 还能够根据出力情况舍弃一部分功率。

由于储能装置所用的材料特性, 热耗散无法避免:

$$C_t^{\text{TS,h}} = (1 - \eta_{\text{loss}}) C_{t-1}^{\text{TS,h}} \Delta t + (\eta_{\text{cha}} P_t^{\text{TS,cha}} - P_t^{\text{TS,dis}}) \Delta t \quad (5)$$

式中: $C_t^{\text{TS,h}}$ 为 t 时刻的储热状态; η_{loss} 为固定的热量耗散系数; $C_{t-1}^{\text{TS,h}}$ 为 $t-1$ 时刻的储热状态; η_{cha} 为储热效率。

集热系统捕获热能并转化为电能的功率, 储热系统将储存的热能进一步转换为电能的功率。二者共同构成了 CSP 的等效发电功率, 可在无光照时段利用存储热能发电, 实现了光能的时移利用与输出功率的平滑调节。其具体计算公式如下:

$$P_t^{\text{csp,e}} = \eta_{\text{h-e}} (P_t^{\text{csp,h}} + \eta_{\text{dis}} P_t^{\text{TS,dis}}) \quad (6)$$

式中: $P_t^{\text{csp,e}}$ 为 t 时刻 CSP 电站的等效输出功率; $\eta_{\text{h-e}}$ 为热-电转换效率。

与风电机组同样, CSP 电站的输出功率为电网提供 $P_t^{\text{csp-n}}$ 的同时为 CCS 装置提供能耗 $P_t^{\text{csp-c}}$ 。其数学模型为:

$$P_t^{\text{csp,e}} = P_t^{\text{csp-c}} + P_t^{\text{csp-n}} \quad (7)$$

1.2.3 CCBP 模型

CCS 系统主要由吸收、再生、压缩 3 个环节组成。通过吸收塔使烟气与吸收液反应吸收 CO_2 , 吸收液由贫液变富液; 富液经换热器进入再生塔加热再生, CO_2 分离, 富液变贫液, 再生后的吸

收液冷却后循环吸收,再沸器热量从发电侧抽取蒸汽获取;最后用压缩机压缩CO₂以便运输封存。因此,3个环节所产生的能耗占CCPP能耗的绝大部分。

CCPP出力分为向电网输出的火电净出力和为CCS装置提供部分能耗两部分。出力模型可表达为:

$$P_{n,t}^{\text{GN}} = P_{n,t}^{\text{G}} - P_{n,t}^{\text{G-C}} \quad (8)$$

式中: $P_{n,t}^{\text{GN}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{G}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{G-C}}$ 分别为CCPP机组净出力、等效出力、CCS能耗。

1.3 风力发电不确定性处理

目前对于可再生能源不确定性的处理研究中,基于概率距离的场景生成-削减法应用较为广泛^[27],常规方法大多采用基于欧式距离的聚类算法,忽略场景分布间的概率特征^[28]。因此,利用文献[29]所提出的场景生成-削减方法对风力发电机组出力进行处理,能够有效度量原始场景分布与削减后场景分布在概率密度上的差异,从而在大幅减少场景数量的同时,最大限度地保留风电出力的统计特性。具体流程如图3所示。

$$E_{n,t}^{\text{G}} = \begin{cases} \delta_0 P_{n,\min}^{\text{G}} + \sigma(P_{n,t}^{\text{G}} - P_{n,\min}^{\text{G}})\delta, P_{n,\min}^{\text{G}} \leq P_{n,t}^{\text{G}} \leq P_{n,\min}^{\text{G}} + P \\ \delta_0 P_{n,\min}^{\text{G}} + \sigma(P_{n,t}^{\text{G}} - P_{n,\min}^{\text{G}})\delta_1 + \sigma(P_{n,t}^{\text{G}} - P_{n,\min}^{\text{G}} - p)\delta_2, P_{n,\min}^{\text{G}} + p \leq P_{n,t}^{\text{G}} \leq P_{n,\min}^{\text{G}} + 2P \\ \vdots \\ \delta_0 P_{n,\min}^{\text{G}} + \sigma(P_{n,t}^{\text{G}} - P_{n,\min}^{\text{G}})\delta_1 + \cdots + \sigma(P_{n,t}^{\text{G}} - P_{n,\min}^{\text{G}} - (n-1)p)\delta_n, P_{n,\min}^{\text{G}} + (n-1)p \leq P_{n,t}^{\text{G}} \leq P_{n,\max}^{\text{G}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $E_{n,t}^{\text{G}}$ 为火电机组 n 在 t 时段的碳排放量; δ_n 为 n 机组的碳排放因子修正量,其中 δ_0 为碳排放因子基础值; $P_{n,t}^{\text{G}}$ 、 $P_{n,\min}^{\text{G}}$ 、 $P_{n,\max}^{\text{G}}$ 、 P 分别为火电机组 n 的 t 时段功率、功率最大值、功率最小值、出力区间长度。

1.4.2 动态碳配额模型

由于机组日均碳配额总量固定,可由式(11)得出修正前固定的碳配额系数。

$$\lambda = \frac{C_D}{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T P_{n,t}^{\text{G}}} \quad (11)$$

式中: C_D 为火电机组日均碳配额总量; λ 为日均碳配额系数。

在高新能源比例的场景下,若采用现有的固定碳配额系数 λ ,将难以适应源荷的波动特性,制约火电机组的调峰主动性。系统的净负荷往往由总负荷扣除风电出力得到,因此风电出力的大小

式(9)利用 Weibull PDF (威布尔概率密度函数)表征风速变化量,从而对风电出力不确定性进行预测。

$$f_{V_t}(V_t) = \frac{k}{c} \left(\frac{V_t}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V_t}{c} \right)^k \right] \quad (9)$$

式中: k 和 c 为 Weibull PDF 对应的形状、尺度参数。

结合气象数据,利用式(1)和式(9)可分别构建风速分布函数与风力发电功率模型。将风能出力视为同一情景中具有差异的特征,依据图3所展示的计算方法,能得出各情景对应的曼哈顿距离及概率距离。基于这些距离度量结果,可明确需要削减的情景与数量,并在情景约束条件下完成场景削减操作。

1.4 碳排放量与动态碳配额模型

1.4.1 碳排放量模型

由于风光等新能源加入VPP调度,火电机组的调峰幅度将相对增加。文献[19]利用式(10)精确表示了火电机组的碳排放量。

将直接决定净负荷的峰谷状态。

为此,本文引入风电出力占比指标 Z 作为表征净负荷特性的关键参数。当 Z 值较高时,风电出力大,对应净负荷低谷期,此时系统消纳压力大,易形成弃风;反之则对应净负荷高峰期,系统的供电压力大。构建动态碳配额修正机制,其核心在于利用经济杠杆引导调节:净负荷低谷期调减配额系数,增加火电的边际碳交易成本,使火电机组主动压减出力,为风电上网腾出空间,实现经济性与消纳能力的双重优化。

定义 t 时刻风电出力占比 $Z_{w,t}$ 及日均占比 $Z_{w,\text{avg}}$ 如下:

$$\begin{cases} Z_{w,\text{avg}} = \sum_{t=1}^T P_{w,t} / \sum_{t=1}^T P_{\text{load},t} \\ Z_{w,t} = P_{w,t} / P_{\text{load},t} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{w,t}$ 和 $P_{\text{load},t}$ 分别为风电功率、负荷功率。

修正后碳配额系数 $\lambda_{x,t}$ 为:

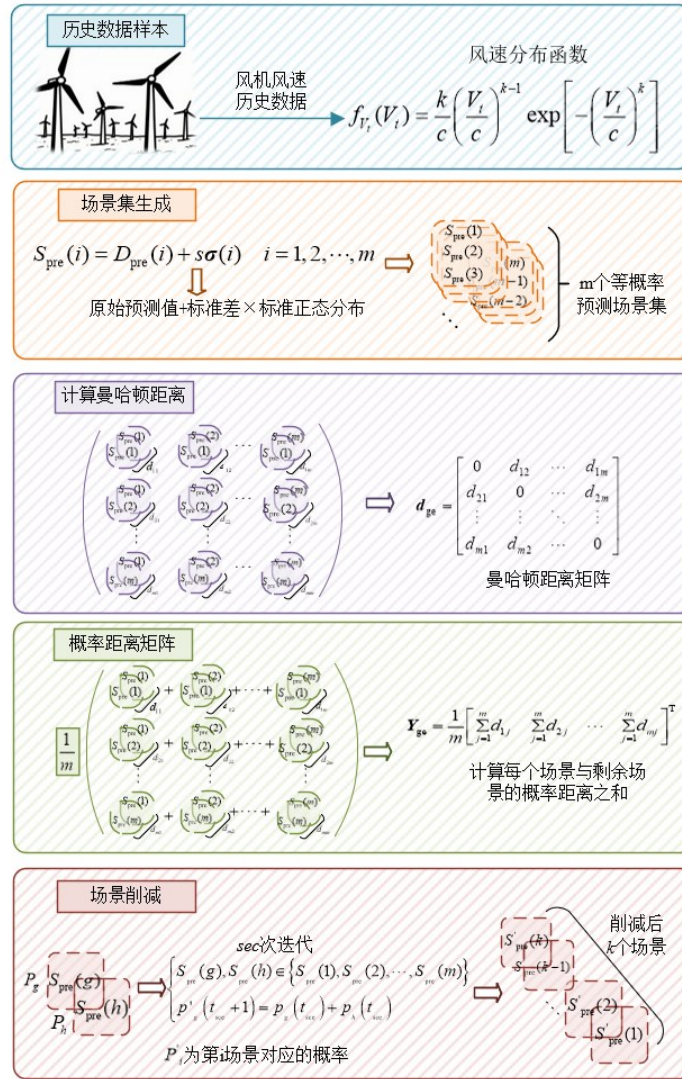


图3 场景生成-削减法主要框图

Fig.3 Main block diagram of the scenario generation and reduction method

$$\lambda_{x,t} = \begin{cases} (1 - k_b)\lambda, Z_{w,t} > 1.5Z_{w,avg} \\ \lambda, 0.6Z_{w,avg} \leq Z_{w,t} \leq 1.5Z_{w,avg} \\ (1 + k_c)\lambda, Z_{w,t} < 0.6Z_{w,avg} \end{cases} \quad (13)$$

根据所修正的碳配额系数, 保证日均碳排放总量不变, 考虑碳配额后的机组输出功率如下:

$$C_D = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda_{x,t} P_{n,t}^{G'} \quad (14)$$

式中: $P_{n,t}^{G'}$ 为考虑碳配额后的火电机组输出功率。

2 调度策略

2.1 目标函数

以 VPP 运行成本最低为目标, 本文的目标函数如下:

$$\min F = \min (C_{WT} + C_{CSP} + C_H + C_C + C_L) \quad (15)$$

式中: C_{WT} 、 C_{CSP} 、 C_H 、 C_C 、 C_L 分别为风力机组运行成本、CSP 电站运行成本、火电机组成本、碳交易成本、弃风及失负荷成本。

为剥离外部现货市场的价格波动对 VPP 内部资源配置的干扰, 充分体现动态碳配额对 VPP 内部多源协同调度的影响机理, 参考文献的处理方式, 本文假定该 VPP 处于自平衡模式。在此模式下, 实现满足各安全约束下的综合运行成本最小化。

2.1.1 风力机组运行成本

尽管风电机组运行时默认无须能源消耗, 但维持其机组运行需要产生一定费用。

$$C_{WT} = \tau_{WT} \sum_{t=1}^T P_t^{WT} \Delta t \quad (16)$$

式中: τ_{WT} 为风电机组运行维护系数; Δt 为时间间隔, 取1 h。

2.1.2 CSP运行成本

$$C_{CSP} = \tau_{CSP} \sum_{t=1}^T P_t^{CSP,e} \Delta t \quad (17)$$

式中: τ_{CSP} 为CSP运行维护系数。

2.1.3 火电机组成本

$$C_H = C_S + C_M \quad (18)$$

$$C_S = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (C_{nq} x_{n,t} + C_{np} y_{n,t}) \quad (19)$$

$$C_M = K_m \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [(aP_{n,t}^G)^2 + bP_{n,t}^G + c] \quad (20)$$

式中: C_S 和 C_M 分别为火电机组运行成本和煤耗成本; C_{nq} 和 C_{np} 分别为机组 n 的启动、停止成本; $x_{n,t}$ 和 $y_{n,t}$ 为布尔状态变量, 可取0或1, 0为停机状态, 1为运行状态; K_m 为火电机组单位煤耗成本系数; a 、 b 、 c 为机组煤耗特性系数。

2.1.4 碳交易成本

根据式(10)的火电机组碳排放模型得到碳排放总量为:

$$E_{a,t} = \sum_{n=1}^N E_{n,t}^G \quad (21)$$

根据1.4.2节修正后的碳排放因子, 精确得到火电机组的碳排放量 $P_{n,t}^{G'}$, 碳交易成本为:

$$C_C = \zeta_c \sum_{t=1}^T \left(E_{a,t} - \sum_{n=1}^N \lambda_{x,t} P_{n,t}^{G'} \right) \quad (22)$$

式中: ζ_c 为碳交易价格。

2.1.5 弃风及失负荷成本

$$C_L = C_q + C_r \quad (23)$$

$$C_q = K_q \sum_{t=1}^T P_{wind,t} \Delta t \quad (24)$$

$$C_r = K_r \sum_{t=1}^T P_{cur,t} \Delta t \quad (25)$$

式中: C_q 为弃风成本; C_r 为弃负荷成本; K_q 为弃风惩罚系数; $P_{wind,t}$ 为弃风功率; K_r 为失负荷惩罚系数; $P_{cur,t}$ 为失负荷功率。

2.2 约束条件

2.2.1 系统功率平衡约束

$$P_t^{WT} + P_t^{CSP} + \sum_{n=1}^N P_{n,t}^{G'} = \sum_{n=1}^N P_{n,t}^C + P_{load,t} \quad (26)$$

式中: $P_{load,t}$ 为负荷功率。

2.2.2 CSP机组约束

CSP中储热装置受容量限制约束, 尽管储放热功率调节能够实现连续调节, 但储热、放热不能够同时进行, 具体约束如下:

$$C_{min}^{TS,h} \leq C_t^{TS,h} \leq C_{max}^{TS,h} \quad (27)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{TS,cha} \leq P_{max}^{TS,cha} \\ 0 \leq P_t^{TS,dis} \leq P_{max}^{TS,dis} \\ P_t^{TS,cha} P_t^{TS,dis} = 0 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $C_{min}^{TS,h}$ 和 $C_{max}^{TS,h}$ 为储热系统容量上、下限值; $P_{max}^{TS,cha}$ 和 $P_{max}^{TS,dis}$ 为储热装置的储热上限和放热上限值。

2.2.3 CCS机组约束

机组出力约束:

$$P_n^{G,min} \leq P_n^G \leq P_n^{G,max} \quad (29)$$

式中: $P_n^{G,min}$ 和 $P_n^{G,max}$ 分别为机组 n 出力的最小、最大值。

CCS能耗约束:

$$P_{n,min}^C \leq P_{n,t}^C \leq P_{n,max}^C \quad (30)$$

式中: $P_{n,min}^C$ 和 $P_{n,max}^C$ 为CCS能耗的最小、最大值。

CCS机组爬坡功率约束:

$$|P_{n,t}^G - P_{n,t-1}^G| \leq \Delta P_n^G \quad (31)$$

$$|P_{n,t}^{G-C} + P_t^{W-C} + P_t^{CSP-C} - P_{n,t-1}^{G-C} - P_{t-1}^{W-C} - P_t^{CSP-C}| \leq \Delta P_n^C \quad (32)$$

3 算例分析

3.1 算例设置

为验证调度策略的有效性, 构建如图1所示VPP为研究对象, 包含风电机组、CSP、CCPP。使用Gurobi求解器进行求解, 以24 h为调度周期, 步长取1 h。采集国内某地区的日风力发电出力数据和负荷数据, 对风电数据进行不确定性处理。场景生成-削减方法见1.4节, 风光出力标准差设为0.2, 削减后场景数量设为6, 通过对比文献[29-30]所使用的两种削减法, 得到本文所使用方法在其不同场景的概率, 如表1所示。文献[31]引用概率距离后采用快速前代消除法, 生成的场景3出力波动过大, 不适宜作为参考。文献[29]采用同步回代缩减法对初始场景进行缩减, 场景3长时间出力满发且短时间骤降, 不具有代表性。因此本文选用概率最大的场景1进行优化调度。典型日负荷、风电机组出力如图4所示。

表 1 不同方法场景概率
Table 1 Scenario probabilities under different methods %

场景	本文	文献[32]	文献[31]
1	24.51	23.48	24.51
2	13.79	14.92	22.71
3	12.31	9.77	9.46
4	16.52	16.52	15.46
5	19.97	19.62	16.37
6	12.90	15.45	11.49

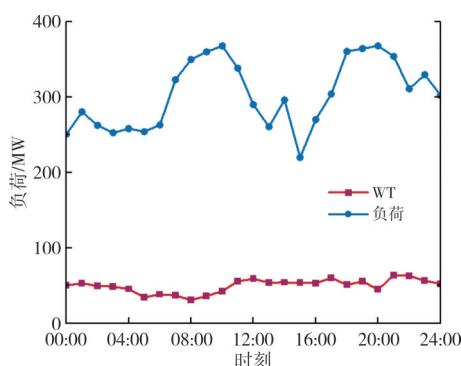


图 4 负荷与风电出力预测
Fig.4 Load and wind power output

CSP 机组参数详见文献[26], 火电机组参数详见文献[19], 其余参数如表 2 所示。本文设置了 3 个模式进行分析对比:

1) 不考虑动态碳配额的独网运行模式: 只有火电机组独立承担 CCS 能耗。

2) 传统固定碳配额下的联合调度模式: 由 WT、CSP 与火电机组联合承担 CCS 能耗, 但采用传统固定碳配额系数, 不计及风电出力的影响。

3) 考虑动态碳配额的联合运行: 除共同承担 CCS 能耗外, 引入本文提出的考虑风电系统占比修正碳配额因子机制。

3.2 优化结果分析

由表 3 可知, 联合运行的模式 2 相较于独立运

表 2 算例系数

Table 2 Case study coefficients

参数	数值
风电机组运行维护系数 τ_{WT}	32
CSP 电站运行维护系数 τ_{CSP}	43
失负荷惩罚系数 K_r	405
弃风惩罚系数 K_q	158
火电机组单位煤耗成本系数 K_m	743
机组煤耗特性系数 a 、 b 、 c	0.000 035、0.18、16.33

行的模式 1 弃风成本减少了 15%, 失负荷成本下降了 28%, 碳排放量减少了 30.5 t。独立运行模式下, 由于仅有火电机组为 CCS 系统提供能耗, 煤耗成本与碳排放量明显增加, 且系统中风电机组弃风量较高。当风电机组、CSP 电站与火电机组联合运行时, 降低了系统煤耗成本, 提高了新能源消纳率。

表 3 不同模式下经济成本

Table 3 Economic costs under different modes

结果量	独立运行模式	现有固定碳配额方法	本文动态碳配额方法
弃风成本/元	25 596.0	16 659.0	10 858.0
失负荷成本/元	44 955.0	32 014.0	20 901.0
碳排放量/t	460.8	430.3	390.7
综合成本/元	478 666.0	461 065.0	405 220.0

而考虑动态碳配额的场景 3 相较于场景 2, 碳排放量减少效果更为显著, 系统综合成本、弃风成本、弃负荷成本同时减少。这是因为风电占系统比例高时, 根据动态碳配额方法算出的机组碳配额值降低, 碳排放对系统经济性影响增大, 火电机组降出力减碳排, CCS 能耗上升, 弃风量减少。而净负荷高、风电功率低时, 机组碳配额提高, 碳排放对系统经济性影响减小, 系统低碳要求降低, 火电机组出力增加, CCS 能耗降低, 系统失负荷成本下降。

不同模式下综合成本与碳排放量的对比如图 5 所示。由表 3 和图 5 可知, 相对于固定碳配额因子下的联合运行模式, 引入风电占比修正机制后, 系统的综合成本由 46.1 万元降至 40.5 万元, 降幅达到了 12.1%, 体现了该策略的有效降本能力。碳排放量由 430.3 t 进一步降至 390.7 t, 减排比例达 9.2%, 实现了经济性与环保性的双赢。另外, 得益于碳成本杠杆对火电出力的倒逼调节, 弃风成本由 1.66 万元大幅降至 1.08 万元, 降幅高达 34.8%; 同时失负荷成本降低了 34.7%, 显著提升了供电可靠性。

进一步结合图 4 与调度结果分析可知, 系统失负荷风险主要集中在 19:00—21:00 的晚高峰时段。在此期间, 由于无太阳直接辐射, CSP 集热环节停止工作, 发电完全依赖储热系统放热。尽管此时风电出力维持在平均水平, 但由于用户侧负荷

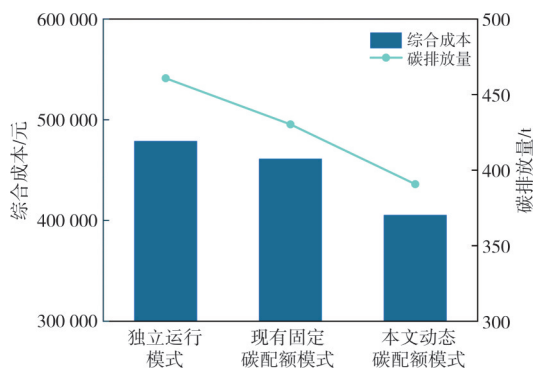


图5 不同模式下综合成本与碳排放量对比

Fig.5 Comparison of total cost and carbon emissions under different dispatch modes

需求达到全天峰值,风电出力未能实现对负荷高峰的有效覆盖,导致系统净负荷上升并达到峰值。在固定碳配额模式下,火电机组受限于严格的碳排放约束,CCS系统能耗占比较高,导致供需失衡。而在动态碳配额模式下,较低的风电渗透率触发碳配额系数修正机制,促使火电机组提升净出力,有效填补晚高峰缺口。

综上所述,本文所提模型相比现有固定配额模型,在各项关键指标上均展现出显著优势。

限于篇幅,本文对考虑动态碳配额的联合运行模式下VPP出力情况进行分析。如图6为模式3下VPP各机组的出力情况,从整体来看,CSP与CCPP机组呈互补趋势。得益于CSP集热与储热环节的耦合,其具备能量时移特性:日间主要通过定日镜场捕获吸收太阳能直接发电,夜间则转为利用储热罐放热维持机组出力。CCS机组通过调度策略,夜间作为主出力机组。图6中12:00—16:00时段,当风电机组出力较大时,通过动态碳配额因子调整,火电机组将降低出力从而减少碳排放,实现高效低碳运行。同时,该场景下总弃风量仅占风电机组总出力的5.9%,提高了新能源消纳率,避免了在新能源消纳保障机制下的消纳率惩罚^[32]。

3.3 动态碳配额效果分析

图7为CCS系统能耗来源,可明显看出在不同时段各机组随CCS机组消纳消耗量,提供不同能耗。VPP内部进行协调优化能够推动系统低碳化发展并提高能源消纳率。

火电机组在不同碳排放因子、不同负荷率下

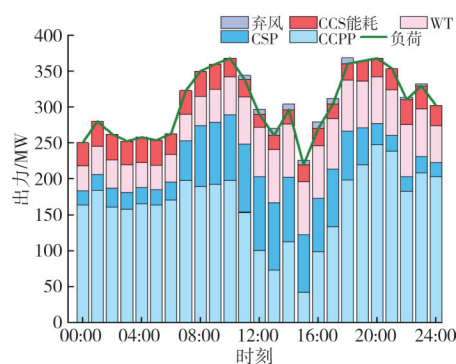


图6 考虑动态碳配额的联合运行模式下VPP出力

Fig.6 VPP output under the coordinated operation mode considering dynamic carbon quotas

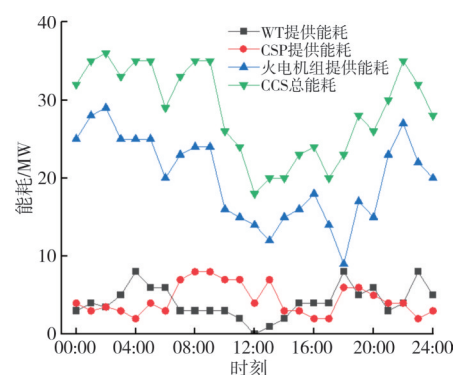


图7 CCS能耗来源

Fig.7 Energy sources for carbon capture

的1 h碳排放量如图8所示。以文献[33]中采用的600 MW等级的LZ 2号火电机组为参考,固定碳排放因子与动态碳排放因子的初始设定值都为0.87。随着负荷率的增加,动态碳排放因子与监测机组碳排放因子皆小幅度下降。当负荷率为0.9时,固定碳排放因子排放量与监测机组排放量每一小时标准差为37.8 t,采用动态碳排放因子使标准差下降为10.8 t,误差率降低了73%。

4 结论

针对目前高比例风电并网下VPP低碳性与经济性兼顾困难的问题,本文提出了一种考虑风电不确定性与动态碳配额的源-荷-碳协同优化调度策略,得到了以下结论:

1)提出了基于风电出力占比的动态碳配额修正机制,将风电的随机波动特性映射为系统的净负荷调节需求,通过动态调整配额系数,利用碳交易成本的经济杠杆引导火电机组主动压低出力,

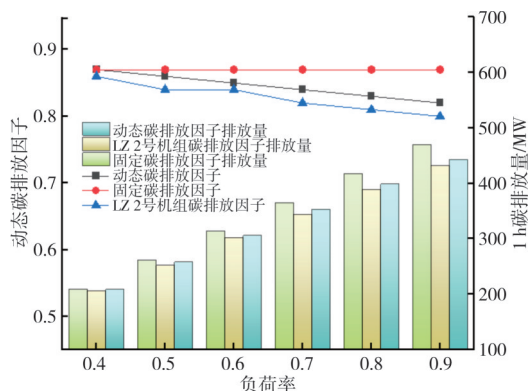


图8 不同碳排放因子下机组1 h碳排放量

Fig.8 Hourly carbon emissions of generation units under varied emission factors

为风电上网腾出空间。结果表明,相比固定配额模式,该机制更能准确反映系统的实时碳排放责任,有效降低碳排放总量。

2)构建了CSP辅助CCS的联合调度模型,实现了为CCS系统提供低碳能耗支撑,有效解耦了火电机组“以热定电”的约束。在保证系统综合运行成本最小化的同时,显著提升了风电消纳水平,实现了经济效益与环境效益的双赢。

3)相比于传统方法,在处理风电不确定性时,基于概率距离的场景生成-削减法较好地保留了场景的概率特征,且避免了调度结果的过度保守,提高了系统的运行经济性。

参考文献

[1] 黄震,谢晓敏,张庭婷.“双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究[J].中国工程科学,2022,24(6):8-18.
HUANG Zhen,XIE Xiaomin,ZHANG Tingting.Medium-and long-term energy demand of China and energy transition pathway toward carbon neutrality[J].Strategic Study of CAE,2022,24(6):8-18.

[2] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.
XUE Yusheng,LEI Xing,XUE Feng,et al.A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J].Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5029-5040.

[3] 李咸善,杨华,张远航,等.考虑CCER机制的虚拟电厂电碳市场运营策略[J/OL].现代电力,2025,42(2):1-13.[2025-06-15].https://link.cnki.net/doi/10.19725/j.cnki.1007-2322.2024.0244.
LI Xianshan,YANG Hua,ZHANG Yuanhang,et al.Op-

eration strategy of virtual power plant electricity-carbon market considering CCER mechanism[J].Modern Electric Power,2025,42(2):1-13.[2025-06-15].https://link.cnki.net/doi/10.19725/j.cnki.1007-2322.2024.0244.

[4] 张文博,邢海军,聂立君,等.考虑高渗透率可再生能源的新型电力系统可靠性评估综述[J].电测与仪表,2025,62(9):51-61.
ZHANG Wenbo,XING Haijun,NIE Lijun,et al.Review of the novel power system reliability assessment with high penetration renewable energy[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2025,62(9):51-61.

[5] 陈郑平,李文忠,陈飞雄,等.分布式资源助力新型电力系统灵活性提升研究综述[J].电力工程技术,2025,44(2):145-159.
CHEN Zhengping,LI Wenzhong,CHEN Feixiong,et al.Summary of research on improving the flexibility of new power systems with distributed resources[J].Electric Power Engineering Technology,2025,44(2):145-159.

[6] 陈会来,张海波,王兆霖.不同类型虚拟电厂市场及调度特性参数聚合算法研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(1):15-27.
CHEN Huilai,ZHANG Haibo,WANG Zhaolin.A review of market and scheduling characteristic parameter aggregation algorithm of different types of virtual power plants[J].Proceedings of the CSEE,2023,43(1):15-27.

[7] 钟永洁,汤成俊,王紫东,等.我国虚拟电厂的发展演进和关键技术及难点分析[J].浙江电力,2025,44(2):13-31.
ZHONG Yongjie,TANG Chengjun,WANG Zidong,et al.Analysis of the evolution, key technologies, and challenges of virtual power plants in China[J].Zhejiang Electric Power,2025,44(2):13-31.

[8] 张丽娟,保富.含分布式新能源的多虚拟电厂协同运行[J].电测与仪表,2025,62(9):134-141.
ZHANG Lijuan,BAO Fu.Coordinated operation of multiple virtual power plants integrated with distributed renewable energy[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2025,62(9):134-141.

[9] 高明,曾平良,冯永朝.新型电力系统中的虚拟电厂研究综述[J].电力工程技术,2025,44(6):143-154.
GAO Ming,ZENG Pingliang,FENG Yongzhao.Review of virtual power plant in new power system[J].Electric Power Engineering Technology,2025,44(6):143-154.

[10] 王鹏,张勤,季益俊.“双碳”目标下考虑多主体互动的虚拟电厂合作博弈鲁棒优化策略[J].电测与仪表,2025,62(10):85-95.
WANG Peng,ZHANG Qin,JI Yijun.Robust optimization strategy for the cooperative game of virtual power plant considering multi-agent interaction under the dual carbon target[J].Electrical Measurement & Instrumentation,

- 2025,62(10):85-95.
- [11] 宋铎洋,薛田良,李艺瀑,等.考虑风光不确定性的虚拟电厂合作博弈调度及收益分配策略[J].电力工程技术,2025,44(1):193-206.
SONG Duoyang, XUE Tianliang, LI YiPu, et al. Cooperative game scheduling and revenue sharing strategy for virtual power plants considering scenery uncertainty[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1): 193-206.
- [12] 陈继明,徐乾,李勇,等.计及源荷不确定性和碳捕集虚拟电厂的电-气互联系统优化调度[J].太阳能学报,2023,44(10):9-18.
CHEN Jiming, XU Qian, LI Yong, et al. Optimal dispatch of electricity-natural gas interconnection system considering source-load uncertainty and virtual power plant with carbon capture[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(10):9-18.
- [13] 崔杨,曾鹏,惠鑫欣,等.考虑碳捕集电厂综合灵活运行方式的低碳经济调度[J].电网技术,2021,45(5):1877-1886.
CUI Yang, ZENG Peng, HUI Xinxin, et al. Low-carbon economic dispatch considering the integrated flexible operation mode of carbon capture power plant[J]. Power System Technology, 2021, 45(5):1877-1886.
- [14] 刘江涛,延巧娜,白冰青.计及碳捕集设备加装的低碳综合能源系统运行及配置方法[J].电测与仪表,2025,62(8):20-28.
LIU Jiangtao, YAN Qiaona, BAI Bingqing. Operation and configuration method of low-carbon integrated energy system considering carbon capture equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(8):20-28.
- [15] 张良,栾翰章,杜华琛,等.考虑碳捕集与压缩液态二氧化碳储能的虚拟电厂低碳经济调度[J].电网技术,2025,49(7):2789-2798.
ZHANG Liang, LUAN Hanzhang, DU Huachen, et al. Low-carbon economic dispatch of virtual power plant with carbon capture and compressed liquid carbon dioxide storage[J]. Power System Technology, 2025, 49(7): 2789-2798.
- [16] 张杰,陈洁,孙晗喆,等.基于碳捕集与液态CO₂储能的综合能源系统优化调度[J].智慧电力,2023,51(3):1-8.
ZHANG Jie, CHEN Jie, SUN Hanzhe, et al. Optimal scheduling of integrated energy systems based on carbon capture and liquid CO₂ energy storage[J]. Smart Power, 2023, 51(3):1-8.
- [17] 袁桂丽,刘骅骐,禹建芳,等.含碳捕集热电机组的虚拟电厂热电联合优化调度[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4441-4448.
YUAN Guili, LIU Huaqi, YU Jianfang, et al. Combined heat and power optimal dispatching in virtual power plant with carbon capture cogeneration unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12):4441-4448.
- [18] 林俐,周龙文,郑馨姚.计及机组碳排放特性的抽蓄辅助燃煤机组深度调峰的低碳经济调度[J].华北电力大学学报(自然科学版),2024,51(5):1-10.
LIN Li, ZHOU Longwen, ZHENG Xinyao. Low-carbon economic dispatch of deep peak shaving of coal-fired units with pumped storage assisted regarding the carbon emission characteristics of coal-fired units[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2024, 51(5):1-10.
- [19] 熊军华,李润南,李灵秀,等.考虑动态碳配额的灵活碳捕集电厂-广义储能系统低碳经济调度[J].太阳能学报,2025,46(5):696-705.
XIONG Junhua, LI Runnan, LI Lingxiu, et al. Low-carbon economic scheduling of flexible carbon capture power plants and generalized energy storage systems considering dynamic carbon quotas[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(5):696-705.
- [20] 吴迟绿,杨晓辉,万钊,等.计及碳-绿证互联交易的虚拟电厂两阶段鲁棒优化调度[J].智慧电力,2025,53(5):16-23.
WU Chilu, YANG Xiaohui, WAN Zhao, et al. Two-stage robust optimal scheduling for virtual power plants considering carbon-green certificate interlinked trading[J]. Smart Power, 2025, 53(5):16-23.
- [21] 李志伟,赵书强,刘金山.基于机会约束目标规划的风光-水-气-火-储联合优化调度[J].电力自动化设备,2019,39(8):214-223.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Jinshan. Coordinated optimal dispatch of wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-storage system based on chance-constrained goal programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):214-223.
- [22] 周星球,郑凌蔚,杨兰,等.考虑多重不确定性的综合能源系统日前优化调度[J].电网技术,2020,44(7):2466-2473.
ZHOU Xingqiu, ZHENG Lingwei, YANG Lan, et al. Day-ahead optimal dispatch of an integrated energy system considering multiple uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(7):2466-2473.
- [23] YANG N C, MEHMOOD D, YANG N C, et al. Multi-objective bee swarm optimization algorithm with minimum Manhattan distance for passive power filter optimization problems[J]. Mathematics, 2022, 10(1):1-20.
- [24] 赵书强,要金铭,李志伟.基于改进K-means聚类 and SBR算法的风电场景缩减方法研究[J].电网技术,2021,45(10):3947-3954.

- ZHAO Shuqiang, YAO Jinming, LI Zhiwei. Wind power scenario reduction based on improved K-means clustering and SBR algorithm[J]. Power System Technology, 2021, 45(10):3947-3954.
- [25] 杜尔顺, 张宁, 康重庆, 等. 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21):5765-5775.
- DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21):5765-5775.
- [26] 仲悟之, 黄思宇, 崔杨, 等. 考虑源荷不确定性的风电-光热-碳捕集虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9):3424-3432.
- ZHONG Wuzhi, HUANG Siyu, CUI Yang, et al. W-S-C capture coordination in virtual power plant considering source-load uncertainty [J]. Power System Technology, 2020, 44(9):3424-3432.
- [27] 黎静华, 骆怡辰, 杨舒惠, 等. 可再生能源电力不确定性预测方法综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(4):1144-1157.
- LI Jinghua, LUO Yichen, YANG Shuhui, et al. Review of uncertainty forecasting methods for renewable energy power [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4):1144-1157.
- [28] 孙怡文, 邢海军, 梅丘梅, 等. 计及风电-光伏出力相关性的新型电力系统可靠性评估[J]. 浙江电力, 2025, 44(9):13-20.
- SUN Yiwen, XING Haijun, MEI Qiumei, et al. Reliability assessment of modern power systems accounting for the correlation of wind-PV output correlation [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(9):13-20.
- [29] 李东东, 王啸林, 沈运帷, 等. 考虑多重不确定性的含需求响应及电碳交易的虚拟电厂优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5):210-217.
- LI Dongdong, WANG Xiaolin, SHEN Yunwei, et al. Optimal scheduling strategy of virtual power plant with demand response and electricity-carbon trading considering multiple uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5):210-217.
- [30] 袁桂丽, 贾新潮, 房方, 等. 虚拟电厂源荷双侧热电联合随机优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(8):2932-2940.
- YUAN Guili, JIA Xinchao, FANG Fang, et al. Joint stochastic optimal scheduling of heat and power considering source and load sides of virtual power plant [J]. Power System Technology, 2020, 44(8):2932-2940.
- [31] 戴尚文, 张利, 刘宁宁, 等. 考虑可再生能源消纳责任的售电公司购电决策分析[J]. 中国电力, 2021, 54(9):156-164.
- DAI Shangwen, ZHANG Li, LIU Ningning, et al. Energy purchasing strategy of electricity retailer considering the responsibility of renewable energy consumption [J]. Electric Power, 2021, 54(9):156-164.
- [32] 李德鑫, 郑涛岳, 姜齐荣, 等. 计及消纳惩罚的日前市场优化出清方法[J]. 电力建设, 2023, 44(4):29-36.
- LI Dexin, ZHENG Taoyue, JIANG Qirong, et al. Day-ahead optimized market clearing method considering renewable energy absorption [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4):29-36.
- [33] 刘科, 杨兴森, 王太, 等. 基于实时监测的燃煤机组碳排放特性研究[J]. 热力发电, 2022, 51(10):47-53.
- LIU Ke, YANG Xingsen, WANG Tai, et al. Research on carbon emission characteristics of coal-fired units based on real-time monitoring [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10):47-53.

收稿日期: 2025-09-14; 修回日期: 2025-12-24

作者简介:

范宏(1978), 女, 博士, 研究生导师, 主要从事电网规划、虚拟电厂优化调度方面的研究工作。

郑涵(2001), 女, 硕士研究生, 研究方向为购售电优化与虚拟电厂优化调度。(通信作者)

(本文编辑: 徐 晗)