DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2022. 05. 006

风-光-氢能源系统容量优化配置研究

Optimization of capacity allocation scheme for wind-solar-hydrogen energy system

姚芳^{1,2},杨晓娜^{1,2},葛磊蛟^{3*},郑帅^{1,2} YAO Fang^{1,2},YANG Xiaona^{1,2},GE Leijiao^{3*},ZHENG Shuai^{1,2}

(1.省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学),天津 300130; 2.河北省电磁场与电器可靠性重点实验室,天津 300130; 3.天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072)

(1.State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Hebei University of Technology), Tianjin 300130, China; 2.Hebei Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Tianjin 300130, China; 3.School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

摘 要: "碳达峰、碳中和"背景下,利用风、光等可再生能源就地制取氢气,是突破制氢成本困境、拓展电能利用途 径、应对新能源随机波动、提高可再生能源就地消纳能力的关键技术之一。为优化风-光-氢能源系统的合作收益, 减少系统弃风弃光造成的绿色能源浪费及中断负荷造成的用户损失,考虑系统投资,运维成本,售氢售氧、售购电 能的成本和利润,附加弃风弃光及中断负荷的惩罚费用,建立风-光-氢系统收益最大化模型。在弃风弃光及中断 负荷惩罚函数中考虑风-光-氢系统售购电能至主网的最大限额,避免因功率越限而导致系统失稳。引入自适应惯 性权重,设计自适应粒子群算法,求解收益模型的最优容量配置方案,可有效避免算法陷入局部最优。仿真结果表 明,在相同投运成本下,典型月中该优化策略可最大限度减少系统弃风弃光及负荷中断现象,且可有效提高系统整 体收益。

Abstract: To achieve the goals of carbon peaking and carbon neutrality, we must lower the hydrogen production cost, expand the application of electric energy, alleviate the fluctuations of new energy and facilitate the local consumption of renewable energy. One of the key technologies to solve these problems is to realize hydrogen production powered by local wind and solar power. To optimize the comprehensive benefit of a wind-solar-hydrogen energy system and reduce wind and solar power curtailment loss and the loss of suppliers caused by interrupted load, a return maximization model for the system is established. The model has taken the system's investment, operation and maintenance costs, costs and profits of hydrogen selling, oxygen selling, electric power selling and purchasing, as well as the penalty for wind and solar power curtailment and interrupted load into consideration. The upper limit of the electric energy purchased by or sell to the main network is considered in the penalty function of wind and solar power curtailment and interrupted load, to avoid the imbalance of the system caused by the over-limit power. Introducing adaptive inertia weight into the designed adaptive particle swarm optimization algorithm can effectively avoid the algorithm from falling into the local optimal scheme can minimize the wind and solar power curtailment ratios and load interruption in a typical month, and effectively improve the comprehensive benefit of the system.

Keywords: carbon neutrality; wind-solar-hydrogen system; renewable energy; wind and solar power curtailment; hydrogen production; microgrid; load interruption; capacity allocation; adaptive particle swarm algorithm

收稿日期:2021-04-16;修回日期:2022-05-07

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5100-202155018A-0-0-00);河北省自然科学基金项目 (E2019202481)

0 引言

在国际能源格局变迁大背景下,光伏、风电等 可再生能源正在逐步成为能源转型中的支柱型力 量。然而,风力、光伏发电受自然资源约束,具有间 歇性与波动性,并网比例仅30%左右,弃风弃光、投 资浪费等现象严重^[1-2]。为实现"碳达峰、碳中和"目 标,大力发展风-光绿电制氢,提高风光等可再生能 源的消纳比例并实现可再生能源多途径高效利用 已成为能源转型和深度减碳的关键技术之一^[3]。

水电解制氢具有纯度高、产物无污染、原料广 泛易得、制备工艺简单等优点,因此,利用风光等可 再生能源就地制取氢气并与储氢装置配合是高比 例消纳弃风弃光、平抑风光绿电并网波动性的重要 途径之一[4-5]。目前,很多国内外学者对风-光-氢能 源系统的容量优化配置方案开展了研究。文献[6] 考虑气候条件,使用遗传算法对风-光-氢能源系统 的成本和效益进行多目标优化,求解最优容量配置 方案。文献[7-8]在风-光-氢能源系统中加入模型 预测控制器,优化了发电、储能及动态负荷需求之 间的功率平衡。文献[9]以微能源系统的运行效益 最大化为目标,搭建了一个包含风机、光伏、氢燃料 电车、电锅炉等的多主体微能源系统模型,并采用 多目标优化算法进行求解,得到最佳容量配置方 案。文献[10]提出了一种分布式储能接入配电网 后的容量配置和布局优化方案,为分布式储能大量 接入配电网提供了理论依据与技术支持。虽然上 述成果所求解的最优容量配比方案可有效提高风 光绿能的消纳比例,但系统收益最大化模型求解 中,未维护风-光-氢能源系统中各主体的利益;系 统模型建立中,未考虑能源系统售购电能至电网的 限定额度;收益最大化模型求解中,各主体的系列 约束条件不全面。

针对上述问题,本文综合考虑系统投资,运维, 售氢售氧、售购电能的成本和利润,附加弃风弃光 及中断负荷的惩罚费用,建立风-光-氢能源系统最 大收益模型。在弃风弃光及中断负荷惩罚函数中, 引入能源系统售购电能至主网的调度指令限额,避 免因功率越限而导致系统电能失衡。设定系统各 主体的数量配置约束、功率约束及利益约束,在保 证系统可靠运行的同时,维护系统各主体的利益。 最后,采用自适应粒子群算法求解风-光-氢能源系 统最大收益模型,得到约束范围内的最优容量配置 方案。

1 风-光-氢系统模型构建

1.1 风-光-氢系统电能传输模型架构

风-光-氢能源系统由风电机组、光伏阵列、制 氢-储氢-发电系统等主体构成,其系统电能传输架 构如图1所示(图中:EC为电解槽;FC为燃料电池; HST为储氢罐)。





1.2 风力发电功率模型

风力发电系统的输出功率有间歇性、波动性的 特点,以二次方分布模型为例,风力发电机的功率 模型为^[11-12]

$$P_{w} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{in} \\ av^{2} - bP_{r} & v_{in} \leq v \leq v_{r} \\ P_{r} = \frac{1}{2} \rho_{a} A C_{p} (\lambda, \beta) v_{r}^{3} \eta_{i} \eta_{g} & v_{r} \leq v \leq v_{out} \\ 0 & v \geq v_{out} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a = \frac{P_{r}}{v_{r}^{2} - v_{in}^{2}} \\ b = \frac{v_{in}^{3}}{v_{r}^{2} - v_{in}^{2}} \end{cases}, \qquad (2)$$

式中: v_r , v_{in} , v_{out} 分别为风力发电机的额定、切入、切 出风速; η_i 为机械传动效率; η_g 为电力转换效率; ρ_a 为空气密度;A为风轮面积; C_p 为利用系数; P_r 为风力 发电机的额定功率。

1.3 光伏发电功率模型

式中:

光伏阵列输出电流I_{nv}为^[13-14]

$$I_{pv} = I_{ph}n_{b} - I_{rs}n_{b} - I_{rs}e^{\frac{qV_{m}}{n_{c}AKi}}n_{b}, \qquad (3)$$

$$n_{b}$$
 为光伏电池并联数目; n_{c} 为光伏电池串联数

目;*I*_{ph}为光生电流;*I*_s为二极管的反向饱和电流;*V*_{pv} 和*t*分别为光伏电池的输出电压及温度;*q*为电子电荷;*K*为波尔兹曼常数。

光伏阵列发电输出功率Pw为

$$P_{\rm pv} = I_{\rm ph} n_{\rm b} V_{\rm pv} - I_{\rm rs} n_{\rm b} V_{\rm pv} - I_{\rm rs} e^{\frac{q V_{\rm pv}}{n_{\rm s} AKT}} n_{\rm b} V_{\rm pv} \circ \qquad (4)$$

1.4 制氢-储氢-发电系统模型

当风光发电量不能满足负荷需求时,FC 消耗氢 气发电,通过售电获取收益;反之,风光多余的发电 量供给 EC 制氢,通过售氢获取收益。 (5)

碱式 EC 的氢气生产率为^[15] $\begin{cases} n_{\text{H}_2} = \eta_{\text{F}} I N_{\text{c}} / (2F) \\ \eta_{\text{F}} = 96.5 e^{(0.09)/ - 75.5/l^2)}, \end{cases}$

式中:n_{H2}为电解制氢生成的氢的物质的量;F和η_F 分别为法拉第常数和效率;I为电解电流;N_c为EC 个数。

按照克拉伯龙方程,HST的数学模型为^[16]

$$\begin{cases} V(t_0 + \Delta t) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} v(t) dt + V(t_0) \\ p(t)V_s = n_{H_s}(t)RT \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $V(t_0)$ 和 $V(t_0 + \Delta t)$ 分别为 t_0 和 $t_0 + \Delta t$ 时刻的 氢气体积;p(t)为t时刻HST的压力; V_s 为HST的总 体积;v(t)为储氢速率; $n_{H_2}(t)$ 为t时刻氢气的物质的 量:R为气体常量:T为气体热力学温度。

FC的简化数学模型为^[17]

$$\begin{cases} Q_{\rm b} = N_{\rm stack} I_{\rm b} / (2F) \\ P_{\rm b} = U_{\rm b} I_{\rm b} \end{cases}, \tag{7}$$

式中: $Q_{\rm b}$, $I_{\rm b}$, $P_{\rm b}$ 分别为FC的耗氢量、输出电流及输出 功率; $U_{\rm b}$, $N_{\rm stack}$ 分别为电堆电压及其串联个数。

2 风-光-氢系统收益模型

2.1 风力发电收益模型

风力发电收益 G_{wt}表示为

 $G_{wt} = G_{wt,g} + G_{wt,ec} - C_{wt} - C_{wt,trans},$ (8) 式中: $G_{wt,g}$ 和 $G_{wt,ec}$ 分别为风电机组售电至主网的收 益和售电至电解制氢系统的收益; C_{wt} 为风机运维成 本; $C_{wt,trans}$ 为功率传输过网费用。

G_{wt,g}表示为

$$G_{\rm wt,g} = \sum_{t=1}^{T} p_{\rm wt,g} P_{\rm wt,g}^{t}, \qquad (9)$$

式中: P^{*i*}_{wt,g}和 p_{wt,g}分别为风电上网功率及单价; T为 一天划分的时间段数, 取 24。

G_{wt,ee}表示为

$$G_{\rm wt,\,ec} = \sum_{t=1}^{T} p_{\rm wt,\,ec} P_{\rm wt,\,ec}^{t}, \qquad (10)$$

式中:P^{*t*}_{wt,c}和 *p*_{wt,c}分别为风电售电至电解制氢系统的功率及单价。

C_{wt}表示为

$$C_{\rm wt} = \sum_{t=1}^{T} C_{\rm wt,\,u} \Big(P_{\rm wt,\,g}^{t} + P_{\rm wt,\,ec}^{t} \Big), \tag{11}$$

式中:C_{wt,u}为风机单位功率运维成本。

C_{wt, trans}表示为

$$C_{\rm wt, trans} = \sum_{t=1}^{T} \left[\alpha_{\rm wt} \left(P_{\rm wt, g}^{t} \right)^{2} + \beta_{\rm wt} P_{\rm wt, ec}^{t} \right], \qquad (12)$$

式中: α_{w1} , β_{w1} 分别为风电过网成本系数。

2.2 光伏发电收益模型

光伏发电收益 G_{pv}表示为

 $G_{pv} = G_{pv,g} + G_{pv,ec} - C_{pv} - C_{pv,trans}$, (13) 式中: $G_{pv,g}$ 和 $G_{pv,ec}$ 分别为光伏机组售电给电网的收 益和售电给电解制氢系统的收益; C_{pv} 为光伏机组运 维成本; $C_{pv,trans}$ 为功率传输过网费用。

G_{pv,g}表示为

$$G_{\rm pv,g} = \sum_{t=1}^{T} p_{\rm pv,g} P_{\rm pv,g}^{t}, \qquad (14)$$

式中: $P_{\text{pv,g}}^{t}$ 和 $p_{\text{pv,g}}$ 分别为光电上网功率及单价。 $G_{\text{pv,g}}$ 表示为

$$G_{\rm pv,ec} = \sum_{t=1}^{T} p_{\rm pv,ec} P_{\rm pv,ec}^{t}, \qquad (15)$$

式中:P^t_{pv,ee}和P_{pv,ee}分别为光电售给电解制氢系统功 率及单价。

C_w表示为

$$C_{\rm pv} = \sum_{t=1}^{T} C_{\rm pv, u} \Big(P_{\rm pv, g}^{t} + P_{\rm pv, ec}^{t} \Big), \qquad (16)$$

式中:C_{pv,u}为光伏阵列单位功率运维成本。

C_{pv, trans}表示为

$$C_{\rm pv, trans} = \sum_{t=1}^{T} \left[\alpha_{\rm pv} \left(P_{\rm pv, g}^{t} \right)^{2} + \beta_{\rm pv} P_{\rm pv, ec}^{t} \right], \qquad (17)$$

式中: $\alpha_{\mu\nu}$, $\beta_{\mu\nu}$ 分别为光伏发电的过网成本系数。

2.3 制氢-储氢-发电系统收益模型

制氢-储氢-发电系统收益G_表示为

$$G_{u} = G_{fc} + p_{0_{2}}V_{0_{2}} + p_{H_{2}}V_{H_{2}} - (C_{ec} + G_{wt,ec} + G_{pv,ec}),$$
(18)

式中: G_{f_e} 为FC供电至电网的收益; p_{0_1} , V_{0_2} , p_{H_2} , V_{H_2} 分别为售氧单价、售氧体积、售氢单价、售氢体积; C_{ee} 为电解制氢系统的运维成本。

G_{fe}表示为

$$G_{\rm fc} = p_{\rm fc,\,g} \sum_{i=1}^{T} P_{\rm fc,\,g}^{i}, \qquad (19)$$

式中: P^t_{fc,g}, p_{fc,g}分别为燃料电池售电至电网的功率 及单价。

当风电和光电上网功率大于负荷需求时,此时 FC产出的电能不上网,因此FC售电至电网的功率 可表示为

$$P_{\text{fc,g}}^{t} = \begin{cases} P_{\text{fc,g}}^{t} & P_{\text{wt,g}}^{t} + P_{\text{pv,g}}^{t} < P_{\text{load}}^{t} \\ 0 & P_{\text{wt,g}}^{t} + P_{\text{pv,g}}^{t} \ge P_{\text{load}}^{t}, \end{cases}$$
(20)

式中:P^t_{load}为当前时刻用电负荷。

2.4 考虑调度指令限额的风-光-氢系统收益模型 风-光-氢系统收益 *G*_{wou}表示为

 $G_{wpu} = G_{wt} + G_{pv} + G_{u} - C_{wp} - C_{ls} - C_{g} - C_{k},$ (21) 式中: C_{wp} 为弃风弃光惩罚成本; C_{ls} 为切负荷补偿成 本; C_{s} 为风-光-氢系统向主网购电成本; C_{k} 为考虑了 损耗率的设备月均成本。

C_k表示为

$$C_{k} = N_{k}C_{k,i} \frac{d_{k} (1 + d_{k})^{y_{k}}}{(1 + d_{k})^{y_{k}} - 1},$$
 (22)

式中: N_k , $C_{k,i}$, y_k , d_k 分别为各设备数量、投资成本、使用年限、折旧率。设备包括风机、光伏板、FC、EC、HSC。

C。表示为

$$C_{\rm g} = p_{\rm g} \sum_{t=1}^{T} E_{\rm g}^{t} ,$$
 (23)

式中:*E^t_g*为电解制氢系统的购电量;*p_g*为电解制氢系统的购电价格。

定义功率缺额量为

$$P_{v}^{t} = P_{\text{load}}^{t} + P_{\text{ec,min}}^{t} - \left(P_{wt}^{t} + P_{pv}^{t} + P_{fc}^{t}\right), \quad (24)$$

式中: P_{load}^{i} 为负荷所需功率; $P_{ec,min}^{i}$ 为满足 HST 最小 压力时, EC 所需的供电功率; P_{wt}^{i} , P_{pv}^{i} , P_{fc}^{i} 分别为风 电、光伏、FC 输出电功率。

系统所需购电量E'表示为

$$E^{t} = \begin{cases} 0 & P_{v}^{t} \leq 0 \\ P_{v}^{t} & 0 < P_{v}^{t} \leq P_{gs}^{t} \\ P_{gs}^{t} & P_{v}^{t} > P_{gs}^{t} \end{cases}$$
(25)

式中: P_{gs}^{i} 为主网调度功率限额,即为维护主网电能 平衡,风-光-氢系统售给主网电能及由主网购电的 最大限制额度,并有 $P_{gs}^{i} \leq P_{line, max}$ 为传输线所 能够承载的极限功率。

当*P'_v > P'_s*,时,风电功率、光电功率、FC电解功 率及从大电网购得最大功率仍不能维持储氢系统 运行所需最低功率及负荷用电,则需切负荷以保证 电网稳定运行。

切负荷补偿费用 Ca可表示为

$$C_{\rm ol} = \sum_{t=1}^{T} \omega P_{\rm ol}^{t} , \qquad (26)$$

式中:P'al和ω分别为超额负荷和惩罚因子。

P^t_{ol}可表示为

$$P_{\rm ol}^{t} = \begin{cases} 0 & P_{\rm v}^{t} - P_{\rm gs}^{t} < 0 \\ P_{\rm v}^{t} - P_{\rm gs}^{t} & P_{\rm v}^{t} - P_{\rm gs}^{t} > 0 \end{cases}$$
(27)

C_w可表示为

$$C_{\rm wp} = \sum_{t=1}^{T} \xi P_{\rm wp}^{t},$$
 (28)

式中:P^t_{wp}及 *ξ*分别为弃风弃光功率和惩罚因子。

考虑调度指令后的微电网系统可消纳最大功率 Pⁱ_{max}为

$$P_{\max}^{t} = P_{\text{load}}^{t} + P_{\text{gs}}^{t} + P_{\text{ec, max}}, \qquad (29)$$

式中:P_{ec,max}为制氢系统最大压力下所能消耗的最大电功率。

风光过剩功率为

$$P_{wp,over}^{t} = P_{wt}^{t} + P_{pv}^{t} - P_{fc}^{t} - P_{max^{\circ}}^{t}$$
(30)
弃风弃光功率为

$$P_{wp}^{t} = \begin{cases} P_{wp, over}^{t} & P_{wp, over}^{t} > 0\\ 0 & P_{wp, over}^{t} < 0 \end{cases}$$
(31)

2.5 风-光-氢系统收益最大化模型

风-光-氢系统收益目标函数表示为

$$\max G_{wpu} = G_{wt} + G_{pv} + G_{U} - C_{wp} - C_{ls} - C_{g} - C_{k\circ}$$
(32)

各主体设备数量配置约束为

$$\begin{cases}
N_{wt} \leq N_{wt, max} \\
N_{pv} \leq N_{pv, max} \\
N_{fc} \leq N_{fc, max} \\
N_{ec} \leq N_{ec, max} \\
N_{hst} \leq N_{hst, max}
\end{cases}$$
(33)

式中:N为各设备数量; N_{max} 为各设备数量最大值; 下标 wt, pv, fc, ec, hst分别代表风电机组,光伏板, FC, EC, HST。

功率约束为

$$\begin{cases} P_{\text{ec, min}} \leqslant P_{\text{ec}}^{i} \leqslant P_{\text{ec, max}} \\ 0 \leqslant P_{\text{fc}}^{i} \leqslant P_{\text{fc, max}} \end{cases},$$
(34)

式中: $P_{ec, max}$, $P_{ec, min}$ 为EC功率上、下限; $P_{fc, max}$ 为FC功率上限。

为满足各主体的利益需求,定义利益约束为

$$\begin{cases}
G_{wt} \ge G_{wt,min} \\
G_{pv} \ge G_{pv,min}, \\
G_{u} \ge G_{u,min}
\end{cases} (35)$$

式中: *G*_{wt,min}, *G*_{pv,min}, *G*_{u,min}分别为风电主体、光伏主体 及制氢-储氢-发电主体在其当前设备投入情况下 所能接受的期望收益值下限。

3 风-光-氢收益模型求解

通过自适应粒子群算法求解每次迭代后的风机,光伏板,EC,HSC,FC数量的最优组合,输出风-光-氢系统收益最大化容量配比。具体流程如下。

(1)建立风-光-氢系统设备运行及收益模型, 设定系统相关参数。

(2)设置均衡点初值,包括各设备数量、初始位 置和飞翔速度并确定其上下限值;设置最大迭代次 数为30,种群规模为100。

(3)求解各设备容量配置的最佳适应值。为避 免陷入局部最优,引入自适应惯性权重*w*_{self}

$$w_{\text{self}} = \begin{cases} w - \frac{(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})(F_i - F_{\text{min}})}{F_{\text{avg}} - F_{\text{min}}} & F_i \leq F_{\text{avg}}, (36) \\ 0 & F_i > F_{\text{avg}} \end{cases}$$

式中: $w, w_{\text{max}}, w_{\text{min}}$ 分别为惯性权重初始值及上下限; $F_i, F_{\text{min}} \cap F_{\text{avg}}$ 为粒子i当前适应值、最小值和平均值。

(4)迭代寻优。迭代更新粒子速度和位置。

(5)当第 k 次和 k+1 次迭代计算的风-光-氢联 盟收益一致,则迭代结束,输出风机、光伏板、EC、 HSC 和 FC 最优容量配比结果。

求解流程如图2所示。





4 算例结果与分析

4.1 模型参数

选取某区域风速、辐照强度及用电负荷的实际数据,对风机、光伏阵列、FC、EC、HSC进行容量配置。典型月的用电负荷、风速、辐照强度分布如图3 所示。风机、光伏阵列及制氢-储氢-发电系统参数 见表1-3。

4.2 风-光-氢容量优化配置结果

通过自适应粒子群算法求解风-光-氢系统最 优容量配置,结果为 N_{wt} =45, N_{pv} =3 420, N_{ec} =32, N_{hst} = 28, N_{fc} =48,风-光-氢各主体及联络线功率传输情况 如图4所示。

由图4a、图4b可见,因风速及辐照强度的不确 定性,风机和光伏阵列的发电功率具有强烈的波动 性。由于当地典型月风速未超风机切出风速,风机 出力未达其出力上限,因此,风机出力波形中无平 顶波。

由图4c可见,当风机、光伏所发电量不能满足



Fig. 3 Distribution of load, wind speed and irradiation intensity

in a typical month

Table 1	Wind	turbine	parameters
I HOIC I	******	cui onic	parameters

参数	数值
额定功率/kW	10
寿命/a	20
额定风速/(m·s ⁻¹)	12
风电转化效率	0.26
上网电价/[元 • (kW • h) ⁻¹]	0.57
单位发电投资成本/(元·kW ⁻¹)	7 770
切入风速/(m·s ⁻¹)	2.5
切出风速/(m·s ⁻¹)	17.0
电损耗率	0.12
运维成本/[元・(kW・a) ⁻¹]	326

负荷需求时,则燃烧氢气和氧气,FC发电供给负荷, 此时制氢-储氢-发电系统输出功率为正,系统售电 至主网;当风机、光伏所发电量大于负荷需求时,FC 不发电,此时EC消耗电能,系统输出功率为负。如 图4d所示,联络线上运行功率有正有负,其中联络 线功率为正表示风-光-氢系统正售电至主网,为负 表示系统正从主网购电。

表2 光伏阵列参数

Table 2	Photovoltaic	array	parameters	
---------	--------------	-------	------------	--

参数	数值
装机容量/kW	$0.083N_{\rm pv}$
寿命/a	20
光电转化效率	0.17
上网电价/[元 · (kW · h) ⁻¹]	0.65
单位发电投资成本/(元·kW ⁻¹)	11 500
运维成本/[元 · (kW · a) ⁻¹]	359
电损耗率	0.1
工作温度/℃	35

表3	制复_	储复-	- 发由	系统参数
125	101 20	1/12 오니	火屯	不知乏双

Table 3Parameters of the hydrogen production,hydrogen storage and power generation system

	参数	数值
	产氢率	0.019
	制氢能效	0.72
	最大输入功率/kW	10
EC	最大爬坡/下坡功率/kW	2
	寿命/a	20
	投资成本/(元·k₩⁻¹)	6 999
	运维成本/[元 • (kW • a) ⁻¹]	236
-	单机额定功率/kW	2
	放电效率	0.96
	寿命/a	6
FC	投资成本/(元·k₩ ⁻¹)	3 200
	运维成本/[元 • (kW • a) ⁻¹]	132
	上网电价/[元 • (kW • h) ⁻¹]	0.65
	最小气压/MPa	2.0
	最大气压/MPa	3.5
HSC	寿命/a	20
	投资成本(元・kg ⁻¹)	42 000
	运维成本/[元・(kW・a) ⁻¹]	170

需要注意的是,考虑到主网的电能平衡,风-光-氢系统向主网售购电不能超过调度指令的限额。即当主网电能充足,风电机组和光伏阵列所发 电量在满足EC及用电负荷需求后,额外电量售电 至主网,该部分传输的电能不允许超过上网调度指 令的限额,若超过限额,则需弃风弃光,造成绿色能 源浪费,产生弃风弃光惩罚费用。同理,当风电机 组和光伏阵列、FC发电不能满足EC最小运行功率 和用电负荷需求时,需要从主网购电,所购电能同 样不能超过购电调度指令限额。若超过限额,则需 切掉一部分用电负荷,以维持电能平衡,产生切负 荷补偿费用。

为验证最优容量配置下风-光-氢系统的利润 优势,在系统总成本一致的前提下,设置场景2和场 景3,与应用最优容量配置的场景1进行利润优势对



图 4 最优容量配置下风-光-氢系统功率传输情况 Fig. 4 Power transmission of the wind-solar-hydrogen system

with the optimal	l capacity	allocation	
------------------	------------	------------	--

比分析。其中,总成本包括设备投资成本、运维成
本、弃风弃光惩罚费用、切负荷补偿费用、购电费
用。3种场景的容量配置方案见表4。

表4	3种场景的容量配置

ŝ

 Table 4
 Capacity allocation schemes under three

scenarios						
场景	$N_{\rm wt}$	$N_{_{ m pv}}$	$N_{\rm ec}$	$N_{\rm hst}$	$N_{\rm fc}$	
1	45	3 420	32	28	48	
2	42	2 653	38	52	82	
3	50	4 210	29	26	38	

3种场景的弃风弃光量及切负荷情况如图5所 示。由图5可见:场景1,2,3的最大弃风弃光功率 分别为53.0,82.0,412.0 kW;最大切负荷功率分别 为29.2,53.5,0 kW。



under three scenarios

典型月3种场景的累计弃风弃光率及切负荷率 情况见表5。由表5可见:最优容量配比下的场景1 弃风弃光率最低;场景3的切负荷率最低,但弃风弃 光率最高,造成了较大的绿色能源浪费。

3种场景的风-光-氢系统总收益情况见表6。 由表6可见,最优容量配比下的场景1的典型月收 益最高,场景3虽然系统收益优于场景2,但造成了 较大的绿色能源浪费。

表5 3种场景的弃风弃光及切负荷情况对比 Table 5 Wind and solar power curtailment and interrupted load under three scenarios

场景 切负荷率 弃风弃光率	
1 0.000 9 0.006 4	
2 0.003 3 0.011 4	
3 0 0.260 2	

表6 3种场景的系统总收益对比

 Table 6
 Comprehensive benefit of the system under

	three scenarios	元
场景	风-光-氢系统总收益	
1	232 005	
2	181 294	
3	224 737	

5 结论

针对风-光-氢系统最优容量配置的问题,建立

了各主体的数学及收益模型,并通过自适应粒子群 算法对风-光-氢系统收益最大化模型进行求解,具 体结论如下。

(1)引入电能调度功率限额,将风-光-氢系统 售购至主网的电量限制在调度指令范围内,避免因 功率越限而导致系统失稳;引入了过网费用,可提 升主网利益。

(2)引入自适应惯性权重,设计了自适应粒子 群算法,求解各设备容量配置的最佳适应值,避免 算法陷入局部最优。

(3)仿真表明:该策略可最大限度减少风-光-氢能源系统的弃风弃光功率,提高绿色能源的利用 率;最大限度减少切负荷功率,保证负荷用电需求; 在约束范围内获得系统的最优合作收益。

参考文献:

- [1]DINH V N, LEAHY P, MCKEOGH E, et al. Development of a viability assessment model for hydrogen production from dedicated offshore wind farms [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(48): 24620-24631.
- [2]陈宏善,魏花花.利用太阳能制氢的方法及发展现状[J]. 材料导报,2015,29(11):36-40. CHEN Hongshan, WEI Huahua. The methods and

development status for hydrogen production from watersplitting using solar energy[J]. Materials Review, 2015, 29 (11): 36-40.

[3]赵国涛,钱国明,王盛."双碳"目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J].华电技术,2021,43(6):11-20.
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. Analysis on green and low-carbon development path for power industry to realize carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 11-20.

[4]黄大为,齐德卿,于娜,等.利用制氢系统消纳风电弃风的制氢容量配置方法[J].太阳能学报,2017,38(6): 1517-1525.

HUANG Dawei, QI Deqing, YU Na, et al. Capacity allocation method of hydrogen production system consuming abandoned wind power [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(6): 1517-1525.

- [5]侯慧,刘鹏,黄亮,等.考虑不确定性的电-热-氢综合能源系统规划[J].电工技术学报,2021,36(S1):133-144.
 HOU Hui, LIU Peng, HUANG Liang, et al. Planning of electricity-heat-hydrogen integrated energy system considering uncertainties [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1):133-144.
- [6]DONADO K, NAVARRO L, CHRISTIAN G, et al. HYRES: A multi-objective optimization tool for proper configuration of renewable hybrid energy systems [J].

Energies, 2019, 13(1): 26.

- [7]TORREGLOSA J P, GARCIA P, FERNANDEZ L M, et al. Energy dispatching based on predictive controller of an offgrid wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system[J]. Renewable Energy, 2015, 74: 326-336.
- [8] TRIFKOVIC M, SHEIKHZADEH M, NIGIM K, et al. Modeling and control of a renewable hybrid energy system with hydrogen storage [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 22(1): 169-179.
- [9]李建林,牛萌,周喜超,等.能源互联网中微能源系统储 能容量规划及投资效益分析[J].电工技术学报,2020, 35(4):874-884.

LI Jianlin, NIU Meng, ZHOU Xichao, et al. Energy storage capacity planning and investment benefit analysis of microenergy system in energy interconnection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 874–884.

[10]贾雨龙,米增强,刘力卿,等.分布式储能系统接入配电 网的容量配置和有序布点综合优化方法[J].电力自动 化设备,2019,39(4):1-7.

JIA Yulong, MI Zengqiang, LIU Liqing, et al. Comprehensive optimization method of capacity configuration and ordered installation for distributed energy storage system accessing distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):1–7.

- [11]李冲,郑源,朱大胜,等.风力发电机输出功率模型研究
 [J].水力发电,2014,40(8):123-125,128.
 LI Chong, ZHENG Yuan, ZHU Dasheng, et al. A study on power output models of wind turbine [J]. Water Power, 2014,40(8):123-125,128.
- [12]王金铭,卢奭瑄,何新,等.大型风力发电机风能利用系数参数拟合的研究[J].太阳能学报,2012,33(2):221-225.

WANG Jinming, HU Shixuan, HE Xin, et al. Study on parameters matching of rotor power coefficient for large scale wind turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(2): 221-225.

- [13]陈丽文.光伏发电系统建模及功率控制方法研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2014.
- [14]张孝顺,谭恬,蒙蝶,等.基于光伏系统的动态代理模型最大功率点跟踪算法研究[J].华电技术,2021,43
 (8):1-10.

ZHANG Xiaoshun, TAN Tian, MENG Die, et al. Study on dynamic surrogate model for MPPT of PV systems [J]. Huadian Technology, 2021, 43(8): 1-10.

- [15]朱继敏.风电-质子交换膜燃料电池联合供电系统的特性仿真及能量管理[D].济南:山东大学,2017.
- [16]贾成真,王灵梅,孟恩隆,等.风光氢耦合发电系统的容量优化配置及日前优化调度[J].中国电力,2020,53 (10):80-87.

JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Optimal capacity configuration and day-ahead scheduling of wind-solar-hydrogen coupled power generation system [J]. Electric Power, 2020, 53(10): 80-87.

[17]陈冲.风电/制氢/燃料电池集成系统建模与并网控制研究[D].吉林:东北电力大学,2017.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

姚芳(1972),女,教授,博士,从事电器可靠性及检测技术研究,yaofang@hebut.edu.cn;

葛磊蛟*(1984),男,副教授,博士,从事智能配电网态势 感知、新能源并网优化控制和智能配用电大数据云计算技术

等方面的研究,legendglj99@tju.edu.cn。

*为通信作者。