

适应大规模可再生能源接入的 电-氢系统双层配置策略

吴 霜¹ 徐 超² 翟晓萌¹ 王静怡¹ 刘汇川¹ 程 曦¹

(1. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院 2. 国网江苏省电力有限公司)

摘要：随着“双碳”目标的提出以及新型电力系统的构建，我国氢能产业发展已经进入加速期，电-氢系统将在我国能源转型中扮演更加重要的角色。针对电-氢系统的容量配置问题，该文提出适应大规模可再生能源接入的电-氢系统双层配置策略，以制氢成本和弃风弃光率为目标，以电-氢系统安全运行、设备容量等为约束，建立电-氢系统双层配置模型，并通过粒子群算法求解；最后，以含碱性水电解设备的电氢系统为例，验证了所提优化配置策略的有效性。

关键词：新型电力系统；电-氢系统；容量配置；粒子群优化

0 引言

我国能源结构问题亟待解决，构建更加多元、清洁、低碳、可持续的新型能源体系成为实现“能源产业战略性、整体性转型”的当务之急^[1]。构建新型能源体系被赋予的使命是保障国家能源安全，为中国式现代化提供源源不断的能源保障，与此同时还应保证为绿色低碳、高效智能的能源体系。为了构建新型能源体系，不能仅仅依靠新型电力系统的转型，同样也需有一定规模的可靠能源品类作为进一步保障。可再生能源制绿氢，以及进一步转化而来的绿氨和绿甲醇等氢基能源，与电能一样既属于“过程性能源”，又与石油、天然气一样属于“含能体能源”，氢基能源因其独特的双重属性承担起使新型电力系统与新型能源体系互通的媒介。

我国在“双碳”目标下，为加快构建新型电力

系统，需要充足的灵活性资源。制氢作为用电负荷是一种典型的灵活性资源，可以提高新能源利用率，助力新型能源体系的构建^[1]。通过煤电掺氨与气电掺氨燃烧发电，可有效实现火电清洁低碳转型，同时通过储氢（氨），可实现长周期储能，解决跨季能源平衡问题^[2-3]。在当前“西电东送”及大规模开发“沙戈荒”外送基地的背景下，未来特高压送出廊道紧张的局面将进一步加剧，绿氢、绿氨或绿甲醇可通过管输的方式实现长距离经济输送，是对特高压电力送出的一种有效补充。因此，新型能源体系可由以可再生能源为主体的新型电力系统和以“氢基能源”为首的新型能源两部分作为主要支撑，两者相互促进，相互依托，以绿色氢基能源为桥梁，共同组建中国式新型能源体系^[4-5]。

对此，本文构建电氢系统容量配置优化模型，

综合考虑到电氢系统的经济性与资源利用效率，将电氢系统容量配置作为优化决策变量，将制氢成本与弃风弃光率作为容量配置优化的目标函数，并采用粒子群算法进行求解，并以含碱性水电解装置的电氢系统为例，验证了所提配置策略的合理性。

1 电-氢系统组成结构

电氢系统组成包括分布式光伏可再生能源机组、制氢设备以及电池储能、储氢罐等设备，如图1所示，分别根据其运行特性建立相关设备的数学模型。

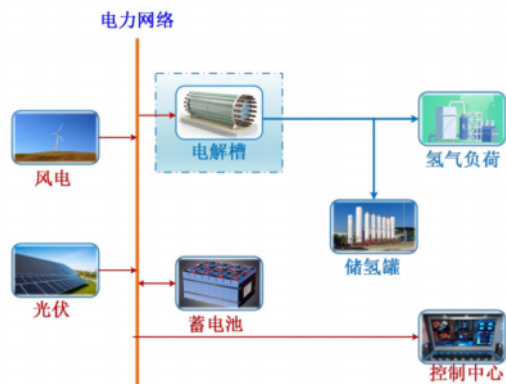


图1 电氢系统组成结构

1.1 电解槽模型

电力系统通过电解槽将电能转换为氢能，进而和氢能系统进行耦合，电解槽通过消耗电能发生电化学反应产生氢气和氧气，具体反应方程式如(1)所示：



根据电解原理的差异，电解水制氢技术主要分为4类，分别为碱性水电解、质子交换膜电解、阴离子交换膜电解和固体氧化物电解。不同类设备具有不同的制氢成本与小时级功率外特性，但面向系统容量配置问题，制氢设备模型重点关注配置成本与小时级功率外特性，因此对制氢设备可进行统一建模。主要体现电氢转换效率、设备运行容量与功率约束，以及制氢设备单位调度周期内的爬坡约束。

电制氢设备的电氢转换效率约束如式(2)所示：

$$G_{\text{EH}}^t = \frac{\lambda_{\text{EH}} P_{\text{EH}}^t}{\rho_{\text{H}_2}} \quad (2)$$

式中， G_{EH}^t 为 t 时刻制氢设备的制氢体积； P_{EH}^t 为 t 时刻制氢设备的电功率； λ 为电解槽的单位能耗； ρ_{H_2} 为标准状态下氢气的密度。

电制氢设备容量与功率约束如式(3)所示：

$$P_{\text{EH.min}} \leq P_{\text{EH}}^t \leq P_{\text{EH.max}} \quad (3)$$

式中， $P_{\text{EH.max}}$ 、 $P_{\text{EH.min}}$ 分别为不同制氢设备的最大最小运行功率。

电制氢设备爬坡约束如式(4)所示：

$$|P_{\text{EH}}^t - P_{\text{EH}}^{t-1}| \leq \Delta P_{\text{EH}}^{\text{max}} \quad (4)$$

式中， $\Delta P_{\text{EH}}^{\text{max}}$ 为不同电制氢设备的最大调整功率。

1.2 储氢罐模型

氢储能作为一种新型的储能方式，在能量维度、时间维度和空间维度上具有突出的优势，可在以新能源为主体的新型电力系统建设中发挥重要作用。根据氢气的存储状态可分为气态储氢、液态储氢和固态储氢3类。

t 时刻储氢罐中氢气体积状态可表示为：

$$V_{\text{H}_2}(t) = V_{\text{H}_2}(t-1) + \eta_{\text{H}_2\text{in}} V_{\text{H}_2\text{in}}(t) - V_{\text{H}_2\text{out}}(t) / \eta_{\text{H}_2\text{out}} \quad (5)$$

每个时刻储氢罐中的氢气体积需要限制在储氢罐的最大存储体积内：

$$V_{\text{H}_2\text{min}} \leq V_{\text{H}_2}(t) \leq V_{\text{H}_2\text{max}} \quad (6)$$

储氢罐充放氢需满足充氢和放氢不同时进行的约束：

$$V_{\text{H}_2\text{in}}^{\text{min}} e_{\text{in}}(t) \leq V_{\text{H}_2\text{in}}(t) \leq V_{\text{H}_2\text{in}}^{\text{max}} e_{\text{in}}(t) \quad (7)$$

$$V_{\text{H}_2\text{out}}^{\text{min}} e_{\text{out}}(t) \leq V_{\text{H}_2\text{out}}(t) \leq V_{\text{H}_2\text{out}}^{\text{max}} e_{\text{out}}(t) \quad (8)$$

$$e_{\text{in}}(t) + e_{\text{out}}(t) \leq 1 \quad (9)$$

$$e_{\text{in}}(t) \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$e_{\text{out}}(t) \in \{0, 1\} \quad (11)$$

1.3 电池储能模型

电池储能系统模型主要包括电池荷电状态 (State of Charge, SOC) 约束, 充放电功率约束等, 式 (12) ~ 式 (13) 表示电池充放电过程中的 SOC 约束; 式 (15) ~ 式 (16) 表示 SOC 与充放电功率约束; 式 (18) 表示整个调度周期内电池储能系统的容量平衡。

$$SOC_{BS}^{t+1} = SOC_{BS}^t(1 - \delta_{BS}) + \frac{P_{BS,c}^t \eta_{BS}^c \Delta t}{C_{BS}} \quad (12)$$

$$SOC_{BS}^{t+1} = SOC_{BS}^t(1 - \delta_{BS}) - \frac{P_{BS,d}^t \Delta t}{\eta_{BS}^d C_{BS}} \quad (13)$$

式中, SOC_{BS}^t 为 t 时刻蓄电池的荷电状态; δ_{BS} 为蓄电池的自损耗率; $P_{BS,c}^t$ 、 $P_{BS,d}^t$ 为 t 时刻充、放电功率; C_{BS} 为蓄电池安装容量; η_{BS}^c 、 η_{BS}^d 为蓄电池充、放电效率。

$$SOC_{BS}^{\min} \leq SOC_{BS}^t \leq SOC_{BS}^{\max} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{BS,c}^t \leq v_{BS,c}^t \cdot P_{BS,c}^{\max} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{BS,d}^t \leq v_{BS,d}^t \cdot P_{BS,d}^{\max} \quad (16)$$

$$v_{BS,c}^t + v_{BS,d}^t \leq 1 \quad (17)$$

式中, SOC_{BS}^{\min} 、 SOC_{BS}^{\max} 分别为蓄电池荷电状态上、下限; $P_{BS,c}^{\max}$ 、 $P_{BS,d}^{\max}$ 分别为蓄电池最大充、放电功率, $v_{BS,c}^t$ 、 $v_{BS,d}^t$ 分别为电池储能机组充放电状态 0~1 变量。

$$SOC_{BS}^T = SOC_{BS}^1 \quad (18)$$

2 电 - 氢系统双层优化配置模型

本文建立电氢系统双层优化配置模型, 同时考虑设备建设投资成本与目标年限的生产模拟成本, 面向系统全生命周期总成本最小进行规划设计。

2.1 电 - 氢系统双层优化配置模型优化目标

规划模型目标函数为全生命周期年等额成本最小, 包括设备年等额投资成本、年等额运维成本、弃风弃光惩罚, 如式 (19) 所示:

$$\min F = C_{inv} + C_{opt} + C_{EA} \quad (19)$$

设备年等额投资成本中计及设备折现率, 可由式 (20) 计算得出:

$$C_{inv} = \sum_j C_{inv,j} \quad (20)$$

$$C_{inv,j} = c_{inv,j} E_j \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (21)$$

$$j = PV, BS, HT, AWE, PEM \quad (22)$$

式中, $c_{inv,j}$ 为第 j 种设备的单位容量投资成本; E_j 为第 j 种设备的规划容量; n 为系统的规划寿命年数; r 为设备折现率。

年等额运维成本 C_{opt} 、弃风弃光惩罚 C_{EA} 可以通过式 (23) ~ 式 (24) 求得。由于系统为离网运行状态, 故运维成本主要考虑设备维护成本。

$$C_{opt} = \sum_j \lambda_{opt,j} \cdot \sum_{t=1}^T P_j^t \quad (23)$$

$$C_{EA} = \lambda_{EA} \cdot \sum_{t=1}^T (P_{Re}^t - \bar{P}_{Re}^t) \quad (24)$$

式中, $\lambda_{opt,j}$ 为设备的单位功率运维成本系数; P_j^t 为设备的实时运行功率; λ_{EA} 为单位弃风弃光成本; P_{Re}^t 为系统实时消纳的风光功率; \bar{P}_{Re}^t 为基于风光资源的实际实时风光发电功率。

2.2 电 - 氢系统双层优化配置模型约束条件

约束条件主要分为规划约束、运行约束以及规划运行耦合约束三部分。规划约束用于表示系统中各类设备的规划容量约束, 如式 (25) 所示:

$$E_j \geq 0 \quad (25)$$

运行约束面向系统生产模拟, 首先分别建立系统电力平衡方程与制氢产量平衡方程:

$$P_{pv}^t + P_{wt}^t + P_{BS,d}^t = P_{BS,c}^t + P_{HS}^t + P_{load}^t \quad (26)$$

$$G_{awe}^t + G_{pem}^t + G_{HS,d}^t = G_{HS,c}^t + H_{LD}^t \quad (27)$$

式中, P_{wt}^t 为 t 时刻的风电机组并网发电功率; P_{pv}^t 为 t 时刻的光伏机组并网发电功率; P_{HS}^t 为 t 时刻制氢装置的用电功率; P_{load}^t 为用电负荷; G_{HS}^t 为 t 时

刻制氢装置的制氢体积。

电氢功率平衡约束之外，系统运行约束还包括式(2)~式(18)对应的制氢设备与储能设备运行约束，以及风电、光伏发电机组的实际并网功率约束，如式(28)~式(29)所示：

$$0 \leq P_{wt}^t \leq \bar{P}_{wt}^t \quad (28)$$

$$0 \leq P_{pv}^t \leq \bar{P}_{pv}^t \quad (29)$$

式中， \bar{P}_{wt}^t 为风电机组在 t 时刻风电资源条件下的预期发电功率， \bar{P}_{pv}^t 为光伏机组在 t 时刻光照条件下的预期发电功率。

第三部分约束为规划与运行的耦合约束，体现为设备规划容量与设备运行功率的约束。其中制氢设备容量与运行功率约束如式(30)~式(31)所示：

$$\mu_{EH,max} E_{EH} = P_{EH,max} \quad (30)$$

$$\mu_{EH,min} E_{EH} = P_{EH,min} \quad (31)$$

式中， E_{EH} 为制氢设备安装容量； $P_{EH,max}$ 、 $P_{EH,min}$ 分别为制氢设备的运行功率最大、最小百分比。

储能设备的设备容量与系统SOC存在运行过程中的充放电深度约束，如式(32)~式(33)所示：

$$\mu_{ES,min} E_{ES} = SOC_{ES}^{min} \quad (32)$$

$$\mu_{ES,max} E_{ES} = SOC_{ES}^{max} \quad (33)$$

式中， E_{ES} 为储电、储氢设备安装容量； $\mu_{ES,max}$ 、 $\mu_{ES,min}$ 分别为储能设备充电/气、放电/气的最大深度百分比。

2.3 电-氢系统双层优化配置模型求解

电氢系统双层优化运行模型为非线性非凸优化模型，采用启发式算法求解，报告中采用粒子群算法求解。粒子群算法从解空间内随机的位置开始，向着适应度函数最小的方向移动，通过不断迭代，在规定的解空间范围内求得最优解。粒子群更新表达式为：

$$\begin{cases} v_{i+1} = \omega v_i + c_1 r_1 (p_{besti} - x_i) + c_2 r_2 (g_{besti} - x_i) \\ x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \end{cases} \quad (34)$$

式中， v_i 为第 i 个粒子速度向量； ω 为惯性权重；

c_i 为加速因子； r_i 为区间[0, 1]均匀分布的随机数； v_i 为第 i 个粒子速度向量； p_{besti} 为第 i 个粒子的个体最优位置； x_i 为第 i 个粒子的位置向量； g_{besti} 为第 i 个粒子的个体最优位置。图2为粒子群算法位置更新过程。

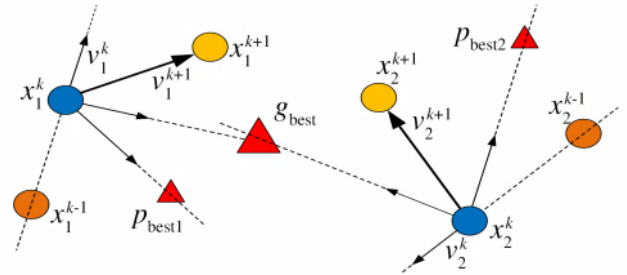


图2 粒子群算法位置更新过程

粒子群算法求解电氢系统双层规划模型如图3所示，首先初始化算法参数，设置粒子群算法中粒子的上下界限，随机生成一组粒子为初始粒子；之后，设置双层优化模型优化目标为粒子群算法的适应度函数，并计算初始粒子群的适应度值；然后将每个粒子的适应度值与个体最优解适应度值比较，保留最优的解；再根据粒子群算法的原理更新粒子的速度和位置；最后通过不断迭代得到电氢系统的最优配置方案。

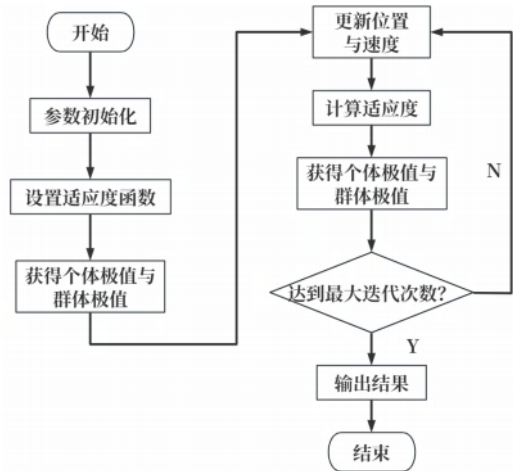


图3 粒子群算法求解电氢系统双层规划模型

3 仿真分析

以碱性水电解 (PEM) 为例, 相关参数如表 1 所示, 储能系统参数如表 2 所示, 风光机组投资与运维成本如表 3 所示。

表 1 PEM 设备参数

主要指标	数值
电氢比 (kWh/kg)	55
功率调节范围	[20%~100%]
爬坡能力	50%/h
产氢效率	62%
单位投资成本 (元/Nm ³)	10000
单位运维成本 (元/Nm ³)	0.75

表 2 储能系统参数

设备名称	单位投资成本	单位运维成本	SOC 范围	蓄能/放能效率
储电系统	2200 元/kW	0.05 元/kWh	[0.10, 0.90]	0.92/0.92
储氢系统	75 元/Nm ³	0.01 元/Nm ³	[0.05, 0.95]	0.95/0.95

表 3 可再生能源机组相关参数

设备名称	单位投资成本	单位运维成本
风电机组	6000 元/kW	0.03 元/kWh
光伏机组	3800 元/kW	0.04 元/kWh

算例验证计算平台配置为 Intel (R) Core (TM) i5-8400 CPU, 8.00G RAM, 基于 Matlab2021b 仿真平台建模, 上层优化采用粒子群算法求解, 下层优化调用 Cplex 商用求解器进行求解, 粒子群算法求解适应度曲线如图 4 所示, 可见, 粒子群算法最终收敛。

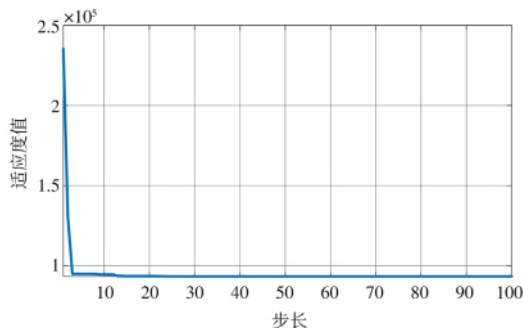


图 4 配电网网损情况

经过粒子群算法寻优可得, 电氢系统中风电机组、光伏机组、电解槽、电池储能以及储氢罐的最优

配置结果如表 4 所示。

表 4 电氢系统最优配置结果

设备名称	蓄能/放能效率
风电机组	5.546 kW
光伏机组	2 kW
电池储能	13.115 kW
电解槽	2.056 kW
储氢罐	2 Nm ³

4 结束语

对于大规模可再生能源接入的电 - 氢融合配置问题, 本文提出电 - 氢融合系统双层配置策略。构建了电氢系统容量配置优化模型, 将电氢系统容量配置作为优化决策变量, 将制氢成本与弃风弃光率作为容量配置优化的目标函数; 最后采用粒子群算法求解双层配置模型, 为电氢系统规划投资提供理论基础。

参考文献

- [1] 王文焯, 姜飞, 张新鹤, 等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度 [J]. 电网技术, 2024, 48 (1): 197-211.
- [2] 郜捷, 宋洁, 王剑晓, 等. 支撑中国能源安全的电氢耦合系统形态与关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (19): 1-15.
- [3] 郑博, 白章, 袁宇, 等. 多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (23): 8486-8496.
- [4] 张盛, 郑津洋, 戴剑锋, 等. 可再生能源大规模制氢及储氢系统研究进展 [J]. 太阳能学报, 2024, 45 (1): 457-465.
- [5] 郭小龙, 亢朋朋, 田晨, 等. 考虑碱性电解槽状态转换的风电制 - 储氢系统优化调度 [J]. 高压电器, 2024, 60 (7): 60-68, 77.

(收稿日期: 2024-10-05)