

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211149

## 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度

程杉<sup>1,2</sup>, 汪业乔<sup>1,2</sup>, 廖玮霖<sup>1,3</sup>, 左先旺<sup>1,2</sup>, 代江<sup>4</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 国网湖北省电力有限公司直流运检公司, 湖北 宜昌 443000; 4. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 电动汽车(EV)和新能源微电网(NEMG)分属不同利益主体。针对 EV 接入 NEMG 后的经济运行问题, 建立计及 EV 有序充放电行为和车主综合满意度的 NEMG 多目标分层调度数学模型并提出求解计算方法。EV 层以最大化车主的综合满意度为目标, 通过 CPLEX 软件求解得到 EV 充放电计划并传递给 NEMG 层。NEMG 层基于 EV 充放电计划调整微电网内部可控分布式电源出力, 以达到最小化系统综合成本和交互功率波动的目标。为求解该高维、非线性和多目标模型, 提出基于可信度的三黑洞系统捕获策略多目标粒子群优化算法。仿真结果表明, 含 EV 微电网分层架构相比不分层架构能够实现 EV 和 NEMG 的互利共赢, 验证了所提方法的科学性及其有效性。

**关键词:** 电动汽车; 新能源微电网; 满意度; 分层优化; 多目标粒子群优化

### Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles

CHENG Shan<sup>1,2</sup>, WANG Yeqiao<sup>1,2</sup>, LIAO Weilin<sup>1,3</sup>, ZUO Xianwang<sup>1,2</sup>, DAI Jiang<sup>4</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security Defense of Power System (CTGU), Yichang 443002, China; 3. DC Operation Maintenance Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang 443000, China; 4. Electric Power Dispatching and Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Electric vehicles (EVs) and the New Energy Microgrid (NEMG) belong to different stakeholders. There can be economic operational problems after EVs are connected to an NEMG. A mathematical model of NEMG multi-objective hierarchical scheduling considering EV orderly charge and discharge behavior and owner's comprehensive satisfaction is established, and calculation method for analysis is proposed. The EV layer aims to maximize the comprehensive satisfaction of the vehicle owner. The EV charge and discharge plan is established by CPLEX software and transmitted to the NEMG layer. The NEMG layer adjusts the output of controllable distributed generation in the microgrid based on the EV charge and discharge plan to minimize the comprehensive cost of system and interactive power fluctuation. To analyze the high-dimensional, nonlinear and multi-objective model, a multi-objective particle swarm optimization algorithm of a three-black-hole-system capture based on reliability is presented. The simulation results show that the layered architecture of the microgrid with EV can achieve mutual benefit and win-win of EV and NEMG compared with a non-layered architecture. This verifies the validity and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51607105).

**Key words:** electric vehicle; new energy microgrid; satisfaction; layered optimization; multi-objective particle swarm optimization

## 0 引言

根据国务院办公厅印发的《新能源汽车产业发

展规划(2021—2035年)》, 为加快我国建设汽车强国, 有效促进节能减排水平, 到2035年纯电动汽车将成为新销售车辆的主流, 公共领域用车全面电动化。而根据我国电力系统的一次能源利用现状, 电动汽车(Electric Vehicle, EV)直接接入电网并不能实

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607105)

现真正意义上的低碳, 规模化接入还可能引起系统峰值负荷增长, 进而对系统的安全和稳定运行产生负面影响<sup>[1]</sup>。对 EV 动力电池统一管理, 可以有效缓解大规模 EV 接入电网所带来的负面影响, 尤其是接入新能源微电网(New Energy Microgrid, NEMG), 既可以就地消纳可再生能源, 实现真正意义上的低碳<sup>[2-3]</sup>, 又可以通过 V2G 技术实现削峰填谷、提供辅助服务等多重效益<sup>[4-6]</sup>。因此, 为满足 EV 用户的充电需求和参与 V2G 收益, 保障 NEMG 的安全、稳定、经济运行, 科学合理的 EV 有序充放电控制和 NEMG 运行调度起着至关重要的作用。

目前, 国内外学者对 EV 接入 NEMG 后的调度问题已经进行了大量研究。文献[7]建立了含 EV 的 NEMG 经济调度模型, 提出了基于改进遗传算法的求解计算方法, 结果表明: EV 有序充放电既可以减轻负荷高峰时 NEMG 的供电负担、发电成本, 又可以实现良好的环境效益。文献[8]提出一种动态电价调整策略, 充分调动 EV 参与 NEMG 的调度, 结果表明 EV 有序充放电可以减少 NEMG 中储能的配置容量。而文献[9]提出了在 NEMG 中利用集群 EV 充放电的灵活性来平抑光伏功率波动的实时调度方法, 结果表明平抑效果良好, 而且参与调度的 EV 数量越多, 平抑效果越佳。文献[3]则考虑 EV 充换储一体化电站和 NEMG 的所有权不同, 提出了基于 Stackelberg 博弈的含一体化电站的 NEMG 双层优化调度模型及其方法, 仿真结果表明所得均衡策略既可以实现互利共赢又可以有效利用一体化电站内部资源从而避免潜在的经济损失。上述文献均通过对 EV 有序充放电调度来提高 NEMG 的经济性, 但除文献[3]外, 其他研究没有考虑到 EV 的利益, 由于 EV 参与 V2G 时和 NEMG 属于两个不同的利益主体, 有必要在对含 EV 的 NEMG 调度优化时考虑并保证 EV 的利益。

NEMG 的调度是通过合理分配各分布式电源出力来解决负荷需求<sup>[10-11]</sup>的优化问题, 涉及经济性、环保性等指标, 具有高维度、非线性、多约束、多目标的特点。文献[12]以 NEMG 的运行成本最小、环境效益最高和综合费用最低为目标函数, 通过线性加权法将多目标优化问题转化为单目标问题来求解, 这种方法简化了多目标优化问题的求解, 但该方法并不能反映出子目标之间的关系, 本质上是一种“单目标优化方法”<sup>[13]</sup>, 优化结果的可靠性会有所下降。文献[14]在文献[12]基础上利用 NSGA-II 算法求解得到 Pareto 前沿, 最后采用模糊决策方法选取最终解。文献[15]则提出了含 EV 的 NEMG 多目标分级优化调度模型, 并采用多目标粒子群优化

(Multi-objective Particle Swarm Optimization)算法求解该优化模型。将多目标优化方法应用于求解多目标优化问题得到的多样性解, 可以为决策者提供 NEMG 调度中各指标之间关系的有用信息, 有助于找到能够惠及多方利益的一组折中解<sup>[13]</sup>。

基于以上讨论, 本文提出考虑 EV 有序充放电行为和车主综合满意度的 NEMG 多目标分层调度优化数学模型及其求解方法。EV 层充分考虑 EV 参与 V2G 的利益, 以车主费用支出和出行的综合满意度最大为目标, 通过 CPLEX 优化 EV 充放电计划并传递给 NEMG 层。NEMG 层基于优化后的 EV 充放电计划, 以系统综合成本最小和与主网交互功率波动最小为目标函数, 采用基于三黑洞捕获策略的多目标粒子群优化(Three-black-hole Capturing Strategy based MPSO, MPSO-TCS)算法求解该高维、非线性的多目标优化模型, 优化调整 NEMG 内部可控分布式电源出力。基于算例<sup>[16]</sup>的仿真结果和对比分析验证了所提方法的科学性及其有效性。

## 1 NEMG 分层优化框架

如图 1 所示, 本文研究的并网 NEMG 包括风电机组(Wind Turbine, WT)、光伏组件(Photovoltaic, PV)等可再生能源发电以及柴油机(Diesel Engine, DE)、微型燃气轮机(Micro Turbine, MT)等分布式电源、蓄电池(Storage Battery, SB)、基础负荷(Load)以及通过智能充电桩入网的 EV 和必要的通信基础设施。首先, 各 EV 通过充电桩入网后将车辆停放时间、电池荷电状态、充电需求及参与 V2G 意愿等信息发送给 NEMG 控制中心, NEMG 控制中心发布各时段的充、放电电价  $\pi_t^{\text{EV-buy}} |_{t=1,2,\dots,T}$ 、 $\pi_t^{\text{EV-sell}} |_{t=1,2,\dots,T}$ 。其次, EV 层以  $N$  辆 EV 的车主综合满意度  $F_1$  最大为目标函数优化每辆 EV 的充放电功率  $P_{i,t}$ (其值为正表示充电, 反之表示放电), 并将其连同荷电状态  $SOC_{i,t} |_{i=1,2,\dots,N; t=1,2,\dots,T}$  通过智能充电桩发送给 NEMG 控制中心。然后, NEMG 控制中心根据收集到的各时段买、卖电价即  $\pi_t^{\text{grid-buy}}$ 、 $\pi_t^{\text{grid-sell}}$ 、基础负荷  $P_{\text{Load},t}$ 、PV 出力  $P_{\text{PV},t}$  和 WT 出力  $P_{\text{WT},t}$  等信息, 以最小化综合成本  $F_{21}$  和最小化与主网交互功率波动  $F_{22}$  为优化目标函数、以系统和各设备运行要求为约束条件, 通过优化调度得到 SB 充放电功率  $P_{\text{SB},t}$  (其值为正表示充电, 为负表示放电)、DE 出力  $P_{\text{DE},t}$ 、MT 出力  $P_{\text{MT},t}$  和与主网交互功率  $P_{\text{grid},t}$  (为正表示 NEMG 从主网购电, 反之则向主网卖电)来满足系统供需平衡。

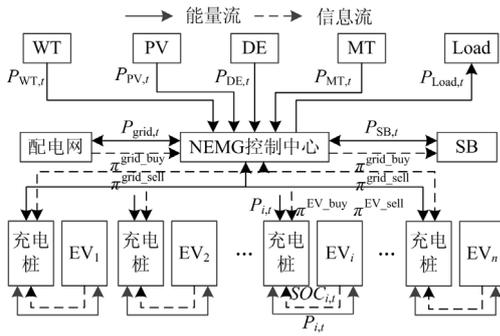


图1 NEMG 及其分层优化框架

Fig. 1 Configuration of NEMG and its hierarchical optimization

## 2 分层优化模型

### 2.1 EV 层

#### 2.1.1 目标函数

EV 具有负荷和储能的双重特性, 车主根据行驶习惯和费用支出, 安排 EV 充、放电计划, 但可能会影响紧急情况下用车出行的便利性。为了同时兼顾费用支出和出行便利两方面, 考虑各 EV 车主费用满意度  $\theta_i$  和出行满意度  $\delta_i$ , 以最大化所有车主的综合满意度为目标函数优化调度 EV 充放电, 即

$$\max F_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_1 \theta_i + \alpha_2 \delta_i) \quad (1)$$

式中,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为  $\theta_i$ 、 $\delta_i$  的权重系数。

#### 1) 第 $i$ 辆 EV 费用满意度

$$\theta_i = 1 - \frac{C_i - C_i^{\min}}{C_i^{\max} - C_i^{\min}} \quad (2)$$

式中:  $C_i^{\max}$ 、 $C_i^{\min}$  分别为 EV 车主可承受的最大、最小费用支出; 费用支出  $C_i$  由充放电费用  $C_{i,\text{price}}$  和潜在的电池损耗成本  $C_{i,\text{bat}}$  [16] 组成, 如式(3)所示。

$$C_i = C_{i,\text{price}} + C_{i,\text{bat}} \quad (3)$$

$$C_{i,\text{price}} = \sum_{t=1}^T (P_{i,t} \pi_t^{\text{EV\_buy}} I_{i,t}^{\text{char}} + P_{i,t} \pi_t^{\text{EV\_sell}} I_{i,t}^{\text{dis}}) \quad (4)$$

$$C_{i,\text{bat}} = \sum_{t=1}^T |P_{i,t}| \frac{C_{\text{change}}}{E_{\text{change}}} \quad (5)$$

式中:  $I_{i,t}^{\text{char}}$ 、 $I_{i,t}^{\text{dis}}$  分别为充、放电状态变量, 取 1 分别表示充电和放电, 取 0 表示不进行充、放电;  $C_{\text{change}}$  为更换电池成本;  $E_{\text{change}}$  为最大充放电电量。

#### 2) 第 $i$ 辆 EV 的出行满意度

$$\delta_i = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |P_{i,t}^{\text{satmax}} - P_{i,t}|}{\sum_{t=1}^T |P_{i,t}^{\text{satmax}} - P_{i,t}^{\text{satmin}}|} \quad (6)$$

式中:  $P_{i,t}^{\text{satmax}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{satmin}}$  分别为出行满意度最大和最小时 EV 的功率, 当车主为了出行便利进行无序充电时, 其出行满意度最大, 即  $\delta_i = 1$ , 当车主为了追求自身费用支出最小而不顾及出行便利地充放电时, 其出行满意度最小, 即  $\delta_i = 0$ 。

### 2.1.2 约束条件

#### 1) EV 充放电功率约束

$$P_{\max}^{\text{dis}} \leq P_{i,t} \leq P_{\max}^{\text{char}} \quad (7)$$

式中,  $P_{\max}^{\text{char}}$ 、 $P_{\max}^{\text{dis}}$  分别为 EV 充电和放电的最大功率。

#### 2) EV 充放电状态变量约束

$$0 \leq I_{i,t}^{\text{char}} + I_{i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \quad (8)$$

#### 3) EV 荷电状态约束

$$SOC_{\min} \leq SOC_{i,t} \leq SOC_{\max} \quad (9)$$

$$SOC_{i,t+1} E = SOC_{i,t} E + P_{i,t} I_{i,t}^{\text{char}} \eta_{\text{char}} + \frac{P_{i,t} I_{i,t}^{\text{dis}}}{\eta_{\text{dis}}} \quad (10)$$

式中:  $SOC_{\max}$ 、 $SOC_{\min}$  为 EV 荷电状态的上、下限;  $E$  为 EV 电池的额定容量;  $\eta_{\text{char}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}$  分别为 EV 充、放电效率。

## 2.2 NEMG 层

### 2.2.1 目标函数

为减小对主网的影响并实现自身经济运行, 以最小化 NEMG 综合成本和最小化与主网交互功率波动作为优化目标。

#### 1) NEMG 综合成本最小

$$\min F_{21} = C_{\text{op}} + C_{\text{en}} \quad (11)$$

式中:  $C_{\text{op}}$ 、 $C_{\text{en}}$  分别为 NEMG 的运行成本和环境成本, 表达式分别如式(12)和式(18)所示。

$$C_{\text{op}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J [F_j(P_{j,t}^{\text{DG}}) + OM_j(P_{j,t}^{\text{DG}})] + \quad (12)$$

$$C_{\text{grid}} + C_{\text{SB\_price}} + C_{\text{SB\_bat}} + C_{\text{SB\_om}}$$

式中:  $J$  为可控分布式电源种类总数,  $j=1, 2$  分别代表 DE、MT;  $F_j(P_{j,t}^{\text{DG}})$ 、 $OM_j(P_{j,t}^{\text{DG}})$  分别为第  $j$  类分布式电源的燃料成本、运维成本, 是分布式电源出力  $P_{j,t}^{\text{DG}}$  的函数。  $OM_j(P_{j,t}^{\text{DG}})$  为运行维护系数  $K_{\text{om},j}$  与  $P_{j,t}^{\text{DG}}$  的乘积, 即

$$OM_j(P_{j,t}^{\text{DG}}) = K_{\text{om},j} P_{j,t}^{\text{DG}} \quad (13)$$

NEMG 与主网能量交互成本  $C_{\text{grid}}$  可表示为

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (P_{\text{grid},t} \pi_t^{\text{grid\_buy}} I_{\text{grid},t}^{\text{char}} + P_{\text{grid},t} \pi_t^{\text{grid\_sell}} I_{\text{grid},t}^{\text{dis}}) \quad (14)$$

式中,  $I_{\text{grid},t}^{\text{char}}$ 、 $I_{\text{grid},t}^{\text{dis}}$  分别表示买、卖电状态。

SB 的充放电费用  $C_{\text{SB\_price}}$ , 充、放电转换损耗成本  $C_{\text{SB\_bat}}$  和运行维护成本  $C_{\text{SB\_om}}$  分别表示为

$$C_{SB\_price} = \sum_{t=1}^T (P_{SB,t} \pi_{grid\_buy}^{grid} I_{SB,t}^{char} + P_{SB,t} \pi_{grid\_sell}^{grid} I_{SB,t}^{dis}) \quad (15)$$

$$C_{SB\_bat} = n C_{loss} \quad (16)$$

$$C_{SB\_om} = \sum_{t=2}^T K_{om,SB} |P_{SB,t}| \quad (17)$$

式中:  $n$  为 SB 充放电转换次数;  $C_{loss}$  为 SB 每次充放电转换成本;  $K_{om,SB}$  为 SB 的运行维护系数。

$$C_{en} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (C_k u_{j,k}) |P_{j,t}^{DG}| + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (C_k u_{grid,k}) |P_{grid,t}| \quad (18)$$

式中:  $K$  为污染物类型总数;  $C_k$  为处理第  $k$  类污染物的单位成本;  $u_{j,k}$ 、 $u_{grid,k}$  分别为第  $j$  类分布式电源、主网联络线运行产生的第  $k$  类污染物的单位排放量。

2) NEMG 与主网交互功率波动最小

$$\min F_{22} = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (P_{grid,t} - P_{grid,av})^2 \quad (19)$$

$$P_{grid,av} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{grid,t} \quad (20)$$

式中,  $P_{grid,av}$  为调度周期内的平均交互功率。

2.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_{grid,t} + \sum_{j=1}^J P_{j,t}^{DG} + P_{SB,t} = P_{net\_load,t} \quad (21)$$

$$P_{net\_load,t} = P_{load,t} + \sum_{i=1}^N P_{i,t} - P_{WT,t} - P_{PV,t} \quad (22)$$

式中,  $P_{net\_load,t}$  为在时段  $t$  的净负荷。

2) 分布式电源出力约束

$$P_{j,min}^{DG} \leq P_{j,t}^{DG} \leq P_{j,max}^{DG} \quad (23)$$

式中,  $P_{j,max}^{DG}$ 、 $P_{j,min}^{DG}$  分别为  $P_{j,t}^{DG}$  的上、下限。

3) 分布式电源爬坡约束

$$|P_{j,t}^{DG} - P_{j,t-1}^{DG}| \leq r_j \quad (24)$$

式中,  $r_j$  为第  $j$  个分布式电源的最大爬坡。

4) SB 充放电功率约束

$$P_{SB,max}^{dis} \leq P_{SB,t} \leq P_{SB,max}^{char} \quad (25)$$

式中,  $P_{SB,max}^{char}$ 、 $P_{SB,max}^{dis}$  分别为 SB 充、放电的最大值。

5) NEMG 买卖电状态变量约束

$$0 \leq I_{grid,t}^{char} + I_{grid,t}^{dis} \leq 1 \quad (26)$$

6) SB 充放电状态变量约束

$$0 \leq I_{SB,t}^{char} + I_{SB,t}^{dis} \leq 1 \quad (27)$$

7) SB 荷电状态约束

$$SOC_{SB,min} \leq SOC_{SB,t} \leq SOC_{SB,max} \quad (28)$$

$$SOC_{SB,t+1} E_{SB} = (1-u) SOC_{SB,t} E_{SB} + P_{SB,t} I_{SB,t}^{char} \eta_{SB,char} + \frac{P_{SB,t} I_{SB,t}^{dis}}{\eta_{SB,dis}} \quad (29)$$

式中:  $SOC_{SB,max}$ 、 $SOC_{SB,min}$  为 SB 荷电状态上下限;  $SOC_{SB,t}$  为 SB 在时段  $t$  的荷电状态;  $E_{SB}$  为 SB 的额定容量;  $\eta_{SB,char}$ 、 $\eta_{SB,dis}$  分别为 SB 充、放电效率;  $u$  为 SB 自放电率。

### 3 求解方法

#### 3.1 分层优化求解

采用 CPLEX 软件和 MPSO-TCS 算法联合求解 NEMG 的多目标分层优化调度模型,前者求解 EV 层的混合整数线性规划问题得到 EV 的充电计划;后者用于求解 NEMG 层的非线性、多维、多约束和多目标优化问题。

#### 3.2 MPSO-TCS 算法

##### 3.2.1 随机黑洞粒子群优化算法

文献[17]提出了随机黑洞粒子群优化(RBPSO)算法。RBPSO 选取全局最优粒子  $gbest$  为中心、 $r$  为半径的区域形成黑洞,视黑洞为近似真实解所在的区域,每个粒子都有一定几率  $p$  被黑洞吸收或逃离,为粒子增加了新的搜索区域,具有较好的优化特性和较快的收敛特性。当粒子逃离黑洞时,即  $l > p$ ,按传统方式更新:

$$v_{i,d}^{k+1} = wv_{i,d}^k + c_1 r_1 (pbest_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 r_2 (gbest_d^k - x_{i,d}^k) \quad (30)$$

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1} \quad (31)$$

当粒子被黑洞吸收时,即  $l \leq p$ ,按式(32)更新。

$$x_{i,d}^{k+1} = gbest_d^k + 2r(r_3 - 0.5) \quad (32)$$

式中:  $l, r_1, r_2, r_3 \in [0, 1]$  为随机数; 下标  $i, d$  分别表示第  $i$  个粒子(可行解)的第  $d$  维; 上标  $k, k+1$  分别表示寻优迭代的第  $k, k+1$  代;  $v, x$  分别为粒子的速度、位置;  $pbest$  为个体最优;  $c_1, c_2$  为学习因子;  $r$  为黑洞半径。

##### 3.2.2 基于可信度的三黑洞系统捕获策略

RBPSO 算法仍存在陷入早熟的可能,且在非连续函数、含多重局部最优解的函数上收敛性能差,文献[18]提出了 TCS。在迭代前期,全局最优粒子是真实最优粒子的可信度不大,但随着迭代次数的增加,粒子总会朝着真实最优粒子运动,全局最优粒子可能是真实最优粒子的可信度逐步增大,故而引入随机数可信度因子  $a \in [0, 1]$ 。

此外, 为了防止粒子初始化过于集中导致快速陷入局部最优的问题, 引入另外两个黑洞。在前期, 三个黑洞共同吸引粒子, 粒子将随机地被某一个黑洞捕获, 但是随着迭代次数增加, 更多的粒子将被全局最优附近的黑洞吸收, 此黑洞吸引力增大, 这导致更多粒子被其捕获, 故此黑洞逐步壮大, 反之另外两个黑洞逐步缩小, 直至瓦解。此黑洞中心位置总是在变动的, 总是在以下三种位置中的某一位置: 全局最优粒子和上界的中点、全局最优粒子和下界的中点、全局最优附近的点。当粒子逃离黑洞时, 即  $l > p$ , 按式(31)更新。当粒子被黑洞吸收时, 即  $l \leq p$ , 按式(33)更新。

$$x_{i,d}^{k+1} = \begin{cases} a \cdot gbest_d^k + 2r(r_3 - 0.5), l' > 1 - a \\ \frac{x_{\max} + gbest_d^k}{2} + 2r(r_3 - 0.5), l' < \frac{1-a}{2} \\ \frac{x_{\min} + gbest_d^k}{2} + 2r(r_3 - 0.5), \text{else} \end{cases} \quad (33)$$

$$a = \left( \frac{k + r_4 \cdot Gen}{Gen + r_4 \cdot Gen} \right)^2 \quad (34)$$

式中:  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  分别为粒子的上、下界;  $k$ 、 $Gen$  分别为当前代数和总代数;  $r_4 \in [0,1]$  为随机数。

### 3.2.3 MPSO-TCS 算法性能测试

将基于 TCS 的粒子群算法扩展为 MPSO, 并采用经典的拥挤距离排序策略得到 Pareto 解<sup>[19]</sup>即得到 MPSO-TCS 算法。为对比分析将基于 RBHPSO 的 MPSO 记为 MPSO-RBH。选取 ZDT1—ZDT4 测试函数进行测试, 其中 ZDT3 为非连续函数, 使得求解不同系列的解变得较为困难, 而 ZDT4 为多峰函数, 多重局部 Pareto 前端导致很多算法都难以收敛到真实解。如图 2 为两算法确认出的 Pareto 前沿对比

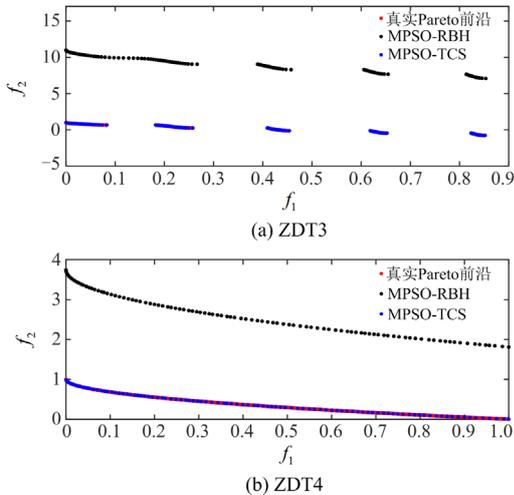


图 2 ZDT3 和 ZDT4 的 Pareto 前沿对比图

Fig. 2 Pareto front comparison of ZDT3 and ZDT4

比。很明显, MPSO-RBH 算法收敛性很差, 而 MPSO-TCS 算法的 Pareto 前沿不但逼近真实且分布性很好。

### 3.3 基于 CPLEX 和 MPSO-TCS 的模型求解

基于 CPLEX 和 MPSO-TCS 的模型求解流程如图 3 所示, 具体步骤如下:

1) 读取 EV 的参数及电网电价。

2) EV 层以式(1)为目标函数、以式(7)一式(10)为约束条件, 通过 CPLEX 软件求解出 EV 的最优充放电功率并传递给 NEMG 层。

3) 读取 NEMG 系统参数, 设置粒子群参数, 初始化粒子群。

4) NEMG 将 EV 的最优充放电功率与基础日负荷、PV、WT 出力叠加, 得到 NEMG 的净负荷。

5) NEMG 以式(11)和式(19)为目标函数、以式(21)一式(29)为约束条件, 通过 MPSO-TCS 算法求解出 Pareto 解和 Pareto 前沿。

6) 采用模糊隶属度函数<sup>[20]</sup>从 Pareto 前沿中选出对应折中解作为最终方案, 即 1~T 时段的  $P_{\text{grid},t}$ 、 $P_{\text{SB},t}$ 、 $P_{\text{DE},t}$  和  $P_{\text{MT},t}$ 。

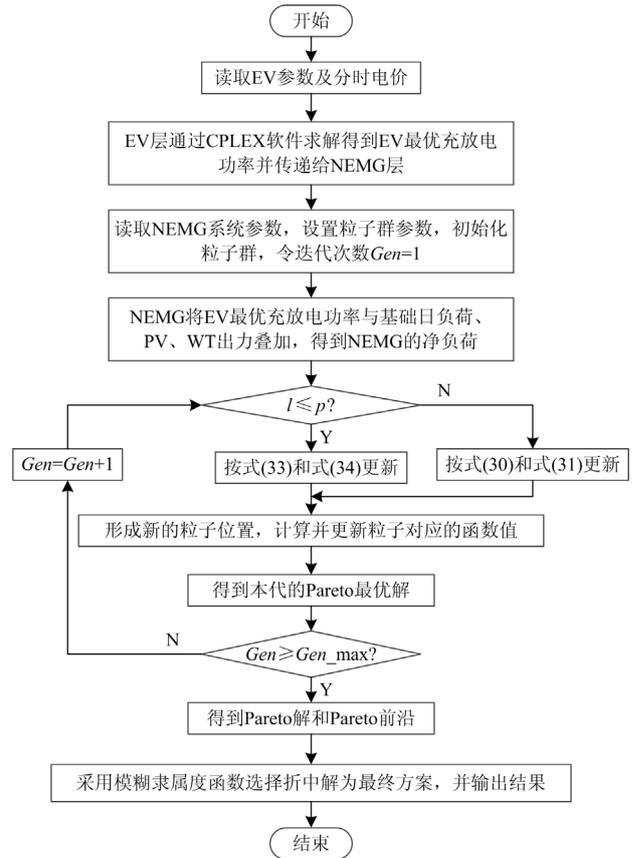


图 3 分层求解流程图

Fig. 3 Hierarchical solution flow chart

## 4 结论与展望

### 4.1 算例参数

本文接入 NEMG 的 EV 数量为 50 辆, 根据 EV 的出行规律<sup>[21]</sup>, 采用蒙特卡洛方法可得到 EV 的接入电网时刻、离开电网时刻、初始荷电状态、期望荷电状态等基本信息<sup>[22]</sup>, EV 的其他参数如表 1 所示<sup>[10,16]</sup>。NEMG 中 DE 和 MT 的燃料成本曲线如图 4 所示, DE、MT 运行参数和 SB 的相关参数<sup>[23]</sup>如表 2 所示, 污染物排放相关参数<sup>[16,24]</sup>如表 3 所示。WT、PV 以最大功率输出, 其出力和 NEMG 基本日负荷曲线<sup>[16]</sup>如图 5 所示。EV 充、放电价和 NEMG 买卖电价均采用如图 6 所示的分时电价<sup>[16]</sup>。MPSO-TCS 算法的种群规模为 50, 黑洞半径  $r$  取 0.01, 总迭代次数为 100。

表 1 EV 的其他参数

Table 1 Other parameters of EV

参数	数值	参数	数值
$E/kWh$	30	$SOC_{min}, SOC_{max}$	0.1, 1
$E_{change}/kWh$	100 000	$p_{max}^{char}, p_{max}^{dis}/kW$	3, -3
$C_{change}/元$	15 000	$\eta_{char}, \eta_{dis}$	0.9, 0.9

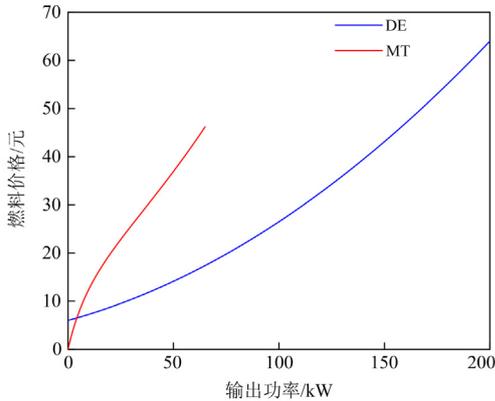


图 4 各分布式电源的燃料成本曲线

Fig. 4 Fuel cost curve of each distributed generation

表 2 分布式电源和 SB 的相关参数

Table 2 Relevant parameters of distributed generation and SB

参数	数值	参数	数值
$P_{1,min}^{DG}, P_{1,max}^{DG}/kW$	0, 200	$SOC_{SB,min}, SOC_{SB,max}$	0.2, 0.9
$r_1/kW$	30	$SOC_{SB}(0)$	0.4
$K_{om,1}/(元/kW)$	0.088	$P_{SB,max}^{char}, P_{SB,max}^{dis}/kW$	45, -45
$P_{2,min}^{DG}, P_{2,max}^{DG}/kW$	0, 65	$\eta_{SB,char}, \eta_{SB,dis}$	0.9, 0.9
$r_2/kW$	10	$u$	0.001
$K_{om,2}/(元/kW)$	0.064 8	$C_{loss}/(元/次)$	18
$E_{SB}/kWh$	300	$K_{om,SB}/(元/kW)$	0.001 8

表 3 污染物排放和处理参数

Table 3 Parameters of pollutant emission and treatment

类型	$C_k/$ (元/kg)	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
		0.210	14.824	62.964
$u_i/$ (g/kW)	WT	0	0	0
	PV	0	0	0
	DE	649	0.206	9.89
	MT	724	0.003 6	0.2
	主网	889	1.8	1.6

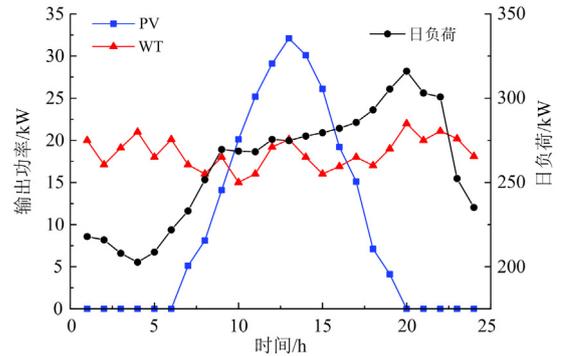


图 5 WT 和 PV 出力、日负荷曲线图

Fig. 5 Curves of WT and PV output and daily load

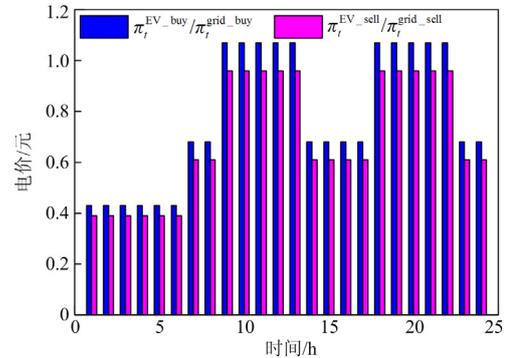


图 6 分时电价

Fig. 6 TOU electricity price

## 4.2 结果与分析

### 4.2.1 EV 层优化结果

考虑两种策略作为对比, 策略 1: 按照车主意愿的无序充电; 策略 2: 费用支出最少的有序充放电。如图 7 所示为三种策略对应的叠加负荷与基础日负荷对比。可见: 策略 1 下的 EV 充电集中在 09:00—13:00 和 18:00—22:00, 这两个时间段是车主到达工作地点和抵达居住地点的时段, 该时段内车主按照意愿无序充电导致了负荷“峰上加峰”, 加重了 NEMG 负担。策略 2 下, 由于利益驱使, EV 在高电价时段 09:00—13:00 和 18:00—22:00

放电获取利益, 在低电价时段 01:00—06:00 充电降低充电成本, 但由于“羊群效应”又出现新的负荷高峰和低谷。而在本文策略下, 费用支出和出行便利的双重影响, 使得 EV 理性充、放电, 有效起到了“削峰填谷”的效果。

表 4 为三种策略的定量指标值对比。可知: 与策略 1 随性的无序充电和策略 2 追求费用支出最低不同, 本文策略既取得了显著地降低负荷峰谷差和负荷方差的效果, 又有效地避免了费用支出过高的现象。由此可见, 本文所提策略“成人达己”, 有效平衡了出行满意度和费用满意度, 取得了综合满意度最大的效果。

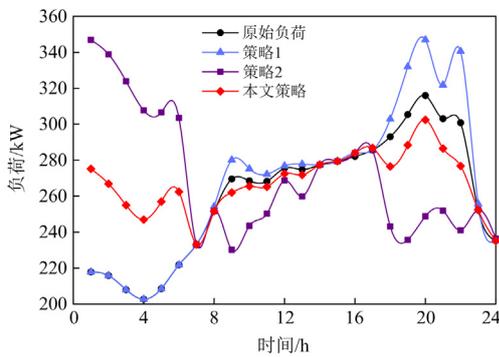


图 7 不同策略下的负荷曲线

Fig. 7 Load curves under different situations

表 4 不同策略下的指标对比

Table 4 Comparison of indicators under different situations

策略	总费用 支出/元	负荷 峰谷差/kW	负荷方差/ kW <sup>2</sup>	综合 满意度
1	189.09	144.31	1 760.35	0.5
2	52.38	116.662	1 143.23	0.5
本文策略	80.62	69.28	276.57	0.661 3

#### 4.2.2 NEMG层优化结果

将 4.2.1 节中优化得到的 EV 最优充放电功率传递给 NEMG 层, 并与 NEMG 层中的基础负荷、光伏出力和风机出力共同构成净负荷, 基于该净负荷, NEMG 调度内部可控分布式电源出力, 利用 MPSO-TCS 算法求解得到的 Pareto 前沿如图 8 所示。可见: 非支配方案对应的 NEMG 的综合成本分布在 3700~3900 元、与主网的交互功率波动分布在 0~500 kW<sup>2</sup>。采用模糊隶属度函数选取 Pareto 前沿中的(3 757.238 2 元, 69.580 0 kW<sup>2</sup>)作为最终的折中解, 即 1~T 时段的  $P_{\text{grid},t}$ 、 $P_{\text{SB},t}$ 、 $P_{\text{DE},t}$  和  $P_{\text{MT},t}$ , 结果如图 9 所示。

从图 9 可见: 首先, 相比主网发电的污染物排放, MT、DE 发电成本及污染处理费用低, 在各个

时段均为 NEMG 的供电单元, 不足部分才调用 SB 放电和从主网购电, 盈余时则向 SB 充电和主网卖电。其次, 与 DE 相比, MT 具有更低的运行成本, 因此 MT 全额出力, DE 输出功率在 150~200 kW。再者, NEMG 为最小化综合成本, 在低电价时段(如 01:00—06:00)从主网买电, 在高电价时段(如 09:00—13:00 和 18:00—22:00)向主网卖电。最后, SB 的主要作用一方面是通过在较低电价时段(如 01:00—8:00 和 22:00—24:00)充电、较高电价时段(11:00—21:00)放电, 降低 NEMG 的运行成本, 另一方面通过有序充电降低 NEMG 与主网的交互功率波动(如 09:00—10:00)。

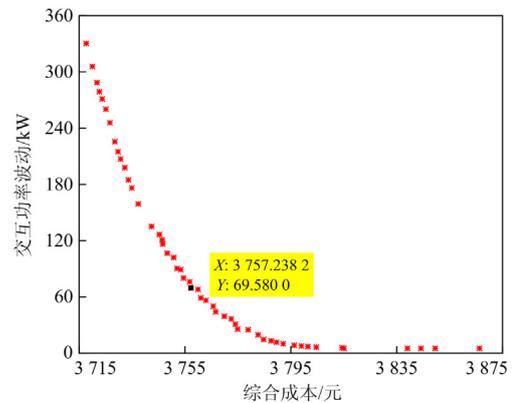


图 8 多目标优化的 Pareto 前沿

Fig. 8 Multi-objective optimization of Pareto front

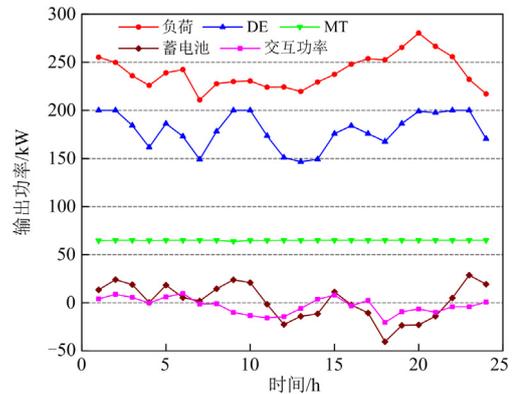


图 9 NEMG 中各单元出力曲线

Fig. 9 Output curve of each unit in NEMG

#### 4.2.3 与不分层时的结果对比

不分层, 即利用 MPSO-TCS 算法同时求解计算出 1~24 时段的 EV 充放电功率、 $P_{\text{grid},t}$ 、 $P_{\text{SB},t}$ 、 $P_{\text{DE},t}$  和  $P_{\text{MT},t}$ , Pareto 前沿如图 10 所示。再采用模糊隶属度函数选取(0.388 9, 5 090.911 2 元, 96.755 3 kW<sup>2</sup>)作为最终的折中解, 对应的量化指标值综合满意度、

NEMG 综合成本和交互功率波动分别为 0.388 9、5 090.911 2 和 96.755 3。与表 4 中本文策略相比，综合满意度下降了 41.19%，NEMG 综合成本增长了 48.80%，交互功率波动增长了 39.06%。

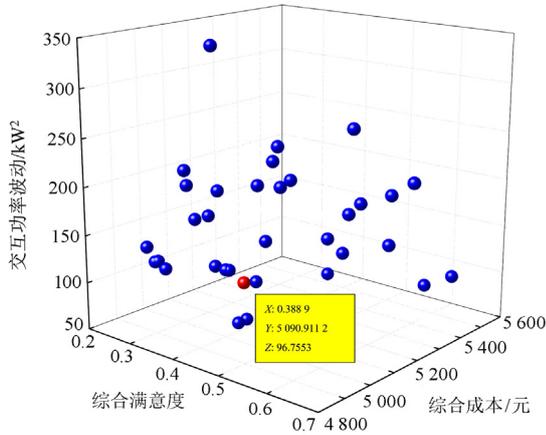


图 10 不分层情况下的 Pareto 前沿

Fig. 10 Pareto frontier without layered optimization

## 5 结论

本文为兼顾 EV 与 NEMG 双方利益，根据利益主体不同，提出采用分层优化。EV 层考虑车主综合满意度，优化 EV 的充放电计划，NEMG 层为了降低 NEMG 综合成本及与主网交互波动，调整内部可控分布式电源出力，以达到 EV 和 NEMG 双赢局面。经过仿真验证，得出如下结论。

1) 提出的综合满意度模型，使得 EV 的充放电更加合理，能有效起到“削峰填谷”的作用。

2) 提出的 MPSO-TCS 算法对于求解高维、非线性的多目标优化模型收敛性良好，能逼近真实的 Pareto 前沿且分布性很好。

3) 与不分层优化相比，分层优化能更好实现 EV 与 NEMG 在运行成本、环境效益等方面的共赢局面。

## 参考文献

[1] CHENG Shan, WEI Zhaobin, ZHAO Zikai. Decentralized optimization for charging-storage station considering spatial-temporal transfer randomness of electric vehicles[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(5): 6800-6815.

[2] 何照安, 沈迪, 刘源, 等. 基于电动汽车群接入的光储充放一体化微电网系统研究[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 3(1): 1-6.

HE Zhaoan, SHEN Di, LIU Yuan, et al. Research on integrated photovoltaic, energy storage, electric vehicle charging and discharge microgrid system based on electric

vehicle group access[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019, 3(1): 1-6.

[3] 程杉, 倪凯旋, 赵孟雨. 基于 Stackelberg 博弈的充换储一体化电站微电网双层协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 49-55, 69.

CHENG Shan, NI Kaixuan, ZHAO Mengyu. Stackelberg game based bi-level coordinated optimal scheduling of microgrid accessed with charging-swapping-storage integrated station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 49-55, 69.

[4] 程杉, 陈梓铭, 徐康仪, 等. 基于合作博弈与动态分时电价的电动汽车有序充放电方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 15-21.

CHENG Shan, CHEN Ziming, XU Kangyi, et al. An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 15-21.

[5] 程杉, 杨堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.

CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of electric vehicle charging station considering prices optimization and discharge behavior control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.

[6] 陈明强, 高健飞, 畅国刚, 等. V2G 模式下微网电动汽车有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 141-148.

CHEN Mingqiang, GAO Jianfei, CHANG Guogang, et al. Research on orderly charging strategy of micro-grid electric vehicles in V2G model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 141-148.

[7] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微电网经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 111-117.

WANG Jing, WANG Lili, GUO Yong, et al. Microgrid economic dispatch method considering electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 111-117.

[8] 赵兴勇, 王帅, 吴新华, 等. 含分布式电源和电动汽车的微电网协调控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3732-3740.

ZHAO Xingyong, WANG Shuai, WU Xinhua, et al. Coordinated control strategy research of micro-grid including distributed generations and electric vehicles[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3732-3740.

[9] 胡俊杰, 周华嫣然, 李阳. 集群电动汽车平抑光伏波动实时调度策略[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2552-2560.

HU Junjie, ZHOU Huayanran, LI Yang. Real-time

- dispatching strategy for aggregated electric vehicles to smooth power fluctuation of photovoltaics[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2552-2560.
- [10] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(4): 304-310.
- [11] 陆立民, 褚国伟, 张涛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(15): 116-124.
- LU Limin, CHU Guowei, ZHANG Tao, et al. Optimal configuration of energy storage in a microgrid based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(15): 116-124.
- [12] 吴红斌, 侯小凡, 赵波, 等. 计及可入网电动汽车的微电网系统经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(9): 77-84, 99.
- WU Hongbin, HOU Xiaofan, ZHAO Bo, et al. Economical dispatch of microgrid considering plug-in electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(9): 77-84, 99.
- [13] CHENG Shan, CHEN Minyou. Multi-objective reactive power optimization strategy for distribution system with penetration of distributed generation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 62: 221-228.
- [14] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. A stochastic multi-objective framework for optimal scheduling of energy storage systems in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(1): 117-127.
- [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] LU Xinhui, ZHOU Kaile, YANG Shanlin, et al. Multi-objective optimal load dispatch of microgrid with stochastic access of electric vehicles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 187-199.
- [17] ZHANG Junqi, LIU Kun, TAN Ying, et al. Random black hole particle swarm optimization and its application[C] // 2008 International Conference on Neural Networks and Signal Processing, IEEE, June 7-11, 2008, Nanjing, China: 359-365.
- [18] 廖玮霖, 程杉, 尚冬冬, 等. 多策略融合的粒子群优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(1): 69-76.
- LIAO Weilin, CHENG Shan, SHANG Dongdong, et al. Particle swarm optimization algorithm integrated with multiple-strategies[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(1): 69-76.
- [19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [20] XU Yan, ZHANG Rui, DONG Zhaoyang, et al. Optimal placement of static compensators for multi-objective voltage stability enhancement of power systems[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2015, 9(15): 2144-2151.
- [21] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J]. *电网技术*, 2014, 38(4): 967-973.
- ZHANG Liang, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for EV charging station[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(4): 967-973.
- [22] 程杉, 王贤宁, 冯毅焜. 电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(1): 39-46.
- CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(1): 39-46.
- [23] 李刚, 李峰, 孔亮, 等. 不同电价下含储能系统的微电网经济调度[J]. *中国电力*, 2018, 51(2): 125-132.
- LI Gang, LI Feng, KONG Liang, et al. Economic dispatch of microgrid with energy storage under different price policies[J]. *Electric Power*, 2018, 51(2): 125-132.
- [24] HOU Hui, XUE Mengya, XU Yan, et al. Multiobjective joint economic dispatching of a microgrid with multiple distributed generation[J]. *Energies*, 2018, 11(12): 3264.

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-12-08

作者简介:

程杉(1981—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源微电网运行优化与控制、电动汽车充换电设施与可再生能源集成、智能计算及其在电力系统中的应用等; E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

汪业乔(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车的优化与调度; E-mail: 1315165753@qq.com

廖玮霖(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能算法及其在微电网中的应用。E-mail: 419454402@qq.com

(编辑 周金梅)