

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.009

考虑氢储能的多目标综合能源优化配置方案研究

孙靓雨, 林泽源, 李 伟
(山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013)

摘要: 针对可再生能源大规模并网带来的能源消纳需求,电制氢技术因其可将电能清洁高效地转换为氢能储存的特性,提供了一种有效的能源消纳方案。文中旨在研究考虑氢储能的多目标综合能源优化配置方案,首先提出包含可再生能源发电、电制氢、储能等环节的能源框架,进一步构建以投资成本低、可再生能源机组的弃风弃光量小和碳排放量低为目标的多目标调度模型,最后通过小生境粒子群算法在多个目标之间寻找最优解集。仿真结果表明,本方法可以得到系统投资成本低、可再生能源利用率高和碳排放量低的配置方案,以推动能源结构绿色转型。

关键词: 多目标优化调度; 小生境粒子群算法; 电解制氢; 可再生能源发电

Research on Multi-objective Comprehensive Energy Optimization Configuration Scheme Considering Hydrogen Storage

SUN Jingyu, LIN Zeyuan, LI Wei

(Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: In view of the energy consumption demand brought about by the large-scale grid connection of renewable energy, Hydrogen production technology provides an effective energy consumption solution due to its ability to convert electrical energy into Hydrogen energy storage in a clean and efficient manner. This paper aims to study the multi-objective energy configuration scheme for the consumption of renewable energy by electric Hydrogen production. Firstly, an energy framework including renewable energy generation, electric Hydrogen production and energy storage is proposed. Furthermore, a multi-objective scheduling model with the goals of low investment cost, small wind and light waste from renewable energy units and low Carbon emissions is constructed. Finally, the optimal solution set is searched among multiple objectives by using the niche particle swarm algorithm. The simulation results show that this method can obtain configuration schemes with low system investment cost, high renewable energy utilization rate and low Carbon emissions in order to promote the green transformation of energy structure.

Key words: multi-objective optimal scheduling; niche particle swarm optimization; electrolytic Hydrogen production; renewable energy generation

0 引言

双碳背景下,风电光伏等可再生能源占比逐步提高,其出力的随机性和不确定性可辅助以可调节资源共同调度^[1-2]。电转气技术(P2G)将气体能源系统和电力系统协同调度实现对电能的实时调节^[3-4]。通过平衡电力供需、提高可再生能源的消纳等方

式,P2G技术有助于提高电网的稳定性和可靠性,推动能源结构的优化和升级^[5-8]。P2G包括电转氢气和电转天然气两种类型,氢气绿色高效易于存储,还可作为燃料发电,与可再生能源发电补充构建多种能源协同调度的微电网。

在含氢能源系统中,如何提供经济低碳的调度方案和高效可靠的调度算法是研究的热点。文[9]

通过降低电氢系统预测误差带来的影响来优化模型,文[10-13]侧重于电—气相互耦合后以系统总成本最低为目标,未考虑解决能源消纳问题后,可再生能源发电占比的提高产生了极大的碳减排价值^[14-15]。

在对包含多个能源子系统的微网进行调度时,往往需要研究多目标优化问题,目标数的增加提高了求解难度,同时增加了平衡多目标算法收敛性和多样性的难度,因此,多目标往往不能同时达到最优,甚至求解失败^[16-18]。文[19]以通过引入绿证交易机制,构建含氢综合能源系统以总运行成本最小为目标的模型,以此兼顾低碳和经济双目标。文[20]以系统收益最大、碳排放量最小和不确定性风险成本最小为目标,通过将模型转换成半定规划问题简化三目标模型。文[21]利用小生境粒子群算法求解以检修成本和期望缺供电量最小的双目标优化模型。文[22]利用自适应小生境遗传算法以经济,环保为多目标优化调度模型。因此,多目标问题需要寻求合适的解决方案来降低其求解难度。

综上,文中建立高比例可再生能源发电模型,通过电转气技术协同调度电能和氢能,利用清洁高效的氢气作为与电能相耦合的气体能源,消纳过剩的可再生能源,并在发电不足时补充电能缺口。对能源系统内多个机组进行灵活调度,使得系统成本降低、新能源机组的弃风弃光量减小和碳排放量降低,并利用小生境粒子群多目标算法求解,验证所提方法的有效性。

1 考虑氢储能的综合能源系统结构

考虑电制氢消纳的可再生能源系统由风力、光伏发电机组、火电机组、氢能系统、储能系统、以及用电负荷组成,首先需要建立各机组的调度模型。

1.1 研究框架

以风电、光伏为主,火电机组辅助调节的高比例可再生能源发电系统,在风光发电过剩时,为减少弃风弃光量,利用电解制氢消纳过剩的电能,同时辅之以传统储能系统作为补充,有效就地消纳可再生能源发电。在风光发电不足时,氢气作为燃料燃烧发电,储能向系统放电,火电机组发电。火电在系统中起到能源支撑作用,在可再生能源发电不足时采取火力发电,有效减少二氧化碳的排放,提高系统绿电占比,构建的考虑氢储能的综合能源系统运行框架见图1。

1.2 风电模型

风电机组发电模型可表示为^[23]

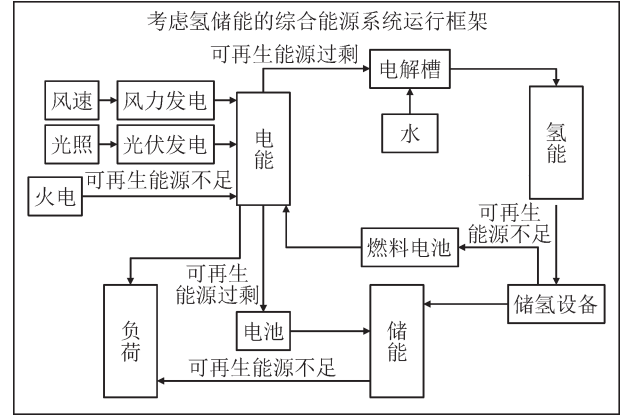


图1 考虑氢储能的综合能源系统运行框架

Fig. 1 A comprehensive energy system operation framework considering Hydrogen storage

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

式(1)中: P_w 表示风电机组实际发电功率; μ_w 表示风电出力系数; $P_{w, N}$ 表示风电机组额定发电功率。

1.3 光伏模型

光伏发电模型可表示为

$$P_{PV} = P_{PV, N} f_{PV} \left(\frac{G_t}{G_{ref}} \right) [1 + \alpha(T_t - T_{ref})] \quad (2)$$

式(2)中: P_{PV} 表示光伏机组实际发电功率; f_{PV} 表示光伏发电效率; $P_{PV, N}$ 表示光伏机组额定发电功率; G_t 表示实际光照强度; G_{ref} 表示参照光照强度; α 表示温度系数; T_t 表示光伏机组实际温度; T_{ref} 表示光伏机组参考温度。

1.4 电解模型

通过电解槽将水电解产生氢气,氢气的制备受到外加电流大小,电解池的面积影响。制氢率为

$$\begin{cases} N(H) = \frac{(E - E_0)NA}{2R_A F} \\ E = \frac{P_H}{I} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: E 为电解反应实际电压; E_0 为标准状态下可逆电动势; $N(H)$ 为制氢率; N 为电池量; A 为电解池电极面积; R_A 为面积比电阻; F 为法拉第常数; P_H 为电解水的功率; I 表示电流。

电解水制氢不会受到原料的制约,制备过程灵活可控。利用同一制氢设备制取氢气时,其电池量、电解池面积、电阻和功率均可做固定值;为了简化电解制氢环节,假设电解槽在运行过程中效率不变,并且不考虑储存设备容量的限制,将制氢率简化,在制氢装置中,电解水产生氢气,输入功率和氢气产出之间的关系为

$$P_H = \eta_H Q_H \quad (4)$$

式(4)中: P_H 为电解水的实际功率; Q_H 为单位输入功率时产生的氢气量, Nm^3 ; η_H 为单位输入功率下产氢的效率。

对于电解质氢环节,碱性电解槽和质子交换膜电解槽方式的制氢成本的主要运行成本包括用电成本、电解和储运设备折旧成本^[24]。电力成本取决于电力市场价格。电解制氢需要消耗水来制备氢气,因此还受到用水量影响;将设备折旧成本根据使用年限作为固定成本平摊到单位氢气的价格上。将单位制氢成本可以描述为

$$C_H = C_E \frac{P_H \cdot t}{\eta_H} + C_{EA, H} + C_{WA} \cdot E_{WA} \quad (5)$$

式(5)中: C_H 为制氢单位电价; $C_{EA, H}$ 为制氢设备单位均摊成本; C_{WA} 为水价; E_{WA} 为每单位氢耗水量。为了提高可再生能源的利用率,最大程度的减少弃风弃光量,未来还可利用价格调控机制,对电价进行分级,利用弃风弃光来制备氢气时成本最低。

1.5 氢燃料模型

氢气作为气体储存,建立氢燃料电池发电模型,燃料电池输出电压为

$$U(H) = N[U_0 + f(T, X)] - RI \quad (6)$$

式(6)中: $U(H)$ 为燃料电池输出电压; N 为电池量; U_0 为开路电压; $f(T, X)$ 为电池运行生热对电压的影响函数; T 为电池温度, K ; X 为气体摩尔数; R 为燃料电池电阻; I 表示电流。

燃料电池氢气消耗和输出功率之间的关系为

$$P_E = \eta_E Q_E \quad (7)$$

式(7)中: P_E 为氢燃料电池发电功率; η_E 为消耗单位氢气输出功率的效率; Q_E 为单位输出功率时消耗的氢气量。

氢燃料电池的发电成本为

$$C_{H, FC} = C_E \frac{P_E \cdot t}{\eta_E} + c_{H, FC} \quad (8)$$

式(8)中: $C_{H, FC}$ 为氢燃料电池的单位发电成本; P_E 为氢燃料电池发电功率; η_E 为消耗单位氢气输出功率的效率; $c_{H, FC}$ 为制氢设备单位均摊成本。

1.6 储能电池模型

建立可调节的储能电池模型

$$P_{B, t} = x_t P_{B, N} \quad (9)$$

式(9)中: $P_{B, t}$ 为储能在 t 时刻的工作功率; x_t 为在 t 时刻的工作状态,值为0时表示停机,1时表示开机; $P_{B, N}$ 为储能电池的额定功率。

储能充放电模型

$$\begin{cases} P_{B, t} > 0 & \text{储能从系统充电} \\ P_{B, t} < 0 & \text{储能向系统放电} \end{cases} \quad (10)$$

储能电池荷电状态为

$$S_{B, t}^{soc} = S_{B, t-1}^{soc} + \frac{\Delta t}{E_B} \left(\mu_c P_c + \frac{P_d}{\mu_d} \right) \quad (11)$$

式(11)中: $S_{B, t}^{soc}$ 、 $S_{B, t-1}^{soc}$ 分别表示储能电池在 t 和 $t-1$ 时刻的荷电状态; μ_c 、 μ_d 分别为储能电池的充、放电效率; P_c 和 P_d 分别为储能电池充电功率和放电功率; Δt 为调度时间间隔; E_B 为电池容量。

储能电池的运行成本为

$$C_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{B, i} C_e^i \quad (12)$$

式(12)中: C_B 为单个储能电池的运行成本; C_e^i 为 i 时刻的电价。

1.7 火电模型

在可再生能源系统中,火电机组从传统的提供电量转变为提供调节功能,可再生能源发电小于用电负荷耗电量时,投入火力发电机组,火力发电机组产生二氧化碳排放。

火电机组单位发电碳排放量为

$$D_{nC} = \delta P_T \quad (13)$$

式(13)中: D_{nC} 为火电机组单位发电碳排放量; δ 表示碳排放系数; P_T 表示火电机组发电功率。

2 考虑氢储能的多目标综合能源优化调度模型

为了协调经济性、环境、能源等多方面利益因素,针对考虑氢储能的多目标综合能源优化调度模型,构建多目标函数。调度对象包含可再生能源发电以及火电机组经济模型和出力模型、氢能源系统的电解制氢模型和发电模型、储能电池的充放电模型,共同构建低成本、低碳化、清洁化的联合调度系统模型。

2.1 目标函数

为了协调经济、环境、能源等多方面利益因素,针对考虑电制氢消纳可再生能源的多目标能源调度系统,构建多目标优化调度模型。从经济、环境和能源的利用率上多方考虑,希望系统在运行时,实现各机组的经济成本最小、碳排放最低、弃风弃光量最少。

系统运行时的经济成本主要包括火电、风电以及光伏机组的发电成本,电解制氢或氢燃料电池发电成本,储能充放电成本。 W 为运行成本之和

$$\min W = n_G C_G + n_W C_W + n_{PV} C_{PV} + n_B C_B + n_H C_H + n_{H, FC} C_{H, FC} \quad (14)$$

式(14)中: n_G 、 n_W 、 n_{PV} 、 n_B 、 n_H 、 $n_{H, FC}$ 分别表示火电、风电、光伏、储能、电解制氢、氢燃料电池参与系统运行的机组数目; C_G 、 C_W 、 C_{PV} 、 C_B 、 C_H 、 $C_{H, FC}$ 分别表示火电、风电、光伏、储能、电解制氢、氢燃料电池参与系统运行时的单位运行成本。

火电机组运行成本计及火电机组建设、运行、退役的单位发电成本与单位发电燃料成本有关

$$C_T = C_{E, T} + C_{A, T} + C_{fuel} \quad (15)$$

式(15)中: C_{fuel} 为火电机组发电的燃料成本; $C_{E, T}$ 、 $C_{A, T}$ 分别为火电机组设备成本和火电机组运维成本。其中

$$C_{fuel} = \sum_{i=1}^n a_i P_G^2 + b_i P_G + c_i \quad (16)$$

式(16)中: P_G 为常规火电机组的有功出力; a_i 、 b_i 、 c_i 为燃料成本系数。

为了得到更为低碳的调度方案, 模型引入碳交易机制, 以碳排放带来的经济成本衡量, 包括碳交易、碳处理成本。

碳交易时, 若碳排放低于额定的碳排额度, 碳交易成本为负数, 获得碳交易收益。可再生能源为系统增加部分碳排放额, 碳交易成本为

$$C_n = \gamma [n_G (D_{nG} - D_n) - n_{PV} D_{PV} - n_W D_W] \quad (17)$$

式(17)中: C_n 表示碳交易成本; γ 表示碳交易价格; n_G 、 n_{PV} 、 n_W 分别为火电机组、光伏机组、风电机组数量; D_n 、 D_{PV} 、 D_W 分别表示火电机组、光伏机组、风电机组碳排放额度。

碳处理成本包含碳捕集和碳处理设备的运行成本

$$C_c = m P_{CCS} + n P_C \quad (18)$$

式(18)中: C_c 表示碳处理成本; P_{CCS} 表示碳捕集设备的输出功率; P_C 表示碳转化处理设备的功率; m 和 n 分别表示碳捕集设备和碳转化处理设备的单位功率运行成本。

在碳交易机制下, 系统总碳排放成本为碳交易成本与碳捕集和碳处理成本之和。为了使系统的碳排放量降低, 制定碳排放成本最小化目标

$$\min C_{CO2} = C_n + C_c \quad (19)$$

式(19)中, C_{CO2} 表示碳排放总成本。

当风电光伏出力在电网的供电谷时期, 可以依靠制氢和储能进行消纳, 若超出二者储能能力范围, 将产生弃风弃光现象; 为了尽可能在系统运行时充分利用新能源发电, 设定系统弃能成本最小目标

$$\min f_Q = C_{Q, W} + C_{Q, PV} \quad (20)$$

式(20)中: f_Q 表示弃能成本; $C_{Q, W}$ 表示弃风成本; $C_{Q, PV}$ 表示弃光成本。

将系统的经济成本和弃风弃光成本合并计算, 原有的三目标问题简化为双目标问题。

2.2 约束条件

由于调度系统包含多个组成部分, 约束条件较多, 主要有等式约束和不等式约束两类。

2.2.1 功率平衡约束

$$\sum_{n_G} P_G + \sum_{n_{PV}} P_{PV, T} + \sum_{n_W} P_{W, T} + \sum_{n_E} P_E = P_L + P_D + \sum_{n_H} P_H + \sum_{n_B} P_B \quad (21)$$

式(21)中: P_L 为负荷功率; P_D 为网络损耗; $\sum_{n_B} P_B > 0$ 为储能从系统吸收电能, 反之向系统供电。

2.2.2 机组出力和爬坡约束

$$P_{Gi}^{\min} I_{Gi} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} I_{Gi} \quad (22)$$

$$-RD_{Gi, t} \leq P_{Gi, t} - P_{Gi, t-1} \leq RU_{Gi, t} \quad (23)$$

式(22)、(23)中, $P_{Gi}^{\max}$ 、 $P_{Gi}^{\min}$ 、 $RU_{Gi, t}$ 和 $RD_{Gi, t}$ 分别为机组有功出力和爬坡速率上下限。

2.2.3 氢能系统的储氢和出力约束

$$0 \leq Q_E \leq Q_{S, \max} \quad (24)$$

式(24)中: Q_E 为单位输出功率时消耗的氢气量; $Q_{S, \max}$ 为氢气储存装置的氧气储量。

2.2.4 储能电池容量约束

$$0.2 \leq S_{B, t}^{\text{soc}} \leq 1 \quad (25)$$

设置电池荷电量不小于20%, 防止电池过度放电。

2.2.5 储能电池状态约束

$$P_c \times P_d = 0 \quad (26)$$

储能电池不可同时为充电状态和放电状态。

2.2.6 氢燃料电池的充放电功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{H, FC}^c \leq P_{H, FC}^{c, \max} \\ 0 \leq P_{H, FC}^d \leq P_{H, FC}^{d, \max} \end{cases} \quad (27)$$

式(27)中: $P_{H, FC}^c$ 为氢燃料电池充电功率; $P_{H, FC}^{c, \max}$ 表示氢燃料电池充电功率上限; $P_{H, FC}^d$ 表示氢燃料电池放电功率; $P_{H, FC}^{d, \max}$ 表示氢燃料电池放电功率上限。

2.3 运行策略

采用如下运行策略对上述模型进行分析。

1) 在1 h的时间周期内, 当可再生能源发电大于等于负荷需求时, 火电机组不启动, 电解制氢和储能电池所需要的电能只来源于可再生能源发电。即

$$\sum_{n_{PV}} P_{PV, T} + \sum_{n_W} P_{W, T} - P_L - P_D \geq 0 \quad (28)$$

此时火电机组和储能电池向系统出力为0, 氢

燃料电池向系统出力为0。

$$\begin{cases} \sum_{n_G} P_G + \sum_{n_E} P_E = 0 \\ \sum_{n_B} P_B > 0 \end{cases} \quad (29)$$

此时,火电机组不启动,碳排放为零,碳排放成本为0。

2)在1 h的时间周期内,当可再生能源发电小于负荷需求时,不限制火电机组和氢燃料电池运行,储能电池可向系统放电,使系统达到功率平衡,各机组出力情况受目标函数影响。

3)为避免机组的频繁启停,在相邻的时间周期内,若运行方式在以上两种模式下切换,设置机组的最小持续启动时间^[24]

$$\sum_t^{t+T^{\text{on}}-1} u_t \geq T^{\text{on}} y_t \quad (30)$$

式(30)中: y_t 表示机组在 t 时刻的启停状况,1表示启动,0表示停止; u_t 表示机组在 t 时刻的运行状况,1表示启动,0表示停止; T^{on} 表示为机组的最小连续运行时间。

2.4 小生境粒子群算法

小生境是一个生物学概念,指生物在其进化过程中一般与自己相同的物种生活在一起,共同繁衍后代^[25]。运用到优化上的操作是:当两个个体的相似度小于为小生境距离,由于存在竞争关系,所以惩罚其中适应值较小的个体。将小生境技术与传统的粒子群算法相结合,具体方法如下。

1)小生境群体的划分

$$D_{ij} = |X_i - X_j| \quad (31)$$

式(31)中: X_i 、 X_j 表示小生境群体中的粒子;

D_{ij} 表示两个粒子之前的距离,给定参数 δ_m ,当 $D_{ij} < \delta_m$,则 X_j 进入以 X_i 为中心的小生境。

2)利用粒子群算法更新小生境中粒子的位置和速度,通过迭代寻优,搜索粒子本身最优位置 P_i 和种群最优位置 G_i ,通过若干次迭代,找到符合要求的适应值。式(32)、(33)为粒子群算法的两个标准表达式:

$$v_{i(t+1)} = \omega \times v_i + C_1 \times \text{rand}() \times [(P_i - X_{i(t)}) + C_2 \times \text{rand}() \times [G_i - X_{i(t)}] \quad (32)$$

$$X_{i(t+1)} = X_{i(t)} + v_{i(t+1)} \quad (33)$$

式(32)、(33)中: ω 为惯性系数; $v_{i(t)}$ 是粒子 t 时刻的速度; $\text{rand}() \in U(0, 1)$; $X_{i(t)}$ 粒子 t 时刻的位置; C_1 和 C_2 是常数。

利用小生境技术将种群个体按照距离进行划分,再通过粒子群算法迭代寻优,直到满足条件为止,从而保证了种群的多样性。小生境技术的介入将粒子群算法中的种群分成相互独立的小生境,在每个小生境中寻优,从而保证了解集的多样性。

3 算例分析

为了验证文中所提调度方法的有效性,利用小生境粒子群算法对多目标问题进行求解,将运行成本和弃电成本合并,三目标问题简化为双目标问题。

选取 IEEE39 节点新英格兰模型为基础改进进行仿真^[26],包含 10 个火电机组,分别表示为 G_1 – G_{10} ,发电机组运行参数见表 1。在改进的新英格兰模型的基础上,增加风电机组、光伏机组、氢燃料电池组、电解制氢机组、储能机组和负荷,构建仿真模型。模型的运行参数见表 2。

表 1 火电机组运行参数

Table 1 Operation parameters of thermal power unit

机组	最小 出力/MW	最大 出力/MW	开机 时间/h	停机 时间/h	a_i / (美元·MW ⁻²)	b_i / (美元·MW ⁻¹)	c_i / 美元	启动 费用/美元	停机 费用/美元
G_1	150	455	8	0	0.000 48	16.19	1 000	280	9 000
G_2	150	455	8	0	0.000 31	17.26	970	280	10 000
G_3	20	130	0	5	0.002 00	16.60	700	280	1 100
G_4	20	130	0	5	0.002 11	16.50	680	280	1 120
G_5	25	162	0	6	0.003 98	19.70	450	280	1 800
G_6	20	80	0	3	0.007 12	22.26	370	280	340
G_7	25	85	0	3	0.007 90	27.74	480	280	520
G_8	10	55	0	1	0.004 13	25.92	660	280	60
G_9	10	55	0	1	0.002 22	27.27	665	280	60
G_{10}	10	55	0	1	0.001 73	27.79	670	280	60

表2 系统运行参数

Table 2 Operation parameters

参数	取值	参数	取值
火电机组碳排放系数/(t·MWh ⁻¹)	1.15	碳排放价格/(美元·t ⁻¹)	45
弃风惩罚成本系数 $R_{Q,w}$ /(美元·MWh ⁻¹)	40	碳排放额度	0.87
弃光惩罚成本系数 $R_{Q,pv}$ /(美元·MWh ⁻¹)	40	制氢设备单位均摊成本 $C_{EA,H}$ /美元	0.66
氢燃料电池效率 η_E	0.65	产氢效率 η_H	0.55

选取风光典型日数据作为风电光伏机组的出力值见图2,根据历史负荷数据得到负荷曲线,设定电池储能的初始电量,启停时间等初始数据。设定功率约束上下限,使变量范围不超出设置区间。

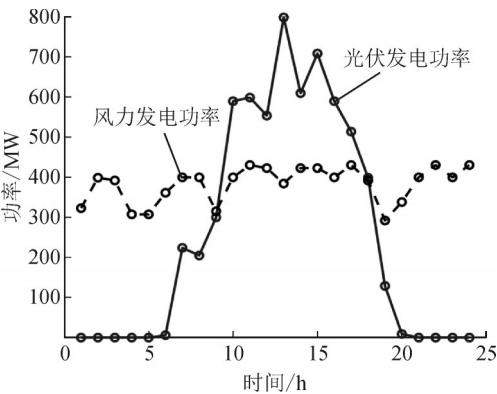


图2 风电光伏发电功率

Fig. 2 Wind power photovoltaic power generation

各机组出力情况见图3,功率取正值代表发出电能,负值代表消耗电能,可再生能源发电占比较高,在功率过剩时需要通过电制氢和储能来消纳过剩的电量。

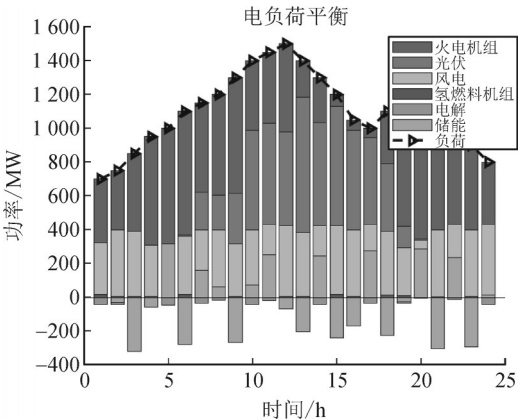


图3 机组出力

Fig. 3 Output of each unit

储能电池的实时调度情况见图4、5。

电能和氢能、储能的相互耦合为新能源高占比情况下波动性提供解决方案。此时迭代获得最优解集见图6。

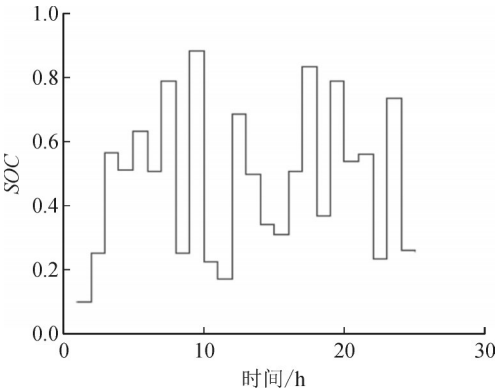


图4 储能变化情况

Fig. 4 Energy storage change

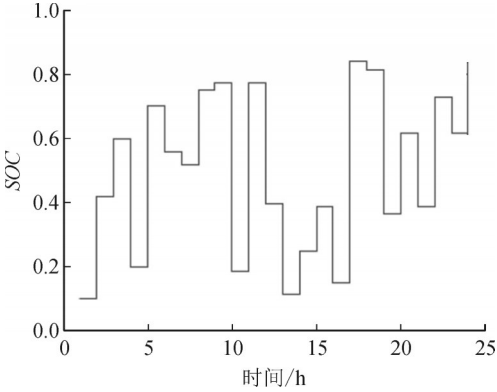


图5 储氢变化情况

Fig. 5 H₂ storage change

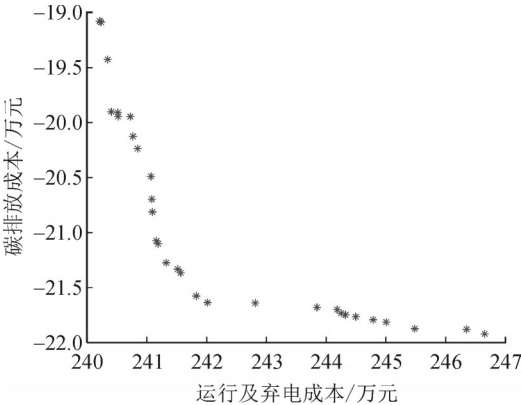


图6 Pareto解集

Fig. 6 Pareto solutionset

从图6中可以看出,在碳排放成本、系统运行与弃电成本相互博弈的过程中,碳排放成本小于0,表明可再生能源占比高使得碳交易市场处于盈利状

态,随着碳交易盈利的增加,系统运行成本和弃电成本增加,说明风电、光伏成本高于火电机组,因此,风电、光伏能源需要进一步降低运行成本来达到经济性、低碳性的统一,得以进一步发展。

4 结语

文中针对可再生能源的高效利用与电制氢技术的融合进行了分析与探讨,旨在提出一种经济、低碳、弃风弃光量低的含氢可再生能源系统的能源配置方案。通过构建综合模型,分析了不同能源之间的互补性,以及电制氢技术在其中的作用。

研究结果表明,电制氢技术作为一种灵活的能源转换方式,能够有效地调节高比例可再生能源系统中的供需关系,在可再生能源出力过剩时,通过制氢实现能量转换,可以在需要时通过氢燃料电池等方式重新将氢能转化为电能,从而提高高比例可再生能源系统的稳定性。

此外,多目标能源配置方案考虑了经济效益和环境效益的最大化。通过电制氢技术的引入和优化能源结构,有助于实现能源消费的绿色转型。

文中研究时简化了氢气制备过程中原料和储存设备等限制因素,需要在接下来的研究中进一步探讨和解决。未来,将继续深化这一领域的研究,为能源系统的优化升级和绿色转型做出贡献。

参考文献:

- [1] 唐程辉,张凡,张宁,等.考虑可再生能源随机性和需求响应的电力系统日前经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(15):18-25.
TANG Chenghui, ZHANG Fan, ZHANG Ning, et al. Day-ahead economic dispatch of power systems considering renewable energy stochasticity and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 18-25.
- [2] 白建华,辛颂旭,刘俊,等.中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3699-3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3699-3705.
- [3] 张儒峰,姜涛,李国庆,等.考虑电转气消纳风电的电—气综合能源系统双层优化调度[J].中国电机工程学报,2018,38(19):5668-5678.
ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19):5668-5678.
- [4] 董帅,王成福,梁军,等.计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度[J].电力系统自动化,2018,42(11):8-15.
DONG Shuai, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Multi-objective optimal day-ahead dispatch of integrated energy system considering power-to-gas operation cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):8-15.
- [5] 卫志农,张思德,孙国强,等.计及电转气的电—气互联综合能源系统削峰填谷研究[J].中国电机工程学报,2017,37(16):4601-4609.
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16):4601-4609.
- [6] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas(P2G) on electrical and gas transmission networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1234-1244.
- [7] 姜智霖,郝峰杰,袁志昌,等.考虑SOC优化设定的电—氢混合储能系统的运行优化[J].电力系统保护与控制,2024,52(8):65-76.
JIANG Zhilin, HAO Fengjie, YUAN Zhichang, et al. Optimal operation of an electro-Hydrogen hybrid energy storage system considering SOC optimization setting[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8):65-76.
- [8] 陈飞雄,林炜晖,邵振国.含电转气和混合储能的微电网双层滚动优化控制方法[J].电力自动化设备,2022,42(5):23-31.
CHEN Feixiong, LIN Weihui, SHAO Zhenguo. double-layer rolling optimization control method for microgrid with power-to-gas and hybrid energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5):23-31.
- [9] 魏震波,黄宇涵,高红均,等.含电转气和热电耦合热电联产机组的区域能源互联网联合经济调度[J].电网技术,2018,42(11):3512-3520.
WEI Zhenbo, HUANG Yuhuan, GAO Hongjun, et al. Joint economic dispatch of regional energy internet with power-to-gas and thermal-electric decoupling CHP units[J]. Power System Technology, 2018, 42(11):3512-3520.
- [10] 徐波,伍声宇,侯东羊,等.考虑季节性储氢的区域能源系统优化模型[J].智慧电力,2024,52(2):40-47.

- XU Bo, WU Shengyu, HOU Dongyang, et al. Regional energy system optimization model considering seasonal Hydrogen storage[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 40-47.
- [11] 李军舟, 赵晋斌, 陈逸文, 等. 考虑动态功率区间和制氢效率的电转氢(P2H)设备容量配置优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 4864-4874.
- LI Junzhou, ZHAO Jinbin, CHEN Yiwen, et al. Optimization of capacity configuration for power-to-Hydrogen(P2H) equipment considering dynamic power range and Hydrogen production efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 4864-4874.
- [12] 钟嘉庆, 靳国臣, 张晓辉, 等. 计及碳交易成本及能效电厂的电源规划模型[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(12): 22-29.
- ZHONG Jiaqing, JIN Guochen, ZHANG Xiaohui, et al. Generation expansion planning model incorporating Carbon trading cost and efficiency power plant[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(12): 22-29.
- [13] 张 锴, 郭小璇, 韩 帅, 等. 基于电转气反应热应用和合作博弈的电转气装置容量规划[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2801-2810.
- ZHANG Kai, GUO Xiaoxuan, HAN Shuai, et al. Capacity planning of power-to-gas devices considering reaction heat recovery and cooperative game[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2801-2810.
- [14] 张 云, 王丽芳, 郭彦杰, 等. 基于NSGA-II算法的无线充电系统磁耦合机构多目标优化[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(12): 28-34.
- ZHANG Yun, WANG Lifang, GUO Yanjie, et al. Multi-objective optimization of magnetic coupling mechanism for wireless charging system based on NSGA-II algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(12): 28-34.
- [15] 何 森, 林舜江, 李广凯. 含光伏的低压配电网分布式储能多目标优化配置与运行[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(3): 18-27.
- HE Sen, LIN Shunjiang, LI Guangkai. Multi-objective optimal configuration and operation of distributed energy storage in low-voltage distribution network with photovoltaic[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(3): 18-27.
- [16] 谢承旺, 余伟伟, 郭 华, 等. DAV-MOEA: 一种采用动态角度向量支配关系的高维多目标进化算法[J]. 计算机学报, 2022, 45(2): 317-333.
- XIE Chengwang, YU Weiwei, GUO Hua, et al. DAV-MOEA: A high-dimensional multi-objective evolutionary algorithm based on dynamic angle vector dominance relation[J]. Chinese Journal of Computers, 2022, 45(2): 317-333.
- [17] 张 虹, 孟庆尧, 王明晨, 等. 考虑火电机组参与绿证购买交易的含氢综合能源系统经济低碳调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 26-35.
- ZHANG Hong, MENG Qingyao, WANG Mingchen, et al. Economic and low-carbon dispatch strategy of a Hydrogen-containing integrated energy system considering thermal power units participating in green certificate purchase trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 26-35.
- [18] 吴孟雪, 房 方. 计及风光不确定性的电—热—氢综合能源系统分布鲁棒优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3473-3485.
- WU Mengxue, FANG Fang. Distributionally robust optimization of electricity-heat-Hydrogen integrated energy system with wind and solar uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3473-3485.
- [19] 刘文颖, 谢 昶, 文 晶, 等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 141-148.
- LIU Wenyong, XIE Chang, WEN Jing, et al. Transmission network maintenance scheduling optimization based on niche multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 141-148.
- [20] 彭道刚, 张孟然, 沈丛奇, 等. 考虑不同控制策略下的多能互补能源互联网优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 17-28.
- PENG Daogang, ZHANG Mengran, SHEN Congqi, et al. Optimal scheduling of multi-energy complementary energy Internet considering different control strategies[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 17-28.
- [21] 张 轩, 王 凯, 樊昕晔, 等. 电解水制氢成本分析[J]. 现代化工, 2021, 41(12): 7-11.
- ZHANG Xuan, WANG Kai, FAN Xinye, et al. Cost analysis of Hydrogen production by electrolysis of water[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(12): 7-11.
- [22] 刘 玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. 碳中和目标下电解水制氢关键技术及价格平准化分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37

- (11):2888-2896.
- LIU Wei, WAN Yanming, XIONG Yalin, et al. Key technology of water electrolysis and levelized cost of Hydrogen analysis under Carbon neutral vision[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11):2888-2896.
- [23] 袁铁江, 曹继雷. 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[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2037-2044.
- YUAN Tiejiang, CAO Jilei. Capacity optimization allocation of wind Hydrogen low-Carbon energy system considering wind power-load uncertainty[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6):2037-2044.
- [24] 叶 伦, 姚建刚, 杨胜杰, 等. 含高比例可再生能源电力系统的调峰成本量化与分摊模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15):20-28.
- YE Lun, YAO Jiangang, YANG Shengjie, et al. Quantification and allocation model of peak regulation cost for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15):20-28.
- [25] 崔 挺, 孙元章, 徐 箭, 等. 基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19):43-50.
- CUI Ting, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Reactive power optimization of power system based on improved niche genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19):43-50.
- [26] TING T, RAO M C, LOO C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1):411-418.
- 孙靓雨(1995—), 女, 硕士, 研究方向为可再生能源调度(E-mail:sunjingyu@sdepcci.com)。
- 林泽源(1981—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事电力系统工程设计研究(E-mail:linzeyuan@sdepcci.com)。
- 李 伟(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护及电气二次设计(E-mail:liweib@sdepcci.com)。