

# 计及风电-负荷不确定性的风氢低碳能源系统 容量优化配置

袁铁江, 曹继雷

(大连理工大学电气工程学院, 大连 116024)

**摘要:** 风电作为最有前景的可再生能源, 氢能作为一种清洁能源载体, 两者的结合将为实现碳中和提供可行方案。为提高系统经济性, 文中在典型风氢耦合系统的基础上引入天然气及碳捕集系统, 未考虑燃料电池发电, 以富氧燃烧技术实现天然气与风电制氢系统的耦合, 提升燃气轮机效率, 降低碳捕集能耗。然后, 提出基于有序聚类算法与  $K$ -means 聚类算法的风电-负荷时序场景缩减方法, 以包含投资、维护、运行以及弃风惩罚成本的期望年化成本最小为目标, 以弃风、碳捕集、储气及功率平衡为约束, 构建风-氢低碳能源系统优化配置模型。最后, 基于 CPLEX 对某地区供能系统进行仿真, 得到系统风电、储气容量及电解槽、燃气轮机功率的最优配置方案, 并结合 Matlab 与 YALMIP 工具包对结果进行灵敏度分析, 为风-氢耦合系统优化配置提供参考。

**关键词:** 风氢耦合; 场景缩减; 综合能源; 优化配置; 碳中和

## Capacity Optimization Allocation of Wind Hydrogen Low-carbon Energy System Considering Wind Power-load Uncertainty

YUAN Tiejia, CAO Jilei

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Wind power is the most promising renewable energy source, and hydrogen energy is a clean energy carrier. The combination of the two will provide a feasible solution for achieving carbon neutrality. In order to improve system economy, this paper introduces natural gas and carbon capture system on the basis of typical wind-hydrogen coupling system. Fuel cell power generation is not considered. Oxygen-enriched combustion technology is used to realize the coupling of natural gas and wind power hydrogen production system, which improves gas turbine efficiency and reduces energy consumption of carbon capture. Then, a wind power-load timing scenario reduction method based on the ordered clustering algorithm and the  $K$ -means clustering algorithm is proposed. The goal is to minimize the expected annualized cost including the cost of investment, maintenance, operation, and wind abandonment penalty. Carbon capture, gas storage, and power balance are taken as constraints, and an optimization configuration model of wind-hydrogen low-carbon energy system is constructed. Finally, the energy supply system in a certain area is simulated based on the CPLEX, the optimization configuration plan of the system wind power, gas storage capacity, electrolytic cell, and gas turbine power is obtained, and the sensitivity analysis of the results is carried out with the combination of Matlab and YALMIP toolkit, which provides references for optimization configuration of a wind-hydrogen coupling system.

**Key words:** wind hydrogen coupling; scenario reduction; integrated energy; optimal allocation; carbon neutralization

## 0 引言

为应对气候变化, 以碳中和为目标的低碳发展模式已成为我国的发展方向<sup>[1]</sup>。作为碳排放的主要

来源, 能源行业将成为实现碳中和的关键。风氢耦合系统利用氢能作为能量载体, 促进可再生能源消纳, 具有显著的低碳效益<sup>[2]</sup>, 有关其框架研究及系统优化配置已成为当前研究热点。

典型风氢耦合发电系统包含风电制氢、储氢、用氢 3 个过程<sup>[2]</sup>。在此基础上, 文献[3]构建了基于氢储能技术的双馈风力发电系统的基本架构, 提高了风电出力的稳定性。文献[4]采用电转气(power to

**基金资助项目:** 国家电网有限公司总部管理科技项目(面向电力系统多时间尺度调节需求的电-热-氢储能匹配模式、运行策略及经济性研究)(5419-202157239A-0-0-00)。

Project supported by State Grid Headquarters Project (Electricity-heat-hydrogen Energy Storage Matching Mode, Operation Strategy and Economic Research for Power System Multi-time Scale Regulation Demand)(5419-202157239A-0-0-00).

gas, P2G)与碳捕集技术,提出电网与氢储能系统及天然气网络的双循环结构;其中,碳捕集方式为从大气中直接捕获  $\text{CO}_2$ , 耗能巨大且投资成本高。文献[5]在综合能源系统中引入富氧燃烧技术,对上述问题有所改善,但其所引用的空分制氧装置(air separation unit, ASU)成本较高。文献[6]基于 P2G 与碳捕集技术提出三管网概念,即建立氧气网、燃气网与碳网,通过网络构建气体循环利用系统,成本较高,不利于经济性达到最优。为此,本文在现有技术及结构基础上,提出风电制氢副产物  $\text{O}_2$  加储氧罐的方式为富氧燃烧碳捕集提供条件,构建风-氢低碳能源系统(wind-hydrogen low carbon energy system, WHLCES),以电能、氢能、天然气为主要能流方式,融合碳捕集与富氧燃烧技术,实现低碳及能量的综合利用,燃料电池由于其成本高、利用率低,因此在风氢耦合系统中会被剔除[7]。

风氢耦合系统包含多种能量,结构复杂,为保证在供能可靠的同时实现效益最大化,需要对其进行优化配置。文献[8]为克服可再生能源的波动性和间歇性,利用天气预报数据提高风氢能源系统优化配置的准确性。文献[9]利用某地区一天的风速、负荷数据,综合考虑经济性与供电可靠性,对系统设备容量进行优化配置。文献[10]根据风电时序特性生成大量场景并结合聚类方法实现场景缩减。文献[11]采用氢气和电池混合储能,构建了离网风氢耦合供氢系统,并对其进行了优化设计。文献[12]构建了外层为综合考虑成本、可靠性与新能源消纳的多目标,内层为微网总运行成本的双层优化配置模型。文献[13]以系统整体利益最大化为目标,兼顾风电消纳与运行经济性。然而,上述研究大多以储氢容量作为优化变量,很少考虑电解副产物氧气的存储与利用;另一方面,风氢耦合系统中风电、电负荷时序场景多样,存在较强的双不确定性。因此,在优化配置过程中需要充分考虑风电-负荷时序场景变化对配置方案的影响。

本文针对上述问题,在 WHLCES 结构基础上,提出一种风电-负荷时序场景缩减方法;然后结合系统各设备出力模型,建立以包含投资成本、维护成本、运行成本以及弃风惩罚成本的期望年化成本最小为目标的系统优化配置模型,分别得出风电、氢储、氧储容量及电解槽、燃气轮机功率。最后通过算例验证富氧燃烧技术对提高 WHLCES 经济效益的有效性,并对系统进行了灵敏度分析。

## 1 风-氢低碳能源系统

### 1.1 系统结构

本文构建的包含碳捕集系统、氢氧存储的 WHLCES 如图 1 所示。风电场是风-氢低碳能源系统的核心供能部分,燃气轮机为辅助供能部分,两者共同为电解制氢设备、电负荷及碳捕集过程供电。电解槽将电能转化为氢能供给氢负荷,氧气供给燃气轮机,以实现燃气轮机富氧燃烧发电,多余氢气和氧气储存在储气罐中,氧气还可通过市场售卖。储氢设备的作用为保证供氢稳定性。在富氧燃烧条件下,燃气轮机排放的高浓度  $\text{CO}_2$  经过膜分离法实现回收利用,捕获的  $\text{CO}_2$  经过存储运输后售卖到市场中,天然气管网与燃气轮机相连,负责给燃气轮机提供燃料。

### 1.2 系统设备出力模型

#### 1.2.1 风电场

风电出力可由装机容量和出力系数的乘积计算,表示为

$$P_w = \mu_w P_{w,r} \quad (1)$$

式中:  $P_w$  为风电场出力;  $\mu_w$  为风电出力系数,表示风电输出功率占额定功率的比例;  $P_{w,r}$  为风电的额定功率。

#### 1.2.2 电解制氢设备

电解槽是电解制氢设备的核心设备,本文假设对电解槽进行了隔热处理,电解槽转化效率在其运行期间保持恒定值。

由于电解槽消耗的水的热能远小于电解消耗的电能,同时反应所需热能可由自身产生的热量供给,在隔热处理下,电解反应本身不需要外界输入热能,也不向外提供热能[14],因此本文忽略电解槽

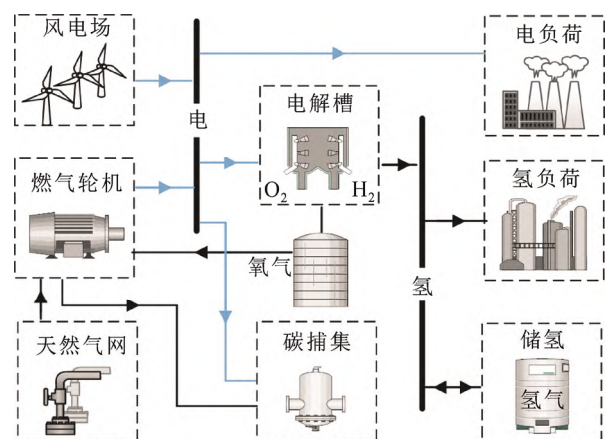


图1 风-氢低碳能源系统

Fig.1 Wind-hydrogen low carbon energy system

所需热能。电解槽出力为

$$r_{ez} = h_{ez} P_{ez} \quad (2)$$

式中:  $r_{ez}$  为电解槽制氢速率;  $h_{ez}$  为电功率与氢流量的转化系数;  $P_{ez}$  表示电解槽输入电功率。

### 1.2.3 碳捕集设备

本文碳捕集方法采用富氧燃烧后碳捕集与膜分离技术, 相比于普通富氧燃烧捕集过程其耗能可减少 35%<sup>[15]</sup>。碳捕集耗能为

$$P_c = \eta_c r_{c,co_2} P_{c,ele} \quad (3)$$

式中:  $P_c$  为碳捕集耗能;  $\eta_c$  为碳捕集率, 取值一般在 90%~95%之间;  $r_{c,co_2}$  表示流入碳捕集设备的 CO<sub>2</sub> 体积;  $P_{c,ele}$  为捕集单位体积 CO<sub>2</sub> 所需的电能。

### 1.2.4 燃气轮机

现阶段燃气轮机的发展发向仍是以更高温、更高效和更低碳为主, 在重型燃气轮机快速发展的同时, 天然气作为一种高效清洁能源, 在我国能源消耗中的比例越来越高。燃气轮机的发电量与天然气消耗量的关系为

$$r_{gt,gas} = \frac{\alpha P_{gt}}{\eta_{gt} Q_{gas}} \quad (4)$$

式中:  $r_{gt,gas}$  表示燃气轮机消耗的天然气流量, m<sup>3</sup>/t;  $\alpha$  为千瓦与千焦的转换系数, 取值为 3 600;  $P_{gt}$  为燃气轮机的发电功率, kW;  $\eta_{gt}$  为燃气轮机的发电效率;  $Q_{gas}$  为天然气燃烧热值, 取值为 33 486.8 kJ/m<sup>3</sup>。

## 2 风电-负荷时序场景缩减方法

风电具有随机性、间歇性和波动性等不确定性, 与负荷存在时序关系。因此, 在对风氢低碳能源系统容量优化配置时, 需要同时考虑风电和负荷的双不确定性。

目前, 在风电-负荷场景提取方面, 连续时序场景提取数据较为庞大, 优化效率较低, 而极端情景提取由于没有考虑风电与负荷之间的时序相关性, 因此在实际中可能不存在提取的场景, 导致优化结果比较保守<sup>[16]</sup>。文献[17]采用改进的  $K$ -means 聚类方法, 通过引入聚类有效性指标确定最佳聚类数, 然后使用传统  $K$ -means 聚类方法实现风电-负荷场景生成。文献[18]采用有序聚类方法, 在连续时间段上对负荷、风电进行分区, 然后生成典型场景。上述文献对风电-负荷时序场景提取起到了积极作用, 但都没有综合考虑场景时序性及风电的随机性和波动性。

本文所提方法包含数据预处理及场景提取两

部分。数据预处理为消除异常或小概率负荷、风电数据。场景提取分为负荷场景提取和风电场景提取。电负荷功率具有明显的季节性、周期性, 采用有序聚类方法可兼顾上述特点。为保证风电、负荷时序性, 本文根据负荷分段时间节点将风电出力标么值分段, 结合  $K$ -means 聚类提取各时段的风电场景。

### 2.1 数据预处理

首先假设全年风电负荷场景样本个数各为  $N$ , 每个样本  $n(n=1, 2, \dots, N)$  有  $T$  个时刻的数据。针对风电、负荷异常数据, 密度聚类可有效发现噪声点并分离, 从而实现消除低概率与异常场景的目的。借鉴文献[19]的参数列表生成方法得到基于密度的噪声应用空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)算法参数列表, 然后通过选取列表中不同  $K$  值下的参数代入 DBSCAN 算法中, 得到噪声点与  $K$  值的关系。当噪声点随  $K$  值增加出现明显不变时, 表示此时的噪声场景离其他场景较远, 确定此时参数为最优参数, 进而得到风电、负荷数据。密度聚类中样本间距离取余弦相似度, 用以区分相似度较差的样本曲线, 具体计算式为

$$D(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 1 - \frac{\mathbf{xy}^T}{\sqrt{\mathbf{xx}^T + \mathbf{yy}^T}} \quad (5)$$

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

### 2.2 基于改进有序聚类的负荷场景提取

首先, 根据数据预处理后的负荷样本数据  $L=\{L_1, L_2, \dots, L_m\}$ , 确定分割点个数  $p$  的范围为  $[1, \sqrt{m}]$  之间的整数<sup>[20]</sup>。然后, 分别选取不同的分割点个数, 以离差平方和最小为目标函数, 离差平方和函数定义如式(6)~式(8)所示, 利用 PSO 算法寻优得到分割点集  $P=\{P_1, P_2, \dots, P_p\}$ , 将样本  $L$  分为  $p+1$  个场景集。最后, 采用改进轮廓系数确定最佳分割点个数, 将被分割后的负荷场景集期望值作为典型负荷场景, 轮廓系数的函数定义如式(8)所示, 其中轮廓系数范围为 $[-1, 1]$ , 其值越大, 聚类效果越好。

$$E = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^k \sum_{x \in X_{i,t}} |x - \mu_{i,t}|^2 \quad (6)$$

$$\mu_{i,t} = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} P_{j,t} \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{b_i - a_i}{\max\{a_i, b_i\}} \quad (8)$$

式中:  $E$  为离差平方和;  $x$  为样本数据;  $k$  为质心样

本个数;  $\mu_{i,t}$  为第  $i$  个质心样本第  $t$  时刻的质心;  $n_i$  为第  $i$  个场景集对应的样本个数;  $P_{ij,t}$  为第  $i$  个场景集中第  $j$  个样本在  $t$  时刻的功率数值;  $m$  是样本个数;  $a_i$  为第  $i$  个样本到其所属的类中其他点的欧式距离平均值;  $b_i$  为第  $i$  个样本到其所属类在时间段上相邻的类中所有点的平均欧式距离最小值。

### 2.3 基于 K-means 聚类的风电场景提取

根据负荷有序聚类得出的  $p$  个时间节点生成风电场景集  $F=\{F_1, F_2, \dots, F_{p+1}\}$ , 以场景  $F_1$  为例, 假设场景  $F_1$  的样本个数为  $f$ , 确定聚类个数范围为  $[2, \sqrt{f}]$ , 采用传统的 K-means 聚类得到不同聚类个数下的风电典型场景。距离计算式为式(6), 再通过式(8)确定最佳聚类数。对每个风电场景集进行聚类得到所有典型风电场景。

## 3 系统优化配置

### 3.1 目标函数

考虑风电-负荷不确定性, 针对风-氢低碳能源系统, 采用概率分析的方法<sup>[21]</sup>, 以最小期望年化成本作为优化目标, 包括投资、维护、运行成本和弃风惩罚成本, 如式(9)、式(10)所示:

$$\min C_p = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (9)$$

$$\begin{cases} C_1 = \sum_{i=1}^I c_{i,inv} c_i \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \\ C_2 = \lambda \sum_{i=1}^I c_{i,inv} c_i \\ C_3 = 365 \sum_{i=1}^s p_i \sum_{t=1}^T (c_g c_{gas}(t) + (c_s + c_t) c_{co_2}(t)) \\ C_4 = 365 \sum_{i=1}^s p_i \sum_{t=1}^T c_{wind}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $C_p$  为期望年化成本;  $C_1$  为系统设备年化投资成本;  $I$  为系统中设备种类个数, 包括燃气轮机、风机、质子交换膜电解槽及储氢/氧罐;  $c_{i,inv}$  为第  $i$  种设备的容量;  $c_i$  为设备单位容量价格;  $r$  为折现率, 取值为 10%; 周期  $T$  取 24 h;  $Y$  表示设备运行周期, 本文设定为 20 a;  $C_2$  为系统维护成本;  $\lambda$  为维护成本系数, 取 0.05;  $C_3$  为年运行成本, 主要包括购买天然气费用、碳存储及运输费用;  $s$  为场景数;  $p_i$  为第  $i$  种场景出现的概率;  $c_g$ 、 $c_s$  和  $c_t$  分别为天然气、碳存储及运输的价格;  $c_{gas}$  和  $c_{co_2}$  为天然气消耗量与碳排放量;  $C_4$  为弃风惩罚成本;  $c_{wind}$  为弃风量。

### 3.2 约束条件

本文所提风-氢耦合系统优化配置模型的约束

主要包括以下几部分:

#### 1) 功率平衡约束

$$P_w(t) + P_{gt,rich}(t) + P_{gt,atm}(t) - P_{w,ab}(t) = P_{hs}(t) + L_h(t) + L_{cle}(t) + P_{c,rich}(t) + P_{c,atm}(t) \quad (11)$$

#### 2) 制氢约束

$$P_{hs}(t) + L_h(t) \geq 0 \quad (12)$$

#### 3) 出力上下限约束:

$$0 \leq P_w(t) \leq P_{w,r} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{gt}(t) \leq P_{gt,r} \quad (14)$$

#### 4) 弃风约束:

$$P_{w,ab}(t) = \delta(t) P_w(t) \quad (15)$$

$$0 \leq \delta(t) \leq 1 \quad (16)$$

式中:  $P_{gt,rich}$ 、 $P_{gt,atm}$ 、 $P_{hs}$ 、 $L_h$ 、 $L_{ele}$  分别为燃气轮机在富氧燃烧和空气燃烧条件下、储氢、氢负荷和电负荷的功率;  $P_{c,rich}$  和  $P_{c,atm}$  表示碳捕集在燃气轮机富氧燃烧和空气燃烧条件下的耗能;  $P_{gt,r}$  为燃气轮机额定功率;  $P_{w,ab}$  为弃风量;  $\delta$  为弃风系数。

#### 5) 储气设备 SOC 约束:

$$S(t) = S(t-1) + \frac{r_{i,s}(t-1)}{r_{i,s,cap}} \quad (17)$$

$$r_{1,s,t} = r_{ez,t} - r_{load,t} \quad (18)$$

$$r_{2,s}(t) = c_{in}(t) r_{in,s}(t) - c_{out}(t) r_{out,s}(t) \quad (19)$$

$$0 \leq c_{in}(t) \leq 1 \quad (20)$$

$$0 \leq c_{out}(t) \leq 1 \quad (21)$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^T r_{i,s}(t) = 0 \quad (23)$$

式中:  $S$  为储氢设备 SOC 值;  $r_{i,s}$  为储氢设备进气流量, 其中  $i=1, 2$  分别代表氢气和氧气;  $r_{i,s,cap}$  为储气容量;  $r_{load}$  为氢负荷流量;  $r_{in,s}$  和  $r_{out,s}$  分别为流入和流出罐体的最大氧气流量;  $c_{in}$  和  $c_{out}$  分别为流入和流出罐体的氧气流量系数;  $S_{min}$  和  $S_{max}$  分别为氢储设备的 SOC 的最小值与最大值。

#### 6) 碳捕集约束:

$$P_c(t) = E_{c,rich} r_{c,rich}(t) + E_{c,atm} r_{c,atm}(t) \quad (24)$$

$$r_{gt,co_2}(t) = r_{gt,rich}(t) - \eta_c r_{c,rich}(t) + r_{gt,atm}(t) - \eta_c r_{c,atm}(t) \quad (25)$$

$$0 \leq r_{c,rich}(t) \leq r_{gt,rich}(t) \quad (26)$$

$$0 \leq r_{c,rich}(t) \leq r_{gt,rich}(t) \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^s p_i \sum_{t=1}^T r_{gt,co_2}(t) / (\sum_{i=1}^s p_i \sum_{t=1}^T (r_{gt,rich}(t) + r_{gt,atm}(t))) \leq \mu_{gt,max} \quad (28)$$

式中:  $E_{c,rich}$  和  $E_{c,rich}$  分别为在燃气轮机富氧燃烧和空气燃烧条件下的单位体积的碳捕集耗能;  $r_{gt,rich}$  和  $r_{gt,atm}$  分别为在燃气轮机富氧燃烧和空气燃烧条



件下所排放的  $CO_2$ ;  $r_{c,rich}$  和  $r_{c,atm}$  分别为在燃气轮机富氧燃烧和空气燃烧条件下  $CO_2$  流入捕获器的量;  $r_{gt,co2}$  为燃气轮机实际碳排放量;  $\mu_{gt,max}$  为碳排放率, 表示碳排放的最大比例。

### 3.3 模型求解

风电-负荷时序场景缩减方法所使用的聚类算法采用 MATLAB 仿真平台。所构造的 WHLCES 优化配置模型为混合整数线性规划问题, 可采用现有的商业求解器 CPLEX 进行求解。本模型求解的测试平台: 英特尔酷睿 i5-8400 CPU 2.80 GHz, 8 GB 内存。软件版本: CPLEX 12.10.0, MATLAB R2016a。模型求解流程图如图 2 所示。

## 4 算例分析

### 4.1 风电-场景典型时序场景

选取某地区 2019 年全年风电出力及电负荷数据为样本, 数据时间间隔为 1 h。将风电数据标幺化后<sup>[22]</sup>的结果如图 3 所示。本文使用 MATLAB R2016a 仿真平台, 采用上述的风电-负荷时序场景缩减方法将 365 d 风电-负荷时序场景聚类为 32 个典型场景, 结果如图 4 所示。

图 4 表示经过有序聚类后的负荷时序场景图。由图 4 可看出, 全年负荷被分为 10 个连续的子场景, 开始时负荷数据较为平稳, 随后曲线形态差异发生明显变化, 波动增大。将图 4 与图 3 对比可以看出,

有序聚类后的整体趋势基本符合电负荷实际时序变化规律。每一子场景为该时间段负荷聚类的结果, 所覆盖的时间段如表 1 所示。

以负荷场景中编号 2 的场景集为例, 聚类算法结果如图 5 所示。通过图 5 可以看出, 风电实际出

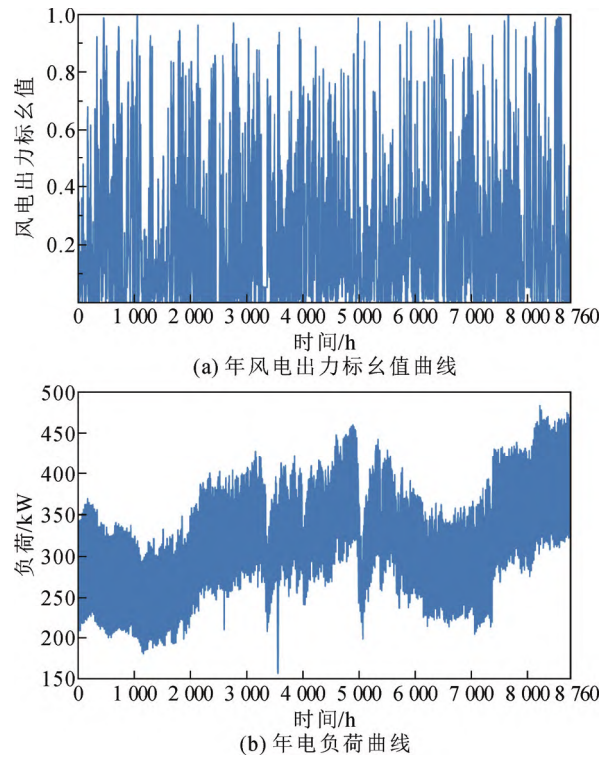


图 3 某地区 2019 年全年风电负荷数据

Fig.3 Annual wind power load data of a region in 2019

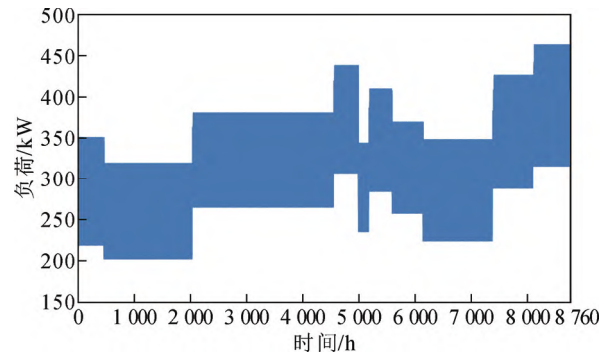


图 4 负荷场景曲线

Fig.4 Load scenario curve

表 1 负荷各场景时序分段情况

Table 1 Time sequence segmentation of load scenarios

场景编号	时间段/h	场景编号	时间段/h
1	1~456	6	5 185~5 592
2	457~2 040	7	5 593~6 120
3	2 041~4 560	8	6 121~7 392
4	4 561~4 992	9	7 393~8 112
5	4 993~5 184	10	8 113~8 760

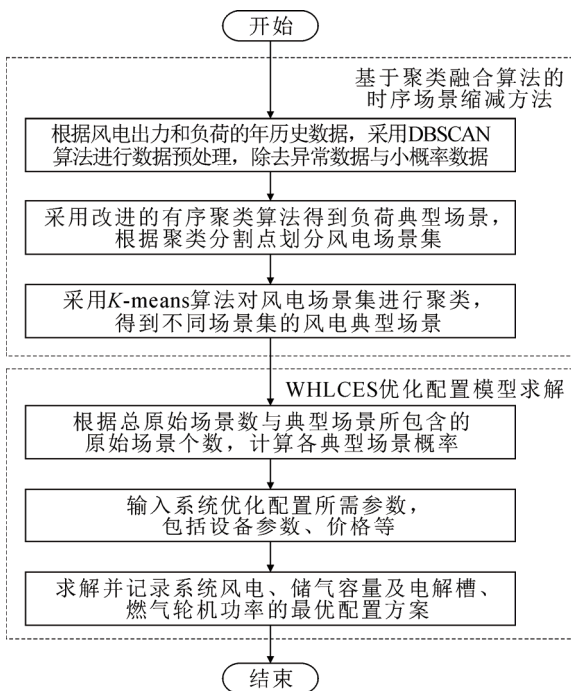


图 2 模型求解流程图

Fig.2 Flow chart for solving optimization model

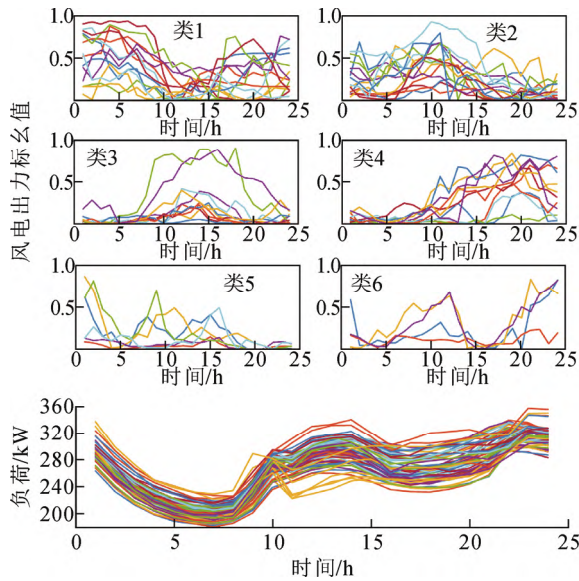


图5 聚类算法结果

Fig.5 Clustering algorithm results

力曲线被聚类成 6 个典型场景，而同类中电负荷或风电出力日变化曲线形态特征相似，说明风电-负荷数据划分较为合理。

#### 4.2 优化结果及分析

在该地区风电和负荷数据基础上，加入氢负荷数据，以煤化工用氢为例，氢能需求为稳定氢气流，数值为 1 000 m<sup>3</sup>/h。结合上述风电-负荷典型时序场景，利用 CPLEX 对某地区供能系统进行仿真，得到系统风电、储气容量及电解槽、燃气轮机功率的最优配置方案。算例优化过程涉及的参数见附录表 A；各场景下储气的充放电功率变化见附录图 A1 和图 A2。

为了说明富氧燃烧对风-氢低碳能源系统的作用，本文对普通空气燃烧和富氧燃烧两种情况下系统的优化配置结果进行对比分析。配置结果如表 2 所示，可以看出与普通空气燃烧相比，采用富氧燃烧技术可以使系统总成本降低 764.73 万元，减少了 13.3%。其中运行成本变化较为明显，降低了 546.4 万元，减少了 20%。而因为储氧设备的加入，增加了额外的投资成本，投资成本整体降低了 125.1 万元，减少了 4.9%。弃风率和能源利用效率变化如图 6 所示，其中弃风率减少 2 个百分点，能源利用效率提高了 9.5 个百分点，即采用富氧燃烧技术在提高系统经济性、能效的同时减少了弃风现象。

对比上述两种方案可知，考虑富氧的燃烧系统供能设备容量和功率减少，能源利用效率提升，这是由于富氧燃烧使燃气轮机烟气中的热量得到了有

表 2 优化配置结果

Table 2 Optimized configuration results

参数	数值	
	不考虑富氧燃烧	考虑富氧燃烧
风电容量/MW	21.2	19.9
储氢容量/m <sup>3</sup>	5 078.7	4 824.9
燃气轮机功率/MW	13.1	11.6
电解槽功率/MW	7.1	6.6
储氧容量/m <sup>3</sup>		9 428.6
投资与维护成本/万元	2 568.1	2 443
运行成本/万元	2 688.3	2 141.9
弃风惩罚/万元	496.7	403.4
总成本/万元	5 753.1	4 988.3

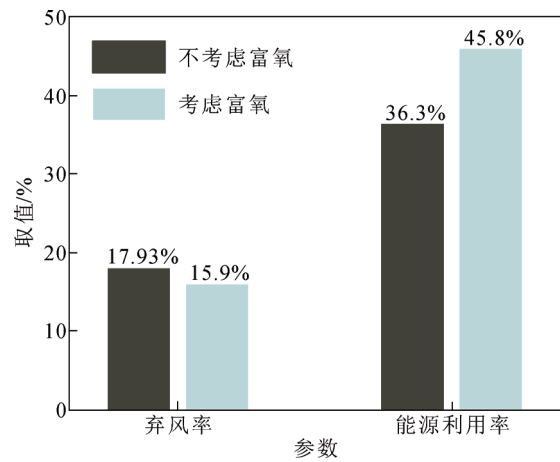


图 6 弃风率与能源利用率

Fig.6 Wind curtailment rate and energy efficiency

效利用，燃气轮机发电效率提升，供给相同负荷时的天然气消耗量减少，系统能耗与运行成本大幅降低。此外，碳捕集过程耗能降低，系统整体供能设备容量减小，投资成本降低，从而降低了系统总成本。此外，风电容量减少，氧气需求增加，有助于减少弃风，降低弃风率。

#### 4.3 灵敏度分析

##### 4.3.1 碳排放率约束对配置结果的影响分析

碳排放率关系到系统减排成本，碳排放率越小，碳捕集耗能越大，风电装机容量与燃气轮机功率越大，天然气消耗量也越大，系统投资和运行成本越高，因此需要研究碳排放率约束对系统优化配置结果的影响。控制碳排放率在 5%~100%之间变化(步长为 5%)时，年化成本和弃风率变化如图 7 所示。

由图 7 可以看出，随着碳排放率的增大，总年化成本逐渐减少，弃风率逐渐降低。这是由于碳处理能耗降低，风电装机容量和燃气轮机功率降低，风电出力减小，从而风电更容易被储氢系统消纳，

弃风现象减少。当碳排放率在 15%~45%之间时, 风电装机容量不变, 燃气轮机功率降低, 天然气消耗减少, 氧气需求降低, 储氧容量减少, 投资成本降低, 运行成本基本保持不变, 在碳排放率为 45%时达到最低值。当碳排放率在 50%~75%之间时, 风电装机容量缓慢增大, 储氢容量增大, 储氧容量减少, 原本被弃掉的风电逐渐被储能系统消纳, 投资成本持续降低, 运行成本开始大于投资成本。当碳排放率在 75%~100%之间时, 风电出力基本被氢负荷、电负荷与储氢系统消纳, 此时弃风率是由于风电出力大于所有负荷总和导致的, 因此弃风成本与弃风率基本不变。

#### 4.3.2 天然气价格对配置结果的影响分析

在上述的风-氢低碳能源系统中, 天然气价格关系到系统的运行成本, 从而影响整个系统的年化总成本。随着天然气需求的变化, 必须考虑天然气价格的波动对风-氢低碳能源系统优化配置的影响。控制天然气价格在本文选取价格的上下 0.5 元之间变化(步长为 0.02)时, 年化成本和弃风率变化如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 随着天然气价格的增长, 系统的年化总成本逐渐增大, 天然气价格在 2.0~2.4 元之间时, 系统投资和运行成本逐渐增大, 由于风电装机容量基本保持不变, 因此燃气轮机供能成本增大, 导致运行成本增大明显。储氢容量增大时, 可以消纳更多的风电, 系统弃风率逐渐降低, 并在天然气价格为 2.38 元时达到最低值。当天然气价格在 2.4~2.76 元之间时, 风电装机容量逐渐增大, 储氢容量逐渐降低, 投资成本基本保持不变, 风电消纳能力降低, 弃风率逐渐增大。当天然气价格在 2.76~3.0 元之间时, 风电装机容量与储氢容量逐渐增大, 燃气轮机功率逐渐降低, 整体趋势为投资成本逐渐增长, 而运行成本逐渐降低。

## 5 结论

1) 本文所提风-氢低碳能源系统结构将风电制氢、燃气轮机及富氧燃烧碳捕集技术相结合, 利用制氢副产物氧气提供富氧燃烧条件, 提升燃气轮机效率, 降低碳捕集能耗, 从而使得系统总成本降低 13.3%, 弃风率下降 2 个百分点, 能源利用效率提高 9.5 个百分点。

2) 本文所提风电-负荷典型时序场景考虑了场景间的时序变化, 较好地描述了负荷的周期性及风

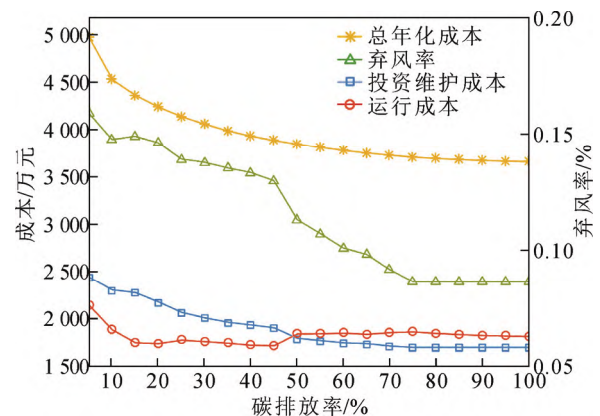


图 7 碳排放率约束对配置结果的影响分析

Fig.7 Analysis of the impact of carbon emission rate constraint on allocation results

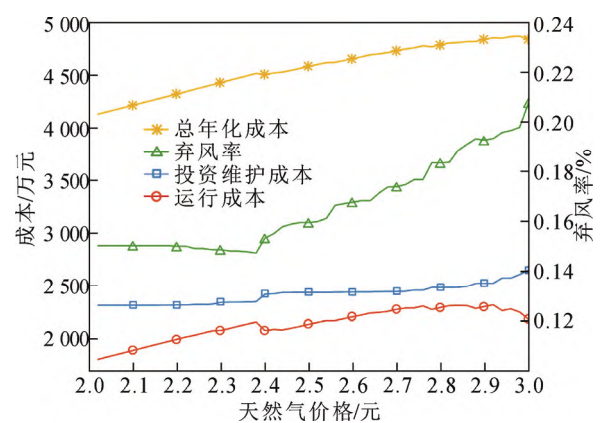


图 8 天然气价格对配置结果的影响分析

Fig.8 Analysis of the impact of natural gas price on allocation results

电的波动性, 结合系统优化配置模型, 有利于提升优化配置计算速度。

3) 在风-氢低碳能源系统中, 弃风率是衡量风电消纳水平的量化指标, 弃风率过大, 弃风现象明显, 风电投资较大; 反之, 弃风率过小, 储能容量投资较大, 两者都会增加成本。为此, 本文通过设定弃风惩罚成本, 得出兼顾减少弃风和经济性的配置方案。此外, 当天然气价格与碳排放率在一定范围内变化时, 配置结果较为稳定。

本文所提策略可为风氢耦合系统优化配置提供一定的理论支持。但本文模型仅考虑了氧存储成本, 在今后的研究中, 将进一步考虑富氧燃烧成本, 以更符合实际工程需要。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。



## 参考文献 References

- [1] 朱彤. “十四五”时期可再生能源发展的关键是体制改革与机制重构[J]. 中国发展观察, 2020(22): 50-54.  
ZHU Tong. The key to the development of renewable energy during the 14th Five Year Plan period is system reform and mechanism reconstruction[J]. China Development Observation, 2020(22): 50-54.
- [2] 邓浩, 陈洁, 焦东东, 等. 风氢耦合并网系统能量管理控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 99-106.  
DENG Hao, CHEN Jie, JIAO Dongdong, et al. Control strategy for energy management of hybrid grid-connected system of wind and hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 99-106.
- [3] 袁铁江, 董小顺, 张增强, 等. 基于氢储能技术的双馈风力发电系统基本架构及其建模[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2100-2110.  
YUAN Tiejia, DONG Xiaoshun, ZHANG Zengqiang, et al. Architecture and modeling of doubly-fed wind power generation system based on hydrogen energy storage technology[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2100-2110.
- [4] 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): 170-178.  
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): 170-178.
- [5] 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): 592-607.  
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): 592-607.
- [6] 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: 113739.
- [7] DENG Z H, JIANG Y W. Optimal sizing of wind-hydrogen system considering hydrogen demand and trading modes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(20): 11527-11537.
- [8] ZHANG W P, MALEKI A, ROSEN M A, et al. Sizing a stand-alone solar-wind-hydrogen energy system using weather forecasting and a hybrid search optimization algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 180: 609-621.
- [9] 马榕谷, 陈洁, 赵军超, 等. 非并网风氢互补系统的容量多目标优化[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 422-429.  
MA Ronggu, CHEN Jie, ZHAO Junchao, et al. Multi-objective optimization for capacity of non-grid-connected wind/hydrogen hybrid power system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(2): 422-429.
- [10] 蔡霖霖, 徐青山, 袁晓冬, 等. 基于风电消纳时序场景的电池储能系统配置策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 993-1001.  
CAI Jilin, XU Qingshan, YUAN Xiaodong, et al. Configuration strategy of large-scale battery storage system orienting wind power consumption based on temporal scenarios[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 993-1001.
- [11] YANG G M, JIANG Y W, YOU S. Planning and operation of a hydrogen supply chain network based on the off-grid wind-hydrogen coupling system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(41): 20721-20739.
- [12] 赵冬梅, 夏轩, 陶然. 含电转气的热电联产微网/热综合储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 46-54.  
ZHAO Dongmei, XIA Xuan, TAO Ran. Optimal configuration of electric/thermal integrated energy storage for combined heat and power microgrid with power to gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 46-54.
- [13] 魏繁荣, 随权, 林湘宁, 等. 考虑制氢设备效率特性的煤风氢能源网调度优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1428-1439.  
WEI Fanrong, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Energy control scheduling optimization strategy for coal-wind-hydrogen energy grid under consideration of the efficiency features of hydrogen production equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1428-1439.
- [14] NI M, LEUNG M K H, LEUNG D Y C. Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(10): 2748-2756.
- [15] FAVRE E, BOUNACEUR R, ROIZARD D. A hybrid process combining oxygen enriched air combustion and membrane separation for post-combustion carbon dioxide capture[J]. Separation and Purification Technology, 2009, 68(1): 30-36.
- [16] 洪绍云, 程浩忠, 曾平良, 等. 基于相关场景聚类的发输电联合扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 71-76, 92.  
HONG Shaoyun, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Coordinated generation and transmission expansion planning with clusters of correlative scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 71-76, 92.
- [17] 丁明, 解蛟龙, 刘新宇, 等. 面向风电接纳能力评价的风资源/负荷典型场景集生成方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4064-4071.  
DING Ming, XIE Jiaolong, LIU Xinyu, et al. The generation method and application of wind resources/load typical scenario set for evaluation of wind power grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4064-4071.
- [18] 刘洁颖, 刘俊勇, 黄媛, 等. 基于面板数据有序聚类的主动配电网规划场景降维技术[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1132-1138.  
LIU Jieying, LIU Junyong, HUANG Yuan, et al. Scene dimensionality reduction technology in active power distribution network planning based on orderly clustering of panel data[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1132-1138.
- [19] 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.
- [20] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 风电储能混合系统的联合调度模型及求解[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 10-17.  
WU Xiong, WANG Xiuli, LI Jun, et al. A joint operation model and solution for hybrid wind energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 10-17.
- [21] KIM M, RAMAKRISHNA R S. New indices for cluster validity assessment[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(15): 2353-2363.
- [22] 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.



袁铁江

1975—, 男, 博士(后), 教授, 博导  
主要从事氢能与电力、化石能源集成技术, 电力储能方面的研究工作  
E-mail: ytj1975@dlut.edu.cn

YUAN Tiejia  
Post-doctorate  
Professor



曹继雷

Corresponding author

曹继雷(通信作者)

1994—, 男, 硕士生  
研究方向为风氢耦合系统容量优化配置  
E-mail: cjl\_9012@mail.dlut.edu.cn

收稿日期 2021-03-08 修回日期 2021-09-02 编辑 何秋萍