

DOI: 10.19666/j.rlfed.202307119

# 基于权重计算的光储耦合制氢系统 模型预测优化控制

李建林<sup>1</sup>, 梁忠豪<sup>1</sup>, 赵文鼎<sup>1</sup>, 梁策<sup>1</sup>, 袁晓冬<sup>2</sup>

(1.北京未来电化学储能系统集成技术创新中心(北方工业大学), 北京 100144;

2.国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**[摘要]** 对光储耦合制氢系统优化控制策略进行研究, 提出一种考虑存在博弈关系的多目标优化的模型预测控制(MPC)功率分配策略。首先, 构建光储耦合制氢系统架构, 明确光储耦合制氢系统运行时需要满足的功率平衡方程; 其次, 将自适应多目标粒子群优化算法和 MPC 算法相结合搭建复合算法模型, 给出同时考虑碱性电解槽(AEL)和储能电池特性的 3 个目标函数, 计算出最优控制增量权重系数; 最后, 利用 MATLAB-function 函数模块构建 MPC 控制器模型, 将计算出的最优控制增量权重系数应用于 MPC 优化过程中, 实现光储耦合制氢系统在线功率分配。与传统 MPC 优化控制方法进行仿真分析, 验证了所提方法在一定程度提高了储能系统的运行指标, 同时又降低了 AEL 输入功率的波动性, 增强了光储耦合制氢系统的动态功率平衡能力。

**[关键词]** 光伏制氢; 储能系统; MPC; 权重系数; 功率分配

**[引用本文格式]** 李建林, 梁忠豪, 赵文鼎, 等. 基于权重计算的光储耦合制氢系统模型预测优化控制[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 59-67. LI Jianlin, LIANG Zhonghao, ZHAO Wending, et al. MPC optimization control of optical-storage coupling hydrogen production system based on weight calculation[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 59-67.

## MPC optimization control of optical-storage coupling hydrogen production system based on weight calculation

LI Jianlin<sup>1</sup>, LIANG Zhonghao<sup>1</sup>, ZHAO Wending<sup>1</sup>, LIANG Ce<sup>1</sup>, YUAN Xiaodong<sup>2</sup>

(1.Beijing Future Technology Innovation Centre for Electrochemical Energy Storage System Integration

(North China University of Technology), Beijing 100144, China;

2.State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Optimization control strategies for hydrogen production system coupled with photovoltaic and energy storage are studied, and a power allocation strategy based on model predictive control that considers multi-objective optimization problems with game relationships is proposed. Firstly, the architecture of the hydrogen production system coupled with photovoltaic and energy storage is constructed, and the power balance equation that needs to be met during the operation of the hydrogen production system coupled with photovoltaic and energy storage is clarified. Secondly, a composite algorithm model is established by combining the self-adaptive multi-objective particle swarm optimization algorithm with the MPC algorithm, and three objective functions that consider both alkaline electrolyzer (AEL) and energy storage battery characteristics are provided, then the weight coefficients of the optimal control increment are calculated. Finally, the MPC controller model is constructed using the MATLAB-function module, and the calculated weight coefficients of the optimal control increment are applied to the MPC optimization process, thus the online power allocation for the hydrogen production system coupled with photovoltaic and energy storage is ultimately achieved. Through simulation analysis and comparison with two optimization control methods, it is proven that the proposed method in this paper improves the operational indicators

收稿日期: 2023-07-29 网络首发日期: 2023-11-06

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5400-202318247A-1-1-ZN)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid (5400-202318247A-1-1-ZN)

第一作者简介: 李建林(1976), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大规模储能技术, dkyllj@163.com.

通信作者简介: 梁忠豪(1990), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为氢储能技术, 16601556629@163.com.

of the energy storage system to a certain extent while reduces the fluctuation of AEL input power, it enhances the dynamic power balance ability of the hydrogen production system coupled with photovoltaic and energy storage.

**Key words:** photovoltaic hydrogen production; energy storage system; MPC; weight coefficient; power distribution

光储耦合制氢系统（简称“制氢系统”）的推广应用不仅缓解了可再生能源并网消纳阻塞，而且还有助于解决氢能的低碳、低成本生产问题<sup>[1-2]</sup>。在制氢系统中主要制氢设备为碱性电解槽（alkaline electrolyzer, AEL）。目前，AEL 由于设备电压低、单独功率较高和成本低等优势已经达到商业化运行水平，但是 AEL 动态响应偏慢并且与波动电源适配性差<sup>[3-4]</sup>。因此，制氢系统中利用储能电池来平滑光伏出力，提高 AEL 与波动电源的适配性和运行寿命。然而，储能电池平抑波动的能力与储能电池运行寿命、死区时间和电池损耗等也有一定的关系。综上所述，对制氢系统进行优化控制，将各设备功率合理分配，兼顾存在博弈关系的多个目标，关键参数是储能电池出力能力、储能电池进入死区时间和 AEL 功率波动率。寻求多目标最优值，这样既能实现在一定程度上提升 AEL 平滑制氢的能力、制氢效率和光伏利用率，延长 AEL 的运行寿命，又兼顾储能电池的平抑能力、运行寿命和电池损耗，也是制氢系统亟待解决的难点问题。

在电氢耦合系统优化控制策略方面，文献[5]考虑分时电价因素，以储能经济性最大、能量损耗最小以及电网功率波动最小为目标，基于多目标粒子群优化算法提出一种电热氢多元储能优化调度方法，但仅考虑储能电池的自身特性和经济性，并未考虑制氢设备的特性；文献[6]针对风氢耦合系统，以平滑上网功率、提高风电消纳能力为目标，提出系统 12 种运行模式下的优化控制方法，但其中并未考虑电解槽和储能系统的最优运行问题。相比传统优化控制方法，模型预测控制（model predictive control, MPC）对于解决多目标、多变量、多约束系统控制问题具有一定的优越性，可以实现在线动态调控<sup>[7]</sup>。文献[8]针对直流微网混合储能系统，搭建了考虑各种约束条件下的 MPC 能量管理策略，并给出系统脱离约束情况下算法无解时的解决方案。文献[9]针对风光储氢微网系统，提出一种基于 MPC 的在线功率优化方法，搭建了系统线性离散状态空间模型，仿真得出 MPC 权重矩阵的选取一定程度上影响其跟踪强度和预测结果，但并未给出权重系数具体计算方法。综上所述，目前针对电氢耦合系统优化控制的研究仍存在以下问题：1) 在设计

和选择电氢耦合系统优化控制方法时，并未兼顾各子系统的运行特性、损耗等；2) MPC 作为优化控制方法时变量的权重系数直接给定，缺少理论依据和计算方法。

为解决以上问题，本文对制氢系统在线功率优化分配展开研究，提出一种考虑多目标最优的 MPC 优化控制方法，包含：1) 搭建一种 MPC 优化控制权重系数的复合计算方法，即自适应多目标粒子群优化（adaptive multi-objective particle swarm optimization, AMOPSO）算法和 MPC 算法相结合的复合算法，其中兼顾储能电池出力能力评价系数、储能电池进入死区时间和 AEL 功率波动率多目标之间的博弈关系，基于此，求得 MPC 优化控制最优权重系数；2) 利用 MATLAB-function 函数模块构建 MPC 控制器，将计算出的最优控制增量的权重系数应用于 MPC 控制器中，实现制氢系统在线功率分配。最后进行仿真分析，验证所提方案的适用性。

## 1 光储耦合制氢系统结构

光储耦合制氢系统由光伏电池、AEL、储氢罐、储能电池、负荷及电网构成<sup>[10-11]</sup>，如图 1 所示。通过考虑多目标最优计算出 MPC 控制器控制增量的权重系数，进而通过 MPC 控制器得出储能电池充/放功率和 AEL 阵列需求功率，进而根据式(1)计算出电网供电功率，最终实现在线调控分配。直流母线电压由电网维持稳定，光伏电池为制氢系统的主要能量来源。

制氢系统满足功率平衡关系为：

$$P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{V}}(t) - P_{\text{load}}(t) = P_{\text{el}}(t) - P_{\text{bat}}(t) \quad (1)$$

式中： $P_{\text{grid}}(t)$ 为  $t$  时刻电网提供功率或光伏并网功率， $P_{\text{grid}}(t) > 0$  表示电网提供功率， $P_{\text{grid}}(t) < 0$  表示光伏并网功率； $P_{\text{V}}(t)$ 为  $t$  时刻光伏电池输出功率； $P_{\text{bat}}(t)$ 为  $t$  时刻储能电池的充/放电功率， $P_{\text{bat}}(t) > 0$  表示储能电池放电， $P_{\text{bat}}(t) < 0$  表示储能电池充电； $P_{\text{el}}(t)$ 为  $t$  时刻 AEL 输入功率； $P_{\text{load}}(t)$ 为  $t$  时刻负荷功率。

储能电池主要用于平抑 AEL 输入功率的波动，因此不考虑储能电池向电网售电情况，另外，在不影响后续分析的前提下，做如下假设<sup>[12]</sup>：

1) 储能电池不出现自放电现象；

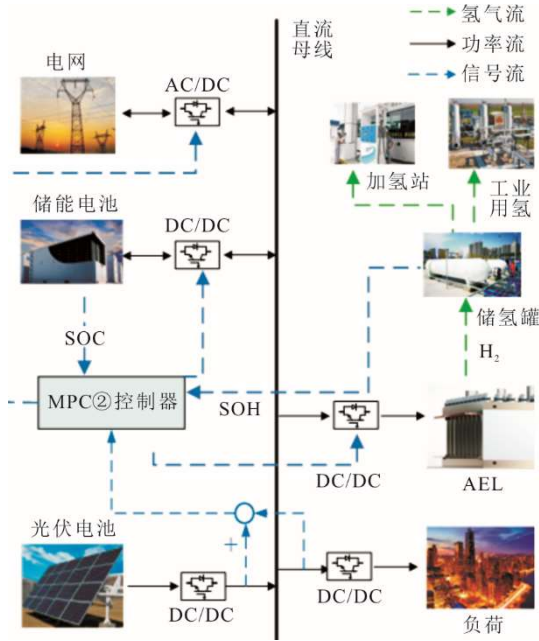


图 1 光储耦合制氢系统结构

Fig.1 Structural diagram of a photovoltaic storage coupled hydrogen production system

- 2) 储能电池荷电状态 (state of charge, SOC) 表示储能电池组整体荷电状态;
- 3) 储氢罐氢容量比例 (hydrogen capacity ratio, HCR) 表示储氢罐整体储氢状态;
- 4) 不考虑启停、负荷变化过程中 AEL 的温度波动, 即将电解槽温度记为常数。

## 2 搭建 AMOPSO-MPC 复合算法优化模型

建立多目标优化模型, 建立以储能电池出力能力评价系数、储能电池进入死区时间和 AEL 功率波动均值最小为目标函数, 以权重系数为决策变量的 AMOPSO-MPC 复合算法 (简称“复合算法”)。另外, 为避免本节中所用 MPC 算法与第 3 节所述 MPC 控制器关键参数混淆, 特定义若干关键参数: 1) 复合算法计算 1 次, 记其中 MPC 算法优化计算时的预测步数为  $N_1$ , 总时长为  $T_1$ , 2 步之间的间隔时间为  $\Delta t$ , 每步中的预测时域为  $N_p$ , 控制时域为  $N_p-1$ ; 2) 记 MPC 控制器采样周期为  $T$ , 每个周期内计算 1 次, 每次计算的预测时域为  $N_p$ , 控制时域为  $N_p-1$ 。

### 2.1 目标函数

#### 2.1.1 储能电池出力能力评价系数

储能电池出力能力评价系数计算式<sup>[13]</sup>为:

$$C_{bat} = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{t=1}^{N_1} (S_{OC}(t) - 50\%)^2} \quad (2)$$

式中:  $S_{OC}(t)$  为  $t$  时刻储能电池的荷电状态,  $S_{OC}(t)=50\%$  时表示储能电池具备最大充/放电能力。  $C_{bat}$  越小, 表明储能电池的荷电状态越接近 50%, 储能电池在下一时刻吞吐电量的能力越大, 深充深放的程度越低。

$S_{OC}(t)$  需满足式(3)的约束条件,  $S_{OC,min}$ 、 $S_{OC,max}$  分别表示储能电池荷电状态下限和上限。

$$S_{OC,min} \leq S_{OC}(t) \leq S_{OC,max} \quad (3)$$

#### 2.1.2 储能电池进入死区时间

储能死区指储能电池无法吞吐能量的荷电状态范围, 储能电池由于荷电状态越限而无法吞吐能量的时间为“死区时间”。进入死区时, 储能电池在一定程度上不再具备对电解槽功率波动的平抑能力。储能电池进入死区时间  $T_D$  计算公式为:

$$\begin{cases} T_D = \sum_{t=1}^{N_1} [f(x_1) \cup f(x_2)] \cdot \Delta t \\ f(x) = \begin{cases} 0 & x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases} \\ x_1 = \frac{S_{OC,min}}{S_{OC}(t)}, x_2 = \frac{S_{OC}(t)}{S_{OC,max}} \\ S_{OC}(t+1) = S_{OC}(t) - \frac{\Delta t}{Q_n u_{bat}} P_{bat}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Q_n$  为储能电池的额定容量;  $u_{bat}$  为储能电池电压。  $T_D$  越小表示储能电池进入死区时间越短, 储能电池平抑波动能力越强。

$P_{bat}(t)$  需满足约束条件:

$$-P_{bat-E} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat-E} \quad (5)$$

式中:  $P_{bat-E}$  为储能电池额定功率。

#### 2.1.3 AEL 功率波动均值

AEL 输入功率在总时长  $T_1$  内的波动均值  $\Delta P_{el-mean}$  计算公式为:

$$\Delta P_{el-mean} = \sum_{t=0}^{N_1-1} |P_{el}(t+1) - P_{el}(t)| / T_1 \quad (6)$$

式中:  $\Delta P_{el-mean}$  越小, 表示储能平抑 AEL 功率波动的综合平均水平越高, 更有利于 AEL 高效运行并延长 AEL 使用寿命, 并且 AEL 运行成本越低。

AEL 输入功率波动约束以及储氢罐储氢状态约束为:

$$\begin{cases} |P_{el}(t + \Delta t) - P_{el}(t)| \leq \delta_{el} P_{el-E} \Delta t \\ H_{CR,min} \leq H_{CR}(t) \leq H_{CR,max} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\delta_{el}$  为 AEL 输入功率单位时间内波动限值比例, 取 5%;  $P_{el-E}$  为 AEL 额定功率;  $H_{CR,min}$ 、 $H_{CR,max}$  分别为储氢罐储氢容量比例的下限和上限。

## 2.2 搭建 AMOPSO 算法优化模型

在 AMOPSO 算法优化模型中,记搜索空间为二维,粒子种群规模为  $N$ ,各解均对应空间中的粒子,即权重系数,随算法更新迭代过程各粒子在搜索空间不断飞行向最优解靠近。本文所提 AMOPSO 算法中引入混沌运动思想,对当前种群的最优粒子进行混沌寻优操作,充分发挥混沌运动的随机性优势,在一定程度上克服了粒子群算法的初始种群生成缺乏多样性、算法易陷入局部最优的缺点<sup>[14-15]</sup>。另外,由于惯性权重影响粒子群算法性能,若其值较大,有利于全局寻优,不利于局部寻优;其值较小,有利于局部寻优,不利于全局寻优<sup>[16]</sup>。因此,本文所提 AMOPSO 算法采用线性递减权重值 (linearly decreasing weight, LDW) 策略将惯性权重设定为动态值来提高算法的寻优能力。综上,AMOPSO 算法优化模型<sup>[17]</sup>为:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{id}(f+1) = w\mathbf{v}_{id}(f) + c_1 d_{\text{rand1}} (\mathbf{P}_{\text{best},id} - \mathbf{x}_{id}(f)) + \\ c_2 d_{\text{rand2}} (\mathbf{G}_{\text{best},id} - \mathbf{x}_{id}(f)) \\ \mathbf{x}_{id}(f+1) = \mathbf{x}_{id}(f) + r\mathbf{v}_{id}(f+1) \\ w^{(f)} = (w_{\text{ini}} - w_{\text{end}}) \times (G_k - g) / G_k + w_{\text{end}} \\ w = w_{\text{ini}} - (w_{\text{ini}} - w_{\text{end}}) \times f / F \end{cases} \quad (8)$$

式中:位置向量  $\mathbf{x}_{id}=[x_{i1},x_{i2}]$ ,速度向量  $\mathbf{v}_{id}=[v_{i1},v_{i2}]$ , $i=1,2,\dots,N$ ;  $N$  为初始种群中的粒子数; $f$  为当前迭代次数; $F$  为最大迭代次数; $c_1$ 、 $c_2 \geq 0$  为加速因子,通常取值  $c_1=c_2=2$ ;  $d_{\text{rand1}}$ 、 $d_{\text{rand2}}$  为在  $[0,1]$  内均匀分布随机常数; $r$  为约束因子,通常取值为 1;  $\mathbf{P}_{\text{best},i}$  为粒子  $i$  在决策空间中的局部最优解;  $\mathbf{G}_{\text{best},i}$  为引导粒子  $i$  不断向最优解进化飞行的全局最优解;  $w$  为惯性权重,其值为非负;  $w_{\text{ini}}$  为初始惯性权重;  $w_{\text{end}}$  为迭代至最大进化代数时的惯性权重。

## 2.3 搭建 AMOPSO-MPC 复合算法优化模型

AMOPSO-MPC 复合算法(图 2)外层算法为 AMOPSO 算法,内层算法为 MPC 算法。复合算法通过 MATLAB 编程实现,属于一种离线优化计算方法。模型求解结果为一组 Pareto 最优解,通过拥挤距离排序法选取 MPC 控制器最优权重系数。本文所用拥挤距离排序法为:在二维空间中,拥挤距离表示 Pareto 最优解中每个解与周围解的密集程度,具体是指在一个解  $m$  周围包含解  $m$  本身但不包括其他解的长方形(以最近邻解作为顶点的长方形)的长,长越小表示该解  $m$  周围越拥挤,即拥挤距离越小,Pareto 最优解中边界的 2 个解拥挤距离

为无穷大。计算出所有解的拥挤距离之后,拥挤距离最小的解为最优解,即本文所求 MPC 控制器最优权重系数。MPC 算法与 MPC 控制器的状态方程和代价函数相同,具体见第 3 节。

## 3 构建制氢系统 MPC 模型

### 3.1 状态方程

储氢罐容量  $H_{\text{CR}}$  计算公式为:

$$\frac{dH_{\text{CR}}}{dt} = \frac{RT_{\text{sto}}\eta_{\text{F}}P_{\text{el}}}{V_{\text{sto}}zFu_{\text{el}}p_{\text{sto\_max}}} \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{el}}$  为电解槽总输入功率;  $u_{\text{el}}$  为电解槽单槽电压;  $R$  为气体常数;  $T_{\text{sto}}$  为储氢罐温度;  $V_{\text{sto}}$  为储氢罐体积;  $p_{\text{sto\_max}}$  为储氢罐压力上限值;  $p_{\text{sto}}$  为储氢罐压力;  $\eta_{\text{F}}$  为法拉第效率;  $z$  为每次反应电子转移数;  $F$  为法拉第常数。

储能电池荷电状态  $S_{\text{OC}}$  计算公式为:

$$\frac{dS_{\text{OC}}}{dt} = -\frac{P_{\text{bat}}}{Q_{\text{n}}u_{\text{bat}}} \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{bat}}$  为电池功率,  $P_{\text{bat}} > 0$  表示储能电池放电,  $P_{\text{bat}} < 0$  表示储能电池充电。

MPC 控制器采样周期为  $T$ ,功率差  $P_{\Delta} = P_{\text{el}} - P_{\text{bat}}$ ,对光储耦合制氢系统模型进行离散化处理,计算公式为:

$$\begin{cases} H_{\text{CR}}(k+1) = H_{\text{CR}}(k) + \frac{RT_{\text{sto}}\eta_{\text{F}}T}{V_{\text{sto}}zFu_{\text{el}}p_{\text{sto\_max}}} P_{\text{el}}(k) \\ S_{\text{OC}}(k+1) = S_{\text{OC}}(k) - \frac{T}{Q_{\text{n}}u_{\text{bat}}} P_{\text{bat}}(k) \\ P_{\Delta}(k+1) = P_{\text{el}}(k) - P_{\text{bat}}(k) \end{cases} \quad (11)$$

设状态变量  $\mathbf{x}(k)=[H_{\text{CR}}(k) S_{\text{OC}}(k) P_{\Delta}(k)]^{\text{T}}$ ,控制变量  $\mathbf{u}(k)=[P_{\text{el}}(k) P_{\text{bat}}(k)]^{\text{T}}$ ,输出变量  $\mathbf{y}(k)=\mathbf{x}(k)$ ,被控输出变量  $\mathbf{y}_{\text{c}}(k)=\mathbf{C}\mathbf{x}(k)$ 。将式(11)转为 MPC 矩阵形式,即式(12)<sup>[18]</sup>所示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{y}_{\text{c}}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $k$  为当前采样时刻;  $\mathbf{A}$  为状态矩阵;  $\mathbf{B}$  为控制矩阵;  $\mathbf{C}$  为输出矩阵。其中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & \alpha_2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 1] \quad (13)$$

$$\alpha_1 = \frac{RT_{\text{sto}}\eta_{\text{F}}T}{V_{\text{sto}}zFu_{\text{el}}p_{\text{sto\_max}}}, \quad \alpha_2 = -\frac{T}{Q_{\text{n}}u_{\text{bat}}}$$

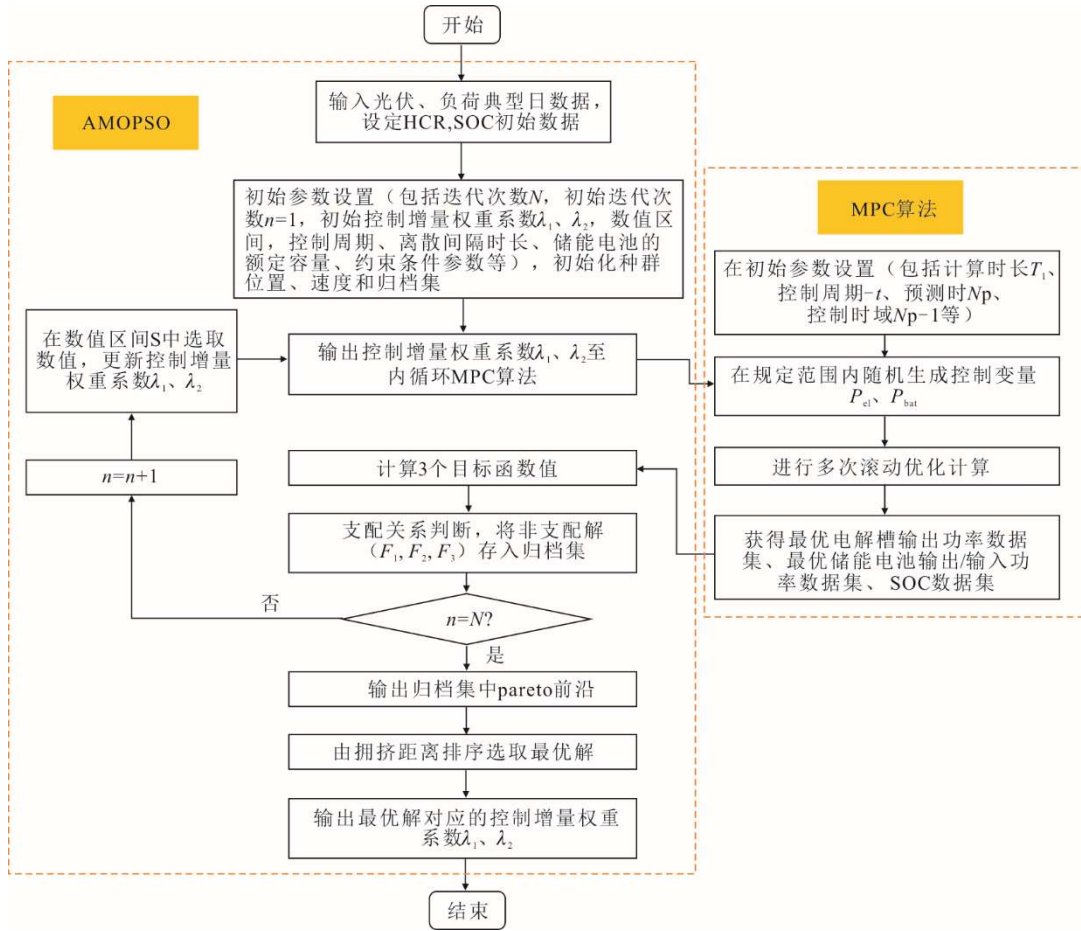


图 2 AMOPSO-MPC 复合算法流程  
Fig.2 Flowchart of the AMOPSO-MPC composite algorithm

### 3.2 代价函数

构建制氢系统 MPC 代价函数:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \beta \Delta y(k+i|k)^2 + \sum_{i=1}^{N_p-1} \Delta u(k+i|k)^T R \Delta u(k+i|k) \quad (14)$$

其中,

$$\begin{cases} \Delta y(k+i|k) = y_c(k+i|k) - y_{ref}(k+i|k) \\ R = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2] \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $N_p$  为预测时域;  $N_p-1$  为控制时域;  $R$  为控制增量的权重矩阵;  $\lambda_1, \lambda_2$  均为控制增量的权重因子;  $\beta$  为输出误差的权重因子; 设  $y_{ref}(k+j|k) = P_v(k) - P_{load}(k)$  作为输出变量的参考值, 使得每时刻尽可能减小制氢系统与电网的交互功率。

将代价函数最小值求解转化为二次规划问题, 最终将代价函数化简为式(16)形式:

$$J^* = \frac{1}{2} U(k)^T H U(k) + f^T U(k) \quad (16)$$

式中:  $H$  为与系数矩阵及权重系数有关的常数矩阵;

$f$  为与系数矩阵、初始状态及权重系数有关的常数矩阵;  $u(k)$  为控制变量矩阵, 代价函数中自变量由控制增量转化为控制量。

制氢系统 MPC 运行约束条件为:

$$P_{el\_min} \leq P_{el}(k+i|k) \leq P_{el\_max} \quad (17)$$

参照青海大学太阳能综合利用工程示范基地中所用 AEL 电解槽设备参数, 取  $P_{el\_min} = 50\% P_{el-E}$ ,  $P_{el\_max} = 110\% P_{el-E}$ , 另外, 式(3)、式(5)、式(7)同为 MPC 运行约束。

## 4 仿真分析

### 4.1 参数设置

MPC 算法中, 设  $N_1=10$ ,  $T_1=1s$ ,  $\Delta t=0.1s$ , 预测时域  $N_p=5$ , 控制时域  $N_p-1=4$ ; MPC 控制器 (求解步骤如图 3 所示) 采样周期为  $T=0.1s$ , 预测时域  $N_p=5$ , 控制时域  $N_p-1=4$ ; 储能电池荷电状态的上限  $Soc_{max}$  和下限  $Soc_{min}$  分别为 80% 和 20%<sup>[19]</sup>。储氢罐储氢状态的上限  $H_{CR,max}$  和下限  $H_{CR,min}$  分别为 90% 和 20%<sup>[20]</sup>。其他系统主要参数见表 1<sup>[21-24]</sup>。

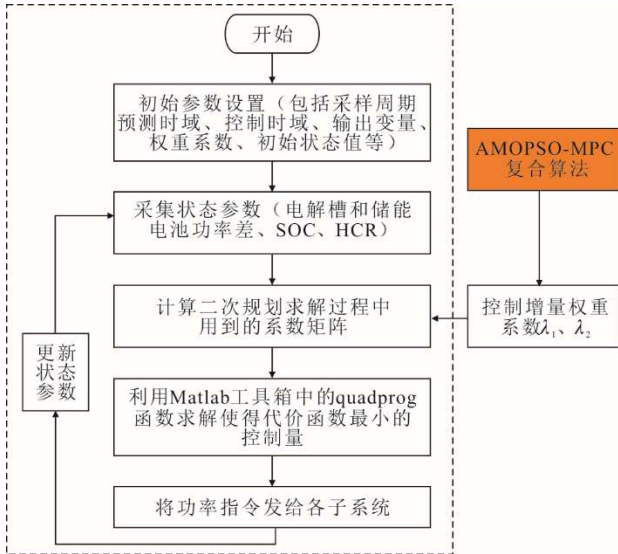


图 3 MPC 控制器优化控制流程

Fig.3 The optimization control flowchart of MPC controller

4.2 仿真验证

在 MATLAB/Simulink 仿真平台中搭建光储耦合制氢系统仿真模型，并选用传统优化控制策略与本文所提基于多目标博弈优化 MPC 的光储耦合制氢系统优化控制（图 4）策略进行对比分析，其中传统优化控制策略为：利用 AMOPSO 算法，以储能电池的充/放电功率  $P_{bat}$  和电解槽的输入功率  $P_{el}$  为决策变量，以储能电池出力能力评价系数、储能

电池进入死区时间、AEL 功率波动均值为目标函数进行功率优化分配。本文所提控制策略为：利用复合算法计算出 MPC 控制器的最优权重系数，实现制氢系统 MPC 在线优化控制。

表 1 系统主要参数  
Tab.1 Main parameters of the system

设备	项目	数值
直流母线	参考电压 $u/V$	400
	单槽额定电压 $u_{cl}/V$	2
碱性电解槽	额定电流 $I_{cl}/A$	33
	串联个数 $N_{cl}$	150
	额定功率 $P_{cl-E}/kW$	14
	额定产氢量 $(m^3 \cdot h^{-1})$	2
	法拉第效率 $\eta_F$	1
储能电池	额定功率 $P_{V-E}/kW$	22
	开路电压 $u_v/V$	64.2
光伏电池	短路电流 $I_{sc}/A$	5.96
	光伏组件并联个数 $N_{b-P}$	12
储能电池	光伏组件串联个数 $N_{b-S}$	6
	额定功率 $P_{bat-E}/kW$	12.8/12.8
	额定电压 $u_{bat}/V$	320
	储能的充电效率 $\eta_{cha}/\%$	90
	储能的放电效率 $\eta_{dis}/\%$	90
	初始 $Soc/\%$	72
	额定容量 $Q_n/(A \cdot h)$	40

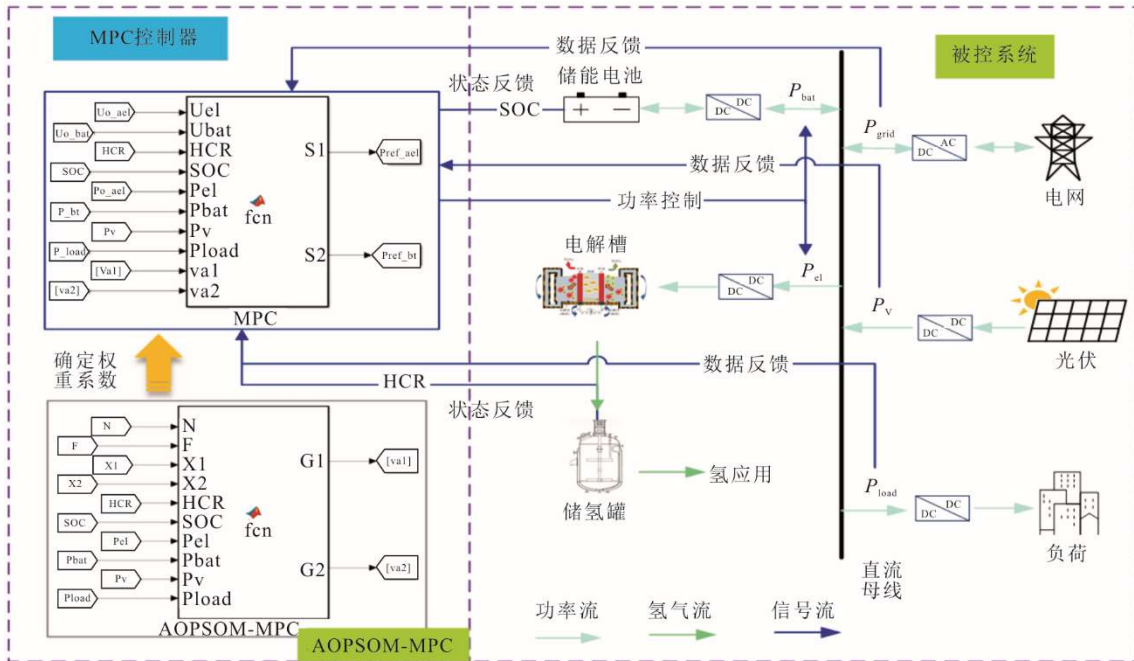


图 4 基于多目标博弈 MPC 的光储耦合制氢系统优化控制框架

Fig.4 Optimal control framework of the photo-storage coupling hydrogen production system based on multi-objective game MPC

以上控制过程中，系统维持电解槽两端电压不变，优化计算出电解槽的功率  $P_{el}$  之后，转化为电解槽电流数据，对电解槽进行电流控制，电解槽 DC/DC 控制策略采用功率外环、电流内环的双环控制。另外，光伏 DC/DC 控制策略、负荷 DC/DC 控制策略均采用单环电流 PI 控制，储能电池 DC/DC 控制策略采用功率外环、电流内环的双环控制，电网 AC/DC 控制策略采用电压外环、电流内环的双环控制<sup>[25]</sup>。

4.2.1.2 种优化控制方法下，电解槽功率及电压波动对比

图 5 和图 6 分别为 2 种控制方法下的电解槽输入功率及两端电压波动分布。

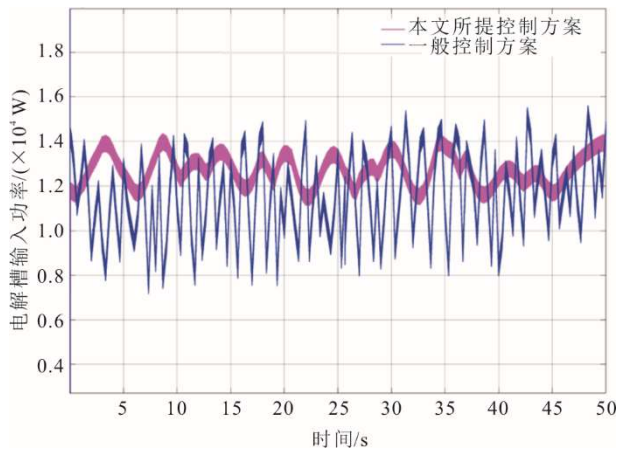


图 5 电解槽输入功率波动对比

Fig.5 Comparison of electrolyzer input power fluctuations

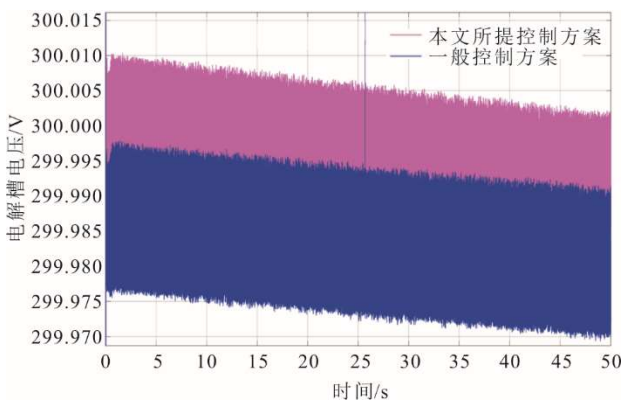


图 6 电解槽电压波动对比

Fig.6 Comparison of electrolyzer voltage fluctuations

由图 5 可以看出，相较于传统优化控制策略，本文所提控制策略很大程度上减小了电解槽输入功率的波动幅值以及波动频率，其中幅值最大波动率由 55%~110%降至 78%~102%。由图 6 可以看出，2 种优化控制策略对维持电解槽两端电压稳定具有

很好的效果，特别是本文所提优化控制策略。

4.2.2 2 种优化控制方法储能电池功率、电压及 Soc 波动对比

图 7—图 9 分别为储能电池功率、电压及 Soc 波动对比。

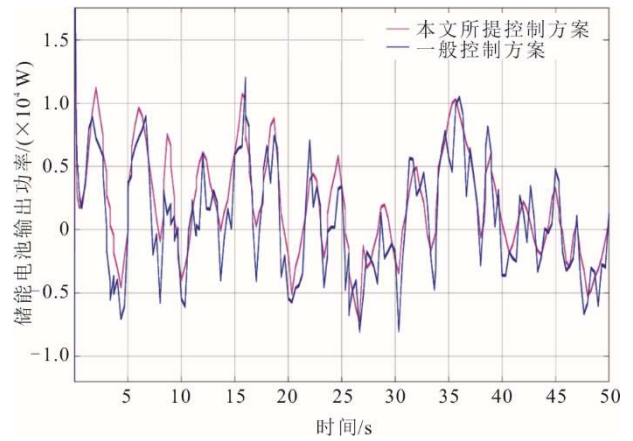


图 7 储能电池功率波动对比

Fig.7 Power fluctuations of energy storage batteries

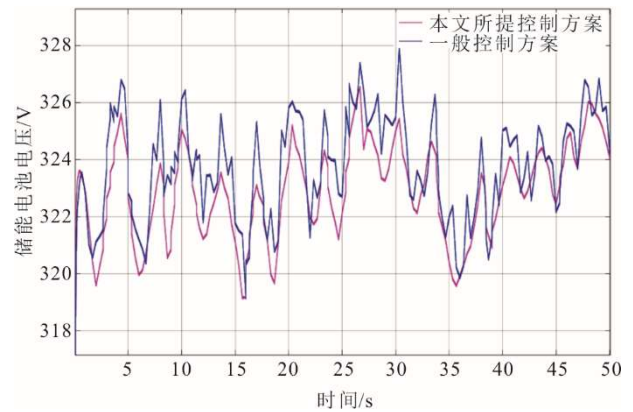


图 8 储能电池电压波动对比

Fig.8 Voltage fluctuations of energy storage batteries

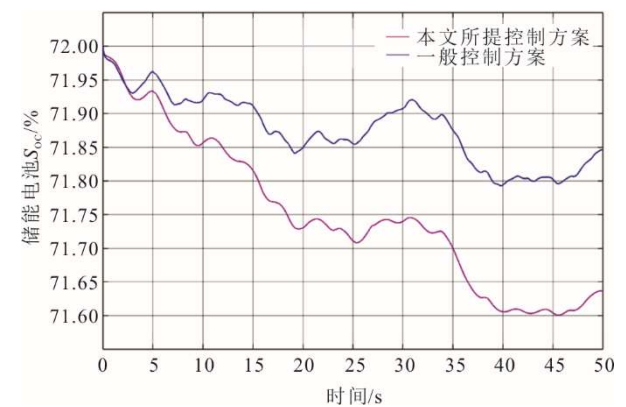


图 9 储能电池 Soc 波动对比

Fig.9 Soc fluctuations of energy storage batteries

由图7—图8可以看出,相较于传统优化控制策略,本文所提控制策略的使用,一定程度上减小了储能电池充/放功率的最大、最小幅值差,其中储能电池充/放功率的最大幅值由 $-8.0\sim 12.5\text{ kW}$ 降至 $-7.0\sim 11.5\text{ kW}$ ,储能电池电压的幅值最大波动由 $319.0\sim 328.0\text{ V}$ 降至 $319.0\sim 326.5\text{ V}$ 。另外,一个时间段内的充放电次数明显减少,进而减少储能电池在1个周期内的吞吐能量总值。同时,储能电池的电压波动维持在可承受范围以内。由图9可以看出,相比传统优化控制策略,本文所提控制策略下储能电池 $S_{OC}$ 变化相对平缓。

#### 4.2.3.2 种优化控制方法下,直流母线电压波动对比

图10为直流母线电压波动对比。由图10可以看出,本文所提控制策略下和传统优化控制策略下直流母线电压均能很好地维持在 $400.0\text{ V}$ ,并且本文所提控制策略下直流母线电压波动较为平缓,表明本文所提控制策略不仅可以优化电解槽的输入功率和储能电池的输出功率,并且可以优化整个系统运行性能。

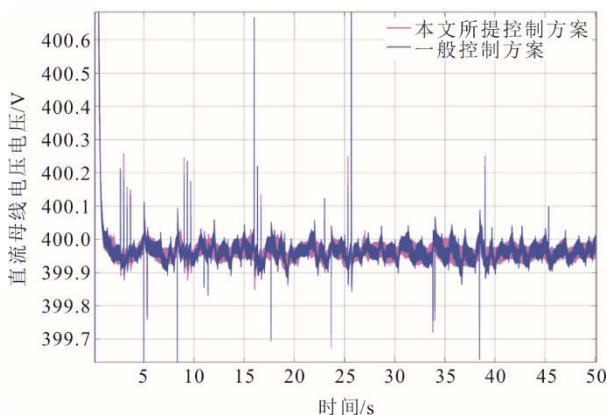


图10 直流母线电压波动对比

Fig.10 Comparison of DC link voltage fluctuations

## 5 结 论

为实现制氢系统合理化功率分配以及在线优化控制,本文兼顾 AEL 和储能电池的运行特性,提出了考虑多目标博弈的 MPC 优化控制方法,通过理论分析与仿真验证得出以下结论:

1) 提出 AMOPSO-MPC 复合算法,其中考虑多目标博弈关系,计算出对应最优控制增量的权重系数;

2) 借助 MATLAB-function 函数模块构建 MPC 控制器,将计算出的最优控制增量的权重系数应用于 MPC 控制器中,实现制氢系统在线功率分配。

使得电解槽输入功率的幅值最大波动率由 $55\%\sim 110\%$ 降低至 $78\%\sim 102\%$ ,储能电池充/放功率的最大幅值由 $-8.0\sim 12.5\text{ kW}$ 降低至 $-7.0\sim 11.5\text{ kW}$ ,储能电池电压的幅值最大波动由 $319.0\sim 328.0\text{ V}$ 降低至 $319.0\sim 326.5\text{ V}$ ,储能电池在一个时间段内的充放电次数也在一定程度上有所减少,避免储能电池进入死区。

### [参 考 文 献]

- [1] 程文姬,赵磊,郝航,等.“十四五”规划下氢能政策与电解水制氢研究[J].热力发电,2022,51(11):181-188. CHENG Wenji, ZHAO Lei, XI Hang, et al. Research on hydrogen energy policy and water-electrolytic hydrogen under the 14th Five-Year Plan[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 181-188.
- [2] 李建林,梁忠豪,梁丹曦,等.“双碳”目标下绿氢制备及应用技术发展现状综述[J].分布式能源,2021,6(4):25-33. LI Jianlin, LIANG Zhonghao, LIANG Danxi, et al. Overview of development status of green hydrogen production and application technology under targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. Distributed Energy, 2021, 6(4): 25-33.
- [3] 潘光胜,顾钟凡,罗恩博,等.新型电力系统背景下的电制氢技术分析与展望[J].电力系统自动化,2023,47(10):1-12. PAN Guangsheng, GU Zhongfan, LUO Enbo, et al. Analysis and prospect of electrolytic hydrogen technology under background of new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 1-12.
- [4] 王永利,向皓,郭璐等.面向多能互补的分布式光伏与电氢混合储能规划优化研究[J/OL].电网技术:1-13[2024-02-02]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2156>. WANG Yongli, XIANG Hao, GUO Lu, et al. Research on planning optimization of distributed photovoltaic and electro-hydrogen hybrid energy storage for multi-energy complementarity[J/OL]. Power System Technology: 1-13 [2024-02-02]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2156>.
- [5] 侯慧,刘鹏,刘志刚,等.电热氢多元储能系统优化调度方法[J].高电压技术,2022,48(2):536-545. HOU Hui, LIU Peng, LIU Zhigang, et al. Optimal dispatch method for multi-energy storage system of electricity heat hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 536-545.
- [6] 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 Energiac Solaris Sinica, 2021, 42(1): 256-263.
- [7] 郑之杰,黄静思,黄元生.基于模型预测控制的水电制氢系统优化调度研究[J].电力科学与工程,2022,38(7):25-33. ZHENG Zhijie, HUANG Jingsi, HUANG Yuansheng. Optimal scheduling of hydro-electricity hydrogen production system based on model predictive control[J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(7): 25-33.
- [8] 杜祥伟,沈艳霞,李静.基于模型预测控制的直流微

- 网混合储能能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 69-75.
- DU Xiangwei, SHEN Yanxia, LI Jing. Energy management strategy of DC microgrid hybrid energy storage based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 69-75.
- [9] 于家敏. 基于模型预测控制的风光氢耦合系统功率调控策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021: 1.
- YU Jiamin. Study on power regulation strategy of wind photovoltaic and hydrogen coupling system based on model predictive control[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021: 1.
- [10] 李建林, 赵文鼎, 梁忠豪, 等. 光储一体化耦合制氢系统控制策略及仿真分析[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 148-155.
- LI Jianlin, ZHAO Wending, LIANG Zhonghao, et al. Control strategy and simulation analysis of coupled optical storage systems for hydrogen production[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 148-155.
- [11] 徐桂芝, 梁丹曦, 宋洁, 等. 基于最大功率点跟踪与储能补偿的光伏-制氢系统研究[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 156-163.
- XU Guizhi, LIANG Danxi, SONG Jie, et al. Photovoltaic hydrogen production system based on MPPT and energy storage compensation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 156-163.
- [12] LI Q, LI R R, PU Y C, et al. Coordinated control of electric-hydrogen hybrid energy storage for multi-microgrid with fuel cell/electrolyzer/PV/battery[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 1-12.
- [13] 刘颖明, 王晓东, 彭朝阳. 计及储能出力水平的平滑风电功率模型预测控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1723-1731.
- LIU Yingming, WANG Xiaodong, PENG Chaoyang. Model predictive control strategy for smoothing wind power with energy storage output level[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1723-1731.
- [14] 谷晓琳, 黄明, 梁旭, 等. 一种改进惯性权重的混沌粒子群优化算法[J]. 大连交通大学学报, 2020, 41(3): 102-106.
- GU Xiaolin, HUANG Ming, LIANG Xu, et al. An improved chaotic particle swarm optimization algorithm with improved inertia weight[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2020, 41(3): 102-106.
- [15] 张伟, 黄卫民. 基于种群分区的多策略自适应多目标粒子群算法[J]. 自动化学报, 2022, 48(10): 2585-2599.
- ZHANG Wei, HUANG Weimin. Multi-strategy adaptive multi-objective particle swarm optimization algorithm based on swarm partition[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(10): 2585-2599.
- [16] 王翠, 姜学军. 基于动态变化自适应惯性权重混沌粒子群算法[J]. 沈阳理工大学学报, 2022, 41(6): 13-18.
- WANG Cui, JIANG Xuejun. Chaotic particle swarm optimization based on dynamic change adaptive inertial weight[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2022, 41(6): 13-18.
- [17] 郭丽丽, 刘勇, 王卫西. 粒子群优化算法之惯性权重递减策略的改进[J]. 黑龙江大学学报, 2019, 10(1): 67-71.
- GUO Lili, LIU Yong, WANG Weixi. Improvement of inertia weight declining strategy based on particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2019, 10(1): 67-71.
- [18] 孔令国, 于家敏, 蔡国伟, 等. 基于模型预测控制的离网电氢耦合系统功率调控[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3139-3148.
- KONG Lingguo, YU Jiamin, CAI Guowei, et al. Power regulation of off-grid electro-hydrogen coupled system based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3139-3148.
- [19] 年珩, 陈磊磊, 赵建勇, 等. 基于电解槽状态识别的风光制氢系统能量管理优化[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 10-16.
- NIAN Heng, CHEN Leilei, ZHAO Jianyong, et al. Energy management optimization of wind-solar hydrogen production system based on electrolytic cell state recognition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 10-16.
- [20] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 氢能储运技术现状及其在电力系统中的典型应用[J]. 现代电力, 2021, 38(5): 535-545.
- LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, et al. An overview on hydrogen energy storage and transportation technology and its typical application in power system[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(5): 535-545.
- [21] 陈梦萍, 任建兴, 李芳芹. 风光互补与电解水制氢系统负荷的协调稳定运行[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 344-350.
- CHEN Mengping, REN Jianxing, LI Fangqin. Coordinated and stable operation of wind solar complementarity and load of Electrolytic water hydrogen production system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(3): 344-350.
- [22] 王季康, 李华, 彭宇飞, 等. 风氢储耦合系统建模与并网控制[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 141-150.
- WANG Jikang, LI Hua, PENG Yufei, et al. Modeling and grid-connected control of wind-hydrogen storage coupled system[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 141-150.
- [23] 邸俊杰, 沈轶, 贾明祥, 等. 风氢耦合发电系统建模与分析[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 65-73.
- DI Junjie, SHEN Yi, JIA Mingxiang, et al. Modeling and analysis of wind-hydrogen coupled power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 65-73.
- [24] 李建林, 赵文鼎, 梁忠豪, 等. 光储一体化耦合制氢系统控制策略及仿真分析[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 148-155.
- LI Jianlin, ZHAO Wending, LIANG Zhonghao, et al. Control strategy and simulation analysis of coupled optical storage systems for hydrogen production[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 148-155.
- [25] 袁铁江, 谭捷, 万志. 考虑下游氢负荷波动的新能源制氢系统协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 150-157.
- YUAN Tiejiang, TAN Jie, WAN Zhi. Coordinated control strategy of hydrogen producing system powered by renewable energy considering downstream hydrogen load fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 150-157.

(责任编辑 杜亚勤)