

基于改进蜂群算法的电动汽车微电网优化调度

王少林^{1,2}, 王刚^{1,2}, 王晓磊^{1,2}, 王海龙^{1,2}, 杨金成^{1,2}, 黄照阳³, 刘鸿鹏³

(1. 国网新疆电力有限公司营销服务中心, 新疆 乌鲁木齐 830001;

2. 智慧用能及能效服务数字物理混合动模实验室, 新疆 乌鲁木齐 830001;

3. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 可再生能源发电系统与电动汽车 (EV) 大规模接入电网会给现有的电力系统的安全、稳定运行带来巨大挑战。探讨了含 EV 和分布式电源的微电网的最优调度问题, 包括风能、光伏以及燃煤机组等不同的分布式电源, 同时考虑了基于 V2G (Vehicle to Grid) 技术的电动汽车对电网负荷的调节功能。提出了一种基于电动汽车荷电状态 (State of Charge, SOC) 检测的有序充放电调度策略, 综合考虑了机组运行成本、弃风弃光成本以及电动汽车充放电成本, 以最小化调度周期内总运行成本为目标建立了微电网优化调度模型。采用一种将蜂群算法与天牛须算法结合的改进蜂群算法对模型进行求解。通过与无序充电结果进行比较, 证明了所提出的调度模型的有效性和优越性。

关键词: 电动汽车; V2G; 有序充放电; 微电网; 改进蜂群算法

Optimal scheduling of electric vehicle microgrid based on improved bee colony algorithm

WANG Shaolin^{1,2}, WANG Gang^{1,2}, WANG Xiaolei^{1,2}, WANG Hailong^{1,2}, YANG Jincheng^{1,2}, HUANG Zhaoyang³,
LIU Hongpeng³

(1. Marketing Service Center of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830001, China;

2. Intelligent Energy Use and Energy Efficiency Service Digital Physics Hybrid Dynamic Simulation Laboratory, Urumqi 830001, China; 3. Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Large-scale integration of renewable energy generation systems and electric vehicles (EVs) into the grid will pose great challenges to the safe and stable operation of the existing power system. In this paper, the optimal scheduling problem of microgrids with EVs and distributed power sources is discussed, including different distributed power sources such as wind power, photovoltaic power, and coal-fired power units. Meanwhile, the load regulation function of electric vehicles based on V2G technology is considered. The influence of such vehicles is applied to the scheduling model, and the problem is expressed as a single-objective optimization model with the goal of minimizing the total operating cost, which also takes into account the unit operating cost, wind and light abandoning cost, and the charge and discharge cost of EVs. An improved colony algorithm combining the colony algorithm and Beetle Antennae Search algorithm was used to solve the model. The validity and superiority of the proposed scheduling model are proved by comparing with the results of disordered charging.

Key words: electric vehicles; V2G; orderly charge and discharge; microgrid; improved colony algorithm

国网新疆电力有限公司科技项目“面向用户侧多端智能用电场景下的多能互动研究”(5230YX20001B)资助

0 引言

随着电动汽车（EV）数量的不断增加以及EV渗透水平的不断提高，电动汽车充电负荷在微电网中所占的比重也越来越大。若规模化电动汽车无序并网参与运行，不仅会增大电网负荷的峰谷差，增加网络损耗，严重时还将危及电网稳定^[1-3]。因此，利用微电网系统中电动汽车与可再生能源之间的良性互动，基于V2G技术研究各能流的协调约束关系，构建智能用电场景下的电动汽车有序充电架构，对于维护电网稳定具有重要意义^[4-6]。

文献[7]提出以负荷峰谷差和配电网损耗最小为目标的电动汽车有序充电模型，以充电站最大容量极限为约束，基于遗传算法优化电动汽车的最佳充电时间，避免了负荷的峰峰叠加。文献[8]将传统的电动汽车充电站有序充电调度集中式优化问题分解为多个子问题，以充电站收益最大为目标，提出了有序充电调度的分散式优化策略。文献[9]针对以电动汽车和居民负荷为对象的负荷级和以分布式电源为对象的源荷级提出了一种分级能量管理策略。文献[10]建立了以微电网运行成本和环境保护成本最小化为目标的微电网调度模型，同时考虑到电动汽车充放电，以及蓄电池损耗成本和峰谷电价对微电网运行产生的影响。文献[11]建立了含风电和光伏发电单元的电动汽车充电站的多目标优化模型，通过调度策略使得充电站优先消纳可再生能源。以上文献针对微电网环境下的能量管理问题和电动汽车有序充放电问题提出了一系列优化调度策略。然而上述文献对电动汽车电池的储能特性，甚至V2G功能考虑较少。此外，在求解调度模型时，往往使用单一算法，导致寻优结果容易陷入局部最优。

因此，为解决上述问题，本文所采取的主要工作可以简单地陈述如下：

1) 分析了微电网中常见的分布式电源的工作原理，并建立了相应的数学模型；针对电动汽车充电行为的不确定性，利用蒙特卡洛法模拟出电动汽车无序充电负荷模型。

2) 基于同时包含多种分布式电源和电动汽车的微电网，以系统总运行成本最低为目标，提出了一种基于V2G技术的最优调度模型。

3) 介绍了一种将天牛须搜索算法和蜂群算法结合的改进蜂群算法，利用该算法求解调度模型。

4) 将改进蜂群算法与传统蜂群算法以及遗传算法的计算结果进行对比分析，验证新算法的优越性。

1 微电网系统结构模型

图1为二端口用电架构下的交流微电网的系统结构。整个架构通过公共母线将微电网与主电网连接在一起，微电网由基本负荷、分布式可再生能源、燃煤机组和电动汽车组成。其中燃煤机组作为微电网的常规供能单元。

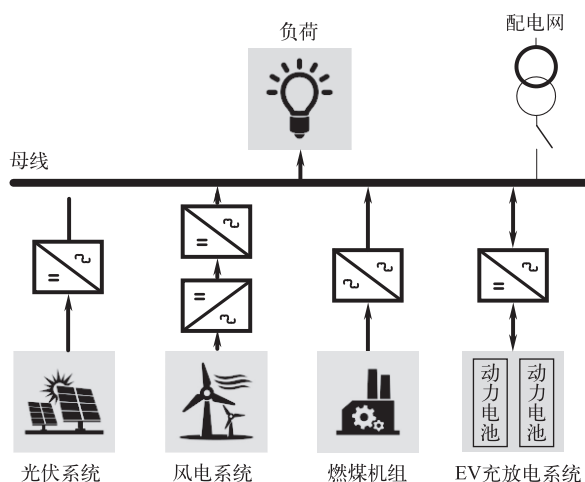


图1 微电网系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microgrid system structure

其中，风力涡轮机和太阳能电池板产生可再生能源，基本负荷是指不包括电动汽车的负荷。电动汽车动力电池作为分布式储能装置，如果能够合理引导电动汽车的负荷，不仅可以削峰填谷，还可以消耗过剩的可再生能源。

1.1 风力发电模型

风电机组的出力模型包含三个非常重要的参数：切入风速、额定风速和切出风速。大量实验表明，风力发电机组的出力具有以下特点^[12]

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ P_N \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_N^3 - v_{ci}^3} & v_{ci} \leq v < v_N \\ P_N & v_N \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中, v 代表实际风速 i ; v_{ci} 代表切入风速; v_{co} 代表切出风速; v_N 为额定风速; P_N 为风力发电机额定输出功率。

1.2 光伏发电模型

光伏发电具有非线性特点,其出力受到天气、环境温度和日照强度等气象条件的影响。其输出功率表达式为

$$P_{PV} = \frac{GP_{STC}[1 + k_T(T - T_{STC})]}{G_{STC}} \quad (2)$$

式中, P_{PV} 为光伏电池的输出功率; G 为当前光照强度; T 为光伏电池运行温度; G_{STC} 为标准光照强度; T_{STC} 代表环境温度; P_{STC} 代表最大测试功率; k_T 为功率温度系数。

标准测试条件: 环境温度为25 °C, 光照强度为1 000 W/m²。

1.3 电动汽车充放电模型

电动汽车接入微电网, 当分布式电源可满足负荷要求, 且电动汽车蓄电池尚未充满时, 电动汽车吸收电能, 其充电状态荷电量可表示为^[14]

$$SOC_{EV,t} = SOC_{EV,t-1} + \frac{t_c}{t_{max_c}} SOC_{max} \quad (3)$$

式中, $SOC_{EV,t}$ 与 $SOC_{EV,t-1}$ 分别为 t 时刻及 $t-1$ 时刻电动汽车的荷电量; t_c 为实际充电时长; t_{max_c} 为最大充满时长; SOC_{max} 为电动汽车充满电时的最大荷电量。

当电动汽车电量存在富裕且微电网处于用电高峰供能不足时, 由电动汽车向大电网输送电能, 其放电状态荷电量可表示为

$$SOC_{EV,t} = SOC_{EV,t-1} - \frac{t_d}{t_{max_d}} SOC_{max} \quad (4)$$

式中, t_d 为实际放电时长; t_{max_d} 为最大放电时长。

电动汽车实际充电时长 t_c 与实际放电时长 t_d 分别表示为

$$t_c = \frac{L_{EV} W_{100}}{100 P_{charge} \eta} \quad (5)$$

$$t_d = \frac{SOC_{max} - SOC_{EV,t}}{P_{discharge} \eta} C_{EV} \quad (6)$$

式中, L_{EV} 为电动汽车实际的日行驶里程; W_{100} 为电动汽车每100 km的耗电量; P_{charge} 与 $P_{discharge}$ 分别为额定充放电功率; η 为充放电效率; C_{EV} 为电池容量。

2 EV有序充放电调度策略

据统计, 电动汽车平均每天处于闲置状态的时间超过19 h^[15]。这为电动汽车参与微电网的调度提供了充分的可能性, 同时也更有利于利用V2G技术, 以达到平抑负荷峰谷差的目的。本文根据用户出行的规律, 在考虑普通电动私家车车主平日出行的负荷需求的基础上, 校正充放电策略, 并做了一些简化, 具体调度策略为:

1) 车主一般在上午8:00~9:00之间到达公司, 此时负荷属于早间时刻的用电高峰, 不应立即连接电网, 需将充电负荷顺延。

2) 9:00~17:00为正常的工作时段, 电动汽车一般停靠在单位, 不连接充电桩, 因此不会产生充电需求, 也不能发挥V2G功能, 所以不考虑该时段的调度方案。

3) 在17:00以后, 车主陆续回到家中, 连接充电桩。而这段时间属于用电晚高峰, 按照协议将电动汽车接入电网, 同时展开电动汽车剩余SOC检测。若剩余SOC>0.2, 则满足放电要求, 在不影响电动汽车车主实际用电需求的前提下进行放电, 缓解负荷压力。

4) 晚间24:00~次日7:00前, 电网负荷处于低谷时段, 电价相对便宜, 若该时段内电动汽车SOC<0.9, 则应立即进行充电, 保证车主出行需求。

电动汽车在充电模式下, 每个时间段的功率约束为

$$\begin{cases} P_{EV_min} \leq P_{EV,t} \leq 0 & 00:00 \leq t \leq 07:00 \\ 0 & 08:00 \leq t \leq 16:00 \\ 0 \leq P_{EV,t} \leq P_{EV_max} & 17:00 \leq t \leq 24:00 \end{cases} \quad (7)$$

电动汽车具体的策略流程描述如图2所示。

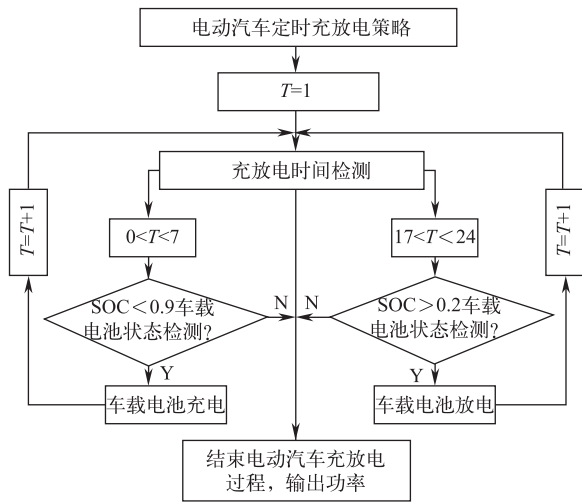


图2 电动汽车定时有序充放电策略

Fig. 2 Electric vehicle timing and orderly charging and discharging strategy

3 微电网中EV充放电调度模型构建

作为微电网中一种潜在的储能单元，电动汽车本身也是一种可移动的电池，当其他发电机组（风电、光伏和燃煤机组）的出力无法匹配负荷时，电动汽车能够通过充放电来平衡负荷的需求。为满足实际运行情况和调度要求，在该系统中引入四台燃煤机组作为微电网的主要供电单元，在考虑风电、光伏出力的情况下，以微电网运行的总成本为目标函数建立电动汽车有序充电模型。

3.1 目标函数

以系统运行的经济性为目标函数，微电网运行成本为

$$F_{\min} = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{k=1}^{N_{CG}} [a^k + b^k P_{CG,t}^k + c^k (P_{CG,t}^k)^2] + r_1 \Delta P_{WT,t} + r_2 \Delta P_{PV,t} + C_{grid,t} (P_{EV,t}^{charge} - P_{EV,t}^{discharge}) \right\} \quad (8)$$

式中， T 为24 h； N_{CG} 为燃煤机组数量； a^k 为燃煤机组运行成本常数项； b^k 为燃煤机组运行成本的一次项系数； c^k 为燃煤机组运行成本的二次项系数； $P_{CG,t}^k$ 为各台机组在 t 时段的出力功率； r_1 、 r_2 分别为弃风、弃光的惩罚因子； $\Delta P_{WT,t}$ 与 $\Delta P_{PV,t}$ 分别为各时段风电、光伏出力功率与实际上网功

率的差值； $C_{grid,t}$ 为各时段的分时电价； $P_{EV,t}^{charge}$ 与 $P_{EV,t}^{discharge}$ 分别为各时段内电动汽车的充放电功率。

3.2 约束条件

为使微电网能长时间稳定运行，应使得系统功率处理平衡及各分布式电源满足其自身运行需要。

(1) 微电网系统运行功率平衡约束

在一个周期内的每个 t 时段内，各分布式电源出力与负荷应满足功率平衡约束

$$P_{WT} + P_{PV} + \sum_{k=1}^{N_{CG}} P_{CG}^k = P_{load} + P_{EV} \quad (9)$$

式中， P_{load} 为微电网中除电动汽车充电负荷以外的其他负荷。

在一个调度周期内，电动汽车的充放电容量是相等的，即

$$\sum_{t=1}^T P_{EV,t} = 0 \quad (10)$$

(2) 各分布式电源出力约束

由于分布式电源都会存在一个出力极限，为保证其正常运行，各分布式电源的功率需要满足如下功率约束

$$P_{WT,t}^{\min} \leq P_{WT,t} \leq P_{WT,t}^{\max} \quad (11)$$

$$P_{PV,t}^{\min} \leq P_{PV,t} \leq P_{PV,t}^{\max} \quad (12)$$

$$P_{CG,t}^{k,\min} \leq P_{CG,t}^k \leq P_{CG,t}^{k,\max} \quad (13)$$

(3) 电动汽车运行功率约束

$$0 \leq P_{EV,t}^{charge} \leq P_{EV,\max}^{charge}$$

$$0 \leq P_{EV,t}^{discharge} \leq P_{EV,t}^{discharge} \quad (14)$$

$$P_{EV,t}^{charge} P_{EV,t}^{discharge} = 0$$

式中， $P_{EV,t}^{charge}$ 和 $P_{EV,t}^{discharge}$ 分别为 t 时段内电动汽车的充放电功率，且电动汽车在同一时刻不能同时充电和放电。

(4) 电动汽车荷电状态约束

为保证动力电池的良好性能以及车主的正常使用，应避免充放电过度，即

$$SOC_{EV}^{\min} \leq SOC_{EV,t} \leq SOC_{EV}^{\max} \quad (15)$$

式中， $SOC_{EV}^{\min}$ 表示调度周期内用以满足用户正常出行的最小荷电状态； $SOC_{EV}^{\max}$ 表示电动汽车在调度周期内的最大荷电状态。

(5) 机组出力爬坡约束

$$-P_{CG}^{k,down} \leq P_{CG,t}^k - P_{CG,t-1}^k \leq P_{CG}^{k,up} \quad (16)$$

式中, $P_{CG}^{k,down}$ 与 $P_{CG}^{k,up}$ 分别为各台机组的功率最大向下爬坡限制与最大向上爬坡限制。

4 改进蜂群算法

改进蜂群算法是将天牛须搜索算法与传统蜂群算法结合而产生的一种新型启发式算法,它兼顾天牛须搜索算法全局搜索能力强与蜂群算法搜索准确度高优点,具有良好的应用前景。

在传统的蜂群算法中,觅食蜂的觅食路线会根据侦查蜂的位置来调整,每次搜索都会根据临近的侦查蜂 k 的位置去探索一个新的食物源。其位置更新公式为^[16]

$$x_{i,j}^{n+1} = x_{i,j}^n + \varepsilon(x_{i,j}^n - x_{k,j}^n) \quad (17)$$

式中, n 为迭代次数; i 为当前正在搜索的个体; j 为解的维度; ε 为 $[0,1]$ 之间的随机数; $x_{i,j}^n$ 是维度为 j 的个体 i 的当前位置; $x_{k,j}^n$ 是维度为 j 的相邻个体 k 的当前位置。

改进蜂群算法利用全局最优解的信息指导候选解的搜索,从而提高蜂群算法搜索能力,同时利用天牛须算法的更新法则引导蜜蜂向最优区域探索。其步骤为^[17]:

1) 确定搜索开始时天牛的朝向,该方向表示为

$$\vec{b} = \frac{\text{rands}(\text{Dim}, 1)}{\|\text{rands}(\text{Dim}, 1)\|} \quad (18)$$

式中, rands 为随机函数; Dim 为解空间维数。

2) 确定左须和右须的位置,可表示为

$$x_{l,t} = x_t - d_t \cdot \vec{b} / 2 \quad (19)$$

$$x_{r,t} = x_t + d_t \cdot \vec{b} / 2 \quad (20)$$

式中, x_t 代表第 t 次迭代时天牛质心的位置; $x_{l,t}$ 与 $x_{r,t}$ 分别代表左须及右须的位置; d_t 为第 t 次迭代时两须之间的距离。

3) 建立天牛搜索迭代模型

$$x_{t+1} = x_t + \delta_t \cdot \vec{b} \cdot \text{sign}[f(x_{r,t}) - f(x_{l,t})] \quad (21)$$

式中, δ_t 为第 t 次迭代时的搜索步长。

4) 判断更新后的适应度值是否优于上次适应度值,若是,则更新天牛位置。当迭代次数达

到上限后输出最优解,否则转步骤2)。

5) 根据左右须的位置更新觅食蜂的位置,即

$$x_i^{t+1} = x_{\text{best}} + \varepsilon(x_{i,r}^t - x_{i,l}^t) \quad (22)$$

式中, t 为迭代次数; x_{best} 为当前适应度最好的个体; $x_{i,r}^t$ 、 $x_{i,l}^t$ 分别为个体 i 右、左须在第 t 次迭代时的位置; x_i^{t+1} 为迭代后的位置。

具体的算法流程如图3所示。

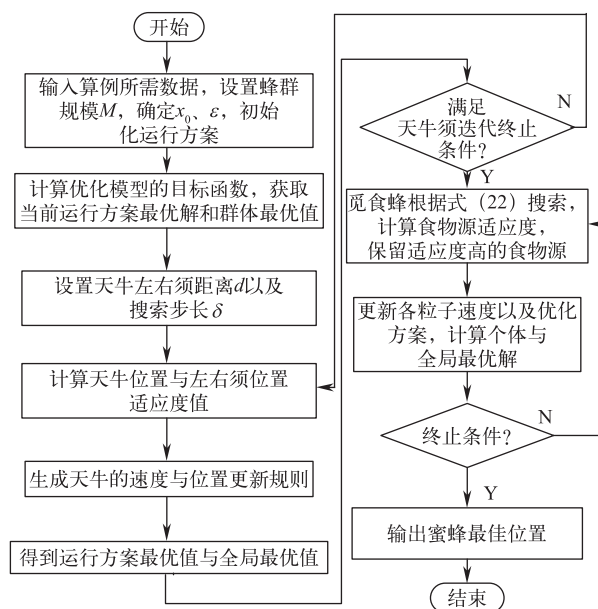


图3 改进蜂群算法求解流程

Fig. 3 Improved bee colony algorithm solution process

5 仿真结果及分析

本文的实验数据来自于某市内微电网项目,根据用户的充电行为和市场价格分别模拟电动汽车的无序充电和有序充放电功率曲线,并在有序和无序两种模式下进行优化求解。电动汽车具体参数见表1,风电、光伏出力数据见表2。

表1 电动汽车参数表

Tab. 1 Electric vehicle parameter sheet

参量	数值
CEV/kW·h	30
$P_{\max}^{\text{charge}} / P_{\max}^{\text{discharge}} / (\text{kW/kW})$	15/15
$W_{100} / (\text{kW} \cdot \text{h}/100 \text{ km})$	13.9
$\text{SOC}_{\max} / \text{SOC}_{\min} (\%)$	90/20
η	0.9

表 2 风电、光伏出力数据
Tab. 2 The data of wind and photovoltaic output

时间/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
风电出力/kW	554	490	495	468	417	382	346	314	236	170	168	151
光伏出力/kW	0	0	0	0	0	0	10	44	101	139	216	230
时间/h	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
风电出力/kW	135	121	123	147	184	231	334	449	500	521	548	560
光伏出力/kW	265	245	235	78	161	83	51	28	0	0	0	0

将改进蜂群算法的种群大小设置为100，即觅食蜂与观察蜂的数量均为50，种群迭代次数为400。设置弃风、弃光的惩罚因子 r_1 、 r_2 分别为100元/kW与100元/kW。风电、光伏机组的出力功率可由式（1）与式（2）求得，实际上网功率

可通过微电网母线测得，通过出力功率与实际上网功率相比较，可得各时段的弃风、弃光功率。

四台燃煤机组作为系统的主要供能单元，各机组参数见表3。

表 3 四台燃煤机组参数
Tab. 3 Parameters of four coal-fired turbines

参量	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4
发电成本函数常数项 a /元	9.62	7.32	8.85	5.32
发电成本函数一次系数 b /（元/kW）	0.285	0.284	0.252	0.82
发电成本函数二次系数 c /（元/kW ² ）	9.22×10^{-6}	1.52×10^{-5}	9.82×10^{-6}	1.02×10^{-7}
机组最大出力 $P_{CG}^{\max}$ /kW	1 000	1 000	1 500	1 500
功率上升速度限制 $P_{CG}^{\uparrow}$ /（kW/h）	400	400	400	400
功率下降速度限制 $P_{CG}^{\downarrow}$ /（kW/h）	400	400	400	400

5.1 无序充电

以150辆车为例，模拟出电动汽车无序充电功率曲线，与电网其他负荷叠加，得到无序充电负荷曲线如图4所示。

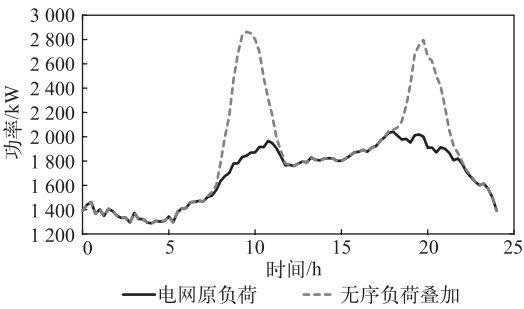


图 4 无序充电负荷曲线
Fig. 4 Disordered charge load curve

由图4可见，无序充电时，在上午9时及晚上20时左右会产生巨大的负荷波峰叠加于电网，对

电网稳定造成不利影响。同时，9时及20时左右的电价较高，此时电动汽车接入电网不利于系统的经济运行。

无序充电环境下的调度结果如图5所示。各台机组的出力情况如图6所示。

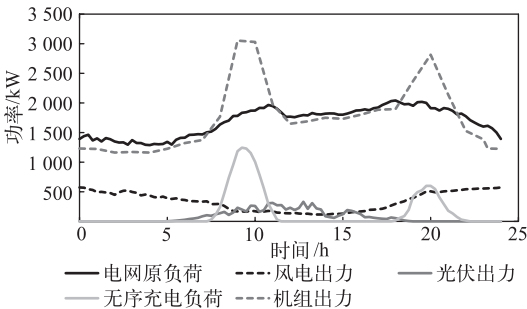


图 5 无序充电综合负荷、出力曲线
Fig.5 Comprehensive load and output curve of disordered charging

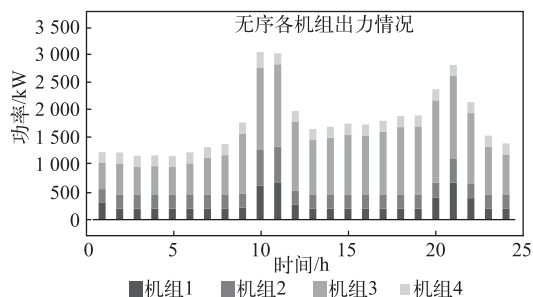


图6 无序充电时各机组出力情况

Fig. 6 Output of each unit of disordered charging

由图5可知,在9时及20时左右,燃煤机组承担巨额出力以弥补突增的无序充电负荷。由图6可知,机组3在无序充电时出力接近满额,对机组寿命产生影响。整个系统的运行成本为139 164.4元。

5.2 有序充放电

风电、光伏出力与无序充电时相同,发挥电动汽车的V2G功能,同样以150辆车为例,按照第3节提出的目标函数和约束条件进行优化。所得有序充电功率曲线如图7所示。各机组出力情况如图8所示。

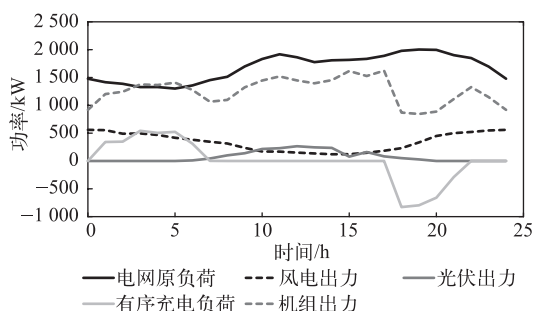


图7 有序充电综合负荷、出力曲线

Fig. 7 Comprehensive load and output curve of orderly charging

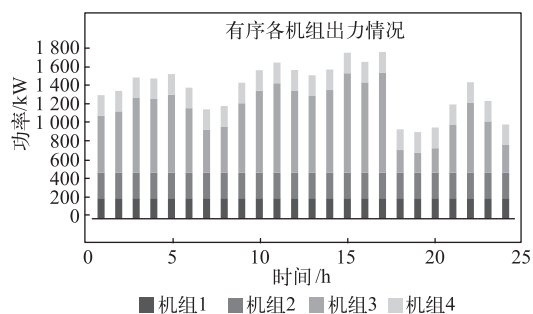


图8 有序充电时各机组出力情况

Fig. 8 Output of each unit of orderly charging

由图7可知,通过有序充放电调度策略,电动汽车被集中在0~7时充电,此时是系统负荷的低谷时期,电价也相对较低,有效降低系统运行成本。7~17时,电价处于平价阶段,按照调度策略,电动汽车无法充放电,但随着该时段风电、光伏机组的出力增大,燃煤机组出力并未有太大增幅。17~24时,电源负荷需求增加,电网买电单价较高,大电网也正处于负荷高峰,用电量较大,此时发挥电动汽车V2G功能为大电网供电,有效降低了燃煤机组的工作负荷,同时降低了成本。

由图8可知,各台机组出力均维持在工作范围以内,未出现过功率的情况。有序充电架构之下,整个系统的运行成本为79 723.3元,有效降低了系统的运行成本,证明了有序充电策略的有效性。

5.3 改进蜂群算法与其他算法的对比分析

分别采用传统蜂群算法、遗传算法以及改进的蜂群算法对提出的调度模型进行求解,所得结果如图9所示。由图9可知,改进的蜂群算法的收敛速度优于遗传算法和传统的蜂群算法。

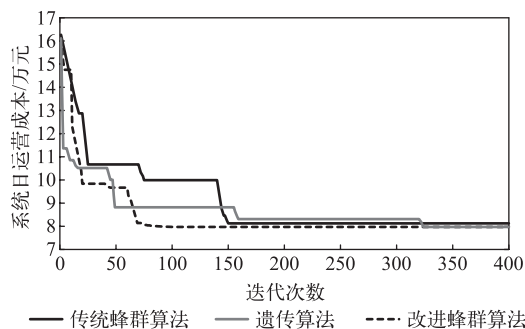


图9 改进蜂群算法与其他算法的对比曲线

Fig. 9 Comparison curve between the improved bee colony algorithm and other algorithm

6 结束语

电动汽车充放电优化管理可以减少高峰时段用电需求增长带来的不利影响,实现负荷分布均匀。通过V2G技术使得电动汽车可以灵活地作为分布式电源使用。本文提出了一种基于用户出行规律,同时考虑可再生能源与电动汽车的协

同调度模型。首先,根据驾驶规律建立电动汽车充电模型;然后,建立了风力发电模型和光伏发电模型,引入4台参数不同的燃煤机组作为系统的主要供电单元。以系统运行成本最小为目标建立优化模型,并采用改进的蜂群算法对模型进行求解。

仿真结果证明,通过电动汽车有序充放电策略,可以减小等效负荷的峰谷差,促进可再生能源的消纳,同时缓解燃煤机组的运行压力,降低整个系统的运行成本。相较于传统的蜂群算法及遗传算法,改进的蜂群算法具有更快的收敛速度。

参考文献

- [1] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J].中国电机工程学报,2012,32(4): 1-10, 25.
- [2] 张颖,容展鹏,张宇雄,等.基于微电网的电网需求响应研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(21): 20-26.
- [3] SHI Ruifeng, LI Shaopeng, ZHANG Penghui, et al. Integration of renewable energy sources and electric vehicles in V2G network with adjustable robust optimization[J]. Renewable Energy, 2020, 153.
- [4] 师瑞峰,孙常浩,周振宇,等.含可再生能源与电动汽车的微网系统调度优化研究综述[C]//智能配电系统和分布式能源研讨会,2015.
- [5] 王帅,赵兴勇,贺天云,等.考虑电动汽车的微电网复合储能容量优化配置[J].中国电力,2017,50(3): 161-167.
- [6] 丁明,史盛亮,潘浩,等.含电动汽车充电负荷的交直流混合微电网规划[J].电力系统自动化,2018,42(1): 32-38, 81.
- [7] 王姝凝,杨少兵.居民小区电动汽车充电负荷有序控制策略[J].电力系统自动化,2016,40(4): 71-77.
- [8] 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.
- [9] 陆燕娟,陈友芹,潘庭龙.考虑EV和需求侧响应的社区微网能量管理[J].储能科学与技术,2021,10(2): 617-623.
- [10] 唐菁敏,王杰,刘思淼.含电动汽车参与的微电网调度策略研究[J].电力科学与工程,2021,37(2): 25-31.
- [11] 付华,柳梦雅,陈子春.风光储电动汽车换电站多目标运行优化[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(4): 38-43.
- [12] 于大洋,宋曙光,张波,等.区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J].电力系统自动化,2011,35(14): 24-29.
- [13] JIANG Xiuli, WANG Jinkuan, HAN Yinghua, et al. coordination dispatch of electric vehicles charging/discharging and renewable energy resources power in microgrid[J]. Procedia Computer Science, 2017, 107.
- [14] 杨武.计及电动汽车的多源微电网优化调度研究[D].南昌:南昌大学,2020.
- [15] 张明霞,田立亭.一种基于需求分析的电动汽车有序充电实施架构[J].电力系统保护与控制,2013,41(3): 118-122.
- [16] 李佳华,马连博,王兴伟,等.基于多目标蜂群进化优化的微电网能量调度方法[J].郑州大学学报(工学版),2018,39(6): 50-58.
- [17] 周磊,董学育,朱建忠,等.基于改进蜂群算法的微电网优化调度[J].电气自动化,2020,42(5): 45-47.

作者简介

王少林(1971—),男,高级工程师,研究方向为电能计量。

(收稿日期:2021-06-29)

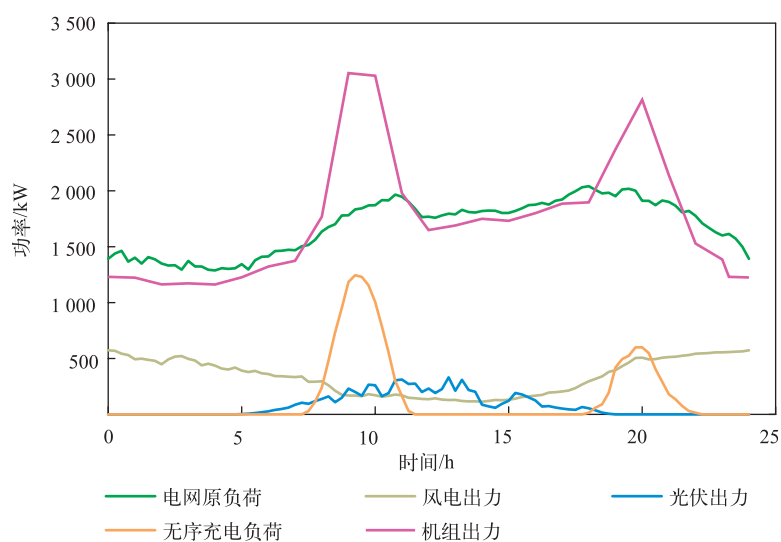


图 5 无序充电综合负荷、出力曲线

Fig.5 Comprehensive load and output curve of disordered charging

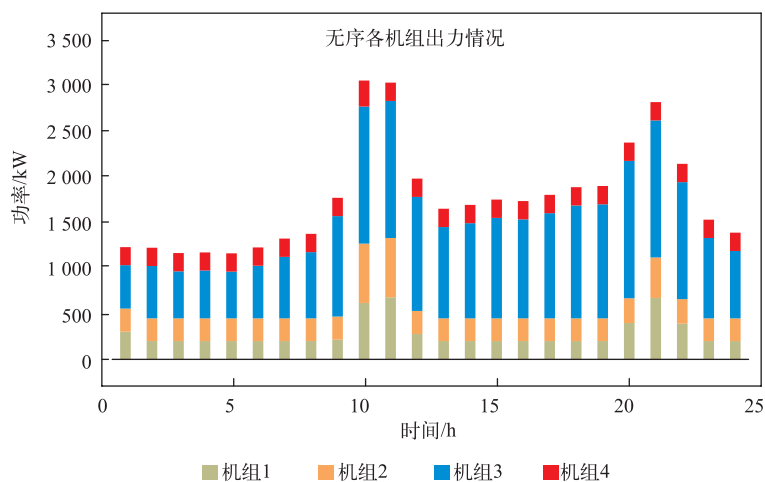


图 6 无序充电时各机组出力情况

Fig. 6 Output of each unit of disordered charging

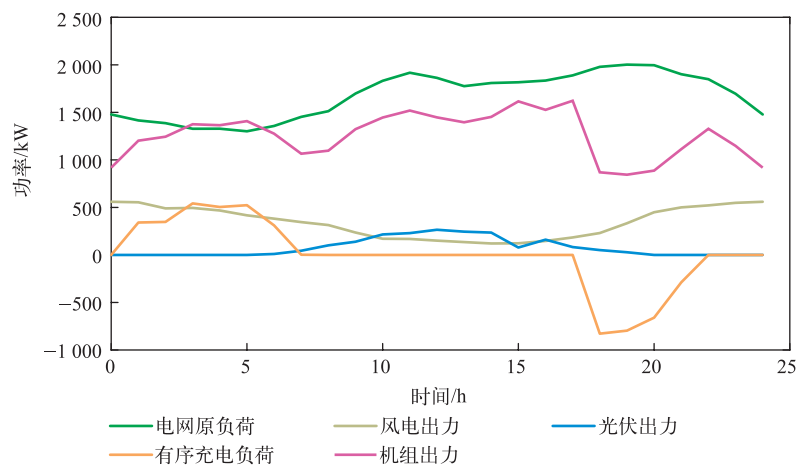


图 7 有序充电综合负荷、出力曲线
Fig. 7 Comprehensive load and output curve of orderly charging

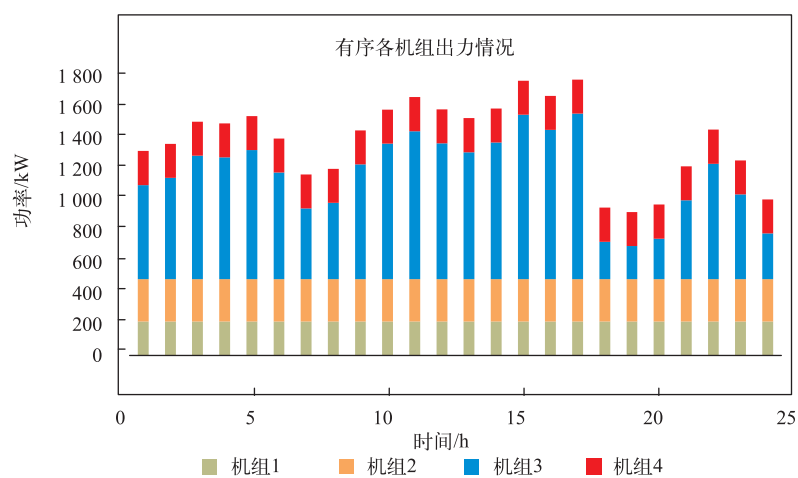


图 8 有序充电时各机组出力情况
Fig. 8 Output of each unit of orderly charging

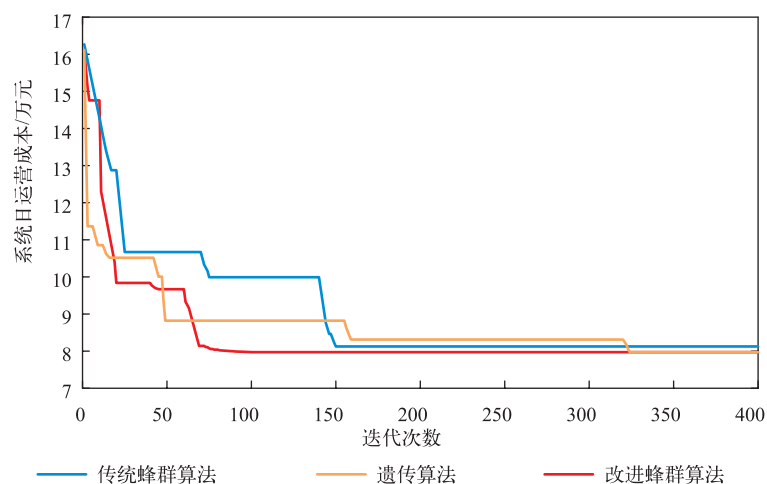


图 9 改进蜂群算法与其他算法的对比曲线
Fig.9 Comparison curve between the improved bee colony algorithm and other algorithm