

引用格式:王宸宇,唐忠,魏敏捷,等.考虑源荷两侧不确定性的含风电-垃圾焚烧热电联产虚拟电厂协调优化调度[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):232-241.
Citation: WANG Chenyu, TANG Zhong, WEI Minjie, et al. Coordinated and optimized scheduling of virtual power plants with wind power-waste incineration cogeneration considering uncertainty of source and load sides[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 232-241.

考虑源荷两侧不确定性的含风电-垃圾焚烧 热电联产虚拟电厂协调优化调度

王宸宇¹, 唐 忠¹, 魏敏捷¹, 刘向阳¹, 崔昊杨²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海电力大学电子与信息工程学院, 上海 200090)

摘 要:针对风电、负荷波动存在不确定性和冬季供暖期热电联产机组存在系统调峰能力不足的问题,将一定区域内风电场、电转气、垃圾焚烧电厂组成虚拟电厂。首先,为应对垃圾焚烧电厂能源利用效率低下,考虑采用其热电联产工作模式参与系统调峰,提高能源利用效率,并建立热电联产模式下垃圾焚烧电厂的数学模型;随后,引入风电场、P2G 及热电联产机组,建立风电-P2G-垃圾焚烧热电联产虚拟电厂模型;最后,针对系统中的源、荷不确定性,采用模糊机会约束建立考虑源荷两侧不确定性的含风电-垃圾焚烧热电联产虚拟电厂优化调度模型。为验证该模型的有效性,设置 2 种不同场景,采用 CPLEX 优化软件求解模型。仿真结果表明所提模型可有效促进风电消纳,提高垃圾焚烧电厂能源利用效率,降低虚拟电厂总成本。

关 键 词:风电消纳;垃圾焚烧电厂;虚拟电厂;模糊机会约束;优化调度;不确定性

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.024 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2024)06-0232-10

Coordinated and optimized scheduling of virtual power plants with wind power-waste incineration cogeneration considering uncertainty of source and load sides

WANG Chenyu¹, TANG Zhong¹, WEI Minjie¹, LIU Xiangyang¹, CUI Haoyang²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In response to the uncertainty of wind power and load fluctuations, as well as the insufficient system peak shaving capacity of cogeneration units during winter heating periods, a virtual power plant consisting of wind farms, power-to-gas (P2G) conversion plants, and waste incineration power plants within a certain area is formed. Firstly, to address the low energy utilization efficiency of waste incineration power plants, it is considered to adopt their cogeneration mode to participate in system peak shaving, improve energy utilization efficiency, and establish a mathematical model of waste incineration power plants under the cogeneration mode. Secondly, wind farms, P2G, and cogeneration units are introduced to establish a virtual power plant model with wind power, P2G, and waste incineration cogeneration. Finally, in response to the uncertainty of the source and load in the system, a fuzzy chance constraint is used to establish an optimized scheduling model for the virtual power plant with wind power-waste incineration cogeneration that considers the uncertainty of both the source and load sides. To verify the effectiveness of the model, two different scenarios are set up, and the model is solved by using CPLEX optimization software. The simulation results show that the proposed model can effectively promote wind power consumption, improve the energy utilization efficiency of waste incineration power plants, and reduce the total cost of virtual power plants.

Key words: wind power consumption; waste incineration power plant; virtual power plant; fuzzy chance constraint; optimized scheduling; uncertainty

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(52177185)

通信作者: 唐 忠(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事系统运行与控制、新能源开发利用与节能方面的研究; E-mail: tangzhong64@163.com

近年来,中国面临着严峻的能源消费压力和社会环境问题,中国城镇垃圾产量逐年上升,多省市已出现了“垃圾围城”现象^[1-2]。目前,垃圾的处理方式主要有3种:垃圾填埋、堆肥和焚烧^[3]。垃圾填埋占地面积大,其渗滤液会对土壤造成重金属污染。堆肥是将垃圾中的有机物分离后进行发酵,最终制成肥料,然而该方式产生的肥料质量不稳定,成本较高,难以缓解生活垃圾产量不断增加而造成的压力。在这种情况下,垃圾焚烧发电成为一种重要的解决方案,在提供电能和热能的同时,有效减少了垃圾的体积。

目前中国的纯发电垃圾焚烧电厂能源利用效率平均仅为0.51,而欧盟的垃圾焚烧电厂大部分采用热电联产工作模式,能源回收利用因子平均约为0.76^[4]。合理利用生活垃圾进行热电联产可以提高电厂的热效率,并同时获得较高的经济效益^[5]。这表明,垃圾焚烧电厂采用热电联产的工作模式将成为提高垃圾焚烧发电能源利用效率的重要发展方向。城市生活垃圾在焚烧过程中产生的气体中包含了多种污染物,需要经过合理的净化。在垃圾焚烧电厂中装设烟气处理系统可以有效降低烟气排放中的有害气体。烟气处理系统的能耗通常较大,为烟气处理装置配备储气罐,可以将电厂焚烧产生的烟气储存在储气罐内,烟气可作为调峰负荷在负荷低谷时进入反应塔参与电网调度^[6-7]。另一方面,电转气(power-to-gas, P2G)技术实现了能源转换及负荷时空平移^[8-9],与烟气处理协同运行有助于提高碳的利用率,减少辅助燃料的购买。同时,风电也可为P2G与烟气处理装置提供捕集能量,有效降低发电成本。

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)借助先进的通信技术,将不同区域独立运行且相互之间缺乏协调的各分布式能源聚合为一个整体,实现了不同区域之间分布式能源的协调优化,从而获得更好的经济效应^[10-11]。目前国内外众多学者已经对垃圾焚烧电厂参与虚拟电厂优化调度展开了相关研究,文献[12]将垃圾焚烧电厂、碳捕集电厂、风电场,电转气、燃气电厂等聚合为虚拟电厂,实现了削峰填谷作用并提高了新能源消纳量;文献[13]将风电场与垃圾焚烧电站及储气罐聚合为虚拟电厂参与市场交易,在保证收益最大化的前提下有效减少了系统弃风量;文献[14]针对多个VPP之间差异,考虑VPP间能量相互作用及风电、负荷不确定性,构建了VPP模型,该模型有效提高了经济效益并优化了负荷分布;文献[15]将各种分布式能源聚合为虚拟

电厂,应用信息间隙决策理论构建零碳排放模型,实现了电-碳-电循环效应。然而,目前对于垃圾焚烧电厂的研究,现有文献主要考虑纯电运行模式,发电效率较低,对于具有热电联产工作模式的垃圾焚烧虚拟电厂的研究相对较少,未能充分利用垃圾焚烧电厂的能源利用效率。

随着可再生能源行业的发展,风电产业规模不断扩大,风电具有波动性、随机性和反调峰特性等特点^[16-17]。在供暖期,热电联产(combined heat and power, CHP)机组“以热定电”的运行模式,大大降低了系统的调峰能力^[18],在与风电配合时,存在严重的弃风现象。目前,关于风电及负荷不确定性的研究已经得到越来越多的重视^[19-20]。随机优化^[21-22]、鲁棒优化^[23-24]、模糊优化^[25-26]常用于处理不确定性问题。随机优化求解问题时,由于场景基数大,增加了求解难度和求解时间。鲁棒优化处理不确定性模型时,要求决策在不确定变量最劣的情况下依然可行,然而最劣情况实际发生的概率极低,因此具有较大的保守性,经济性差。

综上所述,本文在现有研究的基础上,为了降低VPP系统运行成本,同时挖掘垃圾焚烧电厂与可再生能源的能源利用潜力,同时考虑风电、负荷不确定性产生的影响。考虑垃圾焚烧电厂采用热电联产工作模式参与调度,并建立了考虑源荷不确定性的含电转气与垃圾焚烧虚拟电厂优化调度模型。首先分析电转气、垃圾焚烧热电联产电厂运行特性,然后引入模糊参数表达风电出力及负荷的不确定性,最终进行仿真验证,验证所建模型的合理性和有效性。

1 风电-P2G-垃圾焚烧VPP的构建

1.1 P2G运行原理

P2G技术逐渐成熟,P2G运行过程中通过电解水将电能转化为化学能,再通过甲烷化反应转化为CH₄进行储存起来,如图1所示。

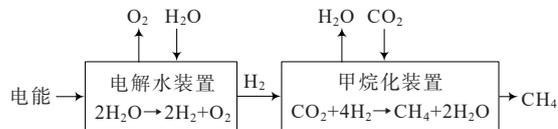


图1 P2G技术原理

Figure 1 Principle of P2G technology

P2G的运行能耗表达式如下:

$$P_t^{P2G} = \frac{H_g V_t^{P2G}}{3.6\eta^{P2G}} \quad (1)$$

式中, P_t^{P2G} 为 t 时段P2G设备能耗; H_g 为天然气热

值; η^{P2G} 为P2G设备转换效率; V_t^{P2G} 为 t 时段P2G生成的天然气体积。

1.2 垃圾焚烧热电联产电厂模型

1.2.1 垃圾焚烧电厂出力模型

垃圾焚烧热电联产电厂的燃料来自于城市的生活垃圾等废弃物,生活垃圾等废弃物经过焚烧炉燃烧,将生活垃圾的化学能转化为热能,再由发电机组产生电能,如图2所示。具有热电联产工作模式的垃圾焚烧电厂可同时为居民供电与供热。

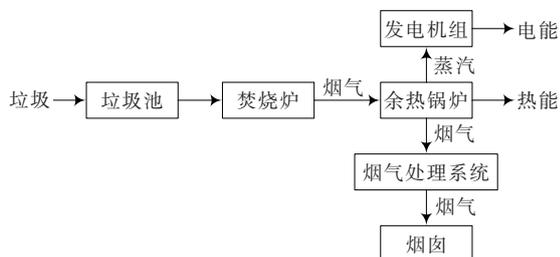


图2 垃圾焚烧电厂发电流程

Figure 2 Power generation process of waste incineration power plant

垃圾焚烧热电联产电厂的模型表达式如下:

$$P_t^{WI} = V_t^{WI} H^{WI} \eta_e^{WI} \quad (2)$$

$$H_t^{WI} = V_t^{WI} H^{WI} \eta_h^{WI} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, P_t^{WI} 、 H_t^{WI} 分别为 t 时刻垃圾焚烧热电联产电厂的电、热功率; V_t^{WI} 为 t 时刻垃圾焚烧热电联产电厂消耗的固体垃圾体积; H^{WI} 为固体垃圾的热值; η_e^{WI} 、 η_h^{WI} 分别为垃圾焚烧热电联产电厂的电、热效率。

1.2.2 烟气处理模型

在垃圾焚烧热电联产电厂焚烧垃圾产生热量的过程中,会产生大量的有毒有害气体,需要经过烟气处理装置处理后才可排放。垃圾焚烧电厂的烟气处理装置结构如图3所示。此外,通过控制储气装置中烟气进入反应塔的阶段将烟气处理装置视为可平移的负荷功率,其中烟气处理能耗^[27]为

$$P_t^{WIN} = \omega^a (V_t^1 + V_t^2) \quad (4)$$

式中, ω^a 为烟气处理系统的能耗系数,取0.513; P_t^{WIN} 为 t 时刻烟气处理装置的烟气处理能耗; V_t^1 、 V_t^2 分别为 t 时刻垃圾焚烧电厂提供给烟气处理装置的烟气量和储气罐提供给烟气处理装置的烟气。



图3 烟气处理装置

Figure 3 Flue gas treatment unit

1.3 风电-P2G-垃圾焚烧虚拟电厂联合运行模型

将风电场、P2G、垃圾焚烧电厂组成VPP联合运行。在夜间风电出力高发、电负荷低谷时段,将垃圾焚烧电厂烟气处理装置中储气装置内的烟气转入反应塔进行烟气处理过程,将分离出的二氧化碳利用P2G设备,转化为天然气。这相当于增加电负荷,同时提高了风电的消纳能力。其中,风电出力提供给垃圾焚烧电厂烟气处理装置、P2G装置及直接输送至电网;垃圾焚烧电厂的出力部分提供给烟气处理装置,部分提供给P2G,其余部分输送至电网。风电-P2G-垃圾焚烧VPP系统结构如图4。各部分公式分别如下:

$$P_t^W = P_t^{WIN,W} + P_t^{P2G,W} + P_t^{e,W} \quad (5)$$

$$P_t^{WI} = P_t^{WIN,WI} + P_t^{P2G,WI} + P_t^{e,WI} \quad (6)$$

式(5)、(6)中, P_t^W 为 t 时刻风电场出力; $P_t^{WIN,W}$ 、 $P_t^{P2G,W}$ 分别为 t 时刻风电场为烟气处理装置、P2G提供的电能; $P_t^{WIN,WI}$ 、 $P_t^{P2G,WI}$ 分别为 t 时刻垃圾焚烧热电联产电厂为烟气处理装置及P2G提供的电能; $P_t^{e,W}$ 、 $P_t^{e,WI}$ 为 t 时刻风电场和垃圾焚烧热电联产电厂净出力。

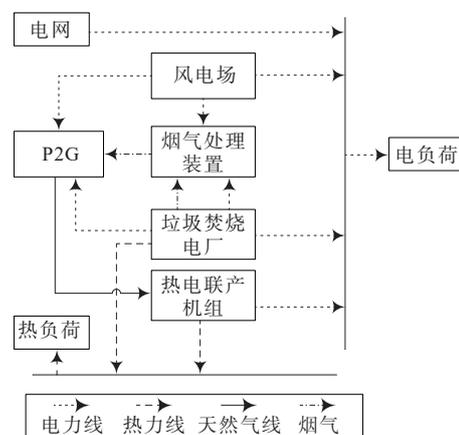


图4 VPP结构示意图

Figure 4 VPP structure

2 模糊优化调度模型

2.1 电力系统源荷不确定性分析

由于电力系统的运行环境存在多种不确定性因素,包括可再生能源的波动性、间歇性,以及负荷的需求的不确定性,都增加了系统运行的不确定性。风电预测准确性也受到多种因素影响,包括气象条件、风电厂定期维护,从而导致风电出力的不确定性。对于负荷而言,居民和商业用户的用电行为具有随机性,包括天气、电力市场电价机制、工业生产波动,这些因素都会影响电负荷需求。

由于风电、负荷的功率预测受外界因素影响,实际给出的预测值并非准确值,存在一定误差,具有明显的模糊性。对于大规模风电并网及负荷规模较大时,预测误差更为显著。采用传统的随机优化与鲁棒优化的方法,都需要较为全面的不确定性信息。而采用模糊机会约束,变量可以在信息不充分或无信息时借助专家系统得到不确定参数的隶属度函数,优化结果更符合实际。出于电力系统可靠性角度考虑,将模糊机会约束用于电力系统中,能够更好地进行电力系统调度,提高电力系统可靠性。

在中国北方冬季供暖期,热电联产机组与风电配合时,热电联产机组“以热定电”的工作模式导致弃风现象严重。需要引入风电模糊参数和负荷模糊参数。本文采用风电模糊参数和负荷模糊参数来代替风电及负荷出力,由于热负荷出力的预测相对稳定,故本文中热负荷出力采用确定性参数。

2.2 不确定性数学模型

对于风电及负荷预测的不确定性,含模糊参数的最优问题^[27]可表述为

$$\begin{cases} \min f(x, \xi) \\ \text{s.t. Cr}\{g_j(x, \xi) \leq 0\} \geq \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中, $f(x, \xi)$ 为目标函数; x 为决策变量; ξ 为参量向量; $g_j(x, \xi)$ 为约束函数; $\text{Cr}\{\cdot\}$ 为 $\{\cdot\}$ 事件中的可信性; α 为系统的置信度水平。

2.3 模糊参数的梯形隶属度函数

风电出力、电负荷的模糊参数可采用梯形隶属度函数:

$$\mu(P_F) = \begin{cases} \frac{P_{F4} - P_F}{P_{F4} - P_{F3}}, & P_{F3} \leq P_F \leq P_{F4} \\ 1, & P_{F2} \leq P_F \leq P_{F3} \\ \frac{P_F - P_{F1}}{P_{F2} - P_{F1}}, & P_{F1} \leq P_F \leq P_{F2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\mu(P_F)$ 为隶属度函数; P_{Fi} 为梯形隶属度参数, 计算公式为

$$P_{Fi} = \omega_i P_i^{\text{pre}} \quad (9)$$

式中, ω_i 为比例系数, 由风电、负荷历史数据确定; P_i^{pre} 为 t 时刻风电、负荷的预测值。

隶属度参数四元组如下:

$$(\tilde{P}_F = (P_{F1}, P_{F2}, P_{F3}, P_{F4}) = P^{\text{pre}}(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4) \quad (10)$$

2.4 模糊参数的清晰等价类求解

当约束函数 $g(x, \xi)$ 具有如下形式:

$$g(x, \xi) =$$

$$f_1(x)\xi_1 + f_2(x)\xi_2 + \dots + f_t(x)\xi_t + f_0(x) \quad (11)$$

式中, ξ_k 为梯形模糊参数, $\xi_k = (\omega_{k1}, \omega_{k2}, \omega_{k3}, \omega_{k4})$ 。其中, $k=1, 2, \dots, t, t \in \mathbb{Z}^+$, $\omega_{k1} \sim \omega_{k4}$ 为梯形隶属度参数。

则可定义下面 2 个函数。

$$f_k^+(x) = \begin{cases} f_k(x), & f_k(x) \geq 0 \\ 0, & f_k(x) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$f_k^-(x) = \begin{cases} 0, & f_k(x) \geq 0 \\ -f_k(x), & f_k(x) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $k=1, 2, \dots, t$ 。当 $f_k(x)=1$, 则 $f_k^+(x)=1, f_k^-(x)=0$; 当 $f_k(x)=-1, f_k^+(x)=0, f_k^-(x)=1$ 。

当置信水平 $\alpha \geq 0.5$ 时, 模糊机会约束的清晰等价类为

$$\begin{aligned} & (2 - 2\alpha) \sum_{k=1}^t [\omega_{k3} f_k^+(x) - \omega_{k2} f_k^-(x)] + \\ & (2\alpha - 1) \sum_{k=1}^t [\omega_{k4} f_k^+(x) - \omega_{k1} f_k^-(x)] + h_0(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

转换为清晰等价类后, 模糊问题在求解上与确定性问题相似, 可采用混合整数规划求解方法进行求解计算。

3 考虑源荷不确定性的 VPP 优化调度模型

3.1 目标函数

本文以风电-垃圾焚烧热电联产虚拟电厂的总运行成本最小为优化目标, 总成本包括风电成本 C_w , 热电联产成本 C_{CHP} , 烟气处理与电转气协同运行成本 C_{w-p} , 垃圾焚烧碳排放成本 C_{w1} , 主网购电成本 C_b , 弃风惩罚成本 C_{AW} , 总运行成本的目标函数如下:

$$C = \min(C_w + C_{\text{CHP}} + C_{w-p} + C_{w1} + C_b + C_{\text{AW}}) \quad (15)$$

1) 风电成本。

风能作为可再生能源, 在发电过程中不需要消耗燃料, 但是风电运行中存在运行维护成本, 表达式为

$$C_w = \sum_t^T k_w P_t^w \quad (16)$$

式中, k_w 风电运行维护成本系数。

2) 热电联产成本。

CHP 机组成本主要为燃料成本^[12], 表达式为

$$C_{\text{CHP}} = \sum_t^T k_{\text{CH}_i} V_t^{\text{BUY}} \quad (17)$$

$$V_t^{\text{BUY}} = V_t^{\text{CHP}} - V_t^{\text{P2G}} \quad (18)$$

式(17)、(18)中, k_{CH_i} 为天然气购气价格; V_t^{BUY} 为 t 时刻天然气购买量。

3) 烟气处理与电转气协同运行成本。

烟气处理与 P2G 协同运行成本表达式为

$$C_{\text{W-P}} = \sum_t^T (k_c P_t^{\text{WI}} + k_{\text{P2G}} P_t^{\text{P2G}}) \quad (19)$$

式中, k_c 为烟气处理运行成本系数, 为 19.8 元/t; k_{P2G} 为 P2G 运行成本系数, 为 20 元 · (MW · h)⁻¹。

4) 垃圾焚烧碳排放成本。

垃圾焚烧电厂运行时需承担碳排放惩罚费用, 成本运行函数表达式为

$$C_{\text{WI}} = \sum_t^T P_t^{\text{WI}} k_c (e^a - \gamma^c) \quad (20)$$

式中, e^a 、 γ^c 分别为垃圾焚烧热电联产电厂单位烟气排放强度与单位电量碳排放基准额度。其中, e^a 取 0.96, γ^c 取 0.76。

5) 主网购电成本。

当电力供应不足时, 为了满足电负荷需求, VPP 选择从电网购电。购电的成本表达式为

$$C_b = \sum_t^T k_t^b P_t^b \quad (21)$$

式中, k_t^b 为 t 时刻电网购电价; P_t^b 为 t 时刻电网购电量。

6) 弃风惩罚成本。

$$C_{\text{AW}} = \sum_t^T k_{\text{AW}} (P_t^{\text{w,pre}} - P_t^{\text{w}}) \quad (22)$$

式中, k_{AW} 为弃风惩罚系数; $P_t^{\text{w,pre}}$ 为 t 时刻风电预测值。

3.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束。

$$P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{P2G}} + P_t^{\text{WIN}} - P_t^{\text{w}} - P_t^{\text{WI}} - P_t^{\text{CHP}} - P_t^b = 0 \quad (23)$$

$$H_t^{\text{WI}} + H_t^{\text{CHP}} = H_t^{\text{load}} \quad (24)$$

式中, P_t^{load} 、 H_t^{load} 分别为系统的电负荷和热负荷; P_t^{CHP} 、 H_t^{CHP} 分别为 CHP 机组的电出力和热出力。

2) 风电出力约束。

$$0 \leq P_t^{\text{w}} \leq P_t^{\text{w,pre}} \quad (25)$$

3) 电转气运行约束。

$$0 \leq P_t^{\text{P2G}} \leq P_{\text{max}}^{\text{P2G}} \quad (26)$$

$$P_{\text{down}}^{\text{P2G}} \leq P_t^{\text{P2G}} - P_{t-1}^{\text{P2G}} \leq P_{\text{up}}^{\text{P2G}} \quad (27)$$

式(26)、(27)中, $P_{\text{max}}^{\text{P2G}}$ 为电转气设备最大运行功率; $P_{\text{down}}^{\text{P2G}}$ 、 $P_{\text{up}}^{\text{P2G}}$ 为电转气最大向上、向下爬坡功率。

4) 垃圾焚烧热电联产电厂的日总出力约束。

$$W_{\text{WI}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{WI}} \leq W_{\text{max}}^{\text{WI}} \quad (28)$$

$$P_{\text{min}}^{\text{WI}} \leq P_t^{\text{WI}} \leq P_{\text{max}}^{\text{WI}} \quad (29)$$

$$P_{\text{down}}^{\text{WI}} \leq (P_{t+1}^{\text{WI}} - P_t^{\text{WI}}) \leq P_{\text{up}}^{\text{WI}} \quad (30)$$

$$H_{\text{min}}^{\text{WI}} \leq H_t^{\text{WI}} \leq H_{\text{max}}^{\text{WI}} \quad (31)$$

$$H_{\text{down}}^{\text{WI}} \leq (H_{t+1}^{\text{WI}} - H_t^{\text{WI}}) \leq H_{\text{up}}^{\text{WI}} \quad (32)$$

$$0 \leq \lambda_t^{\text{WI}} \leq 1 \quad (33)$$

$$0 \leq V_t^{\text{WIN}} \leq 400 \quad (34)$$

$$0 \leq V_t^2 \leq V_L^{\text{WIN,max}} \quad (35)$$

$$0 \leq V_t^3 \leq V_L^{\text{WIN,max}} \quad (36)$$

式(28)~(36)中, W_{WI} 为垃圾焚烧热电联产电厂日总出力; $P_{\text{max}}^{\text{WI}}$ 、 $P_{\text{min}}^{\text{WI}}$ 分别为垃圾焚烧热电联产电厂的最大、最小电出力; $P_{\text{up}}^{\text{WI}}$ 、 $P_{\text{down}}^{\text{WI}}$ 分别为垃圾焚烧热电联产电厂的最大向上、向下爬坡功率; $H_{\text{max}}^{\text{WI}}$ 、 $H_{\text{min}}^{\text{WI}}$ 分别为垃圾焚烧热电联产电厂的最大、最小热出力; $H_{\text{up}}^{\text{WI}}$ 、 $H_{\text{down}}^{\text{WI}}$ 分别为垃圾焚烧热电联产电厂的最大向上、向下爬坡功率; λ_t^{WI} 为垃圾焚烧热电联产电厂中 t 时刻的烟气分流比; V_t^{WIN} 为 t 时刻储气装置内烟气体积; $V_L^{\text{WIN,max}}$ 为储气装置进出管道的最大管流量; V_t^3 为 t 时刻流入储气装置的烟气流。

5) 热电联产机组电热出力及爬坡约束

$$P_{\text{min}}^{\text{CHP}} \leq P_t^{\text{CHP}} \leq P_{\text{max}}^{\text{CHP}} \quad (37)$$

$$H_{\text{min}}^{\text{CHP}} \leq H_t^{\text{CHP}} \leq H_{\text{max}}^{\text{CHP}} \quad (38)$$

$$|P_{t+1}^{\text{PH}} - P_t^{\text{PH}}| \leq \Delta P^{\text{PH}} \quad (39)$$

式(37)~(39)中, $P_{\text{max}}^{\text{CHP}}$ 、 $P_{\text{min}}^{\text{CHP}}$ 分别为 CHP 机组电出力上、下限; $H_{\text{max}}^{\text{CHP}}$ 、 $H_{\text{min}}^{\text{CHP}}$ 为热出力上、下限; ΔP^{PH} 为 CHP 机组出力爬坡速率约束。

3.3 系统可信度模糊机会约束

功率平衡可信性机会约束为

$$\text{Cr} \{ \tilde{P}_t^{\text{load}} + P_t^{\text{P2G}} + P_t^{\text{WIN}} - \tilde{P}_t^{\text{w}} - P_t^{\text{WI}} - P_t^{\text{CHP}} - P_t^b = 0 \} \geq \alpha \quad (40)$$

式中, $\tilde{P}_t^{\text{load}}$ 为 t 时刻系统负荷模糊参数; \tilde{P}_t^{w} 为 t 时刻风电出力模糊参数。

将功率平衡约束转化为清晰等价类:

$$(2 - 2\alpha_k) [P_{L,t,3} - P_{W,t,2}] + (2\alpha_k - 1) [P_{L,t,4} - P_{W,t,1}] = P_t^{\text{WI}} + P_t^{\text{CHP}} + P_t^b - P_t^{\text{P2G}} - P_t^{\text{WIN}} \quad (41)$$

式中, $P_{W,i1}$ 、 $P_{W,i2}$ 为风电的隶属度参数; $P_{L,i3}$ 、 $P_{L,i4}$ 为负荷的隶属度参数。

4 算例分析

4.1 算例仿真情景设定

为验证本文模型,本文采用的算例参数:风电厂装机容量为 240 MW,风电预测值、电负荷、热负荷出力曲线如图 5、6 所示,电力市场购电电价曲线如图 7 所示,垃圾焚烧电厂参数如表 1 所示,梯形隶属度参数如表 2 所示,风电出力幅度与负荷相比,变化较大,预测难度更大,故风电隶属度参数左右扩展幅度要比负荷大。机组出力情况如图 8 所示。不同场景下储气装置内气体变化如图 9 所示。不同场景下 P2G-烟气处理能耗如图 10 所示。不同场景下系统弃风情况如图 11 所示。主网购电量如图 12 所示。

表 1 垃圾焚烧热电联产电厂参数

Table 1 Parameters of waste incineration cogeneration power plant

$W_{wi}/$ MW	$P_{min}^{WI}/$ (MW· h ⁻¹)	$P_{up}^{WI}/$ (MW· h ⁻¹)	$P_{down}^{WI}/$ (MW· h ⁻¹)	e^a	η_h^{WI}	纯发电工 作模式下 电厂效率	η_e^{WI}	储气 罐容 量/m ³
1 500	60	50	50	0.96	0.65	0.4	0.25	400

表 2 梯形模糊隶属度参数

Table 2 Trapezoidal fuzzy membership parameters

对象	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
风电	0.6	0.90	1.10	1.4
电负荷	0.9	0.95	1.05	1.1

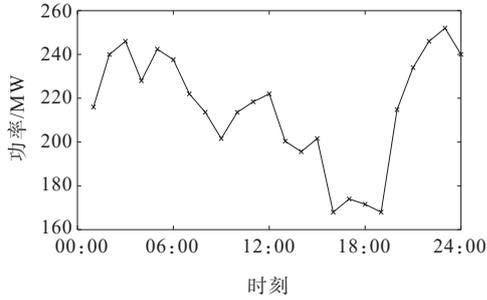


图 5 风电预测值

Figure 5 Predicted value of wind power

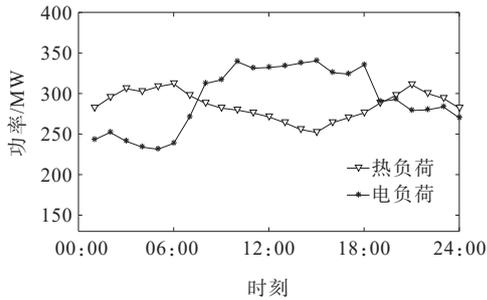


图 6 电负荷、热负荷预测值

Figure 6 Predicted values of electrical and heat loads

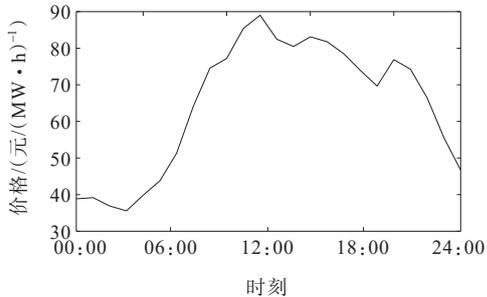


图 7 电力市场购电电价

Figure 7 Electricity prices in electricity market

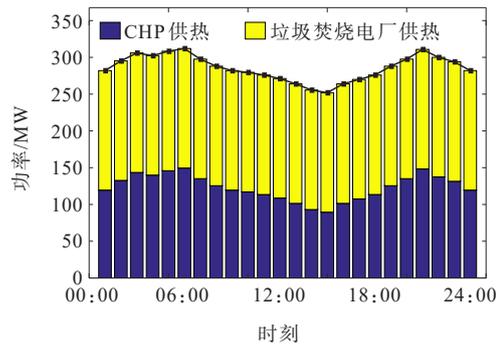


图 8 机组出力

Figure 8 Unit output

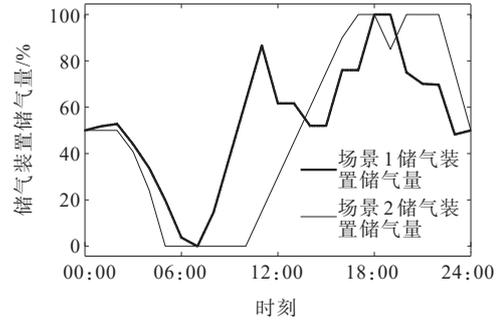


图 9 不同场景下储气装置内气体变化

Figure 9 Gas changes in gas storage device in different scenarios

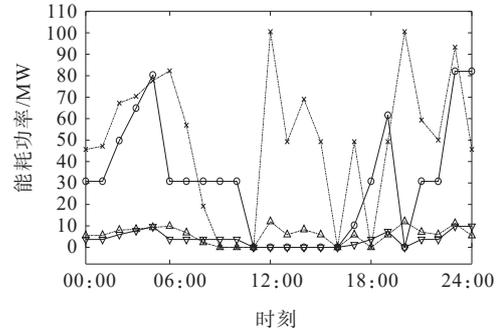


图 10 不同场景下 P2G-烟气处理能耗

Figure 10 Energy consumption of P2G-flue gas treatment in different scenarios

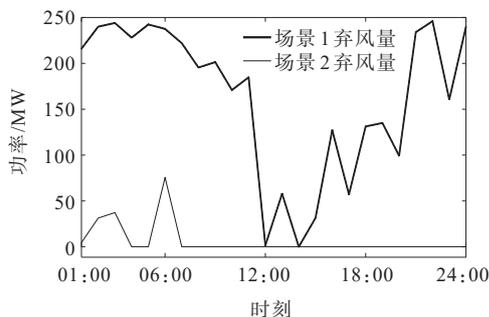


图 11 不同场景下系统弃风情况

Figure 11 System curtailment in different scenarios

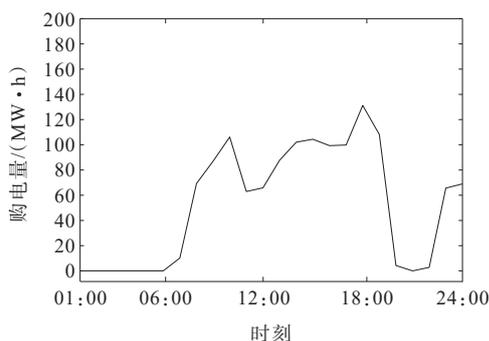


图 12 主网购电量

Figure 12 Power purchased on main network

4.2 不同运行场景分析

考虑到在实际应用中确定性调度模型无法灵活应对电网的中风电及负荷出力的波动性,与实际电网调度情况不符,故本文仅考虑不确定情况下的

调度。本文选取以下 2 种运行场景并进行分析对比,设定 2 种场景下模糊机会约束模型中置信水平 $\alpha=0.95$ 。不同场景下的成本与调度对比结果如表 3、4 所示。

场景 1 垃圾焚烧电厂不采用热电联产模式,采用纯发电运行模式,热负荷仅考虑热电联产机组提供。

场景 2 垃圾焚烧以热电联产模式运行,热负荷由热电联产机组和垃圾焚烧电厂一起承担。

由图 5、6 可知,在时段 08:00—18:00 为电负荷的高峰期,热负荷处于低谷期;在时段 00:00—07:00、21:00—24:00 为电负荷的低谷期,热负荷处于高峰期。在场景 1 下,此时系统内的热负荷全部由 CHP 机组提供,由于 CHP 机组热出力提高的同时,电出力增加,风电的上网功率随之减少。由图 8 可知,在场景 2 下,电厂在发出热能的同时,也可产出电出力,此时的热负荷由垃圾焚烧电厂和 CHP 机组提供,CHP 机组的热出力下降,进而有效降低了 CHP 的电出力,提高风电的上网功率。

由表 3、4 中数据可知,垃圾焚烧电厂纯电工作运行时,电转气,烟气处理装置能耗,购气成本较高,且系统弃风率达到 75.54%。在垃圾焚烧采用热电联产的工作模式下,弃风率降低了 72.67%,总成本相比纯电工作模式降低了 3.32 万元,购气成本降低了 57.2%。

表 3 不同场景下成本对比结果

Table 3 Cost comparison results in different scenarios

场景	总成本/ 万元	风场维护 成本/万元	购气成本/ 万元	烟气处理与电转气协同 运行成本/万元	碳排放惩罚 成本/万元	弃风惩罚 成本/万元	主网购电 成本/万元
1	33.66	2.70	18.08	2.64	0.46	9.75	0
2	30.34	10.74	7.73	1.65	0.29	0.37	9.55

表 4 不同场景下调度对比结果

Table 4 Scheduling comparison results in different scenarios

场景	垃圾焚烧热电联产电厂		CHP 机组上	风电机组		弃风 率/%
	上网功率/MW	P2G-烟气处理能耗/MW	网功率/MW	上网功率/MW	P2G-烟气处理能耗/MW	
1	1 445.0	955.0	5 997.6	827.3	436.3	75.54
2	1 451.8	48.1	2 585.1	4 239.4	779.1	2.87

另一方面,在考虑了源荷不确定情况下,为了系统的安全性考虑,系统考虑从电网购电,购电成本提高了 9.55 万元。由图 11 可知,在纯电工作模式下,日内 24 时刻除 12:00 与 14:00 外都存在严重的弃风现象。结合图 9、10 可知,此时存在较大的烟气处理能耗,消纳了部分风电,因此在 12:00、14:00 恰好无弃风,故场景 1 的系统主网购电量为 0。如表 3、

图 12 所示,虽然在垃圾焚烧热电联产工作模式下,相比纯电发电工作模式电网购电量更高,但是热电联产机组的燃气消耗量减少,购气成本大幅降低,总成本也比纯电发电模式下更低。同时,主网购电也提高了系统的可靠性,能够有效应对风电和负荷波动对电网造成的影响,提高了系统经济性和可靠性。

综上,垃圾焚烧电厂在热电联产工作模式下可以有效提高能源的利用效率,大幅提高风电的消纳量。与纯发电工作模式下的垃圾焚烧电厂相比,垃圾焚烧电厂热电联产模式下电效率略有降低,但兼具了电出力与热出力,减少了热电联产机组的出力,有效减少了购气成本。

4.3 不同置信度下结果对比

表 5 为以场景 2 为例,可置信水平从 0.65 开始逐渐升至 0.95 时的成本和购电量对比。不同置信水平下的成本和购电量如图 13、14 所示。

表 5 不同置信度下结果对比

Table 5 Comparison of results at different confidence levels

置信度	总成本/ 万元	购电成本/ 万元	购电量/ (MW·h)	弃风率/ %
0.65	25.27	4.31	552.7	12.05
0.70	25.94	5.02	642.7	10.03
0.75	26.66	5.58	740.2	8.04
0.80	27.56	6.70	872.7	6.82
0.85	28.48	7.64	1 005.5	5.51
0.90	29.41	8.60	1 140.7	4.14
0.95	30.34	9.56	1 275.7	2.87

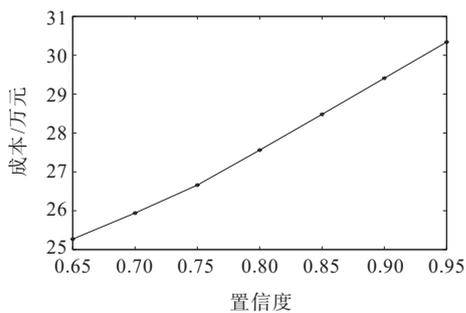


图 13 不同置信水平下的成本

Figure 13 Cost at different confidence levels

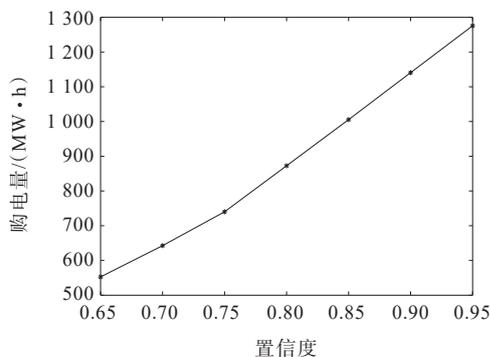


图 14 不同置信水平下的购电量

Figure 14 Electricity purchased at different confidence levels

由图 13、14 和表 5 可见,随着 α 增加,弃风率降低,系统购电量与总成本、购电成本都有所提高。置信水平的提高,系统的可靠性越高,因此对于系统所需投入的成本也越高,系统需要从主网购入更多的电量来保障系统可以稳定运行;置信水平越低,表示系统更加信任风电和负荷的预测值,主网购电量更低,系统风险更高,难以满足系统运行可靠性要求。

5 结语

本文将风电、垃圾焚烧电厂、CHP 机组聚合为虚拟电厂,将风电与负荷的不确定性用模糊参数代替,构建了考虑源荷不确定性的风电-垃圾焚烧热电联产虚拟电厂优化调度模型,通过算例仿真验证,得出如下结论。

1) 与传统纯电工作模式的垃圾焚烧电厂相比,垃圾焚烧电厂热电联产工作模式下,能够兼顾电出力与热出力,提高了生活垃圾能源利用率。

2) 考虑到热电联产机组与风电配合时,存在机组调峰能力不足问题。在源荷不确定场景下,考虑具有热电联产工作模式的垃圾焚烧电厂参与调度,可以有效降低系统总成本,减少热电联产机组天然气消耗量,降低系统弃风,提高新能源消纳量。

3) 模糊优化调度模型能够有效提高系统的运行可靠性,增强系统的抗干扰能力。置信水平与电网购电量和成本相关。随着置信水平的增大,系统购电量增加,总成本随之增加,弃风率降低,供电可靠性高。根据实际选择适当的置信水平,可以保障系统可靠性的同时,有效管理成本。

参考文献:

[1] 王临清,李泉鸣,朱法华.中国城市生活垃圾处理现状及发展建议[J].环境污染与防治,2015,37(2):106-109.
WANG Linqing, LI Xiaoming, ZHU Fahua. Current situation of municipal solid wastes disposal and development proposals in China[J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(2): 106-109.

[2] 龙吉生,杜海亮,邹昕,等.关于城市生活垃圾处理碳减排的系统研究[J].中国科学院院刊,2022,37(8):1143-1153.
LONG Jisheng, DU Hailiang, ZOU Xin, et al. Systematic study on carbon emission reduction of municipal solid waste treatment[J]. Bulletin of Chinese Academy of

- Sciences,2022,37(8):1143-1153.
- [3] 杨征.城市垃圾焚烧发电发展现状与展望[J].中国资源综合利用,2016,34(12):33-35.
YANG Zheng. Current situation and prospects for municipal waste-to-energy power generation technology [J].China Resources Comprehensive Utilization,2016,34 (12):33-35.
- [4] 龙吉生,阮涛.生活垃圾焚烧发电厂热电联产碳减排效益分析[J].环境卫生工程,2023,31(4):46-51.
LONG Jisheng,RUAN Tao.Analysis on carbon emission reduction benefits of cogeneration in waste to energy plant[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2023, 31 (4):46-51.
- [5] 周鑫,程松,任景,等.含储热型热电联产机组的电力系统源荷联合优化调峰方法[J].电力科学与技术学报, 2023,38(5):12-21.
ZHOU Xin,CHENG Song,REN Jing,et al.A source-load joint optimization peak regulation method of power system with heat storage combined heat and power units [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023,38(5):12-21
- [6] 张宇飞,赵娜娜,黄杰,等.垃圾焚烧电厂热电联产的经济性分析[J].能源研究与信息,2020,36(4):216-221.
ZHANG Yufei,ZHAO Nana,HUANG Jie,et al.Economic analysis of combined heat and power in a waste incineration power plant[J]. Energy Research and Information,2020,36(4):216-221.
- [7] 黄婧杰,刘镭志,殷旭锋,等.碳循环利用的垃圾焚烧电厂—烟气处理-P2G协调优化运行[J].中国电力,2022, 55(3):152-158.
HUANG Jingjie, LIU Louzhi, YIN Xufeng, et al. Coordinated and optimized operation of waste incineration plant-flue gas treatment-P2G with carbon cycle[J].Electric Power,2022,55(3):152-158.
- [8] 李欣,刘立,黄婧琪,等.含耦合P2G和CCS的园区级综合能源系统优化调度[J].电力系统及其自动化学报, 2023,35(4):18-25.
LI Xin,LIU Li,HUANG Jingqi,et al.Optimal scheduling of park-level integrated energy system with coupling of P2G and CCS[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2023,35 (4):18-25.
- [9] 赵峰,张帆,陈小强,等.基于VMD-APSO的风电场混合储能系统容量优化配置[J].高压电器,2023,59(6):120-127.
ZHAO Feng, ZHANG Fan, CHEN Xiaoqiang, et al. Optimal configuration of capacity of wind farm hybrid energy storage system based on VMD-APSO algorithm [J].High Voltage Apparatus,2023,59(6):120-127.
- [10] 田立亭,程林,郭剑波,等.虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述[J].电网技术,2020,44(6):2097-2108.
TIAN Liting,CHENG Lin,GUO Jianbo,et al.A review on the study of management and interaction mechanism for distributed energy in virtual power plants[J]. Power System Technology,2020,44(6):2097-2108.
- [11] 李嘉媚,艾芊.考虑调峰辅助服务的虚拟电厂运营模式[J].电力自动化设备,2021,41(6):1-13.
LI Jiamei, AI Qian. Operation mode of virtual power plant considering peak regulation auxiliary service[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(6):1-13.
- [12] 黄勤坤,邱瑜,王飞,等.考虑多重不确定性的虚拟电厂随机优化调度[J].电网与清洁能源,2022,38(11):8-16+26.
HUANG Qinkun, QIU Yu, WANG Fei, et al. Stochastic optimal scheduling of virtual power plants considering multiple uncertainties[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(11):8-16+26.
- [13] 朱显辉,于越,师楠,等.BP神经网络的分层优化研究及其在风电功率预测中的应用[J].高压电器,2022,58(2): 158-163+170.
ZHU Xianhui, YU Yue, SHI Nan, et al. Research on hierarchical optimization of BP neural network and its application in wind power prediction[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(2):158-163+170.
- [14] CAO J Y, ZHENG Y Y, HAN X R, et al. Two-stage optimization of a virtual power plant incorporating with demand response and energy complementation[J]. Energy Reports,2022,8:7374-7385.
- [15] JU L W, YIN Z, ZHOU Q Q, et al. Nearly-zero carbon optimal operation model and benefit allocation strategy for a novel virtual power plant using carbon capture, power-to-gas, and waste incineration power in rural areas [J].Applied Energy,2022,310:118618.
- [16] 赵书强,吴杨,李志伟,等.考虑风光出力不确定性的电力系统调峰能力及经济性分析[J].电网技术,2022,46 (5):1752-1761.
ZHAO Shuqiang, WU Yang, LI Zhiwei, et al. Analysis of power system peaking capacity and economy considering uncertainty of wind and solar output[J]. Power System Technology,2022,46(5):1752-1761.
- [17] CAO L H, WANG Z Z, PAN T Y, et al. Analysis on wind power accommodation ability and coal consumption of heat - power decoupling technologies for CHP units[J]. Energy,2021,231:120833.
- [18] 袁桂丽,刘骅骥,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):4440-4449.
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):4440-4449.
- [19] 吕佳炜,张沈习,程浩忠,等.考虑互联互动的区域综合能源系统规划研究综述[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4001-4021.
LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(12):4001-4021.
- [20] XU Z, SONG P F, YIN C Y, et al. Capacity allocation strategy using virtual synchronous compensator for renewable energy stations based on fuzzy chance constraints[J].Energies,2022,15(24):9306.
- [21] 苗友忠,李顺昕,雷为民,等.考虑用户负荷类型的含分布式电源的配电网可靠性评估[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):93-99.
MIAO Youzhong, LI Shunxin, LEI Weimin, et al. Reliability evaluation of distribution network with distributed generation considering customer sectors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020, 35(2):93-99.
- [22] 徐明忻,石勇,邢敬舒,等.基于多典型场景采样的微网可靠性计算方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):41-49.
XU Mingxin, SHI Yong, XING Jingshu, et al. Reliability calculation method of microgrid based on multi typical scene sampling[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37 (3):41-49.
- [23] 赵晶晶,朱炯达,李振坤,等.考虑灵活性供需鲁棒平衡的两阶段配电网日内分布式优化调度[J].电力系统自动化,2022,46(16):61-71.
ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LI Zhenkun, et al. Two-stage intraday distributed optimal dispatch for distribution network considering robust balance between flexibility supply and demand[J].Automation of Electric Power Systems,2022,46(16):61-71.
- [24] 林毓军,苗世洪,杨炜晨,等.面向多重不确定性环境的虚拟电厂日前优化调度策略[J].电力自动化设备,2021,41(12):143-150.
LIN Yujun, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of virtual power plant for environment with multiple uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(12):143-150.
- [25] 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
- [26] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等.考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J].电力自动化设备,2020,40(11):85-93.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 85-93.
- [27] 周任军,陈溢,阳卫伟,等.含烟气储存装置的风电-垃圾焚烧虚拟电厂双阶段优化调度[J].中国电力,2019,52(2):78-84.
ZHOU Renjun, CHEN Yi, YANG Weiwei, et al. Two-stage optimal dispatching of wind power-waste incineration virtual power plant with flue gas storage device[J]. Electric Power,2019,52(2):78-84.