

DOI: 10.7667/PSPC151565

计及电动汽车的微电网经济调度方法

王璟, 王利利, 郭勇, 孙义豪, 关朝杰

(国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 针对电动汽车接入后微电网的节能减排发电调度问题, 提出了结合电动汽车有序充放电控制的微电网多目标经济调度方案。分析电动汽车的行驶特性, 建立基于峰谷分时电价的有序充放电负荷模型。以微网发电成本和环境效益的综合最优为目标函数, 采用改进遗传算法, 根据实时负荷供电需求, 动态确定各可控分布式电源出力大小。在 Matlab 平台上以一个包含风、光、柴油发电机、微型燃气轮机、燃料电池以及电动汽车的小型微电网系统为例进行仿真。仿真结果表明: 所提调度方法通过合理引导电动汽车的有序充放电, 减少了负荷高峰时段微电网各发电单元的供电负担, 以尽量低的发电成本实现良好的环境效益, 验证了该优化调度方案的可行性和有效性。

关键词: 电动汽车; 有序充放电; 微电网; 经济调度; 改进遗传算法

Microgrid economic dispatch method considering electric vehicles

WANG Jing, WANG Lili, GUO Yong, SUN Yihao, GUAN Zhaojie

(State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Considering problems of energy-saving and emission-reducing in microgrid power generation scheduling with electric vehicles, the multi-objective microgrid economic dispatch method combined with electric vehicles coordinated charging/discharging regulation is proposed. The travel characteristics of vehicles are analyzed, and the load model with coordinated charging/discharging based on time-of-use tariff is established, then the comprehensive optimization between generation cost and environmental benefit is selected to be the objective function and output power of the controlled distributed generation sources can be determined dynamically according to the immediate power supply requirements by adopting a developed genetic algorithm. Simulation researches are carried out based on the MATLAB platform by employing a small microgrid system containing a wind turbine, a photovoltaic, a diesel engine, a micro turbine, a fuel cell and electric vehicles, hence the feasibility and effectiveness of the proposed dispatch strategy are verified by simulation results indicating that the power demand in load peak period can be evidently reduced by intelligent charging/discharging mode of electric vehicles and the better environmental benefits can be reached at lower generation cost.

Key words: electric vehicle; ordered charging/discharging; microgrid; economic dispatch; developed genetic algorithm

0 引言

随着智能配电网的大力建设, 分布式发电得到了越来越多的运用, 微电网作为管理分布式电源的有效技术手段, 更是受到高度重视。微网将各种分布式电源、负荷、储能系统及保护控制等环节融合为一体, 通过公共连接点与配电网相连, 其经济调度直接关系到自身发电成本与环境效益, 对微电网系统的经济、可靠运行具有重要意义^[1]。

此外, 电动汽车(Electric Vehicle, EV)现已大规模渗入微电网, 电动汽车时空的分散性和充电行为的随机性将增大原有负荷峰值, 为其经济优化调度

带来挑战。近年来, 电动汽车入网(Vehicle to Grid, V2G)模式被提出^[2], 即车辆不运行时, 可通过特定装置向电网输送功率, 在车网之间实现电能双向传输, 为解决上述问题提供了思路。电动汽车接入微电网后, 可通过适当的引导机制, 激励电动汽车有序充放电, 从而实现合理负荷转移, 改善系统经济性能。

文献[3-4]在研究微电网经济调度时, 仅考虑运行成本; 文献[5]以经济和环境为双重目标, 实现微电网的动态优化调度; 文献[6]结合实时电价提出并网方式下的热电联产型多目标经济调度模型, 但以上均未考虑电动汽车的入网影响; 文献[7]充分考虑

微网与电动汽车换电站的互动,建立了经济调度双层优化模型,但未涉及对电动汽车的充放电行为研究;文献[8]应用区间系数规划与机会约束规划建立了考虑电动汽车和分布式电源不确定性的微网调度模型,未体现出 V2G 模式的优势;文献[9]验证了电动汽车有序充放电模式下更具经济性,但优化目标同样未考虑环境污染成本。

本文以一个面向居民的小型微电网为研究对象,包含光伏(photovoltaic, PV)、风轮机(wind turbine, WT)、柴油发电机(diesel engine, DE)、微型燃气轮机(micro turbine, MT)、燃料电池(fuel cell, FC)、电动汽车及基本用电负荷,通过分析电动汽车的行驶特性,提出了无序充电负荷模型和基于动态峰谷时段的有序充放电模型,并综合考虑微网发电成本和环境成本为优化目标,在满足各类约束的前提下,采用改进遗传算法计算各可控发电单元的最优出力情况,最后在 Matlab 平台上进行仿真,分析微电网在电动汽车有序充放电模式下显著的经济优势,验证了本文调度方案的有效性。

1 电动汽车的优化调度模型

基于用户的使用习惯,本文以常规慢充电动汽车为研究对象,选择车载电池为 25 kWh 容量的锂电池,考虑到电池的使用寿命,设定电池的荷电状态(State of Charge, SOC)上下限分别为 90%和 10%,分析车辆的行驶特性,利用蒙特卡洛随机抽样得到单台电动汽车的充电功率需求,并在此基础上完成基于动态峰谷时段的电动汽车优化调度建模。

1.1 电动汽车行驶特性

车辆行驶特性决定了每日行驶里程及电动汽车的开始充电时刻,文献[10]利用美国国家车辆调查中的统计数据拟合,得到车辆日行驶里程概率密度函数为

$$f_d(x) = \frac{1}{x\sigma_d\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (1)$$

式中: $\mu_d=3.20$; $\sigma_d=0.88$ 。车辆每日行驶里程 D 多在 20~60 英里之间(32~97 km), 25 kWh 的锂电池在充电至 90%的安全约束条件下,基本可保证用户的日常行驶需求。

用户行程返回时刻即为电动汽车开始充电时刻,服从式(2)所示正态分布。

$$f_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & \mu_s - 12 < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x+24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & 0 < x \leq \mu_s - 12 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mu_d=17.6$; $\sigma_d=3.4$ 。

1.2 电动汽车无序充电模型

电动汽车无序充电,即在不加以任何激励手段的情况下,用户仅凭借自身行为习惯和充电需求对电动汽车进行充电的模式。由于电动汽车的充电时间相互独立,可利用蒙特卡洛抽样对一天内单台电动汽车在无序充电模式下的功率需求进行预测,如图 1 所示。

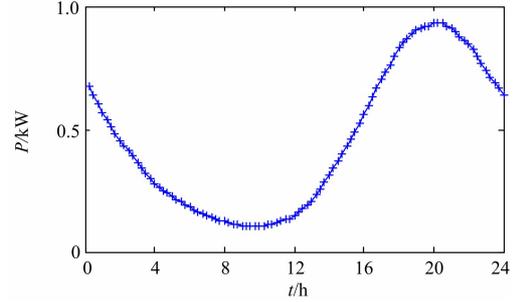


图 1 单台电动汽车自然充电需求

Fig. 1 Original charging requirement for single EV

由图 1 可知,在不采取任何有序充电约束措施时,用户的行为习惯决定了电动汽车充电的峰谷特性: 8:00~12:00 用户上班期间,车辆基本为闲置状态,充电需求低迷;而充电负荷高峰大致将集中在 18:00~22:00 时段,用户下班回家,开始为车辆充电。因此,电动汽车大规模使用时,无序充电形成的负荷高峰会加重电网负担,影响电力系统安全运行。

1.3 电动汽车有序充放电模型

为了响应 V2G 模式,正确引导电动汽车用户进行有序充放电,本文采用峰谷分时电价政策,基于电网实时负荷对不同时段制定不同电价水平,利用用户对价格的知觉,实现用电负荷的合理转移,建立三段式电价模型为

$$f(t) = \begin{cases} price_v & t_1 \leq t \leq t_2 \\ price_p & t_3 \leq t \leq t_4 \\ price_f & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $price_v$ 、 $price_p$ 、 $price_f$ 分别表示谷时段电价、峰时段电价,平时段电价; t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别表示谷时段及峰时段的开始时刻及结束时刻。此外再定义变量 t_{sc} 、 t_c 分别代表用户开始充电时刻和充电持续时间, t_{sd} 、 t_d 分别代表用户开始放电时刻和放电持续时间。

为鼓励用户负荷低谷充电,负荷高峰放电,规定:当用户充电时长超过谷电价时段长度,在谷电价开始时刻充电;当用户充电时长不超过谷电价时段长度,则选择在谷电价内任意时刻开始充电,放

电过程亦然。因此参与电动汽车有序调度的用户可依式(4)、式(5)分别选择充放电开始时刻^[11]。

$$t_{sc} = \begin{cases} t_1 + rand \times (t_2 - t_c) & 0 \leq t_c \leq t_2 - t_1 \\ t_1 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$t_{sd} = \begin{cases} t_3 + rand \times (t_4 - t_d) & 0 \leq t_d \leq t_4 - t_3 \\ t_3 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $rand$ 代表[0,1]之间的任意随机数。由上分析, 对于三段式分时电价模型, t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 决定了峰谷时段, 引导着用户的充放电行为, 直接影响负荷特性, 成为 V2G 优化调度的关键因素。本文以总负荷峰谷差最小为优化目标, 确定对应的最优峰谷时段。

在优化模型建立过程中, 做出如下假设:

(1) 用户响应度 $\lambda=0.6$, 即 60%的车主参与有序充放电调度;

(2) 用户每次放电至安全下限 $SOC=10\%$, 充电至安全上限 $SOC=90\%$, 且充放电过程理想无损耗;

(3) 电池电量满足当天用户的行驶需求, 且无其他耗电行为, 因此每台电动汽车的充电需求为 V2G 模式下向电网回送电能及当日行驶消耗电能之和。

2 微网经济调度模型及求解算法

2.1 优化目标

本文经济优化调度综合考虑调度周期内, 微电网系统发电成本最低和环境成本最低两个目标函数, 并假设发电成本与环境成本均只与有功相关。

目标函数 1: F_1 为发电成本, 即微电网向负荷供电需收取的费用, 包括各分布式电源的微源燃料费用、运行维护费用和折旧费用等以及发电单元供电不足时从主网购电的费用。

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (C_{fuel}(i, t) + C_{OM}(i, t) + C_{DP}(i, t) + C_{grid}(t)) \quad (6)$$

式中: T 为调度周期所包含的时段数; N 为微电网系统中可控分布式电源数目; $C_{grid}(t)$ 表征 t 时刻微电网向主网的购电成本; $C_{fuel}(i, t)$ 、 $C_{OM}(i, t)$ 、 $C_{DP}(i, t)$ 分别代表 t 时刻第 i 个可控分布式电源的燃料成本、运行维护成本及投资折旧成本, 具体数据参见文献[12]。

目标函数 2: F_2 为环境成本, 即排放污染物的惩罚费用, 本文主要考虑 NO_x 、 SO_2 、 CO 三种污染排放。

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^N [(C_k \gamma_{ik}) P_i(t) + (C_k \gamma_{gridk}) P_{grid}(t)] \quad (7)$$

式中: C_k 代表系统排放 1 kg 第 k 类污染物的惩罚成本; γ_{ik} 、 γ_{gridk} 分别为第 i 个可控分布式电源输出

1 kWh 电能时第 k 类污染物的排放系数和主网向微电网输送 1 kWh 电能时第 k 类污染物的排放系数, 数据可参见文献[12-13]; $P_i(t)$ 、 $P_{grid}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个可控分布式电源的出力大小及主网向微电网提供的电能。

将发电成本与环境成本视为同等重要的目标, 采用线性加权法, 可确定优化目标为

$$\min F = 0.5F_1 + 0.5F_2 \quad (8)$$

2.2 约束条件

等式约束条件为有功功率平衡, 即

$$\sum_{i=1}^N P_i + P_{grid} = P_o + P_{EV} \quad (9)$$

式中: P_o 为常规用电负荷; P_{EV} 为电动汽车充电负荷, 充电状态时为正, 放电状态时为负。

不等式约束包括:

(1) 分布式电源出力约束

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad (10)$$

式中, P_{imin} 、 P_{imax} 分别为第 i 个分布式电源的出力下限及出力上限值。

(2) 电动汽车锂电池的荷电状态约束

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (11)$$

式中, SOC_{min} 、 SOC_{max} 分别为车载电池荷电状态的安全下限及安全上限值。

(3) 主网向微网传输电能容量约束

$$0 \leq P_{grid} \leq P_{gmax} \quad (12)$$

式中, P_{gmax} 为主网向微网传输电能容量上限值。

2.3 模型求解算法

遗传算法是依据群体中的个体对环境的适应度进行优胜劣汰的操作, 包括选择、交叉、变异三个基本遗传算子。为提高寻优效率, 本文对传统遗传算法加以改进, 在选择过程中引入最优保存策略^[14], 在交叉、变异过程中引入自适应处理方法, 使交叉概率和变异概率能够随适应度自行变化, 对微网经济调度的数学模型进行求解。

最优保存策略指当前群体中适应度最高的优秀个体不参与交叉、变异运算, 而是集中起来形成遗传子群体, 直接复制到下一代, 可避免传统遗传算法中交叉、变异操作对最优个体的破坏, 从而提高算法稳定性, 加快收敛。

交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 的选择是影响遗传算法性能的关键所在。交叉概率过大, 遗传模式被破坏的可能性也越大; 交叉概率过小, 会使寻优过程缓慢, 降低搜索效率。而对于变异概率, 过大则变为纯随机搜索算法, 过小又难以产生新的个体结构。基于上述问题, 本文采用 Srinivas 提出的自适

应处理方法, 对 P_c 、 P_m 作出如下改进^[15]。

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(F_{\max} - F')}{F_{\max} - F_{\text{avg}}} & F' \geq F_{\text{avg}} \\ k_2 & F' < F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3(F_{\max} - F'')}{F_{\max} - F_{\text{avg}}} & F'' \geq F_{\text{avg}} \\ k_4 & F'' < F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: F_{\max} 、 F_{avg} 分别为群体中最大适应值和平均适应值; F' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值; F'' 为要变异个体的适应度值; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为常数, 分别设为 0.5、0.9、0.02、0.05。由式(13)、式(14), 适应度值高于群体平均适应值的个体对应较低的交叉概率和变异概率, 使得这些个体免遭破坏而进入下一代; 低于平均适应值的个体, 对应较高的交叉概率和变异概率, 加速此类个体的淘汰。算法流程如图 2 所示。

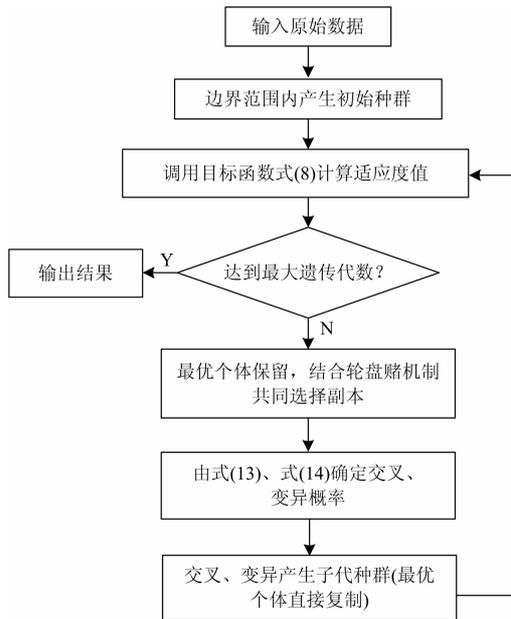


图 2 改进遗传算法流程

Fig. 2 Flowchart of the developed genetic algorithm

计算出初始群体的适应度值后, 选出综合优化效果最好的出力方案个体进行保留, 其他个体依据轮盘赌机制依次选择。交叉算子作用在选取的两个个体上, 通过交叉操作产生两个子代个体, 然后在某一变异点用基因取值范围内的某个随机数代替原基因完成变异操作。交叉、变异后的子代个体与最优个体复制形成的直接遗传子群体混合组成子代初始种群, 重复迭代计算输出最优解。群体规模设为 30, 迭代次数 300。

3 算例分析

本文以某面向居民住宅的小型微电网系统为研究对象, 基于 Matlab 平台对前文所述优化调度方法进行仿真验证, 调度周期设为 1 天。微电网系统中包括: (1) 光伏电池、风力发电机, 由于均属可再生能源发电装置, 视为零发电成本且无污染排放, 统计得到某日内输出功率分布如图 3 所示; (2) 柴油发电机, 燃料电池, 微型燃气轮机等发电单元, 输出功率上限分别为 $P_{\text{DE-max}}=7 \text{ kW}$, $P_{\text{FC-max}}=4 \text{ kW}$, $P_{\text{MT-max}}=4 \text{ kW}$; (3) 居民用电负荷及电动汽车充电负荷, V2G 模式下放电状态的电动汽车视为电源, 设该区域内共有电动汽车 5 辆, 充放电功率均为 2.5 kW, 并采集住宅区某日用电负荷数据如图 4 所示。若微电网发电单元输出电能总和仍不能满足用户需求时, 用户需从主网购电, 固定电价不能引导用户的充电行为, 电动汽车处于无序充电模式, 设此时购电价格恒为 0.65 元/kWh; 峰谷分时电价的实时则有效引导了电动汽车的有序充放电, 三段式电价分别设为 $\text{price}_p=1.253 \text{ 元/kWh}$ 、 $\text{price}_v=0.335 \text{ 元/kWh}$ 、 $\text{price}_f=0.781 \text{ 元/kWh}$ 。

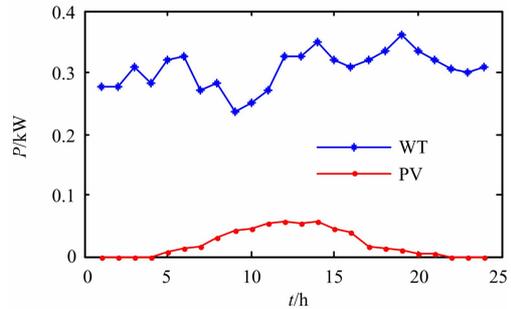


图 3 可再生能源日输出功率

Fig. 3 Daily output power of renewable sources

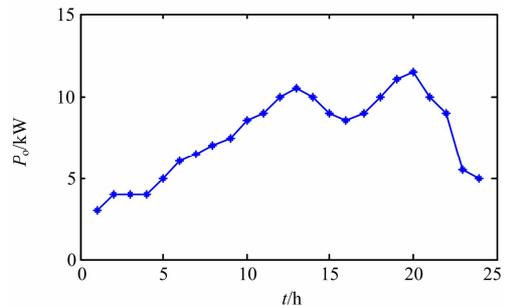


图 4 日用电负荷原始数据

Fig. 4 Daily basic load curve

基于图 4 所示日用电负荷曲线, 在满足用户充电需求的前提下, 得到电动汽车无序充电与有序充

放电模式下的微电网总负荷曲线, 如图 5 所示。由图可知, 电动汽车的无序充电增大了原有的负荷高峰, 加剧了负荷峰谷差, 对微电网内各发电环节的出力提出更高要求, 从而加重了微网运行的成本负担。而峰谷分时电价的引入实现了负荷合理转移, 充分利用电动汽车的电能双向性, 通过鼓励用户在低谷时段充电, 高峰时段放电, 平滑了负荷曲线, 有效减小了 18:00~22:00 时段的负荷峰值, 更利于微电网的经济运行。

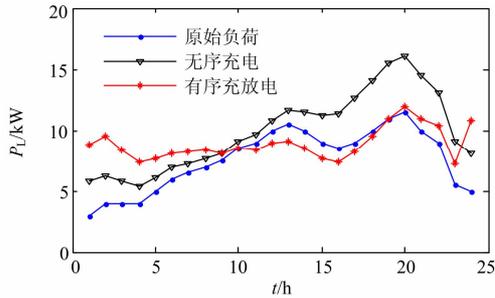


图 5 电动汽车无序/有序充放电模式下的负荷曲线

Fig. 5 Load curves under different regulation modes of EV

确定总负荷的电能需求后, 将 DE、FC、MT 出力大小作为待求解变量, 采用改进遗传算法进行计算, 得到电动汽车在无序充电模式及有序充放电模式下的微电网优化调度结果分别如图 6、图 7 所示, 其中图(a)为求解所得各发电单元的出力情况, 图(b)为对应的发电成本及环境成本。

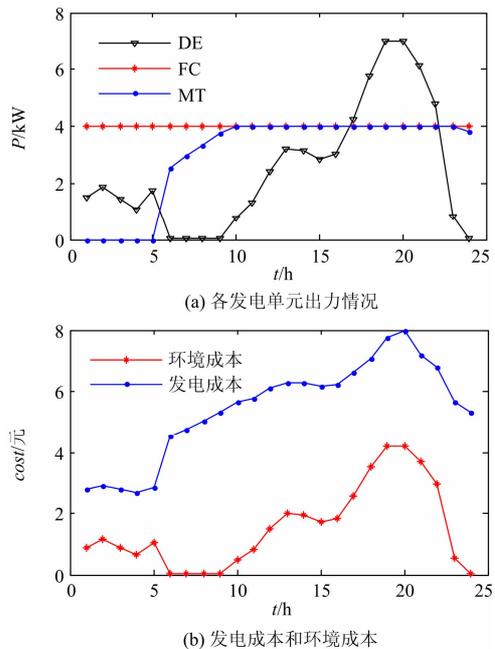


图 6 电动汽车无序充电时的优化运行结果

Fig. 6 Optimization results with EV uncoordinated mode

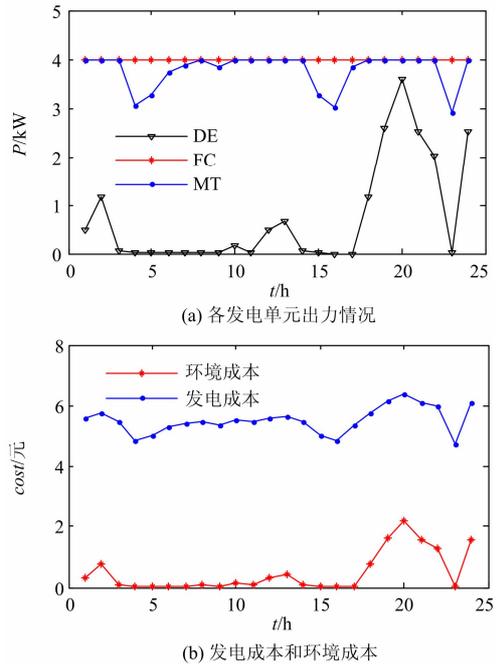


图 7 电动汽车有序充放电时的优化运行结果

Fig. 7 Optimization results with EV coordinated mode

由仿真结果知, 电动汽车处于无序或有序模式下, 燃料电池始终都以最大功率运行, 这是由调度方案的优化目标决定的。根据设定参数可以分析出, 综合总成本角度, 燃料电池具有绝对优势, 因此调度过程中始终保持燃料电池优先运行, 而柴油发电机和微型燃气轮机在环境效益或发电成本上各有欠缺, 需根据实时负荷需求, 依据最优总成本原则来决定各自的输出功率。

电动汽车无序充电场合下, 19:00、20:00 的负荷高峰分别达到 15.519 2 kW 和 16.126 7 kW, 而此时微网发电装置发出电能 15.371 7 kW 和 15.338 9 kW, 缺额部分需以 0.65 元/kWh 的价格向主网购电, 额外增加了买电成本。随着柴油发电机出力增加, 直到所有发电设备均以功率上限值运行, 污染物排放增大, 带来明显的发电成本高峰和环境成本高峰。

对比图 6、图 7 可知, 由于电动汽车优化调度策略的实施, 有效实现了削峰填谷, 负荷峰值由无序充电时的 16.126 7 kW 下降到 11.918 2 kW, 减轻了微电网的电力负担, 避免了向主网购电的费用, 同时也降低了污染物排放量, 统计一天内系统总成本由无序充电的 167.257 4 元减少到 144.126 9 元, 节省了 13.8%, 如表 1 所示, 其中发电成本节省 1.912 元, 环境成本减少 21.218 5 元, 环境效益优化效果显著, 这是因为在无序充电的负荷高峰时段, 柴油

机带来严重的污染物排放,而电动汽车的合理调度有效减小了柴油机输出功率。用户响应度 λ 越高,即参与电动汽车优化调度的车主越多,削峰填谷作用越明显,也越有利于提高系统的经济性和环保性。

表 1 电动汽车无序/有序充电的优化结果对比

Table 1 Results comparison with different EV regulation modes

	无序充电	有序充放电
发电成本/元	132.378 5	130.466 5
环境成本/元	34.878 9	13.660 4
总成本/元	167.257 4	144.126 9

4 结论

本文基于微电网经济调度的基本思想,针对电动汽车的普及现状,提出了考虑电动汽车接入后的微电网经济优化调度方案。文中首先结合车辆的行驶特性,建立了电动汽车自然充电和基于峰谷分时电价的有序充放电负荷模型,以明确电动汽车对日常用电负荷的影响,然后综合考虑微网运行的发电成本和环境效益为优化目标建立数学模型,在满足各类约束前提下,采用基于最优保存策略的自适应遗传算法为手段进行求解,得到最优的各可控分布式电源出力情况。仿真结果证明,通过本文的优化调度方法,充分发挥电动汽车的能量双向性和主动性,避免无序充电引起的负荷高峰,削弱对主网的供电依赖,以尽量低的运行成本实现良好的环境效益,另多目标调度下,综合性能较好的发电装置(燃料电池)具有更高的运行优先级,为微网优化调度的工程应用提供一定的参考价值。

参考文献

- [1] 柳丹,李强,袁晓冬.考虑随机性的微网能量优化调度模型[J].电力系统保护与控制,2014,42(11):112-117.
LIU Dan, LI Qiang, YUAN Xiaodong. Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 112-117.
- [2] 王旭冉,郭庆来,孙宏斌,等.计及电动汽车充放电负荷的分布式电压稳定监控方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(16):43-48.
WANG Xuran, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Distributed voltage stability assessment and control considering electric vehicle charging and discharging load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 43-48.
- [3] 侯贺军,罗春辉,隗霖捷,等.基于微分进化算法的水火电短期优化调度的研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(9):54-61.
- [4] HOU Maojun, LUO Chunhui, WEI Linjie, et al. Study on short-term hydrothermal scheduling based on differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 54-61.
- [4] 修春波,陆丽芬.改进的混沌优化算法及其在电力系统负荷分配中的应用研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):109-112.
XIU Chunbo, LU Lifen. Chaos optimization algorithm and its application in economic load dispatch on power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 109-112.
- [5] 洪博文,郭力,王成山,等.微电网多目标动态优化调度模型与方法[J].电力自动化设备,2013,33(3):100-107.
HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 100-107.
- [6] 陈洁,杨秀,朱兰,等.微网多目标经济调度优化[J].中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 57-66.
- [7] 陈思,张焰,薛贵挺,等.考虑与电动汽车换电站互动的微电网经济调度[J].电力自动化设备,2015,35(4):60-69.
CHEN Si, ZHANG Yan, XUE Guiting, et al. Microgrid economic dispatch considering interaction with EV BSS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 60-69.
- [8] 苗轶群,江全元,曹一家.考虑电动汽车及换电站的微网随机调度研究[J].电力自动化设备,2012,32(9):18-24.
MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Microgrid stochastic dispatch considering electric vehicles and battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 18-24.
- [9] 苗轶群,江全元,曹一家.考虑电动汽车随机接入的微网优化调度[J].电力自动化设备,2013,33(12):1-6.
MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 1-6.
- [10] 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.
- [11] 葛少云, 黄鏐, 刘洪, 等. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 1-5.
- GE Shaoyun, HUANG Liu, LIU Hong, et al. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5.
- [12] 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 365-373.
- ZHUANG Huaidong, WU Hongbin, LIU Haitao, et al. Multi-objective economic dispatch of microgrid system considering electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 365-373.
- [13] 黄敏. 基于改进粒子群算法的微电网多目标优化运行研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- HUANG Min. Research of multi-objective optimal operation for a micro-grid based on improved particle swarm optimization[D]. Chongqing: Chingqing University, 2014.
- [14] 刘前进, 许慧铭, 施超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 1-7.
- LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on power flow optimization based on multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 1-7.
- [15] 姚兴佳, 赵骞, 王士荣, 等. 多目标蜂群算法求解微电网调度问题[J]. 电器与能效管理技术, 2015(24): 58-63.
- YAO Xingjia, ZHAO Qian, WANG Shirong, et al. Multi-objective artificial bee colony applied in the schedule dispatch of microgrid[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(24): 58-63.

收稿日期: 2015-09-05; 修回日期: 2015-12-30

作者简介:

王 璟(1973-), 女, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为电网规划技术; E-mail: 13234957@qq.com

王利利(1984-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为配电网规划技术;

郭 勇(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网规划技术。

(编辑 周金梅)