

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231127

计及需求响应的海岛微电网群优化运行研究

黄冬梅¹, 吕嘉欣², 时帅², 李媛媛², 傅望安³, 王晓亮⁴

(1. 上海电力大学电子与信息工程学院, 上海 201306; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 3. 华能(浙江)能源开发有限公司清洁能源分公司, 浙江 杭州 310014; 4. 自然资源部东海海域海岛中心, 上海 200136)

摘要: 在海岛可再生能源替代与电动汽车技术大规模应用的背景下, 为解决偏远海岛居民的用电需求, 提出了计及需求响应的电动汽车接入海岛微电网群的优化方法。首先, 根据实际监测数据集对电动汽车充电行为建模, 对比多种分布形式的联合评价和指标, 得到拟合较好的概率分布函数。其次, 选取多个海岛构成低碳化海岛能源系统, 在考虑可再生能源渗透率和用户满意度的前提下, 建立了以海岛微电网群的经济性和环保效益最优为目标的微电网群优化模型, 利用蜘蛛蜂优化(spider wasp optimization, SWO)算法求解。最后, 以浙江某海岛群为例进行验证, 算例结果表明, 所提海岛微电网群优化模型能够在满足可再生能源高渗透率的场景下, 有效降低系统成本, 更具经济性。

关键词: 海岛微电网群; 电动汽车; 需求响应; 蜘蛛蜂优化算法

Optimal operation of island microgrid clusters considering demand response

HUANG Dongmei¹, LÜ Jiaxin², SHI Shuai², LI Yuanyuan², FU Wang'an³, WANG Xiaoliang⁴

(1. School of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China; 2. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 3. Clean Energy Branch of Huaneng (Zhejiang) Energy Development Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 4. East China Sea Area and Island Center, MNR, Shanghai 200136, China)

Abstract: With the background of the island renewable energy substitution and the large-scale application of electric vehicle technology, then to solve the electricity demand of remote island residents, an optimization method for electric vehicle access to the island microgrid cluster is proposed. First, the charging behavior of electric vehicles is modelled based on an actual monitoring data set, a joint evaluation and indices of various distribution forms are compared, and a well-fitting probability distribution function is obtained. Second, this paper selects multiple islands and constructs a low-carbon island energy system. Considering renewable energy penetration and user satisfaction, the optimization model of the microgrid cluster is established, with the aim of optimizing the economic and environmental benefits of the cluster. The spider wasp optimization (SWO) algorithm is used for analysis. Finally, taking an island cluster in Zhejiang as an example, the calculations show that the proposed island microgrid cluster optimization model can effectively reduce the system cost and be more economical when there is a high penetration rate of renewable energy.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC3101602).

Key words: island microgrid cluster; electric vehicle; demand response; spider wasp optimization (SWO)

0 引言

随着化石燃料的大规模开采和消耗, 全球能源危机日益加剧, 利用可再生能源代替化石能源发电成为主要的趋势。海岛因其特殊的地理位置, 自身

具有丰富的自然资源, 如何利用这部分资源提高海岛微电网的经济性具有十分重要的现实意义。

由于海岛微电网天然的局限性, 大部分海岛微电网只能孤网运行^[1], 为保障微电网的安全可靠, 将多个地理上邻近的海岛微电网划分形成多微电网系统^[2], 并将2个及以上微电网互联形成微电网群^[3-4], 有效提高了电网的可靠性和安全性。微电网的优化运行研究已经取得了一定的成果^[5-7], 现阶段主要从微电网群的稳定性^[8]、经济性^[9]、环保性和用户侧

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFC3101602); 华能集团总部科技项目“HNKJ20-H66 基于深远海的海上风电选址和支撑技术研究”资助

需求响应^[10-11]等方面对其进行优化研究。文献[12]在分时电价的机制下, 考虑微型燃气轮机的冷热电联运行特性和微电网与大电网的交互, 构建了微电网并网经济运行优化模型。文献[13]采用改进的退火变异粒子群优化算法, 分析了电动车有序和无序两种模式充放电对微电网经济成本和环保成本的影响。文献[14]采用蚁群优化算法控制微电网调度模型, 提出微电网智能控制框架以提高可再生能源在电网系统中的渗透率, 分析系统优化控制策略。众多学者选用了 PSO、GA、ACO^[14]等智能算法对模型进行求解, 但其优化结果仍存在保守性。

微电网优化运行问题与多种因素有关, 随着环保意识的提高和新能源汽车技术的进步, 电动汽车得到了广泛关注和应用。由于电动汽车的“源”、“荷”双重特性, 使系统的运行更为复杂^[15], 且大量无序的电动汽车入网会增加微电网的安全隐患^[16]。在激励政策方面, 目前的研究主要是通过电价激励政策引导电动汽车的有序充放电^[17]。文献[18-20]在分时电价的基础上对电动汽车进行分散式优化, 达到削峰填谷的效果。但当大规模电动汽车接入电网时, 分时电价引导下用户在电价低谷时段易产生新的负荷高峰, 因此文献[21-22]引入价格弹性来表示电价变化对负荷造成的影响, 充分反映负荷动态变化趋势。为解决电动汽车出行时间、电量变化等数据的随机性, 大部分研究倾向于基于 EV 出行或充电数据进行分布拟合或概率拟合, 但拟合模型主要为正态分布^[23], 比较单一。

基于上述研究, 本文首先根据电动汽车用户出行特征参数获取状态分布, 采用多种概率分布形式拟合, 改善单一正态分布拟合效果差、与实际数据不贴近的问题, 得到基于分时电价激励的电动汽车负荷、电价等信息, 以海岛微电网群的经济性和环保效益最优为目标, 建立含电动汽车的微电网群优化模型, 通过具有独特更新策略的蜘蛛蜂优化(spider wasp optimization, SWO)算法进行求解, 验证所提模型与方法的有效性。

1 微电网群结构

1.1 微电网群的特征及种类

现阶段, 根据电网应用场景和所处地理环境的不同, 可将微电网群系统分为住宅区微电网群、工业园区微电网群和海岛型微电网群。

1) 住宅区微电网群

住宅区微电网群是将每一个居民小区当成单个微电网系统为用户供电, 大多地处阳光资源充足的地区, 将储能技术与光伏发电结合, 利用储能系统

的功率调节作用, 来平抑光伏出力的功率波动^[24]。

2) 工业园区微电网群

工业园区因占地面积较大, 发电设备以微型燃气轮机为主, 同时需要大型储能设备配合使用, 多个子微电网的储能装置可以进行削峰填谷, 保持电压及频率的稳定^[25]。

3) 海岛微电网群

海岛地区具有丰富的自然资源, 利用风力发电机、太阳能电池和水利发电机组建设成孤岛微电网群, 解决了当地的供电难题。同时, 系统需要配备一定容量的微型燃气轮机和储能设备作为备用电源, 防止分布式电源出力不稳定对负荷设备造成损坏。

1.2 旅游型海岛微电网群

海岛地区对电能的需求量不高, 一般利用风力发电机、太阳能电池等组建成孤岛型微电网系统, 但随着旅游业的发展以及特色民宿、商铺、渔家乐等娱乐场所的建设, 用电量与日俱增, 多个小型微电网组成的微电网群系统能够实现电能互补, 很好地消除了分布式电源的波动, 提升用户用电的可靠性。

按照负荷的重要等级可以将海岛微电网系统内的负荷分为3类: 以电梯、通信设备为主的重要负荷; 以空调为主的可选中断负荷; 以电动汽车为主的转移负荷。负荷特性与海岛居民的生活习性息息相关, 负荷的高峰期集中在 08:00—13:00、17:00—23:00^[26]时段。

2 电动汽车充电负荷模型

2.1 数据集准备

关于用户出行时间特征参数, 本文记录浙江某海岛地区不同类型的充电桩充电过程, 以此作为车辆充电起始时间、充电功率等变量拟合的初始的数据。根据不同变量需求进行分类统计获得状态分布, 然后将状态分布拟合为概率密度曲线, 并作为后续仿真的抽样函数。

针对单一类型函数拟合效果较差, 本文比较了多种类型概率分布形式, 包含正态分布函数、高阶傅里叶函数和多阶高斯分布函数等, 具体公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} f(x) = a_0 + a_1 \cos(x) + b_1 \sin(x) + \dots + \\ \quad a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx) \\ f(x) = a_1 \times \exp\left(-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2\right) + a_2 \times \\ \quad \exp\left(-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2\right) + \dots + a_n \times \exp\left(-\left(\frac{x-b_n}{c_n}\right)^2\right) \\ f(x) = \sum_{i=1}^n p_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \end{array} \right. \quad (1)$$

式中： x 表示待拟合行为变量模型中自变量参数； $a_0, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n$ 表示各项系数； μ_i, σ_i 和 p_i 分别为第 i 个正态分布均值、标准差和系数。

2.2 海岛电动汽车行驶特性

从出行链角度分析海岛电动汽车的出行规律，电动汽车出行过程有4个基本特征：出行时刻、出行目的地、出行距离和在目的地停留时长。结合海岛旅游特点，对海岛旅游中旅客出行的行为特性进行分析。不同类型电动汽车充电负荷的模型数据如表1、表2所示。

表1 旅游私家车负荷模型
Table 1 Load model of tourist private car

类型	每天充电次数	充电时段	各时段充电的概率	起始SOC
旅游旺季 私家车	1	07:00—18:00	0.2	N(0.6,0.01)
		19:00—07:00	0.7	
		19:00—22:00	0.1	
旅游淡季 私家车	0.8	20:00—05:00	0.5	N(0.6,0.01)
		00:00—07:00	0.1	
		12:00—22:00	0.2	

表2 旅游环岛班车负荷模型

Table 2 Load model of tourist roundabout shuttle

充电时段	各时段充电的概率	起始充电时刻	起始SOC
19:00—05:00	0.7	N(19,0.01)	N(0.5,0.01)
08:00—11:30	0.3	N(8,0.25)	N(0.4,0.01)

1) 出行时刻

通过文献[27]总结，已有研究中电动汽车的出行时间主要集中在07:00—09:00、17:00—20:00时段，出行时间的高峰时刻满足正态分布。但对于海岛游客出行时间，会较工作日延迟1~2h，并且耗时较长，即出行时间集中在08:00—22:00时段，高峰时期出现在15:00—21:00时段。

2) 出行距离

电动汽车出行距离决定了电池容量消耗，出行距离越长，消耗的能量越多，对于旅游海岛而言，有较为固定的行驶路线，目的地为各景区景点。2022年国庆节期间，全国海岛旅游出行平均出行距离为147 km。

3) 目的地停留时间

根据中国旅游局《2022年国庆、中秋长假海岛旅游大数据报告》，旅游旺季海岛游客平均出游时间达两天以上，平均为67 h，过夜比例达68.53%。跨省市游客出行比重近半。私家车在旅游旺季和旅游淡季的出行情况有较大差异，因此参数差也较大，假设旅游旺季每天的充电概率为1，淡季的充电概

率为0.8。

4) 起始续航里程

根据海岛交通需求状况，环岛观光车一般通过固定充电站、动力电池集中充电的运营模式，即起始续航里程为电池满电量状态。对于海岛旅游的用户，私家车出发地一般是家，所以起始续航里程一般为电池满电量状态。

2.3 各车型充电负荷预测模型

以某海岛典型日负荷为依据，通过蒙特卡洛模拟的方法，基于充电起始时刻概率分布拟合模型推导一天内各时段充电概率分布函数，然后计算车辆入网时段的充电概率，最后将充电概率与充电功率相乘得到车辆在网时段的充电负荷 P_b 。

$$p(\gamma_{t_0} = 0) = F_s(t_s > t_0, t_s + T_d \leq t_0 + 24) + F_s(t_s + T_d \leq t_0) \quad (2)$$

$$p(\gamma_{t_0} = 1) = 1 - p(\gamma_{t_0} = 0) \quad (3)$$

$$P_b = P_c(t_0) \times p(\gamma_{t_0} = 1) \quad (4)$$

$$P_b = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{24} f_{mt} P_{cmt} \quad (5)$$

式中： γ_{t_0} 表示在 t_0 时刻的状态， $\gamma_{t_0} = 0$ 表示离网状态， $\gamma_{t_0} = 1$ 表示在网状态； $p(\gamma_{t_0} = 0)$ 、 $p(\gamma_{t_0} = 1)$ 分别表示离网和在网状态时的概率； t_s 为车辆起始充电时刻； F_s 为概率分布函数； T_d 为电动汽车充电时长； P_{t_0} 为在 t_0 时刻的充电负荷； P_c 为在网时刻的负荷总功率； M 为电动汽车数量； f_{mt} 为第 m 辆车在 t 时段的充电概率； P_{cmt} 为第 m 辆车在 t 时段的充电功率。

2.4 电动汽车充电成本模型

本文考虑峰谷分时电价对电动汽车用户充电行为的影响，根据文献[21]提出的基于弹性效应权重的改进价格弹性矩阵模型，得出实行分时电价政策之后的用电量为

$$\begin{bmatrix} Q'_1 \\ Q'_2 \\ \vdots \\ Q'_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q_t \end{bmatrix} \mathbf{E} \begin{bmatrix} \Delta p_1 / p_1 \\ \Delta p_2 / p_2 \\ \vdots \\ \Delta p_t / p_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： Q'_t 为时间段 t 内实行分时电价政策后的用电量； Q_t 为时间段 t 内的用电量； \mathbf{E} 为电量电价弹性矩阵； Δp_t 和 p_t 分别为时间段 t 内的电价变化量和原来的电价。

以平抑电网负荷为目标，将一天分为 $T=24$ h，根据实际情况，考虑用户经济效益约束，建立分时电价决策模型。设定电动汽车用户充电总费用最小为目标函数，即

$$C_t^{\text{EV}} = \sum_{i=1}^T P_{\text{EV},i} \times C_p \quad (7)$$

式中: C_t^{EV} 为电动汽车充电总费用; C_p 为 EV 充电电价; $P_{\text{EV},i}$ 为车辆在 t 时段的充电功率。

根据实际情况, 提出 SOC 水平约束、成本约束和充电时刻约束, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max} \\ t_{\text{in}} \leq t_d \leq t_{\text{in}} + R_t^T \\ C_{\min} \leq C_p \leq C_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S(t)$ 为电动汽车 t 时段的荷电状态; S_{\max} 和 S_{\min} 分别为电动汽车 SOC 水平的上下限; C_{\max} 和 C_{\min} 分别为电动汽车充电价格上下限; t_{in} 为车辆入网时间; t_d 为车辆充电起始时刻; R_t^T 为 t 时段充电量。

3 海岛微电网群优化模型

3.1 目标函数及约束条件

1) 经济性成本

孤岛微电网系统经济性目标函数包括分布式发电单元的维护成本、燃料成本以及电动汽车充电成本。由于风力、光伏发电属于可再生能源, 不消耗燃料, 若不考虑其设备建设和维护成本, 则机组的运行成本为 0; 且孤岛微电网与大电网不进行能量交互, 其运行成本和污染物成本不包含大电网成本。

$$C_1 = \sum_{i=1}^T (C_i^{\text{DE}} + C_i^{\text{MT}} + C_i^{\text{BESS}} + C_i^{\text{EV}} + C_i^{\text{MG}}) \quad (9)$$

(1) 微电网间传输成本

$$C_i^{\text{MG}} = \sum_{i=1}^T P_{\text{MG},i} \times C_{p2} \quad (10)$$

(2) 电动汽车充电成本

$$C_t^{\text{EV}} = \sum_{i=1}^T P_{\text{EV},i} \times C_p \quad (11)$$

式中: C_1 为经济性成本; C_i^{DE} 为柴油发电机的总成本, 包括运维成本和燃料成本; C_i^{MT} 为微型燃气轮机的总成本; C_i^{BESS} 为蓄电池的总成本; C_i^{EV} 电动汽车充电总费用; C_i^{MG} 为微电网群之间交互成本; $P_{\text{MG},i}$ 为微电网在 t 时段的充电功率; C_{p2} 为微电网能量交换时电价。

2) 环保性成本

环保性目标函数包括污染物的处理成本。

$$C_2 = \sum_{f=1}^F \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^K (\alpha_k \beta_{f,k} P_{f,i}) \quad (12)$$

式中: C_2 为环保性成本; α_k 表示 k 类污染气体的处理单位成本; $\beta_{f,k}$ 表示 f 类发电单元的 k 类有害

气体的排放系数; $P_{f,i}$ 表示 f 类发电单元在 t 时刻的输出功率。

3) 约束条件

主要包括微电网 1、2 功率平衡约束、可再生能源发电出力约束、蓄电池储能设备约束、微网间的交互功率约束以及微网的出力约束。

3.2 微电网优化评价指标

1) 可再生能源渗透率

$$R = \frac{E_{\text{WT}} + E_{\text{PV}} + E_{\text{EV}}}{E_{\text{all}}} \quad (13)$$

2) 用户满意度

$$R_{\text{esp}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{24} |\Delta e(t)|}{\sum_{t=1}^{24} P_L(t)} \quad (14)$$

式中: R 为可再生能源渗透率; R_{esp} 为用户满意度; E_{WT} 、 E_{PV} 、 E_{EV} 和 E_{all} 分别为风机、光伏、电动汽车以及总供给负荷的电量; $\Delta e(t)$ 为优化后的负荷变化量; $P_L(t)$ 为 t 时段的负荷功率。

3.3 蜘蛛蜂优化算法运行流程

针对现阶段优化算法存在求解精度低、搜索速度慢等缺点, 本文引入蜘蛛蜂优化算法提升微电网优化过程的搜索速度及求解精度, 该算法基于雌性蜘蛛蜂的狩猎、筑巢和交配行为, 通过对蜘蛛蜂的行为进行数学模拟, 来解决优化问题。算法中包括 4 个操作员, 分别为: 模拟寻找的蜘蛛、跟踪和逃逸的蜘蛛、筑巢的蜘蛛以及产下雌蜂卵进行交配的蜘蛛, 其行为如下。

1) 种群初始化阶段

在初始化中, SWO 算法会生成一个相对均匀分布的种群, 设定种群数量为 N , 种群中第 i 只蜘蛛蜂用 W_i 表示, 因此 D 维空间下每一个 W_i 的初始化表示为

$$W_i = W_{\min j} + r(0,1) \times (W_{\max j} - W_{\min j}) \quad (15)$$

式中: $i \in [1, N]$, $j \in [1, D]$; $W_{\max j}$ 和 $W_{\min j}$ 分别表示搜索空间中 j 维的上下限; $r(0,1)$ 表示(0,1)内的随机数。

2) 搜索阶段

在这一阶段, 雌性黄蜂以一个恒定的步骤随机探索搜索空间, 在每一代 s 上不断更新每个雌性黄蜂的当前位置, 以模拟雌性黄蜂的探索行为。

$$W_i^{s+1} = \begin{cases} W_i^s + \mu_1 \times (W_a^s - W_b^s), r_3 < r_4 \\ W_c^s + \mu_2 \times (W_{\min j} + r_2 \times (W_{\max j} - W_{\min j})), \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

式中: W_i^{s+1} 和 W_i^s 分别表示黄蜂 i 在 $s+1$ 和 s 代的位置; W_a^s 和 W_b^s 分别为种群中随机选择的两个指标来

确定探索方向； W_c^s 为从总体中随机选取的指标， a, b, c 表示从总体中随机选择的 3 个解的指标； r_2, r_3, r_4 表示(0,1)中的随机数； μ_1 和 μ_2 表示当前蜘蛛的运行方向。

3) 逃逸阶段

在抓到猎物后，蜘蛛蜂试图在网的中心攻击它们，然而，它们存在掉在地上逃跑的可能性，雌蜂和蜘蛛之间的距离逐渐增大，这一阶段最初是一个开发阶段，随着距离的增大，开发被转化为勘探。

$$W_i^{s+1} = \begin{cases} W_i^s + C \times |2r_3 \times W_a^s - W_i^s|, r_3 < r_4 \\ W_c^s \times \bar{v}, \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

式中： C 为距离控制因素； r_3 表示(0,1)中的随机数； \bar{v} 为根据正态分布在 k 和 $-k$ 之间生成的带有方向的量， k 为逐渐增加的雌性黄蜂与蜘蛛之间的距离。

4) 筑巢阶段

雌性黄蜂把瘫痪的蜘蛛拉进预先准备好的巢穴。由于蜘蛛蜂有不同的筑巢行为，算法用两个不同的方程模拟了这些行为。

$$W_i^{s+1} = \begin{cases} W_0 + \cos(2\pi l) \times (W_0 - W_i^s), r_3 < r_4 \\ W_a^s + r_3 \times |\gamma| \times (W_a^s - W_i^s) + \\ (1 - r_3) \times \bar{U} \times (W_b^s - W_c^s), \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

式中： W_0 表示迄今为止最好的解决方案； γ 为根据莱维飞行产生的数据； \bar{U} 表示一个二进制量，用于确定何时应用步长来避免在同一位置建立两个巢。

5) 交配阶段

蜘蛛蜂的主要特征之一是它们确定性别的能力。性别是根据产卵的宿主的大小来决定的。雄蜂以小蜘蛛蜂为代表，雌蜂以大黄蜂为代表，根据式(19)生成。

$$W_i^{s+1} = \text{Crossover}(W_i^s, W_m^s, C_R) \quad (19)$$

式中： Crossover 为雄蜂向量 W_i^s 和雌蜂向量 W_m^s 之间应用的均匀交叉算子； C_R 表示交叉率。

迭代过程中，将使用式(20)更新种群的长度，最后，通过提出的算法进行保存，以保持每个黄蜂获得在下一代中更新的最佳蜘蛛位置。

$$N = N_{\min} + (N - N_{\min}) \times k \quad (20)$$

式中， N_{\min} 表示为避免在优化过程的不同阶段陷入局部最小值而所采用的最小种群数量。

从节能、环保的角度出发，蜘蛛蜂优化求解微电网优化运行流程图如图 1 所示。

4 算例仿真

4.1 仿真场景及参数设置

本文所研究的多个海岛微电网基本架构如图 2

所示。偏远海岛地区的负荷与资源存在逆向分布特征^[28]，大型岛屿适合聚居，是重要的负荷中心，通过海岛旅游业的发展充分利用有限的土地资源，如图 2 中微电网 1；小型岛屿数量众多，但面积较小，不适宜发展成居住区，可以建设更多的新能源设施，如图 2 中微电网 2。

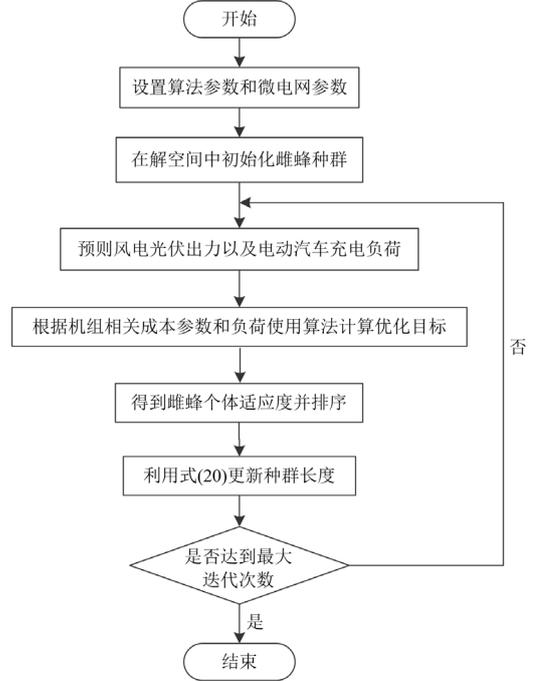


图 1 蜘蛛蜂优化求解微电网优化运行算法流程图

Fig. 1 Flow chart of SWO algorithm for optimal operation of microgrid

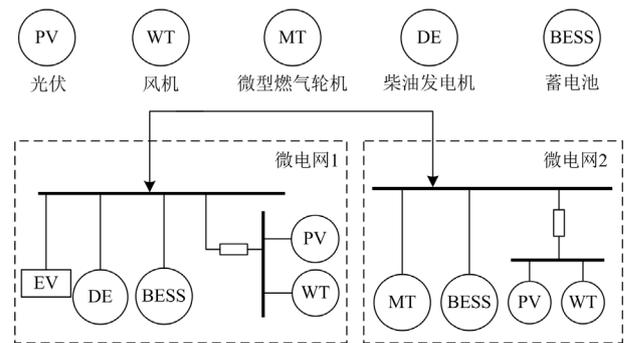


图 2 微电网群基本架构

Fig. 2 Basic structure of microgrid clusters

两个微电网分别记为 M1、M2。两个微电网对应的光伏出力、风机出力以及负荷曲线如图 3 所示。

其中，负荷包括不可控的居民用电和电动汽车^[31]。根据微电网各分布式电源模型和电动汽车需求响应策略进行微电网群的优化研究，风机、光伏、柴油发电机、微型燃气轮机和蓄电池的相关技术参数见表 3、污染物排放系数见表 4。

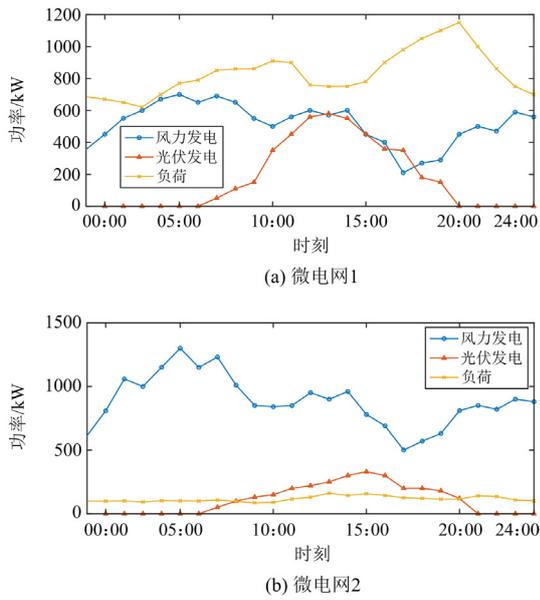


图3 微电网1与2的光伏出力、风机出力以及负荷曲线
Fig. 3 WT and PV output and load curves of MG1 and MG2

根据我国大部分海岛地区的分布式电源电价, 设立初始电价为 1 元/kWh, 电价波动区间为 0.25~2 元/kWh。在此基础上, 基于文献[29]的需求弹性系数, 可以得到电动汽车峰谷平时段电价, 如表 5 所示。

为了验证本文所提算法的有效性, 采用 CEC23 测试库中的 3 个经典测试函数对本文算法进行验证, 3 个测试函数的表达式为

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{x=1}^n x_i^2 \\ F_2 = \sum_{x=1}^n -x_i \sin(\sqrt{|x_i|}) \\ F_3 = \sum_{x=1}^n [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 - (x_i - 1)^2] \end{cases} \quad (21)$$

对所提算法在 Matlab 2019a 平台进行仿真测试, 并与 PSO 和 SSA 算法进行对比。实验中取种群规模 $N = 30$, 最大迭代次数为 100, 为避免寻优结果的偶然性以及证明 SWO 的稳定性, 选取各基准函数独立运行 30 次的实验结果作为实验数据。针对选区的 3 个基准函数, 将各个算法的平均值和标准

差作为最终评价指标, 如表 6 所示。

表3 微电网系统设备技术参数

Table 3 Technical parameters of equipment in micro-grid system

电源类型	参数	数值
风机	出力上限/kW	700/1300
	出力下限/kW	0
	运行维护系数	0.63
	安装成本/(万元/kW)	2.37
光伏	出力上限/kW	600/400
	出力下限/kW	0
	运行维护系数	0.85
	安装成本/(万元/kW)	6.65
蓄电池储能系统	充放电功率/kW	500
	$S_{max}/\%$	100
	$S_{min}/\%$	0
	充放电效率	0.95
柴油发电机	运行维护系数	0.38
	出力上限/kW	1000
	出力下限/kW	0
微型燃气轮机	出力上限/kW	800
	出力下限/kW	80
	运行维护系数	0.9
电动汽车	电池容量/kWh	60
	额定充电功率/kW	10
	充放电效率	0.95
	预期行驶里程/km	515

表4 污染物单位处理成本和排放系数

Table 4 Unit treatment cost and emission coefficient of pollutants

污染物类型	单位处理成本/(元/kg)	MT	DE
CO ₂	0.21	724	649
SO ₂	14.842	0.0036	0.4641
NO _x	62.95	0.2	4.3314

表5 海岛电价

Table 5 Power price on islands

	峰时段 16:00—24:00	谷时段 00:00—08:00	平时段 08:00—16:00
电价/(元/kWh)	1.4	0.79	0.89

表6 基准测试函数优化结果比较

Table 6 Comparison of benchmark function optimization results

函数	PSO		SSA		SWO	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
F_1	5.073	1.718	3.757×10^{-24}	2.058×10^{-23}	6.203×10^{-78}	3.189×10^{-77}
F_2	-3211	448.5	-8513	687.3	-11130	713.1
F_3	-3.274	5.924×10^{-2}	-3.267	6.033×10^{-2}	-3.298	4.123×10^{-2}

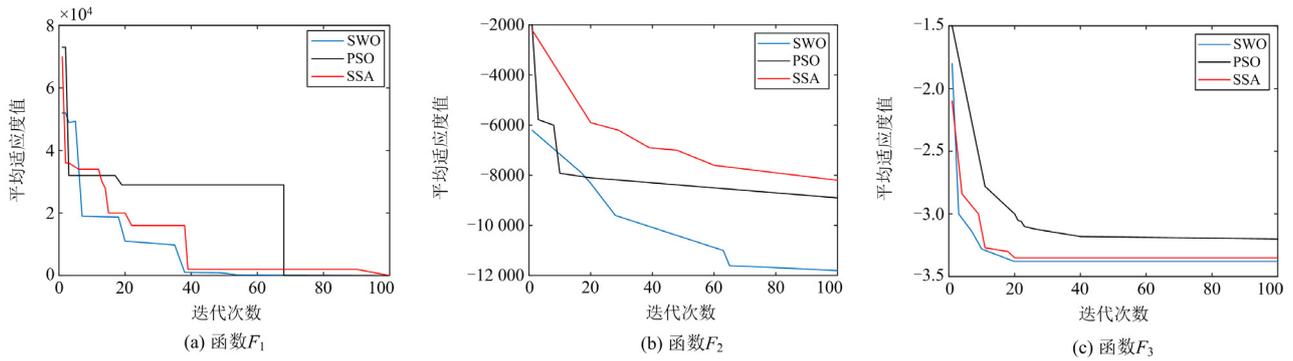


图 4 函数的收敛曲线

Fig. 4 Convergence curve of the function

表 6 的实验结果表明: 在函数 F_1 和 F_3 中, SWO 的稳定性和寻优精度明显优于其他两种算法, 函数 F_2 的寻优性能提升不明显。为反映 SWO 的动态收敛特性, 图 4 分别给出 3 种优化算法下的收敛曲线。通过收敛曲线可以看出, SWO 在收敛速度和寻优精度上都明显优于其他两种算法。

4.2 仿真结果及分析

为了进行对比分析, 本次实验设置 4 种场景。场景设置如表 7 所示, 优化算法中设置蜘蛛蜂的种群数目为 30, 迭代次数为 100, 交叉率为 0.2。

表 7 4 种场景设置情况

Table 7 Setting of four cases

	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
电动汽车接入	√	×	√	√
微电网群优化	√	√	√	√
求解算法	SWO	SWO	PSO	SSA

4.2.1 电动汽车优化结果分析

以海岛电动汽车在典型日的充电起始时刻和充电起始 SOC 为例, 比较不同分布形式拟合结果, 为体现拟合效果, 采用决定系数 R^2 和校正决定系数 R_c^2 两类参数共同量化, 结果如图 5 和表 8 所示。

通过对比发现, 充电起始 SOC 更好地服从正态分布函数和一阶高斯函数, 两类函数拟合结果接近, 仿真过程可采取任意函数形式。其中, 充电起始时刻概率分布采用三阶傅里叶函数拟合结果更好。

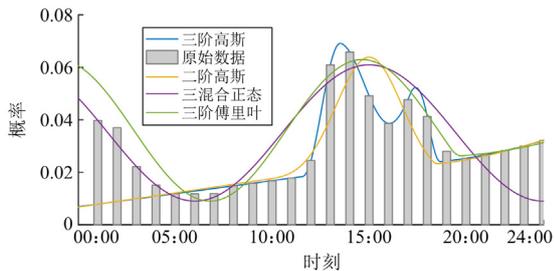


图 5 数据拟合结果曲线对比

Fig. 5 Comparison of data fitting curves

表 8 不同分布形式拟合系数对比

Table 8 Comparison of fitting coefficients of different distribution forms

参数类型	分布形式	R^2	R_c^2
充电起始 SOC	正态分布	0.9964	0.9960
	对数正态分布	0.9843	0.9823
	一阶傅里叶函数	0.9609	0.9413
	一阶高斯函数	0.9966	0.9956
	二混合正态分布	0.3278	0.1863
充电起始时间	三混合正态分布	0.7563	0.6497
	二阶高斯函数	0.8158	0.7646
	三阶高斯函数	0.8581	0.7824
	二阶傅里叶函数	0.9032	0.8764
	三阶傅里叶函数	0.9256	0.893

根据私家车的行程计划、模拟车主出行和充电意愿, 取拟合效果最优的曲线结果, 如图 6 所示。可知, 行驶起始 SOC 大多集中在 70%, 充电起始 SOC 大多为 30%~50%。

将拟合结果用于模拟车辆的具体行驶行为, 通过分时电价激励机制得到优化后的电价(图 7)和电动汽车充电负荷曲线(图 8)。

常规场景下的电动汽车充电需求高峰分别出现在 09:00—20:00 时段, 而海岛电动汽车的充电需求高峰期集中在 08:00—20:00 时段, 充电负荷

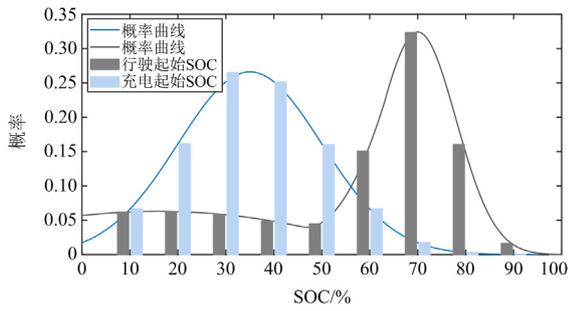


图 6 数据拟合结果曲线对比

Fig. 6 Comparison of data fitting results curves

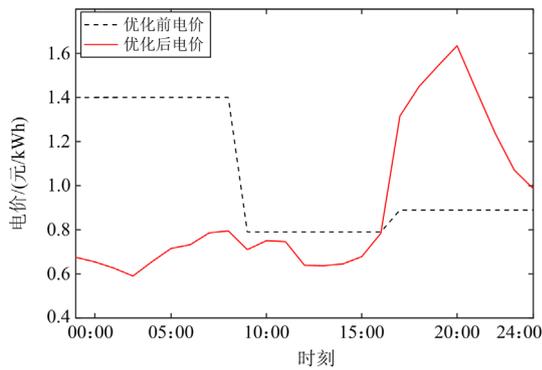


图 7 优化前后的分时电价

Fig. 7 TOU tariff before and after optimization

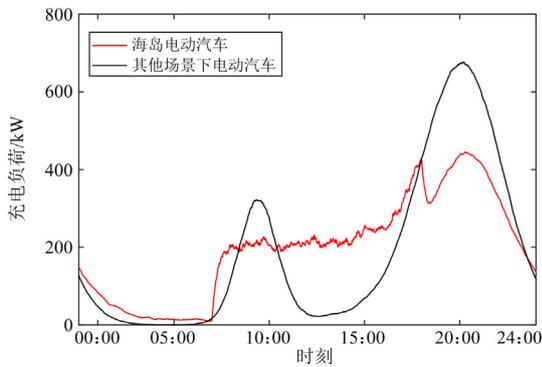


图 8 电动汽车充电负荷

Fig. 8 Charging load of electric vehicle

总体上略高于常规场景下的充电需求。因为海岛旅游观光车属于长时间无间断发车, 充电具有一定的规律性, 使用频率高于私家车, 因此在 08:00—16:00 时段, 充电负荷呈小幅度波动。

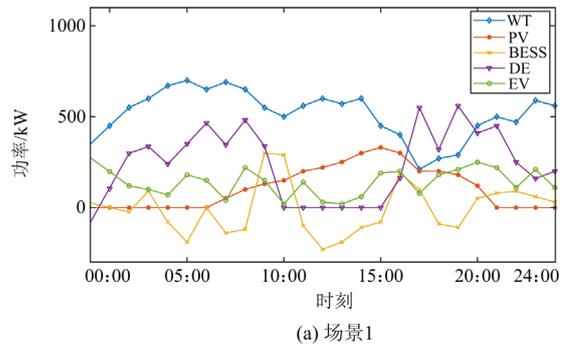
根据图 7, 对比优化前后电价, 在 00:00—08:00 时段电动汽车的充电电价明显降低, 在负荷低谷时段停驶的电动汽车车主会选择低价充电, 以满足行驶需要和电价高峰时段放电的容量储备。在 08:00—16:00 时段电动汽车充电电价与优化前分

时电价相差不大, 负荷在平时段有明显的提高。16:00—24:00 时段是电动汽车充电的高峰时段, 优化后峰时段电动汽车充电电价显著提高, 此时负荷小于优化前负荷, 电动汽车入网后峰谷差明显减小, 达到了削峰填谷的效果, 提高了微网的稳定性。

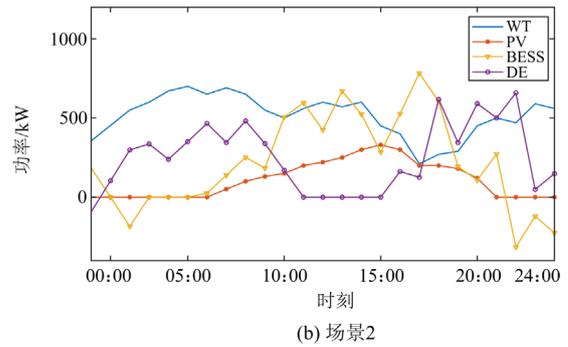
4.2.2 海岛微电网群经济性分析

以某海岛旅游旺季典型日负荷为依据, 4 种场景的调度结果分别如图 9 所示。

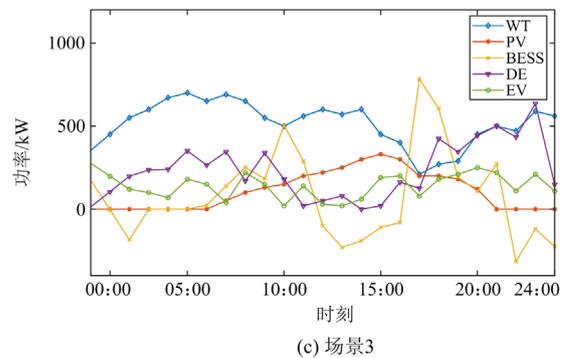
由图 9 可知, 在综合考虑电动汽车接入的海岛微电网群中, 能够有效确定每个时段各分布式电源的充放电状况。在 00:00—08:00 时段, 光伏出力几乎为零, 为满足微电网内部负荷需求, 柴油发电机开始工作, M2 多余的新能源出力通过联络线传送到 M1, 此时蓄电池处于充电状态, 此时电动汽车充电电价较低, 电动汽车车主会在此时进行充电; 在 09:00—18:00 时段, 风光柴联合出力, 此时场



(a) 场景1



(b) 场景2



(c) 场景3

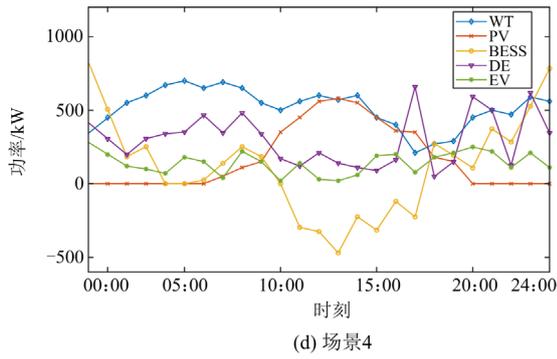


图 9 不同场景下 MG1 中各电源出力

Fig. 9 Output of each power supply in MG1 in different scenarios

景 2 中系统的风光出力完全满足负荷要求，柴油发电机出力降低，常规负荷主要由新能源供给；19:00—24:00 时段为负荷晚高峰，该时段光伏停止出力，风机和柴油发电机联合出力，此时柴油发电机出力波动较大，常规负荷会快速下降，电动汽车消耗更多的新能源。

4.2.3 结果分析

综合考虑供给侧和需求侧，得到电动汽车入网前后负荷曲线对比，如图 10 所示；在不同场景下微电网群运行成本如图 11 所示、不同场景下的运行结果评价如表 9 所示。

对比场景 1 和场景 3、场景 4，本文算法求解结果优于 PSO 和 SSA 算法，运行成本分别降低了 1073.33 万元和 465.05 万元，说明本文所提蜘蛛蜂优化求解算法的优越性。在不同电价机制下，用户参与需求响应后的等效负荷以及原负荷曲线如图 10 所示，显然以用户侧负荷为依据制定的分时电价具有较好的削峰填谷效果，峰谷差由 623.45 kW 调整为 546.23 kW。

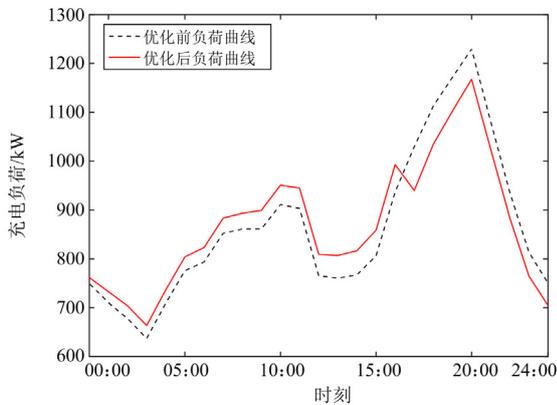


图 10 电动汽车入网前后负荷曲线

Fig. 10 Load curve before and after electric vehicle grid access

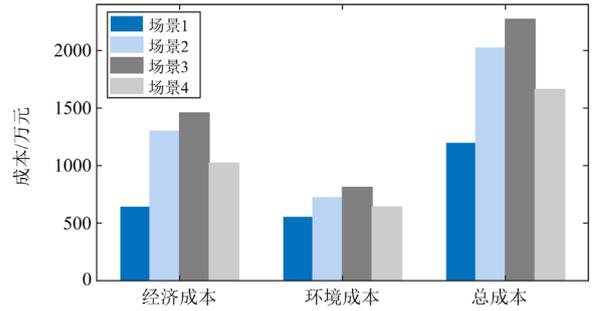


图 11 不同场景下微电网群运行成本

Fig. 11 Operating costs of microgrid in different scenarios

表 9 运行结果评价

Table 9 Assessment of running results

场景	经济成本/万元	环境成本/万元	总成本/万元	渗透率	用户满意度
1	643.42	555.51	1198.93	0.821	0.876
2	1300.5	720.47	2020.97	0.756	0.901
3	1459.15	813.11	2272.26	0.804	0.875
4	1021.88	642.1	1663.98	0.813	0.875

由图 11 可知，在算法相同的情况下，考虑需求侧管理。场景 1 相较于场景 2，经济成本和环境成本分别降低了 21.4%和 10.8%，总成本降低了 17.6%。由表 9 可知，可再生能源渗透率明显增加。原因是 M2 为了满足 M1 的负荷需求，在满足自身负荷需求之后，优先向 M1 传送功率，然后再将多余功率储存，导致 M2 中微型燃气轮机的出力明显增大，所以微电网 2 的经济成本增加了 18.9%，但由于微电网 1 的总成本优化效果更加明显，微电网的总成本有明显降低。由上述可知，在微电网群中考虑电动汽车的接入能显著提高经济性与环保性。场景 1 的用户满意度较场景 2 低，是因为电动汽车接入的场景下，风光出力与负荷相匹配，转移与中断负荷变化比场景 2 多。

通过上述场景对比，本文所提微电网优化运行方法的总成本最低，同时将电动汽车接入微电网群策略不仅能提高新能源渗透率，还可以进一步提高海岛微电网群运行的经济性与环保性。

5 结论

为满足旅游旺季海岛的用电需求，以及减小常规化石燃料机组在解决海岛用电需求时带来的环境污染，考虑计及需求响应的电动汽车接入，建立以海岛微电网群整体经济性最优为目标的优化模型，利用蜘蛛蜂优化算法进行求解，对本文方法的适用性和优化模型的有效性进行验证，结论如下：

1) 通过对私家车及海岛班车的行驶特性和充电需求进行分析, 对比多种分布形式的联合评价和指标, 得到拟合效果较好的概率分布函数, 提高了电动汽车充电负荷预测精确度;

2) 通过对4种场景下微电网群的成本、渗透率、用户满意度等评价指标进行对比, 可得到电动汽车的接入提高了可再生能源渗透率, 减少其他微源的出力, 同时降低了微电网群的运行成本, 起到了一定的削峰填谷作用;

3) 采用蜘蛛蜂算法对微电网群进行优化具有良好的可行性, 相比其他两种算法具有更高的收敛精度, 有利于提高微电网群的经济性与环保性。

参考文献

- [1] ZHANG Xingyou, CHEN Bo, WANG Fei, et al. Multi-microgrids system reliability assessment considering difference characteristics and inter-connection ability among microgrids[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019, 14(5): 1957-1962.
- [2] 吴盛军, 刘建坤, 周前, 等. 考虑储能电站服务的冷热电多微网系统优化经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(10): 10-18.
WU Shengjun, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Optimal economic scheduling for multi-microgrid system with combined cooling, heating and power considering service of energy storage station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(10): 10-18.
- [3] TENG Y, SUN P, HUI Q, et al. A model of electro-thermal hybrid energy storage system for autonomous control capability enhancement of multi-energy microgrid[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019, 5(4): 489-497.
- [4] 于国星, 宋蕙慧, 侯睿, 等. 柔性直流互联孤岛微网群的分布式频率协同控制[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(20): 103-111.
YU Guoxing, SONG Huihui, HOU Rui, et al. Distributed cooperative frequency control for flexible DC interconnected island microgrid cluster[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(20): 103-111.
- [5] LEE J, LEE S, LEE K. Multistage stochastic optimization for microgrid operation under islanding uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 56-66.
- [6] SHETA A N, ABDULSALAM G M, SEDHOM B E, et al. Comparative framework for AC-microgrid protection schemes: challenges, solutions, real applications, and future trends[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 363-402.
- [7] 葛磊蛟, 范延赫, 来金钢, 等. 面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术[J]. *高电压技术*, 2023, 49(6): 2219-2238.
GE Leijiao, FAN Yanhe, LAI Jingang, et al. Artificial intelligence enabled microgrid optimization technology for low carbon economy[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(6): 2219-2238.
- [8] 赵波, 李得民, 吴在军, 等. 基于100%绿色能源供电目标的海岛微电网群容量优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(3): 932-946.
ZHAO Bo, LI Demin, WU Zaijun, et al. Capacity optimal sizing of island microgrid clusters based on the target of 100% green energy power supply[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(3): 932-946.
- [9] 陈池瑶, 苗世洪, 姚福星, 等. 基于多智能体算法的多微电网-配电网分层协同调度策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(10): 57-65.
CHEN Chiyao, MIAO Shihong, YAO Fuxing, et al. Hierarchical cooperative dispatching strategy of multi-microgrid and distribution networks based on multi-agent algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(10): 57-65.
- [10] 张程, 匡宇, 刘佳静, 等. 考虑需求侧管理的风光燃储微网两阶段优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 13-22.
ZHANG Cheng, KUANG Yu, LIU Jiajing, et al. Two-stage optimal scheduling of a wind, photovoltaic, gas turbine, fuel cell and storage energy microgrid considering demand-side management[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 13-22.
- [11] 颜宁, 潘霄, 马少华, 等. 基于用户需求侧管理的环型微电网群并网协调控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 368-374.
YAN Ning, PAN Xiao, MA Shaohua, et al. Research on grid-connected coordination control strategy of ring microgrids group based on demand side management[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(12): 368-374.
- [12] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. *电网技术*, 2010, 34(11): 38-42.
NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jiahuan, et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(11): 38-42.
- [13] JIANG Haoyu, NING Shiyuan, GE Quanbo, et al. Multi-objective optimal dispatching of microgrid with large-scale electric vehicles[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 145880-145888.
- [14] COLSON C M, NEHRIR M H, WANG C. Ant colony optimization for microgrid multi-objective power management[C]// 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, March 15-18, 2009, Seattle, WA, USA: 1-7.
- [15] 侯慧, 薛梦雅, 陈国炎, 等. 计及电动汽车充放电的微电网多目标分级经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(17): 55-62.
HOU Hui, XUE Mengya, CHEN Guoyan, et al. Multi-objective hierarchical economic dispatch for microgrid considering charging and discharging of electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(17): 55-62.
- [16] GANGWAR P, SINGH S N, CHAKRABARTI S. Multi-objective planning model for multi-phase distribution system

- under uncertainty considering reconfiguration[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(12): 2070-2083.
- [17] 李咸善, 周晓岚, 姚俊伟, 等. 考虑车主多模式需求响应模糊意愿的优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 89-101.
LI Xianshan, ZHOU Xiaolan, YAO Junwei, et al. Optimal dispatch strategy considering fuzzy intention of multi-mode demand response of vehicle owners[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 89-101.
- [18] 龚诚嘉锐, 林顺富, 边晓燕, 等. 基于多主体主从博弈的负荷聚合商经济优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 30-40.
GONG Chengjiarui, LIN Shunfu, BIAN Xiaoyan, et al. An economic optimization model of load aggregator based on multi-agent master-slave game[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 30-40.
- [19] 陈奎, 马子龙, 周思宇, 等. 电动汽车两阶段多目标有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 65-72.
CHEN Kui, MA Zilong, ZHOU Siyu, et al. Charging control strategy for electric vehicles based on two-stage multi-target optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 65-72.
- [20] 朱磊, 黄河, 高松, 等. 计及风电消纳的电动汽车负荷优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 194-203.
ZHU Lei, HUANG He, GAO Song, et al. Research on optimal load allocation of electric vehicle considering wind power consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 194-203.
- [21] 刘浩田, 陈锦, 朱熹, 等. 一种基于价格弹性矩阵的居民峰谷分时电价激励策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 116-123.
LIU Haotian, CHEN Jin, ZHU Xi, et al. An incentive strategy of residential peak-valley price based on price elasticity matrix of demand[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 116-123.
- [22] 何英静, 叶泽, 魏文. 考虑用户需求价格弹性的峰谷分时电价时段划分研究[J]. 价格月刊, 2022, 547(12): 1-9.
HE Yingjing, YE Ze, WEI Wen. Research on time division of peak-valley TOU tariff considering price elasticity of user demand[J]. Prices Monthly, 2022, 547(12): 1-9.
- [23] 李丹奇, 郑建勇, 史明明, 等. 电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 75-83.
LI Danqi, ZHENG Jianyong, SHI Mingming, et al. Prediction of spatiotemporal distribution of charging load of electric vehicles[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 75-83.
- [24] 黄钰琪, 杨莘, 刘泽健. 家庭小区型多微网典型特征及工程设计[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3): 13-20.
HUANG Yuqi, YANG Ping, LIU Zejian. Typical characteristics and engineering design of residential multi-microgrids[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 13-20.
- [25] 陈厚合, 贺昌慧, 张儒峰, 等. 工业园区微电网参与配电网的策略性能量管理双层优化方法[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2671-2683.
CHEN Houhe, HE Changhui, ZHANG Rufeng, et al. Bi-level optimization of strategic energy management for industrial park microgrid participating in distribution market[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2671-2683.
- [26] 荆朝霞, 胡荣兴, 袁灼新, 等. 含风/光/抽水蓄能并计及负荷响应的海岛微网优化配置[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 65-72, 116.
JING Zhaoxia, HU Rongxing, YUAN Zhuoxin, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/ solar/ pumped storage considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 65-72, 116.
- [27] 李蓓, 赵松, 谢志佳, 等. 电动汽车虚拟储能可用容量建模[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(6): 101-111.
LI Bei, ZHAO Song, XIE Zhijia, et al. Electric vehicle virtual energy storage available capacity modeling[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(6): 101-111.
- [28] 赵玉, 徐天奇, 李琰, 等. 基于分时电价的电动汽车调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 92-101.
ZHAO Yu, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on electric vehicle scheduling strategy based on time-shared electricity price[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 92-101.
- [29] YANG Y, JIA Q S, GUAN X, et al. Decentralized EV-based charging optimization with building integrated wind energy[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(3): 1002-1017.
- [30] YANG H M, PAN H, LUO F J, et al. Operational planning of electric vehicles for balancing wind power and load fluctuations in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 592-604.
- [31] 王泽森, 唐艳梅, 门向阳, 等. 独立海岛终端一体化系统下电动汽车的投放数量规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2005-2016.
WANG Zesen, TANG Yanmei, MEN Xiangyang, et al. Research on the quantity planning of electric vehicle on the isolated island terminal integration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2005-2016.

收稿日期: 2023-08-31; 修回日期: 2024-02-03

作者简介:

黄冬梅(1964—), 女, 博士, 教授, 从事海洋与电力时空信息技术研究; Email: dmhuang_dl@163.com

吕嘉欣(1997—), 女, 硕士研究生, 从事微电网优化运行研究; E-mail: jiooxin@163.com

时 帅(1987—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 从事风电并网可靠性研究. E-mail: shishuai@shiep.edu.cn

(编辑 许 威)