

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220719

利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统容量优化配置

张文伟¹, 王维庆¹, 樊小朝², 史瑞静², 程志江¹

(1. 可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 新疆工程学院新能源科学与工程系, 新疆 乌鲁木齐 830023)

摘要: 为提高风电消纳能力, 降低燃煤电厂碳排放水平, 提出了一种利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统容量优化配置方法。首先, 考虑到源荷两侧的不确定性及相关性, 采用基于改进轮廓系数的有序聚类算法与含 $D_{CH(+)}$ 评价指标的 K-means 聚类算法的典型场景生成法获得源荷典型场景。在此基础上, 以系统总成本最小为目标, 构建了基于源荷典型场景的利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统容量优化配置模型。最后, 以西北某地区全年源荷数据为例进行了仿真验证。结果表明该典型场景生成法能使系统容量配置结果合理化, 引入富氧燃烧技术的同时考虑售卖多余液氧可有效降低系统总成本及碳排放量, 提高风电消纳能力。

关键词: 风电消纳; 场景生成; 优化配置; 富氧燃烧

Optimal capacity configuration of a low carbon energy system of oxygen-enriched coal-fired power plant using wind power to produce oxygen

ZHANG Wenwei¹, WANG Weiqing¹, FAN Xiaochao², SHI Ruijing², CHENG Zhijiang¹

(1. Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Connection (Xinjiang University), Urumqi 830047, China; 2. Department of New Energy Science and Engineering,

Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

Abstract: To improve the capacity of wind power consumption and reduce the carbon emission level of coal-fired power plant, an optimal capacity configuration method of a low-carbon energy system of oxygen-enriched coal-fired power plant using wind power to produce oxygen is proposed. First, considering the uncertainty and correlation of both sides of the power supply and load, a typical scenario generation method of ordered clustering algorithm based on the improved contour coefficient and the K-means clustering algorithm with $D_{CH(+)}$ evaluation index is adopted to obtain the typical scenario of power supply and load. Then, to minimize the total cost of the system, an optimal capacity configuration model of the system is constructed based on typical scenarios of power supply and load. Finally, taking the annual power supply and load data of a region in northwest China as an example, a simulation is carried out. The results show that the typical scenario generation method can rationalize the system capacity configuration results, and the introduction of oxygen-enriched combustion technology and considering the sale of excess liquid oxygen can effectively reduce the total system cost and carbon dioxide emissions, and improve the wind power consumption capacity.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52067020).

Key words: wind power consumption; scenario generation; optimal configuration; oxygen-enriched combustion

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 如何有效控制和减少电力行业的碳排放成为了亟需解决的关键问题^[1]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52067020); 新疆维吾尔自治区教育厅重点项目资助(XJEDU20191009)

目前, 减碳途径主要有两条: 1) 高比例消纳新能源^[2]; 2) 大力发展碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)技术^[3]。因此, 如何在消纳新能源的同时利用 CCS 技术促进碳减排已成为国内外学者的研究热点。

当前, 实现高比例消纳风电的主要研究方法是将风电与氢储能相结合。文献[4]构建了含风电供

能、电制氢、燃料电池辅助发电与超级电容储能的风氢耦合发电系统,通过能量管理策略降低了弃风率。文献[5]提出了一种考虑风光消纳能力和氢能燃料汽车的综合能源系统,以系统年投资成本、运行成本最小和风光利用率最大为目标,提高了系统经济性和风光消纳能力。文献[6]提出了一种基于数据驱动的两阶段多准则决策框架,使得独立风电/光伏/氢气系统的最优容量配置更加合理,提升了系统经济性和供电可靠性。

碳捕集与封存技术是目前最有望实现低碳排放的技术之一^[7]。文献[8]将 P2G(power to gas)与碳捕集结合,提出了一种含氢储能的电力与天然气双向转换的系统结构,其中 CO₂ 来源于空气,耗能巨大且投资成本高。文献[9]在综合能源系统(integrated energy system, IES)中,将 P2G 设备与碳捕集电厂结合,使 P2G 设施中的 CO₂ 原料气来自碳捕集电厂,优化了碳源,提高了系统经济性,消纳了更多新能源。文献[10]通过引入 P2G 技术,有效利用了碳捕集电厂产生的 CO₂,同时加入碳交易成本,提升了系统经济性,实现了系统低碳化。上述研究中,均为空气燃烧方式下的碳捕集,存在投资成本高、碳捕集能耗高和捕集效率低等问题。而近年来 CCS 技术中富氧燃烧技术的迅速发展,使得上述问题有所改善。文献[11]将富氧燃烧技术应用于天然气联合循环发电中,研究了不同富氧比下天然气联合循环发电系统的发电量,得到了最佳富氧比,提升了系统发电效率。文献[12]在综合能源系统中考虑富氧燃烧,虽提高了捕集效率、降低了捕集成本,但增加的空分制氧系统(air separation unit, ASU)成本仍较高。文献[13]基于 P2G 与碳捕集技术建立了一种含氧气网、燃气网与 CO₂ 网的气体循环利用系统,但成本依旧较高。故本文在上述研究基础上,提出一种利用风电制氧加储氧罐配合 ASU 的供氧方式,为燃煤电厂富氧燃烧提供条件,构建利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统(low carbon energy system of oxygen-enriched coal-fired power plant using wind power to produce oxygen, LCES-OCPP-WPPO),以电能、氢能、氧能为主要能量流,结合富氧燃烧捕集技术,实现系统低碳排放及能量的综合利用。

为保证系统供能可靠性的同时实现效益最大化,需对其容量进行合理配置。在容量优化配置方面,文献[14]通过合理选取典型日负荷与风电出力曲线,并考虑多种参数对储能容量配置的影响,最终得出系统最佳储能容量。文献[15]提出了一种含两个阶段的随机优化法,其中第一阶段采用遗传算法对各设备容量进行配置优化,第二阶段利用蒙特

卡洛法模拟生成光伏及负荷的随机场景,结合第一阶段求出的容量得到该场景下系统的最小成本期望。文献[16]在燃气电厂中增设了储气设备,建立了燃气电厂储气设备的多时段优化配置与调度模型,得到了经济性最优的储气容量及日前储气计划,提高了发电可靠性。文献[17]有效利用了电解槽与燃料电池产生的热,建立了含热平衡约束的氢储能系统模型,同时考虑了风电功率波动造成的热平衡不确定性,以系统投资成本最小为目标进行氢储能容量配置。文献[18]提出一种计及多微网电能交互的两层优化配置方法,通过引入 Frank-Copula 函数及同步回代削减法生成典型场景,在该场景下进行多微网系统协同优化配置,结果表明该配置方法能有效降低系统总成本。上述文献虽考虑了氢储能,但并没有考虑氧气的存储及利用,同时在实际情况中风电和负荷存在较强的不确定性及相关性,为此,在利用氧气的同时合理配置各子系统容量,需充分考虑源荷不确定性及相关性对容量配置的影响。

针对上述问题,本文采用基于改进轮廓系数的有序聚类算法与含 $D_{CH(+)}$ 评价指标的 K-means 聚类算法的典型场景生成法获得源荷典型场景,建立以包含投资、维护、运行、弃风惩罚成本和售二氧化碳收益、氢气替代及售液氧收益的总成本最小为目标的系统容量优化配置模型,通过求解得出最佳容量配置方案,并与不同燃烧方式及碳捕集技术下含风电制氧的燃煤电厂进行对比,通过算例仿真验证富氧燃烧捕集技术对 LCES-OCPP-WPPO 效益提升的有效性。

1 利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统

1.1 系统结构

本文构建的 LCES-OCPP-WPPO 包含风电系统、氢能系统、空分制氧系统(ASU)、富氧燃煤电厂和碳捕集系统。其中,风电系统与富氧燃煤电厂为 LCES-OCPP-WPPO 的两大核心供能部分,二者共同为电解水制氢设备、电负荷、ASU 及碳捕集系统提供电力,其系统结构如图 1 所示。

LCES-OCPP-WPPO 运行机理:风电系统、富氧燃煤电厂将产生的电力供给电解槽,电解槽将电能转化为氢气和氧气,氢气稳定供给氢冶金园区冶炼钢铁,由储氢罐灵活平抑氢气流的波动,氢冶金原理参考文献[19]。电解槽、ASU 制取的氧气与循环烟气以一定比例混合后供给富氧燃煤电厂进行富氧燃烧,不足时由储氧罐提供,过量时进行售卖。

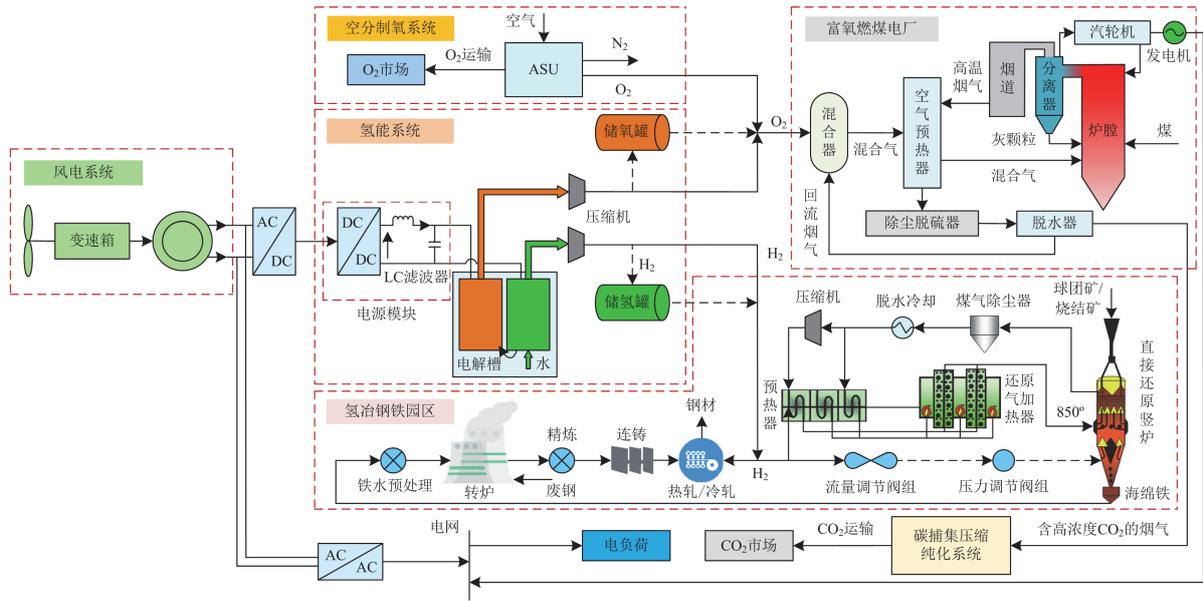


图 1 利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统

Fig. 1 Low carbon energy system of oxygen-enriched coal-fired power plant using wind power to produce oxygen

该燃烧方式使烟气中的 CO_2 占比提升至 80.01%。系统排放的高浓度 CO_2 通过碳捕集装置进行捕集，并将捕集到的 CO_2 进行储存运输后售卖给 CO_2 市场。

1.2 LCES-OCPP-WPPO 内各子系统出力模型

本文所涉及到的子系统出力模型已有大量研究成果，本文主要参考文献[12,20-21]分别建立了富氧燃煤机组、风电、电解槽、空分制氧系统、碳捕集系统出力模型。篇幅所限，此处不再赘述。

2 源荷不确定性及相关性分析

因风电具有波动性、随机性，电负荷具有波动性、周期性的特点，为使 LCES-OCPP-WPPO 容量配置合理化，故需解决风电出力不稳定及电负荷需求波动等因素带来的影响。

目前，在源荷场景缩减方面的研究主要集中于单独考虑源荷之间的不确定性、考虑源与源之间的不确定性及相关性。文献[22]依据多重源荷不确定性的特征，对风光出力和综合需求响应不确定性采用鲁棒优化法进行建模，对购能价格不确定性采用随机场景法进行建模，并构建了 IES 鲁棒-随机优化模型，仿真结果表明该方法在提升 IES 经济性的同时兼顾了鲁棒性。文献[23]将核密度估计和 Copula 理论用于风光出力场景生成，并用此法处理了风光的不确定性及相关性，同时构建了多能互补系统的双层优化配置模型，提高了系统经济性和一次能源节约率。上述文献对源荷场景缩减起到了积极作用，但都没有同时考虑源与荷之间的不确定性及相关性。

为此，本文采用含数据预处理的源荷典型场景生成法处理风电和负荷的双重不确定性及相关性。首先通过 DBSCAN 密度聚类算法[24]去除异常或发生概率低的负荷、风电数据点，然后对电负荷和风电进行场景缩减。为顾全上述电负荷特性，本文采用基于改进轮廓系数的有序聚类法进行电负荷场景缩减。为同时考虑风电和负荷之间的不确定性及相关性，本文将电负荷聚类后得出的分割点对风电标幺化出力分区，然后结合 $D_{\text{CH}(+)}$ 评价指标和 K-means 聚类算法对各大分区的风电进行典型场景生成。

2.1 基于 DBSCAN 密度聚类算法的数据预处理

数据预处理具体过程如下：假设一年中风电负荷场景的样本个数为 N ，每个样本 $n(n=1,2,\dots,N)$ 有 T_1 个时刻的数据。参考文献[25]得到 DBSCAN 算法参数列表，将列表中不同 K 值下的参数代入到 DBSCAN 算法中，若噪声点不随 K 值的增加而改变，则此时的噪声点离其他数据点较远而被去除，最终确定该 K 值并得到筛选后的风电、电负荷数据。密度聚类中样本间距用余弦相似度表征，使得差异较大的样本曲线能被区分，其公式为

$$\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 1 - \frac{\mathbf{x}\mathbf{y}^T}{\sqrt{\mathbf{x}\mathbf{x}^T + \mathbf{y}\mathbf{y}^T}} \quad (1)$$

式中： $\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 为余弦相似度； \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 为场景样本中某两个样本向量； \mathbf{x}^T 、 \mathbf{y}^T 为其向量的转置。

2.2 基于改进轮廓系数的有序聚类负荷场景缩减

考虑电负荷的特点，本文采用将目标类与相邻

类作比较的轮廓系数, 更加省时、精确地确定电负荷最佳聚类数。改进的轮廓系数函数如式(3)所示, 取值为 $[-1, 1]$, 且其值离 1 越近聚类效果越好。

首先基于去除噪声点的负荷样本数据 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_z\}$, 设定分割点个数 ν 为 $[1, \sqrt{z}]$ 之间的整数。然后将 ν 作为变量, 以最小离差平方和为目标函数, 离差平方和函数定义如式(2)所示, 利用粒子群算法寻优得到分割点 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_\nu\}$, 将样本 D 分为 $\nu+1$ 个场景集。最后经计算得出改进轮廓系数峰值, 以此确定其最佳聚类数, 将生成的电负荷场景集均值作为典型负荷场景。

$$S = \sum_{i=1}^{T_1} \sum_{i=1}^m \sum_{x \in X_{i \times T_1}} |x - \tau_{i,t}|^2 \quad (2)$$

$$\mathcal{J} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \frac{g_i - h_i}{\max\{h_i, g_i\}} \quad (3)$$

式中: S 为离差平方和; x 为某一样本数据; $X_{i \times T_1}$ 为 $i \times T_1$ 阶的样本数据矩阵; m 为质心样本个数; $\tau_{i,t}$ 为第 i 个质心样本第 t 时刻的质心; \mathcal{J} 为改进的轮廓系数; z 为样本个数; h_i 为第 i 个样本距它所在类中其余点欧式距离的平均值; g_i 为第 i 个样本到它所属类的相邻类(在时间段上相邻)中所有点的平均欧式距离的最小值。

2.3 基于 $D_{CH^{(+)}}$ 的 K-means 聚类算法风电场景缩减

风电出力具有随机性、间歇性, 而 K-means 聚类算法^[26]为风电场景缩减的常用方法。但此法存在首个聚类中心无规则选择、聚类结果每次不同^[27]等问题。因此, 本文参考文献[28]采用密度思想选择首个聚类中心, 配合最大最小距离原则避免首个聚类中心的选择太过接近。同时引入文献[29]的 $D_{CH^{(+)}}$ 指标(calinski harabasz index)作为聚类效果的评价指标, 当 K 取某一个数值时, $D_{CH^{(+)}}$ 指标取峰值, 此时 K 即为最佳聚类个数。

首先基于负荷有序聚类得到 ν 个分割点, 将风电数据分割为 $\nu+1$ 个场景集, 即 $A = \{A_1, \dots, A_\nu, A_{\nu+1}\}$ 。在所有场景集内, 基于密度思想和最大最小距离原则选择首个初始聚类中心, 然后根据式(4)将每一类的场景期望值作为下一个聚类中心 W_a , 而下一次聚类与计算下一个聚类中心同时进行, 其值满足式(5)时停止迭代, 得出最佳聚类中心后设定聚类数的搜索范围为 $[2, \sqrt{N_1}]$ 内的整数^[29], 根据式(6)计算不同 K 值下的 $D_{CH^{(+)}}$ 值, 经比较后得出最佳聚类数。依据最佳聚类数对各个风电场景集进行聚类, 得到所有风电典型场景。

$$W_a = \frac{1}{C_a} \sum_{G_a \in H_a} G_a \quad (4)$$

$$\max[d(W_a^{k+1}, W_a^k)] < \varpi \quad (5)$$

$$D_{CH^{(+)}} = \frac{T_K(N_1 - K)}{P_K(K - 1)} \quad (6)$$

式中: W_a 、 C_a 、 G_a 和 H_a 分别为第 a 类场景的初始聚类中心、个数、原始场景和集合; W_a^k 、 W_a^{k+1} 分别为第 a 类场景的第 k 和第 $k+1$ 个聚类中心, 将不同聚类中心连续两次计算后得到的欧氏距离峰值进行比较, 若均小于 ϖ 则停止迭代, 取 $\varpi = 0.1$; T_K 、 P_K 分别为聚类数为 K 时的类间和类内离差平方和; N_1 为某数据集中的样本天数。

源荷场景经缩减后得到不同源荷典型场景发生的概率^[30], 公式为

$$\wp(s) = \frac{n_s}{N} \quad (7)$$

式中: $\wp(s)$ 为典型场景 s 产生的概率; n_s 为典型场景 s 中所涉及的初始场景个数; N 为全部初始场景个数。

3 LCES-OCPP-WPPO 容量优化配置计算模型

3.1 目标函数

本文提出的 LCES-OCPP-WPPO 容量优化配置模型主要从经济性、风电消纳和碳减排等方面考虑, 运用概率分析法, 以总成本最小为目标函数, 包含投资、维护、运行、弃风惩罚成本、售 CO_2 收益、氢气替代和售液氧收益, 可表示为

$$\min C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 - C_5 - C_6 - C_7 \quad (8)$$

式中: C_T 为总成本; C_1 为系统投资成本, 包括富氧燃煤电厂、风电系统、质子交换膜电解槽、储氢罐、储氧罐、碳捕集系统和 ASU 的投资, 其中富氧燃煤电厂由现有的常规燃煤电厂改造而成, 只考虑其进行富氧燃烧所必要的锅炉改造成本(1960 万元)^[31]; C_2 为系统维护成本; C_3 为系统运行成本, 主要包括燃煤购买费用、 CO_2 和液氧运输费用; C_4 为典型场景 s 下的弃风惩罚成本; C_5 为售 CO_2 收益; C_6 为氢气替代收益; C_7 为售液氧收益。因此, 系统投资、维护成本可表示为

$$\begin{cases} C_1 = c_{bi} + \sum_{i=2}^U c_{i,\text{cap}} \cdot c_i \cdot \frac{r \cdot (1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \\ C_2 = \mathcal{M}_c c_m + \mathcal{M}_s c_s + \xi_1 \sum_{i=2}^{U-2} c_{i,\text{cap}} \cdot c_i + \xi_2 \sum_{i=6}^U c_{i,\text{cap}} \cdot c_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: c_{bi} 为锅炉改造成本; U 为系统中子系统的种类个数, 取 7; $c_{i,cap}$ 为第 i 种子系统的容量; c_i 为各子系统单位容量成本; r 为折现率, 取 10%; Y 表示设备生命周期, 均为 20 年; c_m 为常规火电厂中燃煤机组的投资成本, 文中燃煤机组容量为 600 MW, 其投资成本为 251 600 万元; c_s 为脱硫设备的投资成本, 为 16 950 万元; \mathcal{R}_c 为燃煤机组维护系数, 取 2.50%; \mathcal{R}_s 为脱硫设备维护系数, 取 1.50%; ξ_1 为风电、电解槽、储气罐维护系数, 取 5%; ξ_2 为碳捕集、ASU 维护系数, 取 4%。

LCES-OCPP-WPPO 的运行、弃风惩罚成本可表示为

$$\begin{cases} C_3 = \sum_{s=1}^{M_s} \left\{ D_s \cdot \wp(s) \cdot \sum_{t=1}^T \left[c_{coal} \cdot q_{oxy-coal}(s,t) + \right. \right. \\ \left. \left. c_t \cdot q_{oxy-cd}(s,t) + \right. \right. \\ \left. \left. c_{LO} \cdot q_{oxy-sell,LO}(s,t) \right] \right\} \\ C_4 = \sum_{s=1}^{M_s} \left[D_s \cdot \wp(s) \cdot \sum_{t=1}^T c_{aw} \cdot q_{aw}(s,t) \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中: D_s 为典型场景 s 下的总天数; M_s 为总场景数; c_{coal} 为燃煤购价, 取 735 元/t; $q_{oxy-coal}$ 为燃煤电厂在典型场景 s 下的煤耗量; c_t 为 CO_2 运输的价格, 取 0.18 元/ m^3 ; q_{oxy-cd} 为碳捕集系统在典型场景 s 下的捕碳量; c_{LO} 为液氧运输的价格, 取 100 元/t; $q_{oxy-sell,LO}$ 为典型场景 s 下的液氧售量; c_{aw} 为弃风惩罚价格, 取 400 元/MWh; q_{aw} 为典型场景 s 下的弃风量; T 为运行周期, 取 24 h。

LCES-OCPP-WPPO 的售 CO_2 收益、氢气替代和售液氧收益如式(11)所示。

$$\begin{cases} C_5 = \sum_{s=1}^{M_s} \left[D_s \cdot \wp(s) \cdot \sum_{t=1}^T c_{cd} \cdot q_{oxy-sell,cd}(s,t) \right] \\ C_6 = \sum_{s=1}^{M_s} \left\{ D_s \cdot \wp(s) \cdot \sum_{t=1}^T \left[c_{coke} \cdot Y_1 \cdot I_{regas-H}(s,t) + \right. \right. \\ \left. \left. c_{mth} \cdot Y_2 \cdot I_{progas-H}(s,t) \right] \right\} \\ C_7 = \sum_{s=1}^{M_s} \left[D_s \cdot \wp(s) \cdot \sum_{t=1}^T c_{LO,sell} \cdot q_{oxy-sell,LO}(s,t) \right] \end{cases} \quad (11)$$

式中: c_{cd} 为 CO_2 售价, 取 620 元/t; $q_{oxy-sell,cd}$ 为典型场景 s 下的 CO_2 售量; c_{coke} 、 c_{mth} 分别为焦炭、甲醇购价, 其值分别为 1779.79 元/t 与 3559 元/t; Y_1 、 Y_2 分别为焦炭/氢系数与甲醇裂解制氢系数, 其值分别为 9.33 与 6.07; $I_{regas-H}$ 、 $I_{progas-H}$ 分别为还原气耗氢流量与轧钢保护气耗氢流量; $c_{LO,sell}$ 为液氧售价, 取 600 元/t。

3.2 约束条件

3.2.1 富氧燃烧技术条件

本文提出的 LCES-OCPP-WPPO 优化配置模型的约束条件主要有电功率平衡、氢(氧)流量平衡、出力最大最小值、机组爬坡、弃风、储气系统、碳捕集及场景约束 9 个部分。

1) 电功率平衡约束

$$P_{wt}(s,t) + P_{coal,oxy}(s,t) = P_{ele}(s,t) + P_{pez}(s,t) + P_{asu,oxy}(s,t) + P_{cc,oxy}(s,t) + P_{wt,aw}(s,t) \quad (12)$$

2) 氢流量平衡约束

$$q_{pez,H}(s,t) + q_{dis,H}(s,t) = I_H(s,t) + q_{sto,H}(s,t) \quad (13)$$

3) 氧流量平衡约束

$$q_{pez,O}(s,t) + q_{dis,O}(s,t) + q_{asu,O}(s,t) + q_{smo-re,O}(s,t) = q_{oxy,O}(s,t) + q_{oxy-sell,LO}(s,t) + q_{sto,O}(s,t) \quad (14)$$

式中: $P_{coal,oxy}$ 、 $P_{asu,oxy}$ 、 $P_{cc,oxy}$ 分别为富氧燃烧及典型场景 s 下燃煤机组发电功率、ASU 制氧功率和碳捕集系统耗电功率; P_{wt} 、 P_{ele} 、 P_{pez} 、 $P_{wt,aw}$ 分别为典型场景 s 下的风电发电功率、电负荷、电解槽耗电功率和弃风功率; $q_{pez,H}$ 、 $q_{dis,H}$ 、 $q_{sto,H}$ 、 I_H 分别为典型场景 s 下电解制氢流量、储氢罐放氢流量、储氢罐储氢流量和氢冶钢铁需氢流量; $q_{pez,O}$ 、 $q_{dis,O}$ 、 $q_{sto,O}$ 、 $q_{asu,O}$ 、 $q_{smo-re,O}$ 、 $q_{oxy,O}$ 分别为典型场景 s 下电解制氧流量、储氧罐放氧流量、储氧罐储氧流量、ASU 供氧流量、回流烟气中的氧气流量和燃煤电厂富氧燃烧总耗氧流量。

4) 出力最大最小值约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{wt}(s,t) \leq P_{wt,r} \\ P_{coal,oxy,min} \leq P_{coal,oxy}(s,t) \leq P_{coal,oxy,max} \\ 0 \leq P_{pez}(s,t) \leq P_{pez,r} \\ 0 \leq P_{asu,oxy}(s,t) \leq P_{asu,oxy,r} \\ 0 \leq P_{cc,oxy}(s,t) \leq P_{cc,oxy,r} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{wt,r}$ 、 $P_{pez,r}$ 、 $P_{asu,oxy,r}$ 、 $P_{cc,oxy,r}$ 分别为配置后的风电、电解槽、ASU 及碳捕集系统额定功率; $P_{coal,oxy,min}$ 、 $P_{coal,oxy,max}$ 分别为燃煤机组最小和最大输出功率, 其值分别为 180 MW 与 600 MW。

5) 富氧燃煤机组爬坡约束^[32]

$$-g_{coal,down} \leq P_{coal,oxy}(s,t) - P_{coal,oxy}(s,t-1) \leq g_{coal,up} \quad (16)$$

式中, $g_{coal,up}$ 、 $g_{coal,down}$ 分别为富氧燃煤机组最大上坡速率与最大下坡速率, 其值为 540 MW/h。

6) 弃风约束

为减少 LCES-OCPP-WPPO 的弃风现象, 弃风功率应满足式(17)所示的约束。

$$\begin{cases} P_{wt,aw}(s,t) = P_{wt,pre}(s,t) - P_{wt}(s,t) \\ 0 \leq P_{wt,aw}(s,t) \leq P_{wt}(s,t) \end{cases} \quad (17)$$

式中, $P_{wt,pre}$ 为风电预测出力, 本文将风电年历史出力作为风电预测出力进行计算。

7) 储气系统约束

$$\begin{cases} q_{st,n}(s,t) = q_{st,n}(s,t-1) + \\ A_1 \cdot \Delta t \cdot q_{sto,n}(s,t-1) - \frac{q_{dis,n}(s,t)}{A_2} \cdot \Delta t \\ 0 \leq q_{sto,n}(s,t) \leq \varepsilon_{sto} \cdot c_{i,cap} \\ 0 \leq q_{dis,n}(s,t) \leq \varepsilon_{dis} \cdot c_{i,cap} \\ \begin{cases} q_{sto,n}(s,t), \Phi = 1 \\ q_{dis,n}(s,t), \Phi = 0 \end{cases} \\ \Delta_{min} \cdot c_{i,cap} \leq q_{st,n}(s,t) \leq \Delta_{max} \cdot c_{i,cap} \\ q_{st,n}(s,t) = \chi_{ini,n} \cdot c_{n,ca} \\ \sum_{s=1}^{M_s} \sum_{t=1}^T q_{st,n}(s,t) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $q_{st,n}$ 、 $q_{sto,n}$ 、 $q_{dis,n}$ 分别为典型场景 s 下储气罐的储气量、储气流量和放气流量, $n = \{1, 2, 3\}$ 表示当 n 为 1 时代表 H_2 、 n 为 2 时代表 O_2 、 n 为 3 时代表液氧; A_1 和 A_2 分别为典型场景 s 下的储气罐储放效率, 同取 0.97; Δt 为时间间隔; $c_{n,ca}$ 为第 n 种储气罐的容量; ε_{sto} 和 ε_{dis} 分别为最大储放流量系数, 同取 0.30; Φ 为 0-1 变量, 表示储气罐储放状态; Δ_{min} 和 Δ_{max} 分别为储气罐储气量系数下限与上限, 其值分别为 0.10 与 0.90; $\chi_{ini,n}$ 为储气罐初始容量系数, 取 0.30。

8) 碳捕集约束

$$\begin{cases} P_{cc,oxy}(s,t) = P_{cc,ele-ox} \cdot q_{c,oxy}(s,t) \\ q_{act,cd}(s,t) = q_{oxy-gen,cd}(s,t) - q_{cc,oxy}(s,t) - q_{oxy-re,cd}(s,t) \\ q_{oxy-re,cd}(s,t) = \psi_{re} \cdot q_{oxy-gen,cd}(s,t) \\ q_{cc,oxy}(s,t) = \eta_{cc,oxy} \cdot q_{c,oxy}(s,t) \\ 0 \leq q_{c,oxy}(s,t) \leq q_{oxy-gen,cd}(s,t) \end{cases} \quad (19)$$

$$\frac{\sum_{s=1}^{M_s} \left[\varphi(s) \sum_{t=1}^T q_{act,cd}(s,t) \right]}{\sum_{s=1}^{M_s} \left[\varphi(s) \sum_{t=1}^T q_{oxy-gen,cd}(s,t) \right]} \leq \gamma_{max,cd-emi} \quad (20)$$

式中: $P_{cc,ele-ox}$ 为燃煤电厂在富氧燃烧及典型场景 s 下碳捕集系统捕捉单位 CO_2 的能耗, 取

89.30 kWh/t; $q_{c,oxy}$ 、 $q_{act,cd}$ 、 $q_{oxy-gen,cd}$ 、 $q_{cc,oxy}$ 、 $q_{oxy-re,cd}$ 分别为富氧燃烧及典型场景 s 下流入碳捕集系统的 CO_2 量、实际 CO_2 排放量、燃煤电厂产生的 CO_2 量、碳捕集系统捕碳量和回流烟气中的 CO_2 量; ψ_{re} 为富氧燃烧条件下的烟气回流比, 取 68.90%; $\eta_{cc,oxy}$ 为碳捕集系统在富氧燃烧条件下的捕集效率, 取 98%; $\gamma_{max,cd-emi}$ 为最大碳排放率, 取 10%。

9) 场景约束

$$\sum_{s=1}^{M_s} \varphi(s) = 1 \quad (21)$$

3.2.2 微富氧燃烧技术条件

燃煤电厂进行微富氧燃烧时, 其电功率平衡、氧流量平衡、微富氧燃烧碳捕集约束与富氧燃烧技术条件有所区别, 具体如式(22)所示。

$$\begin{cases} P_{wt}(s,t) + P_{coal,moecc}(s,t) = P_{wt,aw}(s,t) + P_{pez}(s,t) + \\ P_{ele}(s,t) + P_{cc,moecc}(s,t) + P_{asu,moecc}(s,t) \\ q_{pez,O}(s,t) + q_{dis,O}(s,t) + q_{asu,moecc,O}(s,t) + \\ q_{smo-re,moecc,O}(s,t) + q_{air,O}(s,t) = q_{moecc,O}(s,t) + q_{sto,O}(s,t) \\ P_{cc,moecc}(s,t) = P_{cc,ele-moecc} \cdot q_{c,moecc}(s,t) \\ q_{smo-re,moecc,cd}(s,t) = \Gamma_{re} \cdot q_{smo-gen,moecc,cd}(s,t) \\ q_{cc,moecc}(s,t) = \eta_{cc,moecc} \cdot q_{c,moecc}(s,t) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{coal,moecc}$ 、 $P_{cc,moecc}$ 、 $P_{asu,moecc}$ 、 $P_{cc,ele-moecc}$ 分别为微富氧燃烧及典型场景 s 下燃煤机组发电功率、碳捕集系统耗电功率、ASU 制氧耗电功率和碳捕集系统捕捉单位 CO_2 的能耗; $q_{asu,moecc,O}$ 、 $q_{air,O}$ 、 $q_{smo-re,moecc,O}$ 、 $q_{moecc,O}$ 分别为微富氧燃烧及典型场景 s 下 ASU 供氧流量、掺入空气中的 O_2 流量和回流烟气中的 O_2 流量及总耗氧流量; $q_{smo-re,moecc,cd}$ 、 $q_{smo-gen,moecc,cd}$ 、 $q_{c,moecc}$ 、 $q_{cc,moecc}$ 分别为微富氧燃烧及典型场景 s 下回流烟气中的 CO_2 量、燃煤电厂产生的 CO_2 量、流入碳捕集系统的 CO_2 量和碳捕集系统捕碳量; Γ_{re} 为微富氧燃烧条件下的烟气回流比, 取 43.97%; $\eta_{cc,moecc}$ 为碳捕集系统在微富氧燃烧条件下的捕集效率, 取 95%。

3.2.3 空气燃烧技术条件

传统燃煤电厂均为空气燃烧, 因其不燃烧纯氧, 故去除储氧罐, 并将电解槽制取的氧气进行售卖。因此, 只需满足电/氢平衡、出力最大最小值、弃风、储气系统、机组爬坡、燃烧后碳捕集及场景约束即可。

$$q_{cc,atm}(s,t) = \eta_{cc,atm} \cdot q_{c,atm}(s,t) \quad (23)$$

式中: $q_{cc,atm}$ 、 $q_{c,atm}$ 分别为空气燃烧及典型场景 s 下的碳捕集系统捕碳量和流入碳捕集系统的 CO_2

量; $\eta_{cc,atm}$ 为碳捕集系统在空气燃烧条件下的捕集效率, 取 90%。

3.3 LCES-OCPP-WPPO 相关评价指标计算模型

本文从经济性、风电消纳、碳减排的角度对系统考虑富氧燃烧技术后的效益进行评价, 其中弃风率、碳排放率和煤耗率^[33]为 LCES-OCPP-WPPO 效益提升的三个重要评价指标。其计算模型如式(24)所示。

$$\begin{cases} \eta_{wt,aw} = \left[\sum_{s=1}^{M_s} D_s \sum_{t=1}^T P_{wt,aw}(s,t) \right] / \left[\sum_{s=1}^{M_s} D_s \sum_{t=1}^T P_{wt,pre}(s,t) \right] \\ \eta_{cde} = \left[\sum_{s=1}^{M_s} D_s \sum_{t=1}^T q_{act,cd}(s,t) \right] / \left[\sum_{s=1}^{M_s} D_s \sum_{t=1}^T q_{oxy-gen,cd}(s,t) \right] \\ \eta_{ccr} = \left[\sum_{s=1}^{M_s} D_s \sum_{t=1}^T q_{oxy-coal}(s,t) \right] / \left[\sum_{s=1}^{M_s} D_s \sum_{t=1}^T P_{coal,oxy}(s,t) \right] \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\eta_{wt,aw}$ 为弃风率; η_{cde} 为碳排放率; η_{ccr} 为煤耗率, t/kWh。

3.4 模型求解

本文考虑源荷双侧的不确定性及其相关性, 所使用的典型场景生成法采用 MatlabR2018a 进行编程仿真。本文所提出的 LCES-OCPP-WPPO 容量优化配置模型为含二次约束的混合整数二次规划问题^[34], 可通过 CPLEX 求解器进行求解, 具体求解流程如图 2 所示。

4 算例分析

4.1 源荷不确定性及其相关性分析

以西北某地区 2021 年全年风电出力和电负荷为样本数据, 数据步长为 1 h, 将风电出力进行标幺化处理, 结果如图 3 所示。然后基于 MatlabR2018a 仿真平台, 采用上述的典型场景生成法将 8760 h 风电、负荷场景集聚类为 7 个源荷典型场景。

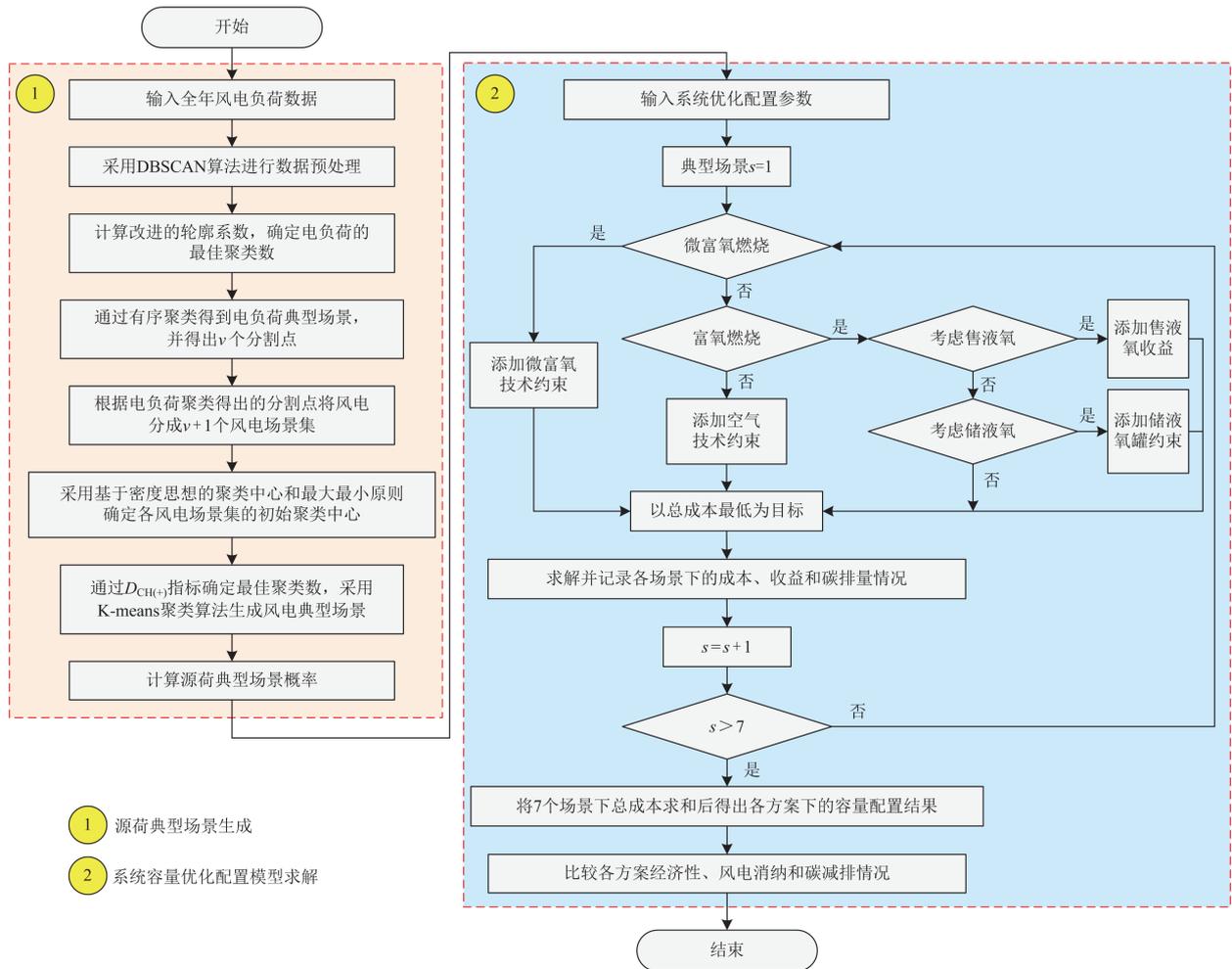
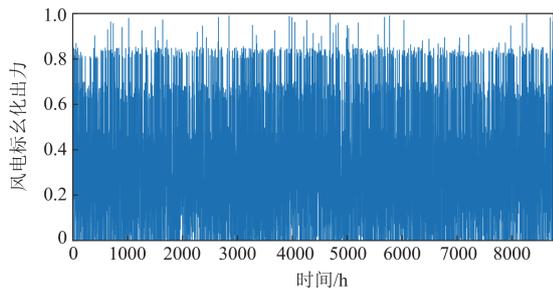
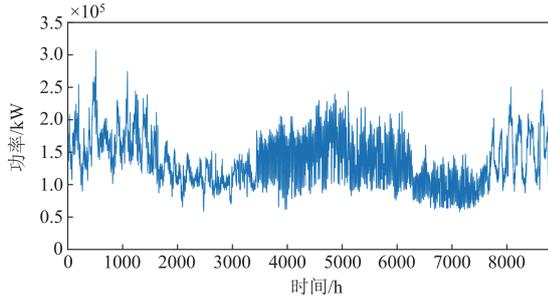


图 2 LCES-OCPP-WPPO 容量优化配置模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart of LCES-OCPP-WPPO capacity optimization configuration model solution



(a) 全年风电历史数据



(b) 全年负荷历史数据

图3 西北某地区 2021 年全年风电、负荷历史数据

Fig. 3 Historical data of wind power and load in a certain area of northwest China in 2021

将上述西北某地区 2021 年全年风电、负荷历史数据经 DBSCAN 密度聚类算法进行数据预处理, 其结果如图 4 所示。

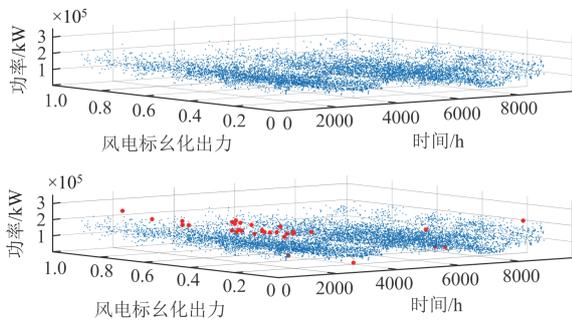


图4 源荷历史数据的预处理结果

Fig. 4 Pre-processing results of source-load historical data

图 4 中的上半图为原始数据点, 下半图为数据预处理结果, 其中红点为检测出的噪声点。由此可知, DBSCAN 密度聚类算法能有效去除异常或发生概率低的负荷、风电数据, 与图 3 对比可知, 经聚类后的数据符合数据预处理的预期效果。

将已筛选的全年负荷数据代入式(3)中, 经计算得出不同分割点个数下电负荷改进的轮廓系数值, 其曲线图如图 5 所示。其中电负荷改进的轮廓系数峰值所对应的分割点个数即为最佳分割点个数, 经分割后电负荷场景分区结果如图 6 所示。

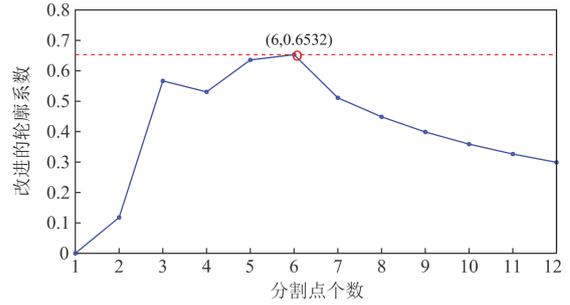


图5 电负荷改进的轮廓系数随分割点个数变化曲线

Fig. 5 Improved contour coefficient of electrical load varies with the number of segmentation points

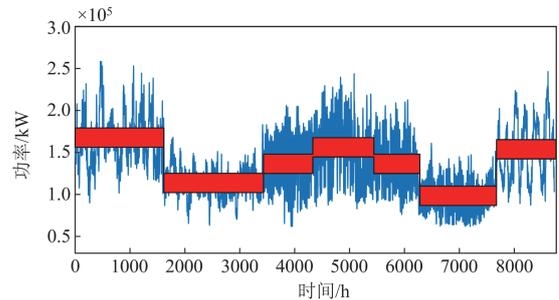
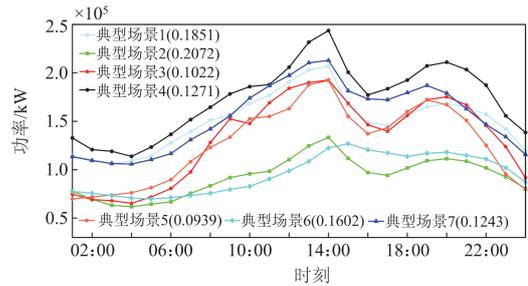


图6 电负荷场景分区结果

Fig. 6 Partition result in the electrical load scenario

由图 5 可知, 分割点个数为 6 时其改进的轮廓系数最大, 即电负荷最佳聚类数为 7。图 6 表示电负荷经过有序聚类后的场景分区结果图, 全年电负荷被分成 7 大分区, 分别为(1~1615)、(1616~3430)、(3431~4330)、(4331~5442)、(5443~6280)、(6281~7676)、(7677~8760)。各大分区内的总天数为 $D_s = [67, 75, 37, 46, 34, 58, 45]$ 。与图 3 对比得出, 图中对应的各个分区时段, 其曲线走势大致符合电负荷实际波动特性, 且每个分区为该时段的负荷聚类结果。

根据上述所得负荷最佳分割点将风电标幺化出力分割成 7 大分区后, 通过计算 $D_{CH(+)}$ 指标得出各个风电分区的最佳聚类数, 采用 K-means 聚类最终将风电共聚成 50 类。然后在风电各个分区中选取一个与负荷时序相关的典型场景, 最终得到 7 个源荷典型场景, 即 M_s 取值为 7。如图 7 所示, 各源荷典型场景概率在图例括号中标出。



(a) 电负荷典型场景

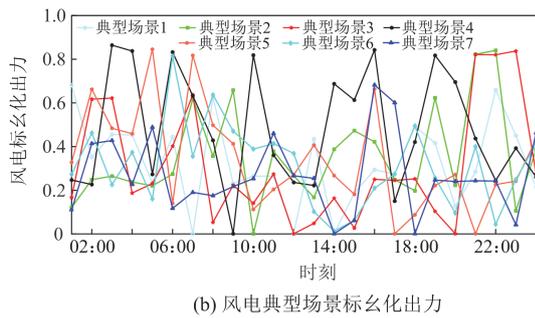


图 7 源荷典型场景生成结果

Fig. 7 Generation results for power supply and load scenarios

由图 7 可知，风电和负荷典型场景表现出较为显著的时序性规律，且在某时段内风电和负荷曲线变化相同或相反，表现出一定的相关性。同一分区中电负荷或风电出力日变化曲线形态特征相似，说明风电负荷数据分区较为合适。总体可知，场景生成结果能较好地模拟系统所处地区的风电、负荷特性，有利于系统更加合理地进行容量配置。

4.2 LCES-OCPP-WPPO 容量优化配置结果及分析

LCES-OCPP-WPPO 中除电负荷的电需求外还需供给氢冶金园区稳定的氢气流，其数值为 5386 m³/h。该氢气流包括炼铁还原气(96.50%)与轧钢保护气(3.50%)两部分，共替代其 1.80%^[35]的钢铁产量所需 H₂ 量，可助力园区低碳化。燃煤电厂进行富氧燃烧或微富氧燃烧时，其混合气中的 O₂ 浓度分别为 33.29%与 24.20%，纯氧占比分别为 90.12%与 65.70%，煤燃烧产生的烟气中 CO₂ 占比分别为 80.01%^[36]与 33.44%，回流烟气中的 O₂ 占比分别为

表 2 系统容量优化配置结果对比

Table 2 Comparison of system capacity optimization configuration results

设备	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
风电/MW	256.03	194.94	118.52	114.73	92.43
电解槽/MW	68.41	69.55	83.67	81.66	83.67
储氢罐/m ³	66 441.81	68 754.98	97 882.42	96 415.51	97 806.52
储氧罐/m ³	—	71 876.46	68 672.84	74 425.51	69 817.90
储液氧罐/m ³	—	—	—	25 394.55	—
ASU/m ³	—	42 067.55	36 513.34	33 123.79	36 830.51
碳捕集系统/MW	76.93	19.98	1.71	1.69	1.72

表 3 系统成本与收益结果对比

Table 3 Comparison of system cost and profit results

方案	投资成本/ 万元	维护成本/ 万元	运行成本/ 万元	弃风惩罚 成本/万元	售 CO ₂ 收益/ 万元	氢气替代 收益/万元	售氧收益/ 万元	售液氧收益/ 万元	总成本/ 万元
1	29 178.56	18 775.45	1 015 600.81	1193.10	3638.46	1074.27	310.95	—	1 059 724.24
2	24 534.74	16 291.32	545 513.01	698.13	1988.15	1074.27	—	—	583 974.78
3	19 041.85	13 727.82	275 730.82	352.72	1153.91	1074.27	—	—	306 625.03
4	19 242.80	13 821.50	275 472.58	321.49	1152.83	1074.27	—	—	306 631.27
5	17 218.98	12 951.10	294 291.07	170.40	1168.30	1074.27	—	90 726.15	231 662.83

4.70%与 3.10%，其余优化配置参数参考文献 [12,37]。基于以上数据并结合已生成的源荷典型场景，利用 CPLEX 求解器对西北某地区低碳能源系统容量优化配置模型进行求解，得到 LCES-OCPP-WPPO 中各子系统容量的最优配置方案。

4.2.1 对比方案构建及优化配置结果分析

为说明考虑富氧燃烧的同时进行液氧售卖对整个系统的作用，本文设置了 5 种方案进行对比分析。方案 1 是空气燃烧与含氨水溶液的碳捕集技术结合的燃煤电厂，由于不需要向燃煤电厂提供 O₂，因此将电解槽制取的 O₂ 进行售卖。方案 2 是微富氧燃烧与含氨水溶液的碳捕集技术结合的燃煤电厂，其中 ASU 制取的多余液氧进行弃氧处理。方案 3—方案 5 是富氧燃烧与碳捕集压缩纯化技术结合的燃煤电厂，因 ASU 无法快速响应负荷变化，需将其制取的多余液氧分为弃氧、储存和售卖 3 种不同处理方案。5 种不同的系统构建方案如表 1 所示。

表 1 5 种不同的系统构建方案

Table 1 Five different compositions of system

方案	储氧罐	储液氧罐	ASU	售氧收益	售液氧收益
1	×	×	×	√	×
2	√	×	√	×	×
3	√	×	√	×	×
4	√	√	√	×	×
5	√	×	√	×	√

上述 5 种方案经优化配置后，得出各方案下的容量配置结果对比、系统成本与收益结果对比、系统风电消纳与碳减排结果对比，分别如表 2、表 3 和表 4 所示。

表 4 系统风电消纳与碳减排结果对比

Table 4 Comparison of wind power consumption and carbon emission reduction results in the system

方案	弃风率/ %	碳排率/ %	煤耗率/ (kg/kWh)	年捕 碳量/t	年碳 排放量/t
1	25.90	10.0	55.20	361 352.05	40 150.22
2	19.95	2.80	29.60	197 524.59	10 396.03
3	17.35	0.62	15.10	114 523.59	2337.21
4	16.03	0.62	15.10	114 434.88	2335.41
5	11.42	0.62	15.10	116 150.00	2370.40

1) 不同燃烧方式下的方案 1、2 和 5 对比分析

由表 2—表 4 可知, 方案 5 中的燃煤电厂进行富氧燃烧会降低其煤耗率与购煤量, 从而降低系统运行成本。然而电厂进行富氧燃烧会使得排放烟气中的 CO₂ 浓度高达 80.01%, 烟气中的 CO₂ 浓度越高越容易捕集, 即提高了捕集效率, 因此碳捕集成本降低。但由于电厂进行富氧燃烧所需氧气量巨大, 需要加入储氧罐与 ASU 来维持 O₂ 的稳定供给, 因此增加了系统投资和维护成本。综合对比可知, 除去售氧、液氧收益后的总成本相较于方案 1 降低 737 646.21 万元, 减少 69.60%, 弃风率与碳排放率分别减少 14.48% 与 9.38%, 相较于方案 2 降低 261 585.80 万元, 减少 44.79%, 弃风率与碳排放率分别减少 8.53% 与 2.18%。总之, 方案 5 在经济性、弃风率和碳减排上明显优于方案 1、方案 2。

2) 多余液氧不同处理方式下的方案 3、4 和 5 对比分析

由于方案 5 考虑了液氧售卖, 而在液氧市场中液氧售价高达 600 元/t, 因此将多余的液氧进行售卖后获取的收益是非常可观的。由表 2 可知, 相较于方案 3, ASU 容量大约高出 317 m³, 电解槽能耗降低, ASU 的供氧量及供氧能耗增大, 由于电解能耗大约为 ASU 的 10 倍, 因此其总能耗仍是降低的, 则风电容量减少 26.09 MW, 系统投资与维护成本降低, 但运输液氧增加了运行成本, 综合可得总成本相较于方案 3 降低 74 962.20 万元, 即减少 24.44%, 弃风率减少 5.93%。方案 4 增加了储液氧罐对多余液氧进行存储, 灵活平抑了 ASU 液氧供给的波动, 相较于方案 3 和方案 5 减少了运行成本, 但增加了投资与维护成本。综合对比可知, 方案 5 的总成本相较于方案 4 降低了 74 968.44 万元, 即减少 24.44%, 弃风率减少 4.61%。

综上, 本文构建的方案 5 通过引入富氧燃烧技术配合碳捕集装置, 减少了系统总成本和碳排放量。同时, 有效利用风电制取的 O₂, 将 ASU 产生的多余液氧进行售卖, 进一步提升了系统的经济性、减

少了弃风现象。

4.2.2 典型场景下的电功率和氢氧流量平衡分析

以典型场景 4 为例, 系统运行时的电功率、氢氧流量平衡曲线见图 8—图 10。

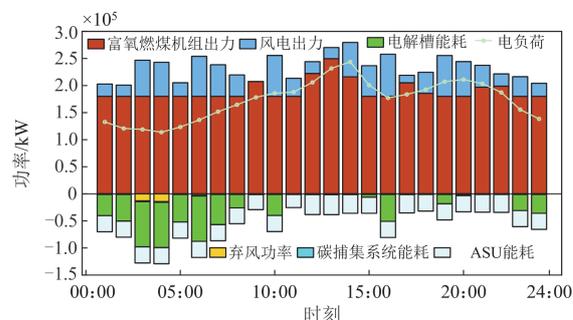


图 8 典型场景 4 下的电功率平衡曲线

Fig. 8 Electric power balance curve in typical scenario 4

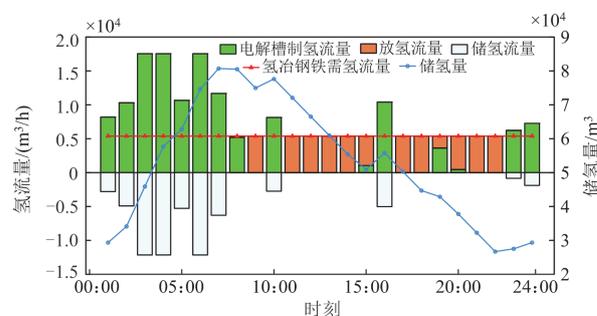


图 9 典型场景 4 下的氢流量平衡曲线

Fig. 9 Hydrogen flow balance curve in typical scenario 4

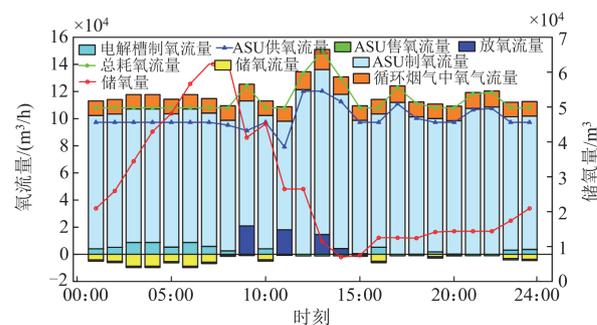


图 10 典型场景 4 下的氧流量平衡曲线

Fig. 10 Oxygen flow balance curve in typical scenario 4

由图 8—图 10 可知, 在整个时段内氢冶金园区需氢流量稳定, 电解槽制取的 H₂ 多余时通过储氢罐储存, 不足时由储氢罐提供 H₂。在 00:00—08:00、23:00—24:00 时段, 电负荷处于谷值需求水平不高, 燃煤电厂平稳出力, 氢氧需求处于平值, 需求水平仍较高, 风电和富氧燃煤电厂供电给电解槽制氢制氧, 同时配合 ASU 系统确保氢氧供需平衡。

在 08:00—16:00 时段, 电负荷和氧需求都处于峰值, 而氢需求处于平值, 此时风电与富氧燃煤电厂在保证电负荷电力需求的同时无法满足电解槽出力, 因此主要由 ASU 与储氢储氧罐来满足氢氧供需平衡。在 16:00—23:00 时段, 电负荷处于小峰值, 氢氧需求高且平稳, 此时风电与富氧燃煤电厂只能满足部分时段电解槽出力, 且储氧罐内的 O₂ 所剩无几, 因此主要由 ASU 满足 O₂ 供给, 储氢罐满足 H₂ 供给。由此可见, 本文的容量配置结果较为合理, 在保证电氢氧供需平衡的基础上减少了弃风。

4.2.3 灵敏度分析

1) 煤价对配置结果的影响分析

在上述 LCES-OCPP-WPPO 中, 煤价为系统运行成本变化的主要影响因素, 且当其变化时系统总成本变化较大。随着系统燃煤耗量的变化, 必须考虑煤价的上下变动对系统容量配置的影响。控制煤价在 500~830 元/t 之间变化时(变化间隔为 30 元/t), 系统总成本、投资与维护成本、运行成本、售液氧收益和弃风率变化如图 11 所示。

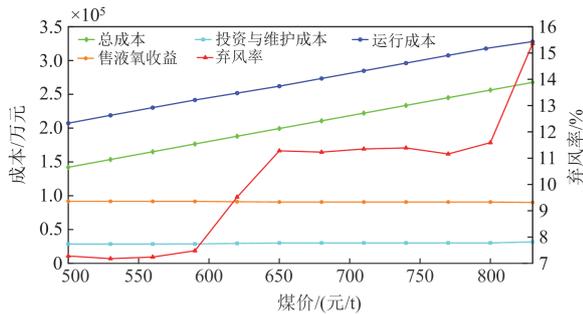


图 11 煤价对配置结果的影响分析

Fig. 11 Analysis of the influence of coal price on the configuration result

由图 11 可知, 因煤价上涨使得富氧燃煤机组供电成本增大, 导致运行成本增大, 故系统总成本逐渐上升。当煤价在 500~530 元/t 之间时, 由于风电与储氧罐容量减小, 储氢罐与 ASU 容量增大, 因此弃风率降低且在煤价取 530 元/吨时达到最低。当煤价在 530~650 元/t 之间, 风电容量增大, 储氢罐、储氧罐与 ASU 容量基本不变, 因此弃风率增大。当煤价在 650~770 元/t 之间时, 风电容量基本不变, 储氢罐、储氧罐与 ASU 容量先减小后增大, 弃风率呈现小幅度上下波动的趋势。当煤价在 770~830 元/t 之间时, 由于风电容量逐渐增大, 电解槽与储氢罐容量基本不变, 储氧罐容量减小, ASU 与碳捕集系统容量不变, 因此风电消纳能力降低, 运行与总成本增大, 投资与维护成本基本不变。

2) 液氧售价对配置结果的影响分析

液氧售价为系统售液氧收益变化的主要影响因素, 且当其变化时系统总成本变化较大。随着耗氧量的改变, 必须考虑液氧售价的上下变动对系统容量配置的影响。参考 2020 年液氧售价的变化, 将其控制在 350~1050 元/t 之间变化(变化间隔为 50 元/t), 系统总成本、投资与维护成本、运行成本、售液氧收益和弃风率变化如图 12 所示。

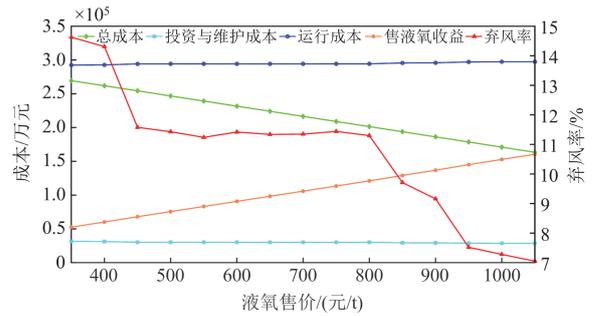


图 12 液氧售价对配置结果的影响分析

Fig. 12 Analysis of the effect of liquid oxygen price on the configuration result

由图 12 可知, 随着液氧售价的增长, 系统总成本明显降低。当液氧售价在 350~450 元/t 之间时, 由于风电与储氧罐容量减小, 储氢罐与 ASU 容量增大, 液氧售量增大, 故运行成本与售液氧收益逐渐增大, 投资与维护成本逐渐降低, 此时更多的风电被消纳, 弃风率降低。当液氧售价在 450~800 元/t 之间时, 各子系统容量基本保持不变, 因此弃风率基本不变。当液氧售价在 800~1050 元/t 之间时, 由于风电容量逐渐降低, 电解槽容量保持不变, 储氢罐、储氧罐与 ASU 容量上下轻微浮动, 因此原本不被消纳的风电被消纳, 使得弃风现象减少。

5 结论

本文采用基于改进轮廓系数的有序聚类法和含 $D_{CH(+)}$ 指标的 K-means 聚类法构建了源荷典型场景生成方法, 并采用概率分析法建立了利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统容量优化配置模型, 结论如下。

1) 本文采用源荷典型场景生成法处理源荷不确定性及相关性, 生成的源荷典型场景基本符合负荷的波动性、周期性规律和风电波动性、随机性的规律, 结合本文所提优化配置模型, 在缩短计算速度的同时配置结果也更加合理。

2) 本文所提利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统, 在引入富氧燃烧技术后降低了燃煤电

厂的煤耗率,增大了燃煤电厂排放时烟气中 CO_2 的浓度,降低了碳捕集能耗,使系统总成本相较于空气燃烧降低了69.60%,弃风率与碳排放率分别下降了16%与9.83%,相较于微富氧燃烧降低了44.79%,弃风率与碳排放率分别下降了9.83%与2.18%。

3) 本文所提低碳能源系统中弃风率是衡量风电消纳的重要指标,其值既不能过大也不能过小。弃风率过大,系统消纳的风电越少,风电容量越大,系统投资成本增大;反之,弃风率过小,储能设备投资越大,也会增大系统投资成本。因此本文加入弃风惩罚成本,得出了兼顾经济性与风电消纳的最优容量配置结果。此外,碳排放率是衡量系统低碳性的重要指标,本文将不同的燃烧技术与不同的碳捕集装置结合后降低了系统的碳排放率,实现了系统低碳化。

本文研究了利用风电制氧的富氧燃煤电厂低碳能源系统优化配置,在以后的研究工作中,将进一步考虑燃煤电厂富氧燃烧带来的高循环能耗,以及研究如何对各子系统电能进行最优分配。

参考文献

- [1] 彭静,王军,亓富军,等. “双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 153-161.
PENG Jing, WANG Jun, QI Fujun, et al. Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 153-161.
- [2] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37-54.
- [3] 崔杨,邓贵波,曾鹏,等. 计及碳捕集电厂低碳特性的含风电电力系统源-荷多时间尺度调度方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-18[2022-05-07]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210697>.
CUI Yang, DENG Guibo, ZENG Peng, et al. Multi-time scale source-load dispatch method of power system with wind power considering low-carbon characteristics of carbon capture power plant[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-18[2022-05-07]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210697>.
- [4] 邓浩,陈洁,腾扬新,等. 风氢耦合系统能量管理策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 256-263.
DENG Hao, CHEN Jie, TENG Yangxin, et al. Energy management strategy of wind power coupled with hydrogen system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 256-263.
- [5] 李健强,余光正,汤波,等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 11-20.
LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 11-20.
- [6] XU C, KE Y, LI Y, et al. Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 215.
- [7] BOOT-HANDFORD M E, ABANADES J C, ANTHONY E J, et al. Carbon capture and storage update[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(1): 130-189.
- [8] 刘继春,周春燕,高红均,等. 考虑氢能-天然气混合储能的电-气综合能源微网日前经济调度优化[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 170-179.
LIU Jichun, ZHOU Chunyan, GAO Hongjun, et al. A day-ahead economic dispatch optimization model of integrated electricity-natural gas system considering hydrogen-gas energy storage system in microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 170-179.
- [9] ZHANG X, ZHANG Y. Environment-friendly and economical scheduling optimization for integrated energy system considering power-to-gas technology and carbon capture power plant[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276.
- [10] 周任军,肖钧文,唐夏菲,等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 61-67.
ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 61-67.
- [11] LEE W S, KANG J H, LEE J C, et al. Enhancement of energy efficiency by exhaust gas recirculation with oxygen-rich combustion in a natural gas combined cycle with a carbon capture process[J]. Energy, 2020, 200.
- [12] 崔杨,曾鹏,仲悟之,等. 考虑富氧燃烧技术的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 592-608.
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electro-gas-thermal integrated energy system based on oxy-combustion technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 592-608.

- [13] COSTAMAGNA P. Three-pipeline gas grid: a new concept for power-to-gas associated with complete carbon capture and utilization[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229.
- [14] 孙伟卿, 罗静, 张婕. 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 9-18.
SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie. Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15): 9-18.
- [15] ZHOU X, ZHAO Q, ZHANG Y, et al. Integrated energy production unit: an innovative concept and design for energy transition toward low-carbon development[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 7(6): 1133-1139.
- [16] QIAO Z, GUO Q, SUN H, et al. Multi-time period optimized configuration and scheduling of gas storage in gas-fired power plants[J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 924-934.
- [17] 司杨, 陈来军, 陈晓弢, 等. 基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10): 3-10.
SI Yang, CHEN Laijun, CHEN Xiaotao, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10): 3-10.
- [18] 林顺富, 刘持涛, 李东东, 等. 考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(5): 1409-1421.
LIN Shunfu, LIU Chitao, LI Dongdong, et al. Bi-level multiple scenarios collaborative optimization configuration of CCHP regional multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(5): 1409-1421.
- [19] 张鹏成, 徐箭, 孙元章, 等. 氢能驱动下钢铁园区能源系统低碳发展模式[J/OL]. *电力系统自动化*: 1-14 [2022-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220407.0619.002.html>.
ZHANG Pengcheng, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Low-carbon development mode for energy system of iron and steel park driven by hydrogen energy[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*: 1-14 [2022-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220407.0619.002.html>.
- [20] 彭元, 娄素华, 吴耀武, 等. 考虑储液式碳捕集电厂的含风电系统低碳经济调度[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(21): 4508-4516.
PENG Yuan, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Low-carbon economic dispatch of power system with wind power considering solvent-stored carbon capture power plant[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(21): 4508-4516.
- [21] 赵东声, 高忠臣, 刘伟. 碳捕集火电与梯级水电联合优化的低碳节能发电调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(15): 148-155.
ZHAO Dongsheng, GAO Zhongchen, LIU Wei. Low-carbon energy-saving power generation dispatching optimized by carbon capture thermal power and cascade hydropower[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 148-155.
- [22] 马国真, 林毓军, 张泽亚, 等. 计及源荷多重不确定性的综合能源系统鲁棒经济调度方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(20): 43-52.
MA Guozhen, LIN Yujun, ZHANG Zeya, et al. A robust economic dispatch method for an integrated energy system considering multiple uncertainties of source and load[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(20): 43-52.
- [23] 白凯峰, 顾洁, 彭虹桥, 等. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(15): 133-141.
BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(15): 133-141.
- [24] 张艺涵, 徐菁, 李秋燕, 等. 基于密度峰值聚类的电动汽车充电站选址定容方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(5): 132-139.
ZHANG Yihan, XU Jing, LI Qiuyan, et al. An electric vehicle charging station siting and sizing method based on a density peaks clustering algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(5): 132-139.
- [25] 李文杰, 闫世强, 蒋莹, 等. 自适应确定 DBSCAN 算法参数的算法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(5): 1-7, 148.
LI Wenjie, YAN Shiqiang, JIANG Ying, et al. Research on method of self-adaptive determination of DBSCAN algorithm parameters[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(5): 1-7, 148.
- [26] HOU K, SHAO G, WANG H, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 119-125.
- [27] 黄越辉, 曲凯, 李驰, 等. 基于 K-means MCMC 算法的中长期风电时间序列建模方法研究[J]. *电网技术*,

- 2019, 43(7): 2469-2476.
- HUANG Yuehui, QU Kai, LI Chi, et al. Research on modeling method of medium-and long-term wind power time series based on K-means MCMC algorithm[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2469-2476.
- [28] 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.
- [29] 张大波, 朱志鹏, 连帅, 等. 基于多场景变权多目标优化的 UPFC 在风电并网系统中的配置方案研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 638-645.
- ZHANG Dabo, ZHU Zhipeng, LIAN Shuai, et al. Allocation scheme research of UPFC based on multiple scenarios with different weighting coefficients and multi-target optimization in wind power integrated system[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 638-645.
- [30] 张靠社, 冯培基, 张刚, 等. 考虑源荷不确定性的 CCHP 型微网多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 18-27.
- ZHANG Kaoshe, FENG Peiji, ZHANG Gang, et al. Multi-objective optimization scheduling of CCHP-type microgrids considering source-load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 18-27.
- [31] 崔彩艳. 微富氧燃烧方式下氨法脱碳的实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- CUI Caiyan. Experimental study on decarbonization by aqueous ammonia under oxy-enrich combustion[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [32] LI G, LI G, ZHOU M. Model and application of renewable energy accommodation capacity calculation considering utilization level of inter-provincial tie-line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-12.
- [33] ZHU Y, ZHAI R, QI J, et al. Annual performance of solar tower aided coal-fired power generation system[J]. Energy, 2017, 119: 662-674.
- [34] 孙东磊, 李雪亮, 韩学山, 等. 考虑运行方式优化和拓扑校正控制的参考电网优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 92-97.
- SUN Donglei, LI Xueliang, HAN Xueshan, et al. Optimization method for reference network considering operation mode optimization and topology correction control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 92-97.
- [35] 张鹏成, 徐箭, 柯德平, 等. 氢能驱动下钢铁园区能源系统优化配置[J/OL]. 电力系统自动化: 1-13[2022-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220421.1424.005.html>.
- ZHANG Pengcheng, XU Jian, KE Deping, et al. Optimal configuration of energy system in iron and steel park driven by hydrogen energy[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-13[2022-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220421.1424.005.html>.
- [36] 邢晓娜. 600 MW 微富氧燃烧煤粉锅炉技术经济性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- XING Xiaona. Techno-economic analysis of 600 MW air enrichment pulverized-coal fired boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [37] 曹继雷. 氢能支撑的风-燃气耦合低碳微网容量优化配置研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- CAO Jilei. Study on optimal configuration of wind-gas coupling low-carbon microgrid capacity supported by hydrogen energy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.

收稿日期: 2022-05-14; 修回日期: 2022-07-22

作者简介:

张文伟(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为含储能的新能源并网技术; E-mail: 1404055494@qq.com

王维庆(1959—), 男, 通信作者, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大型风力发电机关键部件研制、整机智能控制及检测、继电保护和并网送出技术。E-mail: wwq59@xju.edu.cn

(编辑 许威)