

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211311

# 计及功率交互约束的含电-氢混合储能的多微电网系统 容量优化配置

李蕊睿, 李奇, 蒲雨辰, 李朔, 孙彩, 陈维荣

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 在混合交直流多微电网系统中, 其经济性和运行可靠性受到容量优化配置的影响。考虑到基于电储能以及氢储能系统(电解槽/燃料电池/储氢罐)的混合储能系统所具有的优势, 建立了电-氢混合储能型多微电网系统框架。其次, 针对电-氢混合储能型多微电网系统, 提出了考虑系统的实时能量供需状态和储能状态的多微电网运行控制策略。在容量优化配置模型中引入功率交互约束模型, 并在配置过程中嵌入所提出的运行控制策略。最后, 以算例分析证明功率交互约束的必要性, 并采用灰狼-正弦余弦优化算法求解配置模型。所得配置结果优于改进灰狼算法和改进粒子群算法。通过模拟全年运行情况, 验证了所提优化配置方法的有效性和电-氢混合储能系统在季节性储能上的优势。

**关键词:** 多微网; 容量配置; 电-氢混合储能; 灰狼-正弦余弦优化算法

## Optimal configuration of an electric-hydrogen hybrid energy storage multi-microgrid system considering power interaction constraints

LI Ruirui, LI Qi, PU Yuchen, LI Shuo, SUN Cai, CHEN Weirong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In a hybrid AC/DC multi-microgrid system, the economy and operational reliability are affected by the configuration of capacity. Considering the advantages of hybrid energy storage systems based on electric and hydrogen energy storage (electrolyzer/fuel cell/hydrogen storage tank), this paper establishes an electric-hydrogen hybrid energy storage multi-microgrid system framework. Secondly, for the said system, a multi-microgrid operation control strategy considering the real-time energy supply and demand and energy storage status of the system is proposed to ensure the economic and reliable operation of the system. A power interaction constraint model is introduced into the capacity optimization configuration model, and the proposed operational control strategy is embedded in the configuration process. Finally, an example is used to verify the necessary of power interaction constraints, and the grey wolf-sine cosine optimization algorithm is used to solve the configuration model. The results obtained are better than those of Grey Wolf optimizer and mutation particle swarm optimization algorithm. Through the simulation of annual operating conditions, the effectiveness of the optimization strategy proposed and the advantages of the electric-hydrogen hybrid energy storage system in seasonal energy storage are verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977181).

**Key words:** multi-microgrid; capacity configuration; electric-hydrogen hybrid energy storage; grey wolf-sine cosine optimization algorithm

## 0 引言

为了缓解能源紧缺和环境污染的问题, 微电网

(Microgrid, MG)的概念被提出, 具有环境友好性等优点的光伏发电、风力发电技术等分布式发电能源(Distributed Generation, DG)得到广泛应用<sup>[1-6]</sup>。在可再生能源发电系统中配置储能装置, 可以进一步提升系统的稳定性及经济性, 由于光氢耦合系统的技术逐渐成熟, 氢能也因其高效、清洁、便于运输等

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51977181); 霍英东教育基金会高等院校青年教师基金项目资助(171104)

优点, 成为国内外研究的热点储能技术<sup>[7-8]</sup>。

目前, 针对含有氢能的微电网系统的容量优化配置问题, 国内外已有很多研究<sup>[9-10]</sup>。为提高系统对高比例可再生能源的接纳能力, 文献[11]将电转氢作为灵活性资源, 在风光氢耦合的系统中, 得到了年投资运行成本最低和静态灵活性水平最高的配置方案。文献[12]综合考虑光伏出力特性、输电需求和不同储氢配置下制氢过程的氢气系统运行控制策略, 提出了一种光伏电站并网制氢系统功率再分配和容量配置方法。文献[13]针对概率、频率等指标, 提出了兼顾可靠性与经济性的孤岛型微电网容量配置方法, 实现了可靠性与总成本的折中最优配置方案。

然而, 随着微电网技术的发展, 微网也不断拓展出新的结构, 如能源结构、拓扑结构等, 为微电网的容量配置带来了一定的挑战<sup>[14-15]</sup>。其中, 多微网系统作为一种经济性及稳定性受能源生产运输影响较大的系统, 逐渐成为了学者关注的焦点<sup>[16-17]</sup>。因此, 在含有多能源系统的多微网系统中, 分析系统的容量优化配置和稳定运行问题是很有必要的。

文献[18]构建了包含产能基地、系统管理商和用户的区域系统模型, 并提出了两阶段优化调度策略实现系统的利益制约平衡和日内联合优化。文献[19]提出一种考虑交互功率控制和综合成本的双层优化调度模型, 并采取双边竞价交易策略使多微电网间保持公平交易及功率分配。文献[20]提出了一种面向多微电网的两级网络约束对配电网进行重构, 保证了配电网的安全性, 并允许多微电网系统灵活地进行能量交换。研究了多微网间的交易机制并制定了相关市场定价机制, 在优化电力交易模式和科学定价方面有一定的参考价值。文献[21]兼顾能量管理中心和微网运营商双方利益, 通过分析功率盈余和不足两种情况, 考虑了负荷波动带来的效益损耗, 并给予补偿, 防止内部电价剧烈波动。文献[22]考虑到用户与储能电站的共同利益, 提出了基于储能电站服务模式的冷热电联供多微网系统双层优化配置方法, 降低了用户成本和储能资源的浪费。

综合上述文献, 目前的研究中少有在多微网系统中对氢储能设备以及储能系统的储能状态进行考虑, 且鲜有在容量配置模型中对系统的供需状态及功率交互约束加以考虑, 对多微网系统的供电可靠性问题研究也较少。

基于以上问题, 本文建立了含电-氢混合储能系统的多微网交直流系统, 考虑到系统的实时供需状态和储能设备的实时储能状态, 提出了多微网系统运行控制策略, 并令该运行策略参与配置过程。针对电-氢混合储能多微网系统, 从提高系统经济性和

供电可靠性的角度出发, 在多微网系统优化配置模型中引入了功率交互约束模型, 提出了优化配置方案。最后选取西南某地的全年光照强度和负荷数据进行算例分析, 分析功率交互约束对不同系统的成本及供电可靠性的影响, 并验证其必要性; 对比采用三种优化算法得到的配置结果, 分析算法对求解优化配置模型的影响; 通过模拟的全年运行情况, 验证所研究的多微网系统的运行和供电可靠性。

## 1 多微电网系统结构及数学模型

### 1.1 多微电网系统结构

本文所研究的含电-氢混合储能的多微电网系统结构如图1所示, 各微网通过交流母线负担公共负荷。在电-氢混合储能微电网(Electric-hydrogen hybrid energy storage microgrid, E-H\_MG)中, 光伏发电系统、电储能系统和氢储能系统(电解槽/储氢罐/燃料电池)分别由所对应的 DC/DC 换流器及其他设备接入直流母线。

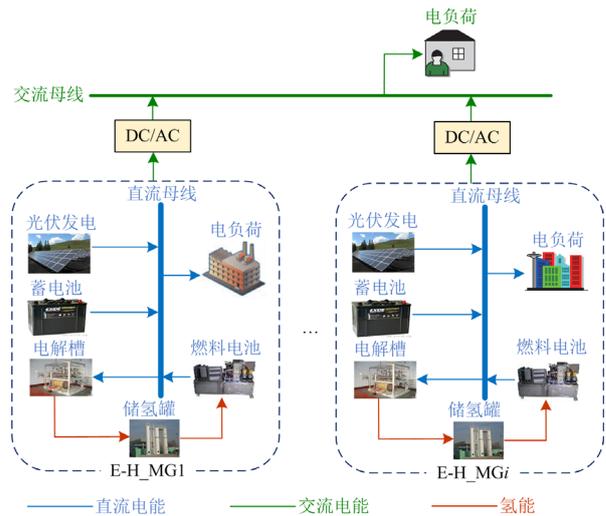


图1 含电-氢混合储能的多微电网系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of multi-microgrid system with electric-hydrogen hybrid energy storage

光伏发电系统是微网系统的主要能量来源, 为提高可再生能源的利用率并减小弃光率, 令光伏电池以最大功率点跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT)将所吸收的太阳能以最大功率输出转化为电能, 在光伏发电量充足时, 由储能系统吸收冗余的母线功率; 在光伏发电量不足时, 由储能系统补足母线功率的缺额。

电储能系统主要通过蓄电池充放电平衡母线功率。氢储能系统中, 在需要吸收母线功率时, 电解槽耗电, 通过电解水制氢, 将氢气储存在储氢罐中;

在母线供能不足时, 燃料电池耗氢放电, 输出功率至母线, 且电解槽和燃料电池不同时工作。

## 1.2 各 DG 的数学模型

### 1.2.1 光伏电池模型

考虑到光照强度和工作温度共同影响了光伏电池的实际输出功率<sup>[23]</sup>, 因此, 将光伏电池的实际输出功率表示为

$$P_{PV} = V_{PV} \frac{I_r(t)}{I_{rst}} \zeta_{ws}(t) \zeta_{PV\_DC} \quad (1)$$

式中:  $V_{PV}$  为光伏电池的额定输出功率;  $I_{rst}$  和  $\zeta_{PV\_DC}$  分别为标准光照强度和光伏电池的DC/DC变换器的工作效率;  $I_r(t)$  和  $\zeta_{ws}(t)$  分别为  $t$  时刻下当地的光照强度和光伏电池因温度升降产生的功率损耗率。

$\zeta_{ws}(t)$  可表示为

$$\zeta_{ws}(t) = 1 + \mu(T(t) - T_s) \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为温度系数;  $T_s$  为标准工作温度;  $T(t)$  为光伏电池的实际工作温度, 由光照强度  $I_r(t)$  和环境温度  $T_{env}(t)$  对其估算, 如式(3)所示。

$$T(t) = T_{env}(t) + \frac{I_r(t)}{800}(T_s - 20) \quad (3)$$

### 1.2.2 蓄电池模型

蓄电池对本文所研究问题的影响主要体现在充放电过程中, 充电时, 蓄电池在  $t$  时刻的储量  $E_{BAT}(t)$  与充电功率  $P_{BAT\_ch}$  相关, 可表示为

$$E_{BAT}(t) = E_{BAT}(t-1)(1-\eta) + P_{BAT\_ch}(t-1) \zeta_{ba\_ch} \zeta_{BAT\_DC} \Delta t \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为蓄电池的自放电率;  $\zeta_{ba\_ch}$  为蓄电池的充电效率;  $\zeta_{BAT\_DC}$  为蓄电池的DC/DC变换器的工作效率;  $\Delta t$  为时间步长。

放电时, 蓄电池的储量可表示为

$$E_{BAT}(t) = E_{BAT}(t-1)(1-\eta) - \frac{P_{BAT\_dis}(t-1)}{\zeta_{ba\_dis} \zeta_{BAT\_DC}} \Delta t \quad (5)$$

式中:  $P_{BAT\_dis}(t-1)$  为蓄电池的放电功率;  $\zeta_{ba\_dis}$  为蓄电池的放电效率。蓄电池的荷电状态可由储量和蓄电池容量  $V_{BAT}$  表示为

$$S_{oc}(t) = \frac{E_{BAT}(t)}{V_{BAT}} \quad (6)$$

### 1.2.3 氢能发电系统模型

本文搭建了氢能发电系统(电解槽-储氢罐-燃料电池), 电解槽吸收母线多余功率制氢, 储氢罐储存所制氢气, 燃料电池消耗氢气发电补足母线功率缺额, 且电解槽和燃料电池不会同时工作。因此, 在电解槽工作时, 储氢罐在  $t$  时刻的储量

$E_{H_2}(t)$  可表示为

$$E_{H_2}(t) = E_{H_2}(t-1) + P_{ELE}(t-1) \zeta_{ELE} \zeta_{ELE\_DC} \quad (7)$$

式中:  $P_{ELE}$  为电解槽的输入功率;  $\zeta_{ELE}$  为电解槽的工作效率;  $\zeta_{ELE\_DC}$  为电解槽DC/DC变换器的工作效率。在燃料电池工作时, 储氢罐的储量可表示为

$$E_{H_2}(t) = E_{H_2}(t-1) - \frac{P_{FC\_CON}(t-1)}{\zeta_{FC\_DC} \zeta_{H_2}} \Delta t \quad (8)$$

式中:  $P_{FC\_CON}(t-1)$  为储氢罐的耗氢功率;  $\zeta_{FC\_DC}$  为燃料电池的DC/DC变换器的工作效率;  $\zeta_{H_2}$  为储氢罐的工作效率。

储氢罐的耗氢功率  $P_{FC\_CON}$  可由燃料电池的输出功率  $P_{FC}$  表示, 如式(9)所示。

$$P_{FC\_CON} = \frac{P_{FC}}{\zeta_{FC}} \quad (9)$$

式中,  $\zeta_{FC}$  为燃料电池的工作效率。

储氢罐的等效荷电状态可由储量  $E_{H_2}(t)$  和储氢罐容量  $V_{H_2\_TANK}$  表示, 如式(10)所示。

$$S_{ohc}(t) = \frac{E_{H_2}(t)}{V_{H_2\_TANK}} \quad (10)$$

## 2 微电网优化配置模型

### 2.1 目标函数

在本文所研究的电-氢混合储能多微电网系统中, 主要DG设备包括光伏发电系统、蓄电池、电解槽及燃料电池。因此, 本文考虑当地的光照强度及负荷, 对各DG及其DC/DC变换器的容量、储氢罐的容量、DC/AC逆变器的容量以及功率交互约束上限进行容量配置优化。

本文考虑到系统的经济性, 采用年值投资成本  $C_{tot}$  作为系统的经济性指标, 可表示为

$$C_{tot} = \rho(C_{pur\_A} + C_{pur\_M} + C_{res}) + C_{op} + C_{lo} \quad (11)$$

式中:  $C_{pur\_A}$  为主设备年值投资成本;  $C_{pur\_M}$  为辅助设备年值投资成本;  $C_{res}$  为重置设备年值投资成本;  $C_{op}$  为系统运营年值成本;  $C_{lo}$  为停电损失成本;  $\rho$  为资金回收系数, 如式(12)所示。

$$\rho = \frac{r(1+r)^{N_y}}{(1+r)^{N_y} - 1} \quad (12)$$

式中:  $r$  为实际年利率;  $N_y$  为微电网设计寿命。主设备年值投资成本可表示为

$$C_{pur\_A} = \sum_{i \in \Gamma} C_{s\_i} V_i + C_{s\_DC/DC} \sum_{i \in \Gamma} V_i \quad (13)$$

式中:  $C_{s_i}$  为各种类设备的单价;  $C_{s_{DC/DC}}$  为变换器的单价;  $V_i$  为各种类设备的容量;  $\Gamma$  表示各DG构成的种类集合。

辅助设备年值投资成本与主设备年值投资成本相关<sup>[24]</sup>, 可表示为

$$C_{pur\_M} = \lambda_1 C_{pur\_A} \quad (14)$$

式中,  $\lambda_1$  为辅助比例系数。

微网的停电损失由停电时长决定<sup>[25]</sup>, 表示为

$$C_{lo} = R_{lo} t_{lo} \quad (15)$$

式中:  $R_{lo}$  为停电的损失成本;  $t_{lo}$  为停电时长。

系统运营年值成本包括设备维护费用、燃料费用及储能系统的运营费用<sup>[26]</sup>, 可表示为

$$C_{op} = \lambda_2 \left( C_{s_{PV}} V_{PV} + C_{s_{DC/DC}} \sum_{i \in \Gamma} V_i \right) + \sum_{t=1}^T \{ C_{op\_BAT}(t) + C_{op\_FC}(t) + C_{op\_ELE}(t) \} \quad (16)$$

式中:  $\lambda_2$  为维护比例系数;  $T$  为运行时间终值;  $C_{op\_FC}$  为燃料电池的运营费用;  $C_{op\_ELE}$  为电解槽的运营费用;  $C_{op\_BAT}$  为蓄电池的运营费用, 如式(17)所示。

$$C_{op\_BAT}(t) = \frac{V_{BAT}}{2Y_{CYC\_BAT}} (P_{BAT\_ch}(t) + P_{BAT\_dis}(t)) \quad (17)$$

式中,  $Y_{CYC\_BAT}$  为蓄电池的循环寿命。储能设备的维护费用可表示为

$$C_{mt\_i} = \lambda_2 C_{s_i} V_i \quad (18)$$

$C_{op\_ELE}$  与电解槽的维护费用  $C_{mt\_ELE}$  和启停费用  $C_{sta\_ELE}$  相关<sup>[27]</sup>, 表示为

$$C_{op\_ELE}(t) = \left( \frac{V_{ELE}}{Y_{CYC\_ELE}} + C_{mt\_ELE} \right) \delta_{ELE}(t) + C_{sta\_ELE} \psi_{ELE}(t) \quad (19)$$

式中:  $Y_{CYC\_ELE}$  为电解槽的循环寿命;  $\delta_{ELE}$  是表示电解槽工作状态的 0 和 1 变量, 即电解槽工作时, 其取值为 1;  $\psi_{ELE}$  是表示电解槽启停状态的 0 和 1 变量, 即电解槽启动或停止工作瞬间取值为 1, 其余时刻取值为 0。

$C_{op\_FC}$  为燃料电池的运营费用, 与燃料电池的维护费用  $C_{mt\_FC}$  和启停费用  $C_{sta\_FC}$  <sup>[23]</sup> 相关, 表示为

$$C_{op\_FC}(t) = \left( \frac{V_{FC}}{Y_{CYC\_FC}} + C_{mt\_FC} \right) \delta_{FC}(t) + C_{sta\_FC} \psi_{FC}(t) \quad (20)$$

式中:  $Y_{CYC\_FC}$  为燃料电池的循环寿命;  $\delta_{FC}$  是表示燃料电池工作状态的 0 和 1 变量, 即燃料电池工作

时, 其取值为 1;  $\psi_{FC}$  是表示燃料电池启停状态的 0 和 1 变量, 即燃料电池启动或停止工作瞬间取值为 1, 其余时刻取值为 0。

各设备的重置成本与其单价、容量和通货膨胀率均相关, 可表示为

$$C_{res} = \sum_{i \in \Gamma} \sum_{n=1}^{n_{eq}} C_{s_i} V_i \frac{1}{(1+r)^{n_i-1}} \quad (21)$$

式中:  $n$  为购买次数;  $n_{eq}$  为最终购买次数;  $l_i$  为第  $i$  种设备的寿命。

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 微电网系统功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{PV} = P_{load} + P_{ELE} + P_{BAT\_ch} + P_{rem} & P_{PV} \geq P_{load} \\ P_{load} = P_{PV} + P_{FC} + P_{BAT\_dis} + P_{sht} & P_{load} > P_{PV} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $P_{rem}$  为系统的弃光功率, 当光伏发电系统供能均被母线吸收时, 其值为 0;  $P_{sht}$  为系统的缺额功率, 当母线供能充足时, 其值为 0。

### 2.2.2 充放电约束

$$\begin{cases} P_{ELE}(t) < P_{ELE\_max} \\ P_{FC}(t) < P_{FC\_max} \\ P_{BAT\_ch}(t) < P_{BATch\_max} \\ P_{BAT\_dis}(t) < P_{BATdis\_max} \\ S_{oc\_min} \leq S_{oc}(t) \leq S_{oc\_max} \\ S_{ohc\_min} \leq S_{ohc}(t) \leq S_{ohc\_max} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $P_{ELE\_max}$ 、 $P_{FC\_max}$ 、 $P_{BATch\_max}$  和  $P_{BATdis\_max}$  分别为电解槽、燃料电池及蓄电池充放电的最大输出功率; 为保证蓄电池等设备的长期有效运行, 系统需要对充放电深度进行限制<sup>[28]</sup>,  $S_{oc\_max}$ 、 $S_{oc\_min}$ 、 $S_{ohc\_max}$  和  $S_{ohc\_min}$  分别为设定的蓄电池和储氢罐等效荷电状态的最大值和最小值。

### 2.2.3 设备安装容量约束

$$0 \leq V_i \leq V_{i\_max} \quad (24)$$

式中,  $V_{i\_max}$  为第  $i$  类设备所配置的最大容量。本文考虑到算法的求解速度, 对各类设备配置了容量上限, 缩小优化配置时求解的搜索范围。

## 2.3 供电可靠性

本文选取失负荷率和能量过剩率两个指标作为微电网系统的供电可靠性指标。失负荷率是系统缺额功率和负荷的比值<sup>[29]</sup>, 可表示为

$$LOLP = \frac{\sum P_{sht}(t)}{\sum P_{load}(t)} \quad (25)$$

系统中的光伏出力过多, 储能系统不能吸收多

余功率时, 光伏系统将弃光, 系统的总弃光能量和总发电量的比值以能量过剩率来表示<sup>[30]</sup>, 即

$$EER = \frac{\sum P_{rem}(t)}{\sum P_{PV}(t)} \quad (26)$$

### 3 多微电网系统运行控制策略及优化配置模型求解方法

#### 3.1 多微电网系统运行控制策略

多微电网系统运行时, 由于系统中多网、多源的耦合关系, 需要控制策略对其进行分配。本文考虑到储能系统的优化荷电状态和微网内、外母线的供需平衡状态, 提出了多微电网系统运行控制策略。

根据  $i$  个微网的能量过剩和缺额状态可将运行情况大致分为  $2^i$  个场景, 以 2 个微电网为例, 将运行情况分为 4 个场景, 如图 2 所示。用供电剩余功率判断各微网的能量盈缺状态, 供电剩余功率可表示为

$$P_{reqi}(t) = P_{PVi}(t) - \sigma_i P_{com}(t) - P_{loci}(t) \quad (27)$$

式中:  $\sigma_i$  和  $P_{loci}$  分别表示第  $i$  个微网承担公共负荷的占比和本地负荷;  $P_{com}$  为公共负荷。当  $P_{req} > 0$  时, 光伏发电可满足全部负荷所需, 则定义微网为过剩状态, 由储能系统将过剩电能吸收; 当  $P_{req} < 0$  时, 光伏发电量不足, 定义微网为缺额状态, 由储能系统将功率缺额补足。场景一表示两微电网均为过剩状态, 为更好地实现微网间的功率交互, 缺额状态下还需被本地供电剩余功率进一步定义, 可表示为

$$P_{dif}(t) = P_{PVi}(t) - P_{loci}(t) \quad (28)$$

$P_{dif} > 0$  时, 光伏发电量可以满足本地负荷所需, 定义该情况为半缺额状态, 储能系统只需补足公共负荷的缺额功率;  $P_{dif} < 0$  时, 光伏发电量不足, 定义该情况为全缺额状态, 储能系统补足本地、公共负荷的缺额功率。

如图 2 所示, 根据两微网的  $P_{dif}$  的大小将场景二、三和四分别划分出不同模式。

1) 场景一:  $P_{req1} > 0, P_{req2} > 0$ , 两微网均为过剩状态, 微网功率交互的工作状态见图 3(a)。

2) 场景二(模式 1):  $P_{req1} > 0, P_{dif2} > 0$ , 微网 1 为过剩, 微网 2 为半缺额状态, 微网功率交互的工作状态见图 3(b)。

3) 场景二(模式 2):  $P_{req1} > 0, P_{dif2} < 0$ , 微网 1 为过剩, 微网 2 为全缺额状态, 微网功率交互的工作状态见图 3(c)。

4) 场景三(模式 1):  $P_{dif1} > 0, P_{req2} > 0$ , 微网 1 为半缺额状态, 微网 2 为过剩状态, 微网功率交互的工作状态见图 3(d)。

5) 场景三(模式 2):  $P_{dif1} < 0, P_{req2} > 0$ , 微网 1 为全缺额状态, 微网 2 为过剩状态, 微网功率交互的工作状态见图 3(e)。

6) 场景四:  $P_{req1} < 0, P_{req2} < 0$ , 共有 4 个模式, 9 种工作方式, 见图 4。

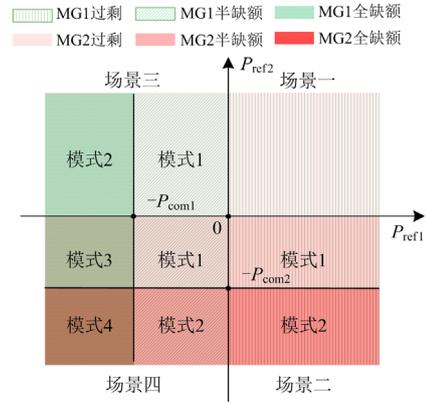


图 2 多微电网间的能量供需状态

Fig. 2 State of energy supply and demand among multi-microgrids

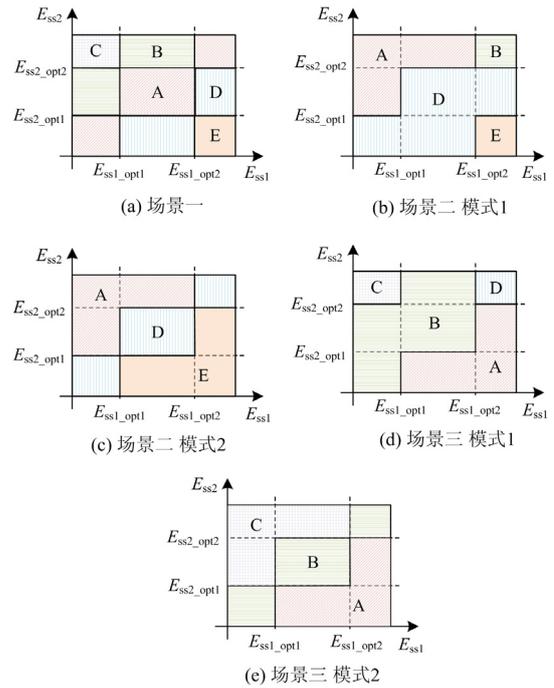


图 3 微电网的功率交互工作方式

Fig. 3 Power interaction mode of microgrid

考虑到微电网系统的优化运行和对储能系统的合理调用, 本文利用储能状态分配微网的交互功率  $P_{int\_i}$ , 微网的系统储能状态可表示为

$$E_{ssi} = \frac{E_{H2i} + E_{BATi}}{V_{H2\_TANKi} + V_{BATi}} \quad (29)$$

如图3和图4所示,两微网的交互功率根据系统的当前储能状态进行了分配,  $E_{ssi\_op1}-E_{ssi\_op2}$  表示第  $i$  个微网的储能系统最优工作区间。在图3中, A 所在的区域表示两微网不进行功率交互, 即  $P_{int\_1}=P_{int\_2}=0$ ; B 表示微网2以  $P_{dif2}$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_2}=P_{dif2}$ ; C 表示微网2以功率交互上限  $P_{max2}$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_2}=P_{max2}$ ; D 表示微网1以  $P_{dif1}$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_1}=P_{dif1}$ ; E 表示微网1以功率交互上限  $P_{max1}$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_1}=P_{max1}$ 。

微网在场景4下的功率交互工作方式如图4所示。A 表示微网1以功率交互上限  $P_{max1}$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_1}=P_{max1}$ ; B 表示微网1以  $P_{max1}/2$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率

$P_{int\_1}=P_{max1}/2$ ; C 表示微网1以  $P_{max1}/3$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_1}=P_{max1}/3$ ; D 表示微网1以  $P_{max1}/4$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_1}=P_{max1}/4$ ; E 表示微网2以功率交互上限  $P_{max2}$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_2}=P_{max2}$ ; F 表示微网2以  $P_{max2}/2$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_2}=P_{max2}/2$ ; G 表示微网2以  $P_{max2}/3$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_2}=P_{max2}/3$ ; H 表示微网2以  $P_{max2}/4$  的大小多承担公共负荷, 即交互功率  $P_{int\_2}=P_{max2}/4$ ; NOT 表示两微网不进行功率交互, 即  $P_{int\_1}=P_{int\_2}=0$ 。图4中, 各 DG 为光伏电池、燃料电池、电解槽和蓄电池, 光伏电池以 MPPT 控制器运行, 储能设备按照图5所示的运行控制策略工作。

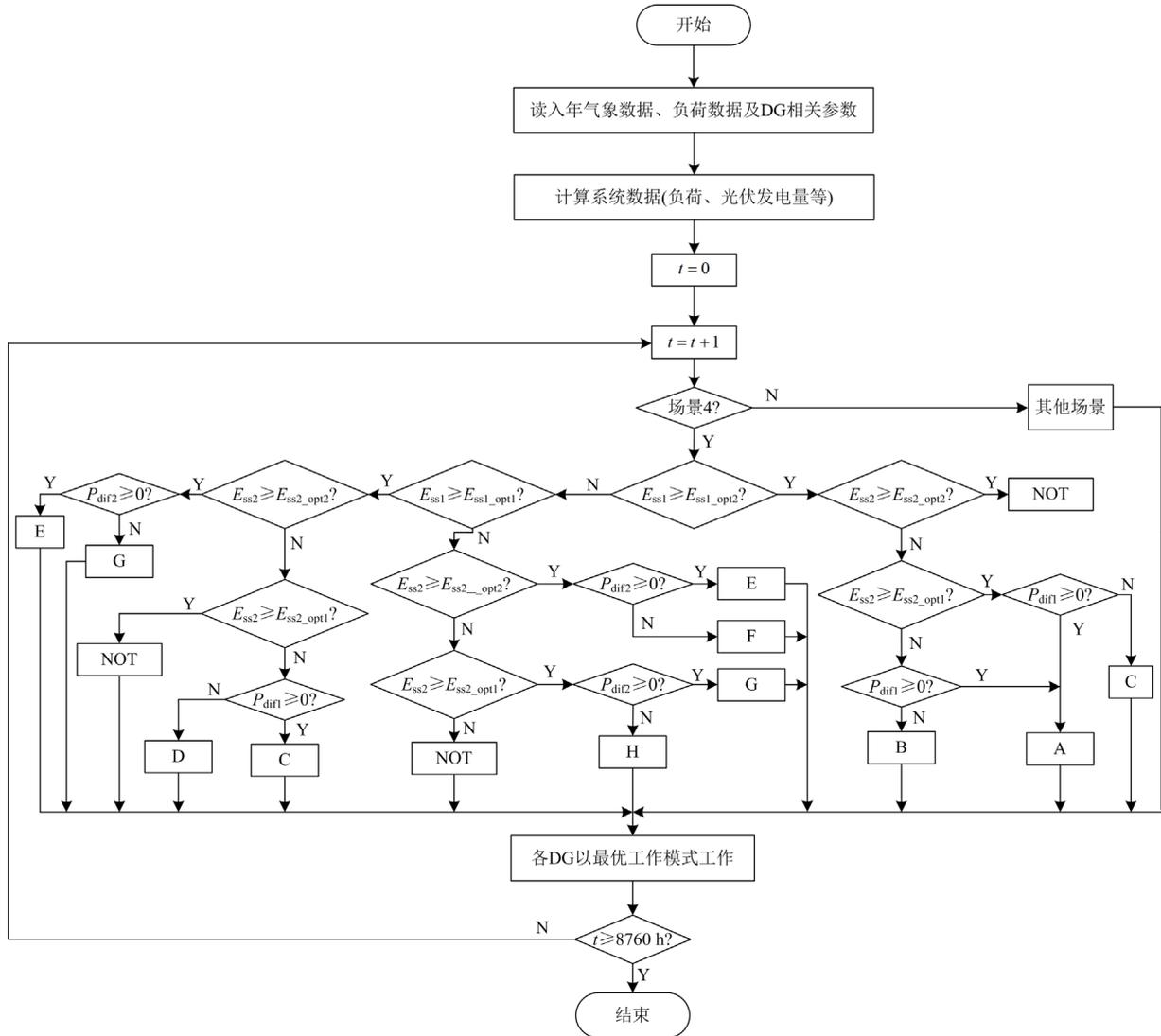


图4 微电网在场景4下的功率交互工作流程

Fig. 4 Flow chart of power interaction of microgrid in scenario 4

计算微网间的交互功率后, 各微网得到直流母线的需求功率, 由于储量过高或过低均对电、氢储能系统的性能有所影响, 本文考虑到电储能和氢储能系统的工作范围, 混合储能设备按照图 5 所示的运行控制策略工作。

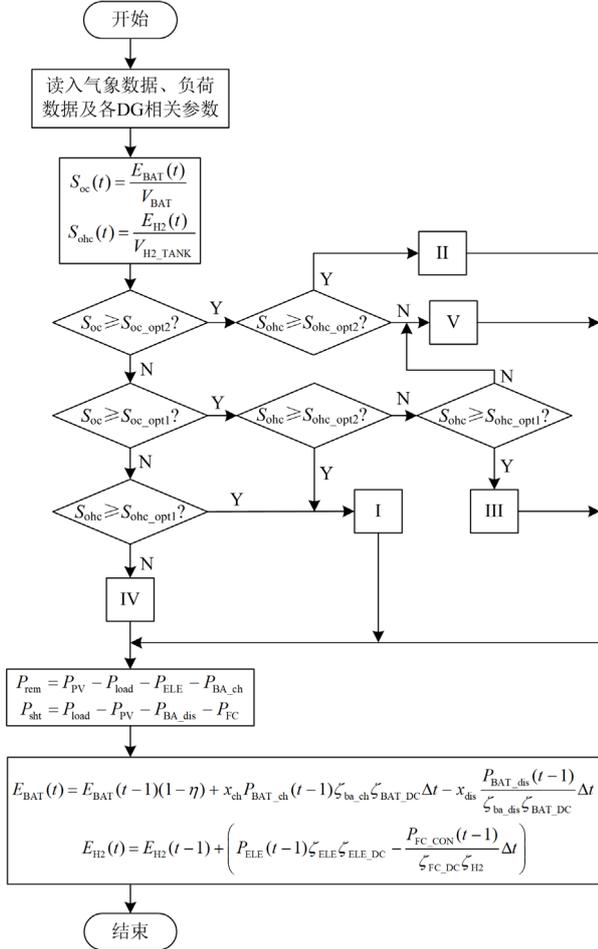


图 5 储能设备运行控制策略流程

Fig. 5 Operation control strategy flow chart of hybrid energy storage equipments

在图 5 中,  $x_{ch}$  和  $x_{dis}$  为蓄电池工作状态的 0 和 1 变量, 即蓄电池充电时,  $x_{ch}$  取 1,  $x_{dis}$  取 0; 蓄电池放电时,  $x_{ch}$  取 0,  $x_{dis}$  取 1; 燃料电池和电解槽不工作时, 当燃料电池工作时,  $P_{ELE}(t-1)$  为 0, 当电解槽工作时,  $P_{FC\_CON}(t-1)$  为 0。  $S_{oc\_op1}$  —  $S_{oc\_op2}$  和  $S_{ohc\_op1}$  —  $S_{ohc\_op2}$  为蓄电池和氢储能系统的正常工作区间。工作方式 I—V 的具体操作如下所述。

I: 氢储能系统较蓄电池储量较高, 因此若光伏输出大于负荷 ( $P_{req} > 0$ ), 由蓄电池吸收多余功率; 若光伏输出小于负荷 ( $P_{req} < 0$ ), 由燃料电池优先供能。

II: 电、氢储量均较高, 当  $P_{req} > 0$  时, 电、氢储能共同吸收多余功率直至饱和; 当  $P_{req} < 0$  时, 蓄电池优先供电至正常储量状态。

III: 电、氢储量均在正常限度内, 当  $P_{req} > 0$  时, 电、氢储能共同吸收母线剩余功率, 由于蓄电池工作效率比电解槽高, 因此电储能系统尽量多工作; 当  $P_{req} < 0$  时, 电、氢储能系统共同供电补足母线缺额, 尽量以电储能系统工作。

IV: 电、氢储量均较低, 当  $P_{req} > 0$  时, 蓄电池优先充电; 当  $P_{req} < 0$  时, 由于蓄电池在过度放电时对其性能等有所影响, 因此燃料电池优先供电。

V: 蓄电池较氢储能系统储量较高, 当  $P_{req} > 0$  时, 由电解槽优先吸收母线剩余功率制氢; 当  $P_{req} < 0$  时, 由蓄电池优先供能。

### 3.2 优化配置模型求解方法

本文建立了多微电网系统优化配置模型, 优化变量主要包括光伏电池、蓄电池等 DG 及其 DC/DC 变换器的容量、储氢罐的容量、DC/AC 逆变器的容量以及功率交互约束上限, 并采用灰狼算法 (Grey Wolf Optimizer, GWO) 与正弦余弦算法 (Sine Cosine Algorithm, SCA) 相结合的灰狼-正弦余弦优化算法 (GSC) 进行模型求解<sup>[31]</sup>, 改进了 GWO 算法中解的移动方向和求解速度, 同时提高了算法的精度。

GSC 算法中, 设置最优解为  $\alpha$ , 次优解为  $\beta$ , 第三优解为  $\delta$ , 以 3 个解形成的区域不断包围并接近最优解, 其跟踪寻优位置的数学表达式为

$$\begin{cases} D_\alpha = |\bar{k}_1 \times \bar{x}_\alpha - \bar{x}| \\ D_\beta = |\bar{k}_2 \times \bar{x}_\beta - \bar{x}| \\ D_\delta = |\bar{k}_3 \times \bar{x}_\delta - \bar{x}| \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $D_\alpha$ 、 $D_\beta$  和  $D_\delta$  分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$  与其他个体间的距离;  $\bar{x}_\alpha$ 、 $\bar{x}_\beta$  和  $\bar{x}_\delta$  分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\delta$  当前的位置;  $\bar{k}_1$ 、 $\bar{k}_2$  和  $\bar{k}_3$  为随机系数向量;  $\bar{x}$  为当前个体位置向量。

剩余个体向优化解群方向前进, 且个体不断更新, 可表示为

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = \bar{x}_\alpha - \bar{A}D_\alpha \\ \bar{x}_2 = \bar{x}_\beta - \bar{A}D_\beta \\ \bar{x}_3 = \bar{x}_\delta - \bar{A}D_\delta \\ \bar{x}^{t+1} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3}{3} \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $\bar{A}$  为系数向量, 其值可表示为

$$A = 2a \times r_{and} - a \quad (32)$$

式中,  $r_{and}$  为[0,1]内的随机数, 迭代系数  $a$  可表示为

$$a = \begin{cases} 2 - \sin(\frac{\pi q_i}{2q_{max}}) & 1 \leq q_i \leq \frac{q_{max}}{2} \\ \sin(\frac{q_i}{q_{max}} \cdot \pi) & \frac{q_{max}}{2} < q_i \leq q_{max} \end{cases} \quad (33)$$

式中:  $q_i$  为迭代次数;  $q_{max}$  为最大迭代次数。

系统优化配置流程如图 6 所示。首先初始化各微网的光伏电池、蓄电池等设备的容量、求解空间规模及收敛条件等; 然后计算各微网数据, 模拟系统的全年运行情况, 步长为 1 h, 实时计算各微网的交互功率  $P_{int}$ , 由所得  $P_{int}$  分配各微网负荷, 储能设备按照图 5 所示的方式工作; 根据年投资成本计算目标函数, 以系统年投资成本为优化目标, 迭代直至达到终止条件, 得到最小成本、系统最优容量配置。

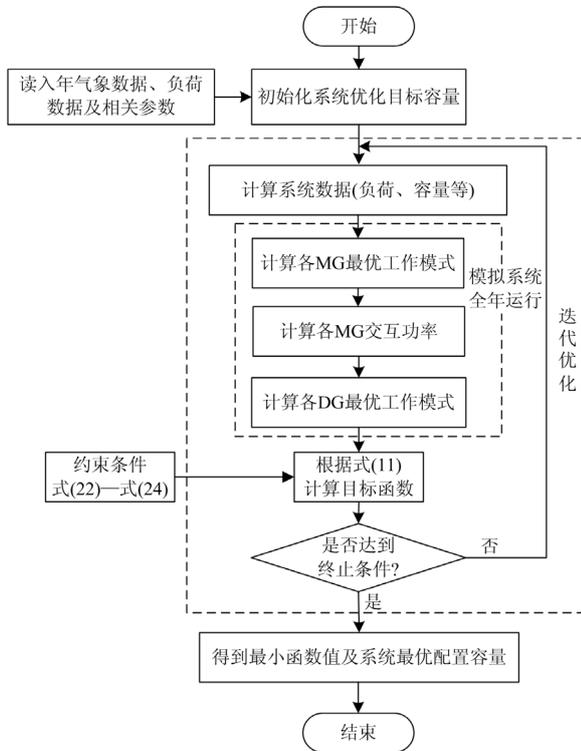


图 6 多微电网系统优化配置流程

Fig. 6 Flow chart of optimal configuration of multi-microgrid system

## 4 算例分析

### 4.1 仿真场景及参数设置

本文选取西南某地区全年的光照强度数据和负荷数据如图 7 所示, 共计 365 天, 仿真步长为 1 h。算例系统结构如第 1 节所述, 以 2 个微电网为例, 两直流微网经 DC/AC 变换器, 通过交流母线互联, 两微网的本地负荷为直流负荷, 公共负荷为交流负荷。

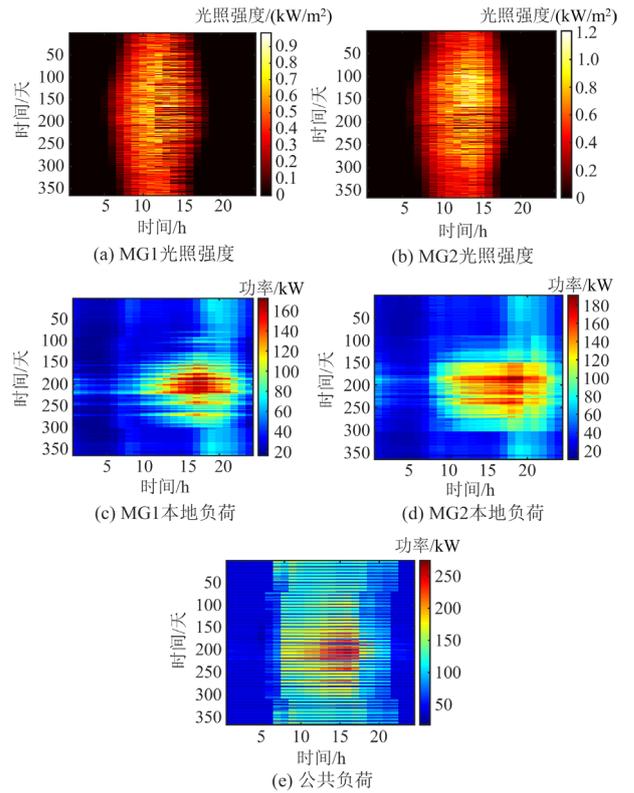


图 7 系统负荷及光照资源年度分布图

Fig. 7 Annual distribution map of system load and solar irradiation resources

本文设定的微电网系统中不同设备的成本参数见表 1, 系统的相关参数设置见表 2。

表 1 不同设备的成本参数

Table 1 Cost parameters of different equipments

设备种类	装机容量/kW	单位功率成本/(元/kWh)	寿命/年
光伏阵列	1	8800	20
蓄电池	50	1000	4
电解槽	5	20 000	10
燃料电池	5	14 000	10
储氢罐	1	1800	20
换流器	1	2000	10

表 2 系统相关参数

Table 2 Parameters related to systems

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
$T_S$	25	$\zeta_{ba\_dis}$	90%	$\zeta_{H2}$	50%	$R_{lo}$	12
$\eta$	0.46%	$\zeta_{ELE}$	60%	$\zeta_{FC}$	60%	$\lambda_1$	0.1
$\mu$	0.004 85	$\zeta_{ELE\_DC}$	90%	$r$	4%	$\lambda_2$	0.01
$\zeta_{ba\_ch}$	90%	$\zeta_{FC\_DC}$	90%	$N_y$	20	—	—
$\zeta_{BAT\_DC}$	90%	$\zeta_{PV\_DC}$	90%	$T$	8760 h	—	—

### 4.2 加入功率交互约束必要性的证明

如图8所示, 在表3所示的三种配置方案下, 系

统的失负荷率、能量过剩率和成本均随着功率交互约束 $P_{\max}$ 的增大而在一定范围内迅速减小；且 $P_{\max}$ 超过临界值时，系统的成本会有不同程度的上升，方案一的临界值为130.5 kW，方案二的临界值为85 kW，方案三的临界值为153 kW。因此，上述临界值也就是在该配置方案下成本最小的功率交互上限值。

不同配置方案下的功率交互约束对系统造成的影响也不相同。在方案一、三下，当 $P_{\max}$ 超过临界值后， $P_{\max}$ 对失负荷率和能量过剩率的影响较小；而在成本的变化曲线上，方案三受 $P_{\max}$ 的影响稍明显。在方案二下，失负荷率、能量过剩率和成本均在 $P_{\max}$ 超过临界值后有明显上升。

这说明功率交互约束对成本和稳定性均有影响，合适的功率交互约束大小可以增强稳定性并降低成本，因此对功率交互约束的配置是有必要的。

表 3 3 种不同配置方案

Table 3 Three different configuration schemes

方案	微电网	PV/台	BAT/个	ELE/个	FC/个	储氢罐/个	成本基准值/元	LOLP 基准值	EER 基准值
方案一	MG1	700	22	10	9	668	$1.92 \times 10^7$	0.201	0.154
	MG2	697	24	11	10	308			
方案二	MG1	715	20	5	15	1136	$1.84 \times 10^7$	0.209	0.204
	MG2	730	23	18	1	2334			
方案三	MG1	716	24	10	1	1079	$1.71 \times 10^7$	0.207	0.183
	MG2	662	24	1	1	206			

#### 4.3 基于功率交互约束的电-氢混合储能多微电网系统容量优化配置

根据节 3.2 节所提的优化配置模型求解方法，设置求解规模为 30，迭代次数为 100，并采用 GWO 算法与 MPSO 算法作为对比<sup>[32]</sup>，得到 3 种优化算法下考虑功率交互约束的配置结果如图 9 所示，3 种优化算法均可得到满足运行条件的配置方案。与其他两种方法相比，GSC 算法用于优化配置求解时系统成本更低，说明采用 GSC 算法求解更利于多微网系统的经济运行。从迭代曲线可以看出，GSC 算法下迭代至约 30 次后，成本始终低于其他两种算法，且在迭代至 80 次时收敛；MPSO 算法在 85 次以后收敛；GWO 算法在 90 次以后收敛。这表明 GSC 改进了 GWO 算法的求解速度，得到了更快的收敛速度，验证了算法的有效性。

由 GSC 算法求解本文所提的优化配置模型，有无考虑功率交互约束模型所得的方案如表 4 所示。由表 4 可知，无功率交互约束的多微网系统配置模型的经济性较差，失负荷率和能量过剩率更高，说明其供电可靠性更差。

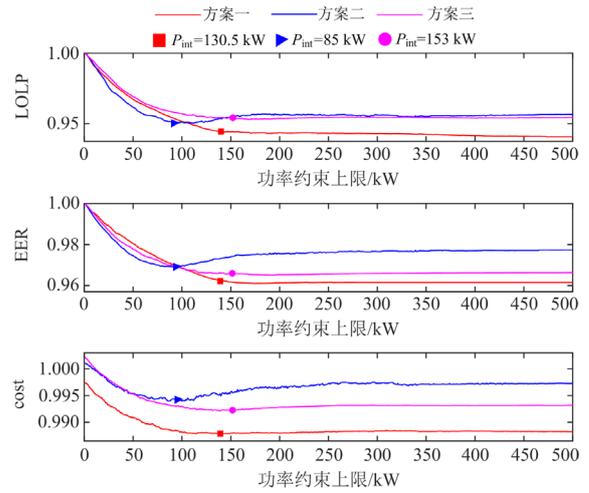


图 8 功率交互约束对不同系统的影响

Fig. 8 Impact of power interaction constraints on different systems

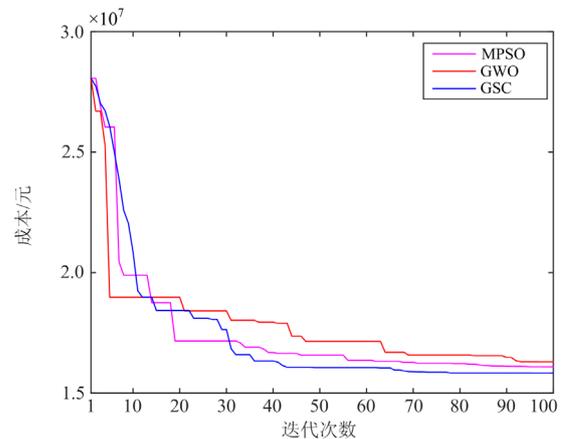


图 9 3 种不同算法下的优化结果对比

Fig. 9 Comparison of optimization results under three different algorithms

按照表 4 中基于功率交互约束的模型进行配置的多微网系统 24 h 运行情况如图 10 所示。微网 1 和微网 2 按照本文所提控制策略进行功率交互，且根据实时工况进行不同大小的有效功率交互。

表 4 有无功率交互约束下的配置结果

Table 4 Configuration results under different optimization algorithms

优化算法	考虑功率交互约束	微电网	PV/台	BAT/个	ELE/个	FC/个	储氢罐/个	功率交互约束/kW	LOLP	EER	成本/元
GSC	有	MG1	703	22	3	6	1431	247	0.16	0.17	$1.63 \times 10^7$
		MG2	768	24	2	5	99				
	无	MG1	810	23	5	9	775	0	0.19	0.19	$1.76 \times 10^7$
		MG2	652	22	4	1	338				

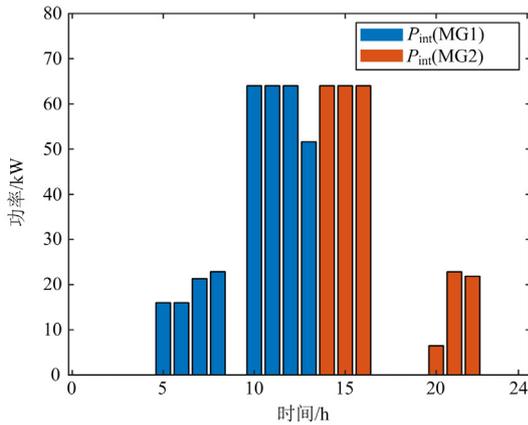


图 10 微电网的功率交互结果(24 h)

Fig. 10 Power interaction results of microgrid (24 h)

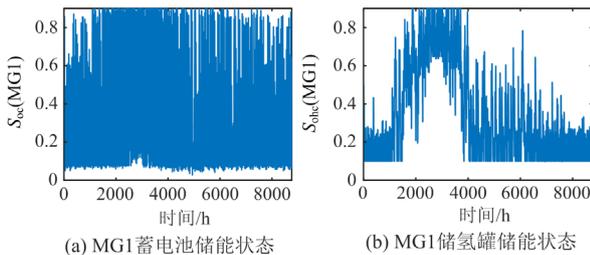
配置模型中考虑有无功率交互约束模型的购置成本和运维成本如表 5 所示。由表 5 可知，考虑功率交互约束时，系统的购置成本略有下降，运维成本大幅下降，降幅达 8.84%，总成本下降了 7%，这说明基于功率交互约束的优化配置模型有利于提高系统的经济性。

表 5 不同方案的具体成本

Table 5 Specific cost of different options

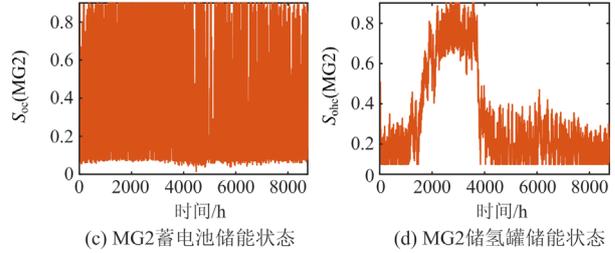
考虑功率交互约束	总成本/元	购置成本/元	运维成本/元
有	$1.635 \times 10^7$	$3.168 \times 10^7$	$1.324 \times 10^7$
无	$1.759 \times 10^7$	$3.175 \times 10^7$	$1.441 \times 10^7$

由表 4 中考虑功率交互约束模型配置的微网储能系统全年运行情况如图 11 所示。蓄电池荷电状态全年在 0.2~0.8 间不断波动，储氢罐等效荷电状态在 1100~4000 h 处于较高状态，然后基本处于较低状态。



(a) MG1 蓄电池储能状态

(b) MG1 储氢罐储能状态



(c) MG2 蓄电池储能状态

(d) MG2 储氢罐储能状态

图 11 微电网储能状态年度变化图

Fig. 11 Annual change of microgrid energy storage status

蓄电池全年工作在最佳区间内，说明蓄电池在短时间尺度上拥有经济性优势；氢储能系统在春末、初夏光伏电量长期盈余时制氢，夏天用电高峰期耗氢，说明氢储能系统在长时间尺度上呈现出储能优势，电、氢混合储能系统有经济性优势且在短期或长时储能下均适用。

## 5 结论

本文提出了考虑功率交互的电-氢混合储能多微电网系统优化配置策略，通过算例仿真得到了配置结果，并比较了 3 种优化算法对配置结果的影响，得到主要结论如下：

1) 在不同配置方案中，功率交互约束的变化对系统的成本和稳定性均有影响，合适的功率交互约束大小可以增强稳定性并降低成本。

2) 经过 3 种优化算法求解优化配置模型的对比可知，以 GSC 算法进行求解得到的配置结果成本、失负荷率、能量过剩率均更低，系统稳定性更高。基于功率交互约束的优化配置模型提高了系统的经济性，运维成本降幅达 8.84%，总成本下降了 7%。

3) 电储能系统在短时间运行上有经济性优势；氢储能系统在春季、初夏长时间储存能量，用于夏季用电高峰期，电、氢混合储能系统在多时间尺度下保证了系统的灵活、可靠运行。

本文只考虑了孤岛情况下的系统容量优化配置，并网情况下微网与大电网间的交互情况对优化配置的影响有待进一步研究。

## 参考文献

[1] 陈景文, 肖妍, 莫瑞瑞, 等. 考虑光伏校正的微电网储

- 能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 59-66.
- CHEN Jingwen, XIAO Yan, MO Ruirui, et al. Optimized allocation of microgrid energy storage capacity considering photovoltaic correction[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 59-66.
- [2] 王成山, 吕超贤, 李鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6791-6803.
- WANG Chengshan, LÜ Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6791-6803.
- [3] 卞艺衡, 别朝红, 黄格超, 等. 弹性配电网分布式可再生能源电源最优配置模型[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 213-221.
- BIAN Yiheng, BIE Zhaohong, HUANG Gechao, et al. Optimal renewable energy distributed generators placement for resilient distribution system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 213-221.
- [4] 杨轶, 陈明. 基于专利数据论太阳能光热发电在中国的研究进展[J]. 广东电力, 2021, 34(3): 12-22.
- YANG Yi, CHEN Ming. Research progress of concentrating solar power from the perspective of patent data[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(3): 12-22.
- [5] 王瀚琳, 刘洋, 许立雄, 等. 考虑风电消纳的区域多微电网分层协调优化模型[J]. 电力建设, 2020, 41(8): 87-98.
- WANG Hanlin, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Research on hierarchical coordinated optimization model of multi-microgrid system considering wind power consumption[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(8): 87-98.
- [6] 卢一菲, 陈冲, 梁立中. 基于电—氢混合储能的风氢耦合系统建模与控制[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 7-14.
- LU Yifei, CHEN Chong, LIANG Lizhong. Modeling and control of wind-hydrogen coupling system based on electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 7-14.
- [7] 甘锐, 李奇, 江淑娜, 等. 考虑燃料电池效率区间优化的混合动力系统双模式能量管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7027-7039.
- GAN Rui, LI Qi, JIANG Shuna, et al. Dual-mode energy management method considering optimization of fuel cell efficiency range[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7027-7039.
- [8] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 165-172.
- XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 165-172.
- [9] GAN W, SHAHIDEHPOUR M, GUO J, et al. Two-stage planning of network-constrained hybrid energy supply stations for electric and natural gas vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2013-2026.
- [10] XIA Y, XU Q, QIAN H, et al. Bilevel optimal configuration of generalized energy storage considering power consumption right transaction[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 128.
- [11] 李鹏, 韩建沛, 殷云星, 等. 电转氢作为灵活性资源的微网容量多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 28-35.
- LI Peng, HAN Jianpei, YIN Yunxing, et al. Multi-objective optimal capacity configuration of microgrid with power to hydrogen as flexible resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 28-35.
- [12] YANG Yang, MA Chao, LIAN Chong, et al. Optimal power reallocation of large-scale grid-connected photovoltaic power station integrated with hydrogen production[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 298.
- [13] 周京华, 翁志鹏, 宋晓通. 兼顾可靠性与经济性的孤岛型光储微电网容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 166-174.
- ZHOU Jinghua, WENG Zhipeng, SONG Xiaotong. Capacity configuration method of islanded microgrid integrated with photovoltaic and energy storage system considering reliability and economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 166-174.
- [14] 李景丽, 时永凯, 张琳娟, 等. 考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 94-102.
- LI Jingli, SHI Yongkai, ZHANG Linjuan, et al. Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 94-102.
- [15] ZHANG W, XU Y. Distributed optimal control for multiple microgrids in a distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3765-3779.
- [16] YANG X, ZHANG Y, WU H, et al. Enabling online scheduling for multi-microgrid systems: an event-triggered approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 1836-1852.
- [17] JIN S, WANG S, FANG F. Game theoretical analysis on capacity configuration for microgrid based on multi-agent system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125.

- [18] 徐业琰, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于综合需求响应和博弈的区域综合能源系统多主体日内联合优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2506-2518.  
XU Yeyan, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Multi-player intraday optimal dispatch of integrated energy system based on integrated demand response and games[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2506-2518.
- [19] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.  
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.
- [20] YAN Mingyu, MOHAMMAD S, ALEKSI P, et al. Distribution network-constrained optimization of peer-to-peer transactive energy trading among multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1033-1047.
- [21] 陈磊, 牛玉刚, 贾廷纲. 基于主从博弈的多微网能量调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 35-42.  
CHEN Lei, NIU Yugang, JIA Tinggang. Multi-microgrid energy scheduling strategy based on master-slave game[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 35-42.
- [22] 吴盛军, 李群, 刘建坤, 等. 基于储能电站服务的冷热电多微网系统双层优化配置[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3822-3832.  
WU Shengjun, LI Qun, LIU Jiankun, et al. Bi-level optimal configuration for combined cooling heating and power multi-microgrids based on energy storage station service[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3822-3832.
- [23] LI B, ROCHE R, PAIRE D, et al. Sizing of a stand-alone microgrid considering electric power, cooling/heating, hydrogen loads and hydrogen storage degradation[J]. Applied Energy, 2017, 205: 1244-1259.
- [24] 李奇, 赵淑丹, 蒲雨辰, 等. 考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 486-495.  
LI Qi, ZHAO Shudan, PU Yuchen, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity-hydrogen coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 486-495.
- [25] 孙彩, 李奇, 邱宜彬, 等. 余电上网/制氢方式下微电网系统全生命周期经济性评估[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4650-4660.  
SUN Cai, LI Qi, QIU Yibin, et al. Economic evaluation of whole life cycle of the micro-grid system under the mode of residual power connection/hydrogen production[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4650-4660.
- [26] GARCIA-TORRES F, BORDONS C. Optimal economical schedule of hydrogen-based microgrids with hybrid storage using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 5195-5207.
- [27] PAN G, GU W, LU Y, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.
- [28] 张良, 闫凯宏, 冷祥彪, 等. 基于 SOC 下垂控制的独立直流微电网协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 87-97.  
ZHANG Liang, YAN Kaihong, LENG Xiangbiao, et al. Research on coordinated control strategy of an autonomous DC microgrid based on SOC droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 87-97.
- [29] YANG H, ZHOU W, LU L, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. Solar Energy, 2007, 82(4): 354-367.
- [30] 李建林, 牛萌, 田立亭, 等. 光伏扶贫电站光-储协同配置方法研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 79-86.  
LI Jianlin, NIU Meng, TIAN Liting, et al. Research on PV-storage coordinated capacity configuration for photovoltaic poverty alleviation station[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(1): 79-86.
- [31] SINGH N, SINGH S B. A novel hybrid GWO-SCA approach for optimization problems[J]. An International Journal of Engineering Science and Technology, 2017, 20(6): 1586-1601.
- [32] 马立新, 徐嘉辉, 杨天笑. 基于 MPSO 算法含电动汽车的微网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8): 116-122.  
MA Lixin, XU Jiahui, YANG Tianxiao. Optimal scheduling of microgrid with electric vehicles based on MPSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 116-122.

收稿日期: 2021-09-26; 修回日期: 2022-01-22

作者简介:

李蕊睿(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网运行与控制; E-mail: 695956731@qq.com

李奇(1984—), 男, 通信作者, 教授, 研究方向为轨道交通新能源技术、综合能源系统运行与控制等。E-mail: liqi0800@163.com

(编辑 魏小丽)