

# 基于非合作博弈的微网混合储能容量配置方法

孙海霞<sup>1</sup>, 朱立位<sup>1</sup>, 韩钰倩<sup>2</sup>, 葛乐<sup>2\*</sup>, 吴英俊<sup>3</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏省 连云港市 222004;

2. 南京工程学院电力工程学院, 江苏省 南京市 211167;

3. 河海大学能源与电气学院, 江苏省 南京市 211100)

## Capacity Configuration Method of Hybrid Energy Storage System in Microgrids Based on a Non-cooperative Game Model

SUN Haixia<sup>1</sup>, ZHU Liwei<sup>1</sup>, HAN Yuqian<sup>2</sup>, GE Le<sup>2\*</sup>, WU Yingjun<sup>3</sup>

(1. Lianyungang Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222004, Jiangsu Province, China;

2. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu Province, China;

3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu Province, China)

**Abstract:** The hybrid energy storage capacity configuration method of a grid-connected microgrid only considers its economy, making it difficult to solve the problem of power fluctuation of tie lines in microgrids, which will have an adverse impact on the power grid. To balance the economy of hybrid energy storage and the effect of smoothing the fluctuation of tie-line power, an optimal configuration method of hybrid energy storage capacity based on a non-cooperative game is proposed. First, a non-cooperative game model was established with hybrid energy storage and tie lines as participants. Second, the reproductive mechanism and mutation operator of the invasive weed algorithm were used to improve the genetic algorithm and solve the model. Finally, the optimization results of the traditional multi-objective optimization model, single-objective optimization model, and non-cooperative game model, as well as the results of traditional and improved genetic algorithms, are compared. The results show that the participants can independently and objectively optimize the objective function so that the hybrid energy storage can make greater profits and

the smoothing effect is optimal. Simultaneously, the invasive weed genetic algorithm demonstrates obvious advantages in search capacity and convergent speed, thereby verifying the effectiveness of the proposed method and algorithm.

**Keywords:** microgrid; hybrid energy storage system; capacity configuration; non-cooperative game

**摘要:** 并网型微电网的混合储能容量配置方法一般仅考虑其经济性, 难以解决微电网联络线功率波动问题, 会对电网产生不利影响。为了权衡混合储能的经济性与联络线功率波动平抑效果, 提出了基于非合作博弈的混合储能容量优化配置方法。首先, 以混合储能和联络线作为参与者, 建立非合作博弈模型; 其次, 引入入侵杂草算法中繁殖机制和变异算子改进遗传算法, 并求解模型; 最后, 对传统多目标优化模型、单目标优化模型和非合作博弈模型的优化结果以及传统、改进遗传算法的求解结果进行对比。结果表明: 参与者进行博弈时可独立且客观优化目标函数, 在获取较大利润的同时, 平抑效果也最优, 同时入侵杂草遗传算法在寻优能力和收敛速度方面有明显优势, 验证了所提方法和算法的有效性。

**关键词:** 微电网; 混合储能; 容量配置; 非合作博弈

**基金项目:** 国家电网有限公司总部科技项目“储能在岸电系统中规划配置与协调运行关键技术研究与应用”; 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019112); 国家自然科学基金资助项目(51707089)。

Science and Technology Foundation of SGCC “Research and Application of Key Technologies for Planning, Configuration and Coordinated Operation of Energy Storage in Shore Power System”; Science and Technology Foundation of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (J2019112); National Natural Science Foundation of China (51707089).

## 0 引言

可再生能源出力 and 负荷具有随机性和波动性, 会引发并网型微电网联络线功率波动, 通常通过配置储能系统平抑其波动<sup>[1]</sup>。相对由单一储能介质组成的储能系统, 混合储能系统 (hybrid energy storage system,

HESS) 兼顾了功率型储能和能量型储能的优点<sup>[2-3]</sup>。因此合理配置HESS容量对平抑联络线功率波动和降低成本有着重要意义。

国内外学者在并网型微电网储能系统容量配置方面已展开较多研究。文献[4-5]建立了以经济性为目标的单一储能容量配置模型, 验证了储能系统容量配置与其经济效益有着相互制衡的关系; 文献[6-7]提出了以HESS经济效益为优化目标的容量配置方法, 但只计及全寿命周期成本, 未考虑微电网的优化目标会对HESS容量配置造成间接影响; 文献[8]建立了计及微电网经济运行的储能全寿命周期成本复合模型, 仅将额定容量和功率设置为模型的约束条件, 求解时很难收敛。上述内容本质上只考虑经济性最优解, 而微网并网运行时, 联络线上流过的功率会产生较大波动<sup>[9]</sup>, 影响电网运行的电压和频率, 以及微网并网等。为此, 文献[10]建立了以联络线功率为边界约束条件、系统经济性最优为目标的单目标优化模型进行容量配置。文献[11]建立双层调度优化模型, 其中下层考虑经济性最优和联络线功率不平衡量最小以实现综合效益最优, 并利用Pareto优化法进行求解。文献[12]建立储能容量配置的双层决策模型, 以实现储能的初始投资与联络线波动惩罚最低和系统联络线功率波动最低, 并利用权重系数法求解模型。文献[11-12]虽然能够在一定程度上平抑联络线功率波动, 但HESS的功率和容量是分别独立优化确定的, 工程应用会存在难以匹配的问题。

HESS经济性与联络线功率波动平抑效果是并网型微网混合储能容量优化配置的主要目标。多目标优化求解方法主要有权重法<sup>[13]</sup>、Pareto优化法<sup>[14]</sup>和非合作博弈法<sup>[15-16]</sup>。传统权重法的系数选取过于依赖经验与调试, 系数的客观性难以保证; 自适应权重法的权重系数会随优化过程变化, 可能求得劣解; Pareto优化方法选取最优粒子时具有较强随机性, 稳定性比较差。上述研究是基于单主体多目标优化的容量配置模型, HESS和联络线是两个收益函数不同的利益主体, 传统多目标优化方法无法解决多主体间的储能容量配置问题, 而非合作博弈可以较好解决多主体问题。非合作博弈不需要对全系统进行统一优化, 每个参与者独立且客观地迭代各自的收益函数<sup>[16]</sup>, 故不必考虑各目标之间的冲突性, 稳定性较好且优化效率高, 可有效提高HESS经济性与联络线功率波动平抑效果。

此外, 已有较多研究采用遗传算法求解非合作博弈问题<sup>[17-18]</sup>。传统遗传算法在变异操作时, 会破坏上

一代种群中适应度最高的解, 容易收敛到局部最优解, 本文应用入侵杂草算法<sup>[19]</sup>中繁殖机制和变异因子改进遗传算法, 提高算法的搜索效率并优化最优个体选取过程, 使求解结果为全局最优解, 避免早熟收敛, 并加快收敛速度。

综上, 本文首先建立混合储能容量配置的非合作博弈模型, 应用入侵杂草算法改进遗传算法进行模型求解, 最后通过算例验证所提模型和算法的有效性。

## 1 并网型微电网混合储能系统

并网型微电网内部包括光伏、风电等可再生能源(renewable energy source, RES), 负荷以及由锂电池和超级电容器组成的HESS, 通过联络线与外部电网相连, 如图1所示。在图1中,  $P_{Grid}$ 为联络线功率,  $P_{load}$ 为负荷功率,  $P_V$ 和 $P_W$ 分别为光伏和风电的出力功率,  $P_l$ 和 $P_{sc}$ 分别为锂电池和超级电容器的有功功率, 当电池功率大于0时, 定义为充电, 反之为放电。

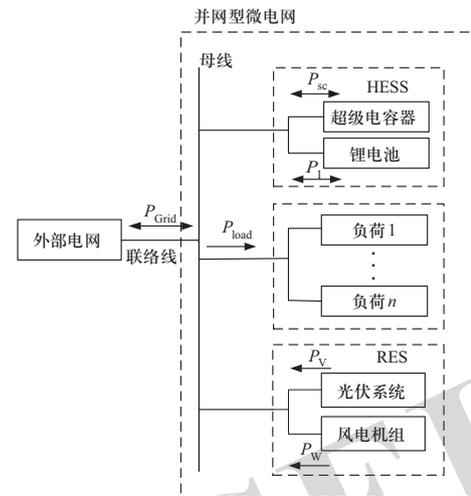


图1 并网型微电网结构

Fig. 1 Structure of grid-connected microgrid

### 1.1 功率控制策略

HESS的功率控制策略利用低通滤波算法<sup>[20]</sup>将动态需求功率分解为低频部分和高频部分, 实现能量和功率的结合。微电网的功率缺额 $P_{LEFT}$ 为

$$P_{LEFT} = P_{HESS} = P_{load} - P_V - P_W \quad (1)$$

式中:  $P_{HESS}$ 为HESS目标平抑功率, 当数值为正时处于放电状态, 反之为充电状态。锂电池功率密度小, 响应速度慢, 用于补偿目标功率中低频分量; 剩余的高频分量由功率型超级电容器补偿。

$$\begin{cases} P_{\text{low}} = \frac{P_{\text{LEFT}}}{1 + T_r s} \\ P_{\text{high}} = \frac{P_{\text{LEFT}} T_r s}{1 + T_r s} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{\text{low}}$ 为经算法得到的低频分量，作为锂电池的参考功率； $P_{\text{high}}$ 为高频分量，作为超级电容器的参考功率； $T_r$ 为低通滤波算法中的时间常数； $s$ 为微分算子。

## 1.2 HESS荷电状态及充放电管理

本文以 $t=1$ 为单位时间尺度， $T=24$ 为优化周期。在小时级容量优化配置方法中，为了保证锂电池和超级电容器的荷电状态（state of charge, SOC）不超限，本文对HESS进行充放电管理。依据充放电功率，计算各自储能的SOC。

$$S_{\text{HESS}}(t) = S_{\text{HESS}}(t-1) - \frac{\Delta t P_{\text{HESS,d}}(t-1)}{\eta_{\text{HESS,d}} E_{\text{HESS}}} = S_{\text{HESS}}(t-1) - \frac{\Delta t P_{\text{HESS,c}}(t-1)}{E_{\text{HESS}}/\eta_{\text{HESS,c}}} \quad (3)$$

$$S_{\text{HESS,min}} \leq S_{\text{HESS}}(t) \leq S_{\text{HESS,max}} \quad (4)$$

式中： $S_{\text{HESS}}(t)$ 和 $S_{\text{HESS}}(t-1)$ 分别为 $t$ 时段和 $t-1$ 时段HESS的荷电状态，SOC过大或过小会影响储能的寿命， $t=1,2,\dots,24$ ； $E_{\text{HESS}}$ 为HESS的额定容量； $P_{\text{HESS,c}}(t-1)$ 、 $P_{\text{HESS,d}}(t-1)$ 分别为 $t-1$ 时段HESS的充、放电功率； $\eta_{\text{HESS,c}}$ 、 $\eta_{\text{HESS,d}}$ 分别为储能的充、放电效率； $\Delta t$ 为采样步长； $S_{\text{HESS,max}}$ 和 $S_{\text{HESS,min}}$ 分别为HESS的荷电状态上、下限。若 $S_{\text{HESS}}(t) < S_{\text{HESS,min}}$ ，HESS限制放电，此时储能实际充电功率应为

$$P_{\text{HESS,c}}(t) = \frac{(S_{\text{HESS,max}} - S_{\text{HESS}}(t-1))}{\eta_{\text{HESS,c}} \Delta t / E_{\text{HESS}}} \quad (5)$$

反之， $S_{\text{HESS}}(t) > S_{\text{HESS,max}}$ 时，HESS限制充电，此时储能实际放电功率为

$$P_{\text{HESS,d}}(t) = \frac{(S_{\text{HESS}}(t-1) - S_{\text{HESS,min}})}{\Delta t / (\eta_{\text{HESS,d}} E_{\text{HESS}})} \quad (6)$$

## 1.3 约束条件

超级电容器、锂电池和联络线要满足并网型微电网平衡方程和各自约束<sup>[21-22]</sup>。

1) 功率平衡约束。

$$P_{\text{Grid}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_v(t) - P_w(t) + P_l(t) + P_{\text{sc}}(t) \quad (7)$$

2) 容量约束。

$$\begin{cases} E_l(t+1) = E_l(t) + P_l(t) \Delta t \\ E_{\text{sc}}(t+1) = E_{\text{sc}}(t) + P_{\text{sc}}(t) \Delta t \end{cases} \quad (8)$$

式中： $E_l$ 和 $E_{\text{sc}}$ 分别为锂电池和超级电容器的容量。

3) HESS需工作在运行范围之内，其功率和容量都有上、下限约束，即

$$\begin{cases} P_{l,\text{min}} \leq P_l(t) \leq P_{l,\text{max}} \\ P_{\text{sc},\text{min}} \leq P_{\text{sc}}(t) \leq P_{\text{sc},\text{max}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} E_l(t) \leq E_{l,\text{max}} \\ E_{\text{sc}}(t) \leq E_{\text{sc},\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $P_{l,\text{max}}$ 、 $P_{\text{sc},\text{max}}$ 、 $P_{l,\text{min}}$ 、 $P_{\text{sc},\text{min}}$ 、 $E_{l,\text{max}}$ 和 $E_{\text{sc},\text{max}}$ 分别为并网功率限制条件下允许的锂电池和超级电容器的最大、最小功率和容量。

4) 微电网络络线输送功率约束。

$$\begin{cases} P_{\text{Grid},\text{min}} \leq P_{\text{Grid}}(t) \leq P_{\text{Grid},\text{max}} \\ P_{\text{Grid},\text{min}} = -P_{V_0} - P_{W_0} \\ P_{\text{Grid},\text{max}} = P_{\text{load}0} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $P_{\text{Grid},\text{min}}$ 为联络线功率的下限； $P_{\text{Grid},\text{max}}$ 为联络线功率的上限； $P_{\text{load}0}$ 为反送功率。

5) 潮流平衡约束和支路功率约束。

$$\begin{cases} P_i(t) = V_i(t) \sum_{j \in c(i)} V_j(t) (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i(t) = V_i(t) \sum_{j \in c(i)} V_j(t) (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ |S_k| \leq S_{k,\text{max}} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $P_i(t)$ 和 $Q_i(t)$ 分别为节点注入的有功和无功功率； $V_i(t)$ 和 $V_j(t)$ 为 $t$ 时刻节点 $i$ 和 $j$ 的电压； $c(i)$ 为与节点 $i$ 相连的节点； $G_{ij}$ 和 $B_{ij}$ 分别为连接节点 $i$ 和 $j$ 的支路电导和电纳； $\theta_{ij}$ 为节点之间的相角差； $S_k$ 和 $S_{k,\text{max}}$ 分别为支路 $k$ 的功率及其上限。

6) 节点电压约束。

$$V_{\text{min}} \leq V_i(t) \leq V_{\text{max}} \quad (13)$$

式中： $V_{\text{max}}$ 和 $V_{\text{min}}$ 分别为节点电压的上、下限。

## 2 混合储能容量配置博弈模型

### 2.1 博弈分析的基本思路

仅考虑HESS的经济性会影响联络线功率波动，如何优化配置HESS的容量使经济性最优，是HESS关注的重点；仅考虑平抑联络线功率波动会使HESS容量配置过大，如何优化储能容量配置以平抑联络线功率波动是联络线关注的重点。由此可见，在小时级储能优化配置模型中，并网型微电网网架结构存在两个利益主体，且不同主体的收益目标、策略和约束条件不同，故利用非合作博弈解决参与者之间的冲突问

题, 建立非合作博弈模型:

$$G = \{L; \Omega; I\} \quad (14)$$

式(14)中包含了模型的三要素: 参与者 $L$ 、策略 $\Omega$ 和收益函数 $I$ 。本文中参与者 $L$ 为HESS和联络线, 分别用 $\{H, S\}$ 表示, 所对应的收益函数分别表示为 $I_H$ 和 $I_S$ ; 以超级电容器和锂电池的容量和功率作为博弈策略, 策略空间为连续容量和功率的集合, 具体表达为

$$\begin{cases} \Omega = \{\Omega_H, \Omega_S\} \\ \Omega_H = \{E_1, E_{sc}\} \\ \Omega_S = \{P_1, P_{sc}\} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\Omega_H$ 和 $\Omega_S$ 分别为HESS和联络线的策略空间。

## 2.2 博弈双方的收益函数

收益函数是参与者在博弈过程中追求的目标, 合理构建收益函数对模型合理性和求解有很大影响。

### 1) HESS收益函数。

HESS既要使成本尽可能低, 又要令收益尽可能高, 因此建立综合成本收益性的收益函数。HESS收益函数 $I_H$ 包括日成本 $f_C$ 和减少联络线建设容量所得日盈利 $f_B$ , 相较传统配置方案更能体现平抑功率波动对HESS容量配置的影响。

$$\min I_H = (f_C + f_B) \quad (16)$$

HESS日成本 $f_C$ 包括日运维费用 $C_{\text{HESS},w}(t)$ 、日投资成本 $C_{\text{HESS},i}(t)$ 、日购电费用 $C_{\text{buy}}(t)$ 。

$$\begin{cases} f_C = C_{\text{HESS},w}(t) + C_{\text{HESS},i}(t) + C_{\text{buy}}(t) \\ C_{\text{HESS},w}(t) = \frac{\Delta t}{365} (C_{w,1}E_1 + C_{w,sc}E_{sc}) \\ C_{\text{HESS},i}(t) = \frac{\gamma(1+\gamma)^{L_1} (C_{11}P_1 + C_{12}E_1)}{365[(1+\gamma)^{L_1} - 1]} + \frac{P_1 I_c}{365} + \\ \frac{\gamma(C_{sc1}P_{sc} + C_{sc2}E_{sc})}{365[(1+\gamma)^{L_{sc}} - 1]} / (1+\gamma)^{L_{sc}} \\ C_{\text{buy}}(t) = \begin{cases} \sum_{t=1}^T e(t) P_{\text{Grid}}(t), & P_{\text{Grid}}(t) > 0 \\ 0, & P_{\text{Grid}}(t) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $C_{w,1}$ 、 $C_{11}$ 、 $C_{12}$ 、 $L_1$ 分别是锂电池的维护成本、单位功率成本、单位容量成本和寿命;  $C_{w,sc}$ 、 $C_{sc1}$ 、 $C_{sc2}$ 、 $L_{sc}$ 分别为超级电容器的维护成本、单位功率成本、单位容量成本和寿命;  $\gamma$ 为资金的贴现率;  $P_c$ 和 $I_c$ 为变频器的功率和价格;  $e(t)$ 为HESS从大电网购电的分时电

价;  $T$ 为总时间。

$f_B$ 可表示为

$$f_B = k_c \max \left[ \begin{array}{l} 0, \max(P_V(t) + P_W(t)) - \\ \max(P_V(t) + P_W(t) - P_1(t) - P_{sc}(t)) \end{array} \right] \quad (18)$$

式中:  $k_c$ 为联络线的单位功率造价。以往的微电网联络线容量按照日出力的最大值进行规划, 然而HESS平抑功率波动后, 使功率曲线更加平滑, 功率峰谷差值降低, 从而使所需建设的联络线的容量降低, 相当于增加了收益。HESS的收益函数包括平抑联络线功率波动, 实际上是为了解决微网功率缺额的问题, 在此背景下, 联络线功率是频繁双向波动的, 所以本文HESS不会长时间处于充电或放电状态, 因此无需计及容量的要求。

### 2) 联络线收益函数。

负荷和分布式电源出力具有较强随机性和波动性, 会导致微电网联络线功率峰谷差变大, 可用联络线功率方差衡量功率波动, 本文对联络线的优化目标是使平抑效果最优, 其收益函数为功率方差最小, 即

$$\min I_S = \frac{\sum_{t=0}^{T-1} [P_{\text{Grid}}(t) - P_{\text{average}}]^2}{T} \quad (19)$$

$$P_{\text{average}} = \frac{\sum_{t=0}^{T-1} [P_{\text{Grid}}(t)]}{T} \quad (20)$$

式中:  $I_S$ 为联络线功率日波动方差;  $P_{\text{average}}$ 为功率均值。

## 3 博弈模型求解方法

基于非合作博弈的微电网HESS容量优化配置是非线性问题, 本文采用改进的遗传算法进行求解, 直到达到稳定的Nash均衡点 $(E_1^*, P_1^*, E_{sc}^*, P_{sc}^*)$ 。

### 3.1 改进遗传算法

传统遗传算法是一种基于基因进化的迭代搜索算法, 具有很强的全局搜索能力, 适用于解决非线性问题, 但传统遗传算法在变异操作时, 会破坏上一代种群中适应度最高的解, 存在早熟、容易收敛到局部最优解的问题。因此, 本文提出一种改进遗传算法, 将入侵杂草算法<sup>[19]</sup>引入到遗传算法中, 利用以适应度为基准的繁殖机制和改进的变异算子来产生后代和变异操作, 提高了种群的适应性以及算法效率, 优化最优个体选取过程, 使求解结果为全局最优解。

### 1) 基于以适应度为基准的繁殖机制。

利用入侵杂草算法中以适应度为基准的繁殖机制来产生自带种群：适应度好的个体产生大量子代，反之，则产生少量子代。在计算初始种群适应度后，每个个体按照式(21)产生相应的子代数量，其中每个子代的第一部分与父代相同，第二部分的断点随机设置，并与父代不同。

$$N(i) = \frac{(N_{\max} - N_{\min})(f_{it_w} - f_{it}(i))}{(f_{it_w} - f_{it_b})} + N_{\min} \quad (21)$$

式中： $N(i)$ 为个体 $i$ 产生的后代数； $N_{\max}$ 和 $N_{\min}$ 分别为每个个体可产生最大和最小的后代数； $f_{it_w}$ 和 $f_{it_b}$ 分别为当前种群中个体最差和最好的适应度； $f_{it}(i)$ 为个体 $i$ 的适应度函数。

### 2) 改进的变异因子。

针对传统遗传算法中的不足，引入入侵杂草算法中优秀个体选取方法对传统遗传算法进行改进。利用式(22)求出种群适应度的均值，并分成优秀个体和较差个体。对于优秀个体使其较大概率进化，对于较差个体则处于小概率进化或完全停滞状态。

$$f_{it_{avg}} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} f_{it}(i) \quad (22)$$

式中：选取 $f_{it}(i) < f_{it_{avg}}$ 的个体为最优个体，剩余为较差个体，共有 $N_p$ 个个体。为了增强算法的局部探索能力并维持种群多样性，令优秀个体进化概率 $P_1=0.9$ 。改进遗传算法的具体流程如图2所示。

在图2中， $\sigma(0,1)$ 是均值为0、方差为1的正态分布随机数； $\text{rand}(0,1)$ 为 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机数； $x_{g_{best}}$ 为最优个体； $x_i(g)$ 代表第 $g$ 代的第 $i$ 个个体； $F$ 为缩放因子； $x_{p1}$ 、 $x_{p2}$ 、 $x_{p3}$ 为3个不同的个体。

### 3) 具体步骤。

在约束条件下，改进遗传算法求解模型的步骤如下。

① 参数设置和确定编码方式，策略和收益函数值使用实数编码方式，并确定适应度函数；

② 在预设范围中随机生成初始值，组成初始种群，并根据繁殖机制产生后代，初值满足约束式(4)、(7) — (13)；

③ 依据式(22)计算当前种群的平均适应度，并判断出所有的优秀个体和较差个体，根据相应的约束规则执行选择、交叉和改进的变异遗传操作，从而产生新一代的种群；

④ 若超过收敛条件和迭代次数则输出结果，反之，则返回步骤②。

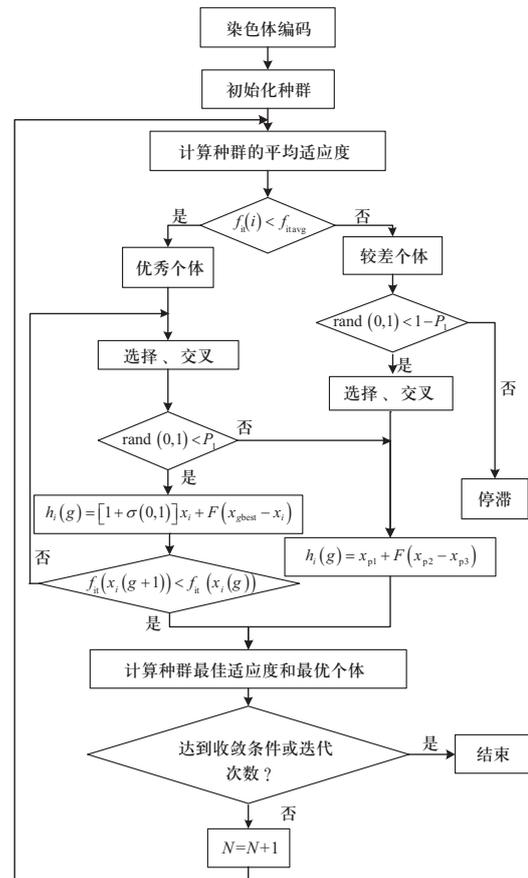


图2 改进遗传算法流程图

Fig. 2 Flowchart of improved genetic algorithm

### 4) 测试函数。

本文利用代距 (generational distance, GD) 和间距 (spacing, S) 两个指标判断传统与改进遗传算法的优劣<sup>[23]</sup>，其中GD表示算法的收敛性；S表示算法的分布性。分别对ZDT1函数随机运行20次，对两指标进行计算和统计。

## 3.2 博弈流程分析

在利用文献[24]的方法验证本文Nash均衡解存在且唯一的基础上，根据第2章的模型设计思路，建立非合作博弈模型。首先，将锂电池和超级电容器的功率、容量视为博弈参与者的策略，当参与者独立优化各自目标的优化问题时，利用改进的遗传算法求解收益函数，得到一方的最优策略，与另一方目前最优策略构成组合策略；其次，以组合策略所对应的适应度函数值为目标进行不断迭代，直到Nash均衡解。求解流程如图3所示。

在图3中，以收益函数作为适应度函数，对两种群分别独立进行遗传算子操作，两方参与者进行独立优化策略。记两方参与者第 $j-1$ 轮优化的结果为

$(E_{sc,j-1}, E_{l,j-1}, P_{sc,j-1}, P_{l,j-1})$ , 通过遗传算法迭代, 得到最优策略组合  $(E_{sc,j}, E_{l,j}, P_{sc,j}, P_{l,j})$ 。最后, 判断是否找到 Nash 均衡解, 若参与者相邻两次得到的最优解相同, 则表明在该策略集下, 找到了 Nash 均衡解。

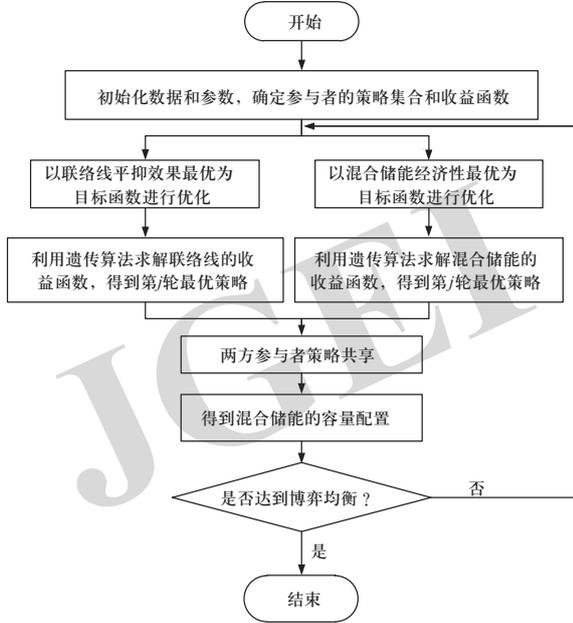


图3 博弈流程图  
Fig. 3 Game flowchart

## 4 算例分析

### 4.1 算例设置

本文采用修改的IEEE-33节点系统作为微电网算例, 其拓扑结构如图4所示。节点1连接外部电网, RES与负荷的数据如图5所示。采用MATLAB R2014a编写算法程序, 调用Matpower工具箱进行潮流计算。仿真计算机处理器为Intel (R) Core (TM) i5-10210U CPU @ 1.60 GHz, 内存为8GB。研究中HES采用锂电池和超级电容器, 系统相关参数见表1。时间间隔  $\Delta t = 1\text{h}$ ,  $T=24$ 。

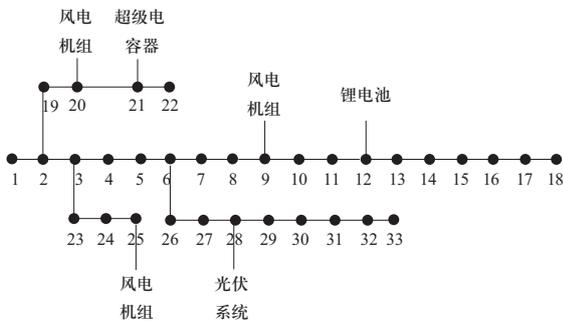


图4 IEEE-33节点微电网算例  
Fig. 4 IEEE-33 node microgrid case

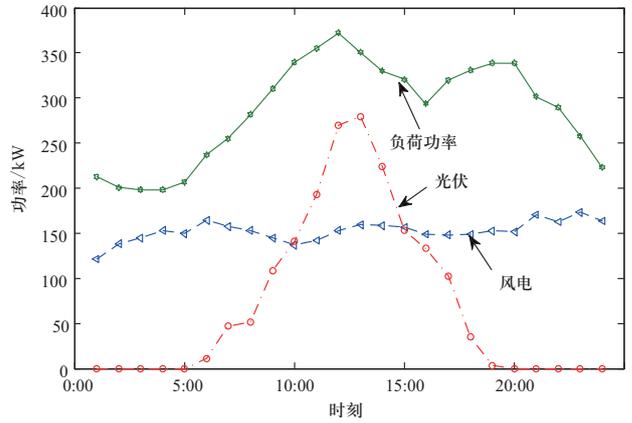


图5 RES和负荷功率  
Fig. 5 Power of RES and load

表1 储能系统参数

Table 1 Parameters of energy storage system

性能指标	超级电容器	锂电池
功率成本系数/(元·kW <sup>-1</sup> )	1400	2600
运维成本系数/(元·(kWh) <sup>-1</sup> )	0.06	0.07
容量成本系数/(元·(kWh) <sup>-1</sup> )	27 000	1000
充放电效率/%	95	80
SOC范围	0.1~0.9	0.2~0.8

根据本文提出的非合作博弈方法, 超级电容器和锂电池运行应满足1 min有功功率变化限值  $\Delta P_{t=1\text{min}}$  不能超过装机容量  $P_k$  的1/10和10 min有功功率变化限值  $\Delta P_{t=10\text{min}}$  不能超过装机容量  $P_k$  的1/5, 即  $\Delta P_{t=1\text{min}} \leq 10\%P_k$  且  $\Delta P_{t=10\text{min}} \leq 20\%P_k$ 。设置遗传算法的参数如下: 种群个体数量  $N_p=100$ , 种群交叉概率  $C_{\text{ROSS}}=0.95$ , 迭代次数  $N_{\text{gen}}=50$ , 变异概率  $M_u=0.05$ , 选择概率  $\omega=0.6$ , 优秀个体进化概率  $P_l=0.9$ 。

### 4.2 算例分析

#### 4.2.1 非合作博弈和其他方法对比分析

为了验证所提方法的有效性, 本文将对以下5种场景进行算例仿真。

1) 场景1: 建立HES经济性最优的单目标优化模型并求解;

2) 场景2: 建立平抑联络线功率波动最小的单目标优化模型并求解;

3) 场景3: 建立HES经济性最优和平抑联络线功率波动最小的多目标优化模型, 并采用权重系数法进行求解;

4) 场景4: 建立HES经济性最优和平抑联络线功率波动最小的多目标优化模型, 并采用Pareto法进

行求解:

5) 场景5 (本文模型方法): 以HES和联络线作为博弈参与方, 储能容量和功率作为博弈策略, 建立综合考虑HES经济性和平抑联络线功率波动的非合作博弈模型, 并采用改进遗传算法进行求解。

表2为不同场景的优化结果。

表2 不同场景的优化结果  
Table 2 Optimization results of different scenarios

场景	额定功率/kW		额定容量/kWh		成本/元	方差/kW <sup>2</sup>
	锂电池	超级电容器	锂电池	超级电容器		
场景1	223.65	96.21	530.94	12.03	16 650	150
场景2	383.20	190.71	754.50	33.75	42 210	48.5
场景3	315.71	203.33	702.39	24.23	22 030	80.21
场景4	310.05	200.95	698.65	21.52	21 703	76.65
场景5	300.15	180.33	684.45	20.93	19 872	74.95

图6为场景1、2和5的经济性对比。从表2和图6可以看出, 场景5较场景1成本增加了19.4%, 主要是由于场景1的策略只需要考虑平抑联络线功率波动, 而场景5则是要在经济性与功率波动平抑效果之间进行博弈, 相当于在收益函数中考虑了平抑效果。此外, 与场景1相比, 场景5的联络线功率方差减小了50%, 其平抑效果要求更高, 使HES必须采取保守的调度方案, 从而保证电力系统经济且稳定运行。

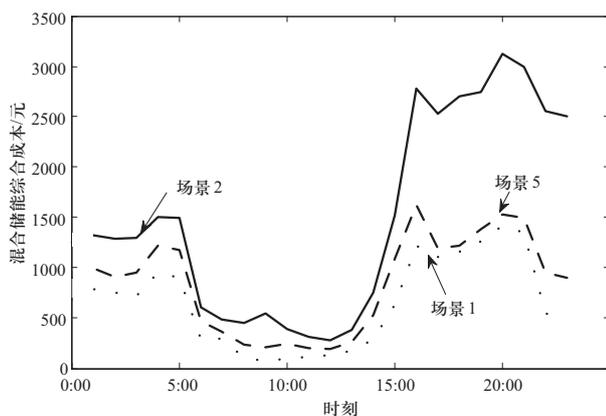


图6 优化模型的经济性对比

Fig. 6 Economic comparison of optimization models

与场景2相比, 场景5联络线功率方差虽略偏大, 但是能够获取较高的收益。在00:00—5:00、19:00—24:00时间段, 成本呈上升趋势, 这是因为没有RES出力, HES开始放电为负荷提供有功功率支撑。系

统在8:00—15:00时间段, 微电网负荷以RES为主、储能为辅供给, 所以成本变化基本平稳。在6:00—7:00、16:00—18:00时间段, RES提供系统的负荷需求和HES的充放电功率, 多余出力会倒送到大电网中, 所以成本会有下降趋势。

综合各项数据, 场景5与场景1、场景2这两个单目标优化模型相比, 能够在混合储能经济性与联络线功率波动平抑效果之间取得较好平衡, 并满足大电网的需求。

由于经济性与平抑效果互斥, 场景3将各主体收益的多目标问题转化为单目标优化问题, 并运用层次分析法对各项指标赋予权重, 目标函数为  $F(X) = \omega I_c + (1 - \omega) I_s$ , 且  $\omega \leq 1$ 。  $\omega$  不是常数, 其随SOC的实时状态而变化, 利用动态自适应控制方法调整  $\omega$ <sup>[11]</sup>。图7(a)给出了权重法求解的多次优化结果, 场景3虽然能够获得总收益的解, 但算法中权重系数的选择受主观因素影响, 较难客观反映两方之间的关系, 从而导致重复计算的结果并不唯一。

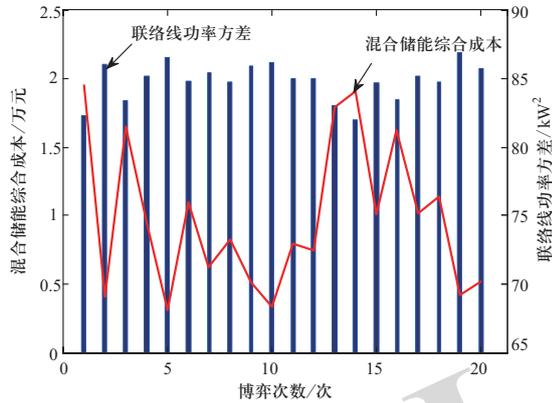
为了避免忽视各收益函数间的竞争关系造成的结果误差, 场景4采用多迭代方向Pareto解集动态更新策略, 从Pareto非劣解集中筛选最优解。数学描述如下:

$$\begin{cases} \min f(x) = [I_H, I_S] \\ \text{s.t. } g_i(x) \leq 0; i = 1, 2, \dots, h, x \in \mathbf{R}^n \end{cases} \quad (23)$$

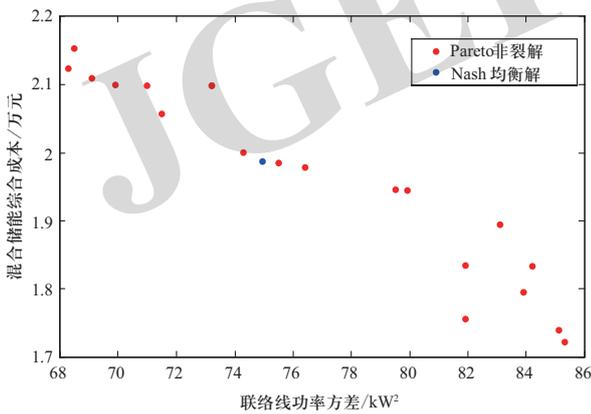
图7(b)给出了Pareto解集与Nash均衡解的关系。由图可知, 虽然非合作Nash均衡解不属于Pareto非劣解集, 但二者极为接近。利用Pareto法选取最优粒子时具有较强随机性, 结果不唯一。

从表2可以看出, 场景3、4和5均可以有效地求解多目标优化问题, 找到满足约束条件下的最优解。从HES的经济性来看, 由于场景5配置的功率和容量更少, 所以成本更低, 较场景3节省了2158元, 较场景4节省了1831元。从平抑联络线功率波动来看, 场景5的方差会低于场景3、4。仿真结果验证出非合作博弈优化方法能够得到稳定的Nash均衡解, 不受主观因素和博弈次数的影响, 且可证明本文所提方法的有效性和最优性。

场景3和场景5的联络线功率曲线如图8所示。由图可知, 场景3和场景5的优化方法均可平抑联络线功率波动, 但从平抑效果来看, 场景5的联络线功率的方差为74.95 kW<sup>2</sup>, 场景3的联络线功率的方差为80.21 kW<sup>2</sup>, 说明场景5通过独立且客观地优化各个收益函数后, 可减少联络线功率方差, 平抑联络线功率波动效果相比场景3更优, 验证了本文所提方法的优越性。



(a) 权重法多次求解结果



(b) Pareto法多次求解结果

图7 传统多目标优化方法求解结果

Fig. 7 Results of traditional multi-objective optimization method

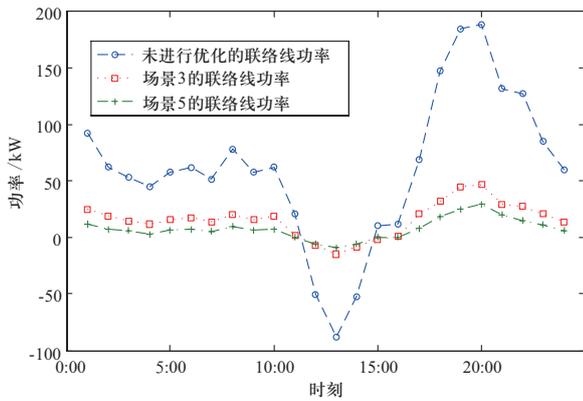


图8 联络线功率曲线

Fig. 8 Tie line power curves

4.2.2 改进遗传算法和传统遗传算法对比分析

ZDT1的算法结果对比如表3所示, 从GD指标和S指标来看, 改进遗传算法要优于传统算法, 改进遗传算法最优解集在最优前沿上的分布性较好。总体来看, 改进算法整体性能优于传统算法, 可提高收敛精度, 且计算时间快。

表3 ZDT1的算法结果对比

Table 3 Comparison of algorithm results of ZDT1

参数	传统遗传算法	改进遗传算法	
最好值	GD/10 <sup>-5</sup>	9.30	7.52
	S/10 <sup>-5</sup>	42.45	8.80
最差值	GD/10 <sup>-4</sup>	4.13	3.33
	S/10 <sup>-2</sup>	52.31	2.21
方差	GD/10 <sup>-8</sup>	2.10	1.36
	S/10 <sup>-5</sup>	10.74	2.51

本文利用传统的遗传算法、所提出入侵杂草遗传算法进行模型求解, 设置迭代次数为50。

由图9可知, 与传统的遗传算法相比, 利用入侵杂草算法改进的遗传算法求解出的成本较低, 其中改进遗传算法到第16次迭代后收敛至19 872元, 传统遗传算法到第28次迭代后收敛为23 241元。

两种算法的迭代结果表明, 传统遗传算法陷入了局部最优解, 而本文所采用的入侵杂草遗传算法可以有效避免早熟收敛。

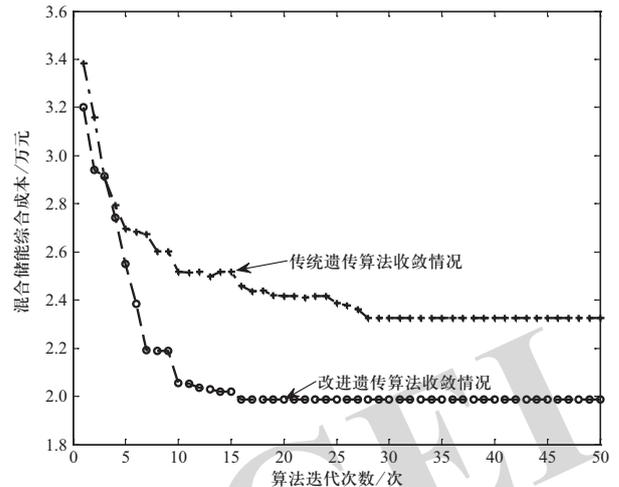


图9 算法收敛结果

Fig. 9 Convergence results of the algorithm

5 结论

本文建立了考虑微电网联络线功率波动平抑效果和经济性的HESS非合作博弈容量配置模型。通过算例分析, 所得结论如下:

1) 与经济优化模型、平抑效果模型相比, 本文方法能够在混合储能经济性与联络线功率波动平抑效果之间取得较好平衡, 并满足外部电网的需求;

2) 与权重法、Pareto多目标优化方法相比, 本文

方法可客观且独立地优化参与者的收益函数,有效避免最优解易受主观因素影响的问题,并获得HESS容量配置的最优解;

3) 传统遗传算法有早熟收敛和收敛速度慢等缺陷,利用入侵杂草算法中变异因子可选出优秀个体,减小算法陷入局部最优的概率,提高了寻优能力和收敛速度,其性能明显优于传统遗传算法。

## 参考文献

- [1] 吴传申, 刘宇, 高山, 等. 基于预测控制的储能系统多时间尺度动态响应优化研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 222-230.  
WU Chuanshen, LIU Yu, GAO Shan, et al. Multi-time scale dynamic response optimization of energy storage system based on predictive control[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 222-230(in Chinese).
- [2] 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(in Chinese).
- [3] 何俊强, 师长立, 马明, 等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 157-167.  
HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 157-167(in Chinese).
- [4] 赵冬梅, 夏轩, 陶然. 含电转气的热电联产微网电/热综合储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 46-54.  
ZHAO Dongmei, XIA Xuan, TAO Ran. Optimal configuration of electric/thermal integrated energy storage for combined heat and power microgrid with power to gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 46-54(in Chinese).
- [5] 窦晓波, 袁简, 吴在军, 等. 并网型风光储微电网容量改进优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 26-32.  
DOU Xiaobo, YUAN Jian, WU Zaijun, et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 26-32(in Chinese).
- [6] FENG X S, GU J, GUAN X F. Optimal allocation of hybrid energy storage for microgrids based on multi-attribute utility theory[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 107-117.
- [7] 梁芷睿, 宋政湘, 王建华, 等. 液态金属电池储能系统在光氢耦合微电网中的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 64-69.  
LIANG Zhirui, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua, et al. Optimal configuration of liquid metal battery energy storage system in photovoltaic and hydrogen coupled microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 64-69 (in Chinese).
- [8] 李斐, 黎灿兵, 孙凯, 等. 微电网中混合储能系统的规划运行一体化配置方法[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 453-460.  
LI Fei, LI Canbing, SUN Kai, et al. Integrated planning and operation method of hybrid energy storage system in microgrid[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(3): 453-460(in Chinese).
- [9] 冯雷, 蔡泽祥, 王奕, 等. 计及负荷储能特性的微网荷储协调联络线功率波动平抑策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 22-28.  
FENG Lei, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Strategy for tie line power fluctuation suppressing of load-energy storage coordinated microgrid considering energy-storage characteristic of load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 22-28(in Chinese).
- [10] 张筱慧, 李佳馨, 张璐, 等. 考虑联络线峰谷差和电网运行效益的综合能源系统规划[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 195-202.  
ZHANG Xiaohui, LI Jiabin, ZHANG Lu, et al. Integrated energy system planning considering peak-to-valley difference of tie line and operation benefit of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 195-202(in Chinese).
- [11] 徐岩, 张建浩. 考虑需求响应和联络线交互的含微电网的主动配电网多目标协同调度优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(1): 1-14.  
XU Yan, ZHANG Jianhao. Multi-objective cooperative dispatching optimization of active distribution network with microgrid considering demand response and tie line interaction[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(1): 1-14(in Chinese).
- [12] 李建林, 郭斌琪, 牛萌, 等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1189-1196.  
LI Jianlin, GUO Binqi, NIU Meng, et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1189-1196(in Chinese).
- [13] 王雅平, 林舜江, 杨智斌, 等. 微电网多目标随机动态优化调度算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2196-2207.  
WANG Yaping, LIN Shunjiang, YANG Zhibin, et al. Multi-objective stochastic dynamic optimal dispatch algorithm of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2196-2207(in Chinese).
- [14] 禹威威, 刘世林, 陈其工, 等. 考虑需求侧管理的光伏微

- 电网多目标优化调度方法[J]. 太阳能学报, 2017, 38(11): 2972-2981.
- YU Weiwei, LIU Shilin, CHEN Qigong, et al. Multi-objective optimization scheduling method for photovoltaic based microgrid considering demand side management[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(11): 2972-2981(in Chinese).
- [15] 汤可宗, 李佐勇, 詹棠森, 等. 一种基于Pareto关联度支配的多目标粒子群优化算法[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(4): 439-446.
- TANG Kezong, LI Zuoyong, ZHAN Tangsen, et al. A multi-objective particle swarm optimization algorithm based on Pareto correlation degree domination[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(4): 439-446(in Chinese).
- [16] 张富平, 李志宏, 常好晶, 等. 计及分布式电源不确定性的微网储能容量博弈优化[J]. 可再生能源, 2019, 37(7): 1042-1048.
- ZHANG Fuping, LI Zhihong, CHANG Haojing, et al. Game-based optimization of energy storage capacity for micro-grid considering uncertainty of distributed generation[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(7): 1042-1048(in Chinese).
- [17] LIU X F, GAO B T, ZHU Z Y, et al. Non-cooperative and cooperative optimisation of battery energy storage system for energy management in multi-microgrid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(10): 2369-2377.
- [18] 张忠会, 刘故帅, 谢义苗. 基于博弈论的电力系统供给侧多方交易决策[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1779-1785.
- ZHANG Zhonghui, LIU Gushuai, XIE Yimiao. A game theory approach to analyzing multi-party electricity trading on supply side[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1779-1785(in Chinese).
- [19] 陈亦杰, 刘故帅, 张忠会. 考虑电动汽车群和新增实体的电力市场多方交易策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 33-40.
- CHEN Yijie, LIU Gushuai, ZHANG Zhonghui. A study on multi-party trading strategy of electricity market considering electric vehicle group and new entity[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 33-40(in Chinese).
- [20] 卢锦玲, 杨月, 王阳, 等. 基于Copula理论的电动汽车光伏电站储能配置[J]. 太阳能学报, 2016, 37(3): 780-786.
- LU Jinling, YANG Yue, WANG Yang, et al. Copula-based capacity configuration of energy storage system for a PV-assisted electric vehicles charging station[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(3): 780-786(in Chinese).
- [21] 郭伟, 赵洪山. 基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1140-1151.
- GUO Wei, ZHAO Hongshan. Coordinated control method of multiple hybrid energy storage system in DC microgrid based on event-triggered mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1140-1151(in Chinese).
- [22] 张晴, 李欣然, 杨明, 等. 净效益最大的平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 40-48.
- ZHANG Qing, LI Xinran, YANG Ming, et al. Capacity determination of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations with maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 40-48(in Chinese).
- [23] 汤可宗, 柳炳祥, 詹棠森, 等. 基于极大极小关联密度的多目标微分进化算法[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(6): 693-699.
- TANG Kezong, LIU Bingxiang, ZHAN Tangsen, et al. Multi-objective differential evolution algorithm based on max-Min correlation density[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2019, 43(6): 693-699(in Chinese).
- [24] 孙国强, 钱苇航, 黄文进, 等. 考虑配电网安全性的虚拟电厂优化调度博弈模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 7-14.
- SUN Guoqiang, QIAN Weihang, HUANG Wenjin, et al. Optimal dispatch game model for virtual power plant considering security of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 7-14(in Chinese).

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-06-02。

#### 作者简介:



孙海霞

孙海霞(1974), 女, 高级工程师, 长期从事电力系统运行与管理工  
作, E-mail: lygsunhx@126.com。  
葛乐(1982), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源与柔性电网。通信作  
者, E-mail: supertiger\_bear@126.com。

(责任编辑 张宇)