

文章编号: 2095-2163(2022)06-0088-09

中图分类号: TM734

文献标志码: A

# V2G 模式下考虑用户满意度的动态经济/排放调度

吴佳欣, 郝正航

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 随着电动汽车的规模化应用, 电力系统正面临着经济及环境的双重考验, 为了应对新的挑战, 本文提出了一种 V2G 模式下考虑用户满意度的动态经济/排放调度模型。首先利用蒙特卡洛随机抽样方法分析了大规模 EV 无序充电对电网负荷的影响; 其次, 为了兼顾电网与用户双侧利益, 在经济调度各时段内, 以 EV 的充放电功率以及火电机组的出力作为决策变量, 以负荷峰谷差、总的燃料费用以及污染物排放作为目标函数, 充分考虑电力系统约束、EV 约束以及用户满意度约束, 动态优化电力系统经济性、环境效益和 EV 的充放电功率。考虑到该模型的多约束复杂性, 本文采用双层优化调度策略, 并分别利用粒子群优化算法以及多目标粒子群优化算法对模型进行求解。以修改的 IEEE 6 机 30 节点系统为例进行仿真分析, 本文提出模型的合理性得到了有效验证。

**关键词:** 电动汽车; “车-网”互动; 用户满意度; 动态经济/排放调度; 多目标优化; 多目标粒子群优化算法

## Dynamic economic/emissions dispatch considering user satisfaction under V2G mode

WU Jiaxin, HAO Zhenghang

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** With the large-scale application of electric vehicles, the power system is facing the dual test of economy and environment. In order to cope with the new challenges, this paper proposes a dynamic economic/emissions dispatch model that considers user satisfaction under the V2G mode. First, the Monte Carlo random sampling method is used to analyze the impact of large-scale EV disorder charging on the grid load; second, in order to take into account the interests of both the power grid and the user, the charging and discharging power of the EV and the power of the thermal power unit are used in each period of economic dispatch. Taking load peak-to-valley difference, total fuel cost and pollutant emissions as objective functions, fully considering power system constraints, EV constraints and user satisfaction constraints, power system economy, environmental benefits and EV charging and discharging power are dynamically optimized. Considering the multi-constraint complexity of the model, this paper adopts a two-layer optimization scheduling strategy, and uses particle swarm optimization algorithm and multi-objective particle swarm optimization algorithm to solve the model respectively. Taking the modified IEEE 6-machine 30-node system as an example for simulation analysis, the rationality of the model proposed in this paper has been effectively verified.

**[Key words]** EV; V2G; user's satisfaction; dynamic economic/emissions dispatch; multi-objective optimization; MOPSO

## 0 引言

在碳中和、碳达峰这一背景下, 国家大力发展绿色能源, 由于电动汽车 (EV) 具有良好的环保性等优势被大力推广和使用。经研究发现, 若以中等速度发展, 到 2030 年美国 EV 的比例将会达到汽车总量的 51%, 到 2050 年可达 62%<sup>[1]</sup>。随着国内充电设施的不断完善与扩充, 2021~2030 年是国内电动私家车大规模发展的阶段<sup>[2]</sup>, EV 的保有量逐年不断地增加, 新能源汽车将逐渐成为主要的交通工具, 以缓解能源、环境双重压力<sup>[3]</sup>。然而大规模 EV 的无

序充电, 将使得电网中的负荷“峰上加峰”等问题凸显, 给电力系统调度运行带来较大的负担<sup>[4]</sup>。

经济调度 (economic dispatch, ED) 是电力系统优化运行的一项基本内容, 而随着环境问题的日益突出, 污染物排放问题也逐渐为人们所重视并将其考虑在运行计划内, 由此引起了对经济排放调度 (economic emission dispatch, EED) 的分析和研究。由于 EED 实际上只适用于某个固定的时间间隔, 因此若要使得在 24 h 的时间跨度内同时将运营成本和排放成本降至最低, 则须对动态经济/排放调度 (dynamic economic emission dispatch, DEED) 问题进

**基金项目:** 贵州省科技计划项目 ([2018]5615); 第二批国家级新工科研究与实践项目 (E-NYDQHGC20202227)。

**作者简介:** 吴佳欣 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统优化运行与控制; 郝正航 (1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能电网及其仿真技术。

**通讯作者:** 郝正航 Email: haozhenghang@163.com

**收稿日期:** 2022-01-06

行研究<sup>[5]</sup>。与传统单时段、单目标的 ED 问题相比, DEED 是典型的非线性最优化问题,具有多时段、多目标、强约束和高维度等特点,尤其是在 EV 以“车-网”互动(vehicle to grid, V2G)模式<sup>[6]</sup>并入电网后,传统的 DEED 问题又迎来了新的挑战,因此成为了许多学者们的研究热点。

文献[7]建立了含插电式混合 EV 充放电的动态经济调度模型,将机组燃料成本、污染物排放成本等多个目标用单个目标、即总成本来表达,对日负荷曲线起到了明显的削峰填谷的效果。然而,仅考虑了 EV 的充放电时间约束,对 EV 复杂的随机过程建模过于简单。文献[8-9]以综合考虑经济与环境因素为基础,建立了单目标调度模型,并利用粒子群优化等算法获得了最佳的调度策略。然而,对 EV 的建模上,也只是考虑了 EV 的基本电池容量约束。此外,尽管这些文献均对经济与环境等多个目标进行了讨论,而实质上都是单目标调度问题,并未真正体现多目标之间的博弈关系。文献[10]综合考虑 EV 用户的出行需求、电池容量以及充放电特性等约束,建立了 V2G 模式下的电力系统 DEED 多目标调度模型,并运用 MOEA/D 算法获得了良好的多目标调度策略。然而,在考虑系统的潮流约束时,文章只是采用简单的 B 系数法进行了简化计算,降低调度问题本身难度的同时也增大了误差。文献[11]考虑复杂潮流约束、电池容量以及充放电特性等一系列约束,构建了融合 EV 削峰填谷的 DEED 多目标调度模型,讨论了使用 EV 实现调峰和填谷时对机组燃料费用和污染物排放的影响。然而,在以上的文献中,均默认所有 EV 是完全按照电网调度需求进行充放电,并未提及 EV 在参与 V2G 过程中用户的用电方式满意度与电网经济调度之间的对弈关系。在 V2G 模式下,若只考虑电网调度侧利益,而忽略用户的用电方式满意度,使得用户参与 V2G 前后用电方式变化较大,会引起用户的不适而拒绝参与 V2G。

基于以上分析,本文构建了 V2G 模式下考虑用户满意度的动态经济/排放多目标调度模型。该模型在兼顾系统经济性和环境效益的同时,还考虑了电网与用户双方利益,同时在电力系统常规约束外,充分考虑了 EV 的出行特性和电池的充放电特性等因素;最后利用粒子群算法对本文提出模型进行求解,模型的合理性和有效性通过仿真结果得到了充分验证。

## 1 EV 无序充电功率需求的建模及其对电网负荷的影响

### 1.1 基于蒙特卡洛法的 EV 充电功率需求

基于蒙特卡洛模拟法<sup>[12]</sup>的 EV 无序充电功率需求建模的设计流程如图 1 所示。分析指出,影响 EV 充电功率的首要因素是用户行为,具有较强的随机性,用户行为主要表现为日行驶里程和开始充电时刻。

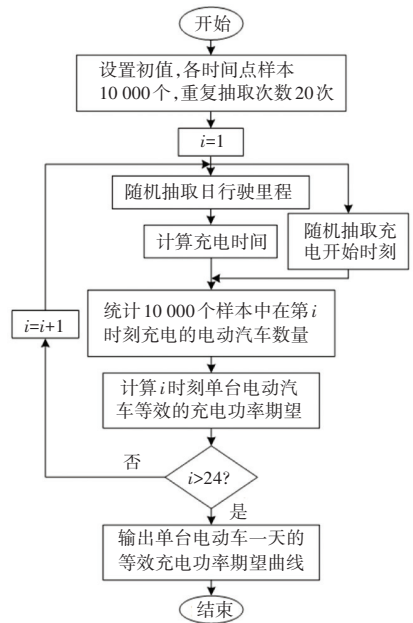


图 1 EV 无序充电功率需求建模的流程

Fig. 1 The flowchart of power demand modeling in the case of random charging of EV

根据文献[13]对日行驶里程和充电开始时刻的概率进行建模,得出日行驶里程和充电开始时刻的概率密度函数分别如式(1)和式(2)所示,并对日行驶里程和充电开始时刻的密度函数采用蒙特卡洛法进行随机抽样;其次根据式(3)~(5)可求得 EV 充电持续时间,结合充电开始时刻便可得到一天内单台 EV 的等效充电功率需求。结果如图 2 所示。

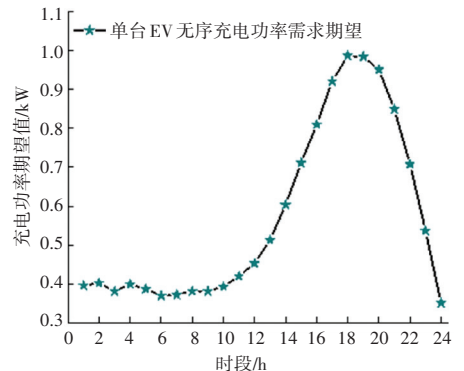


图 2 一天内单台 EV 的等效充电功率需求

Fig. 2 The equivalent charging power demand of a single EV in one day

电动汽车日行驶里程概率密度函数为:

$$f_D(x) = \frac{1}{x\sigma_D\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right], 0 < x \leq 200 \quad (1)$$

其中,  $\mu_D = 3.2, \sigma_D = 0.88$ 。

电动汽车充电开始时刻概率密度函数为:

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

其中,  $\mu_S = 17.6, \sigma_S = 3.4$ 。

假设充电功率  $P_C$  在 2~3 kW 范围内遵循均匀分布的规律,则电动汽车充电功率的概率密度函数为:

$$f_{P_C}(x) = \begin{cases} 1 & x \in [2, 3] \\ 0 & x \notin [2, 3] \end{cases} \quad (3)$$

根据 EV 日行驶里程与充电功率密度函数,可得出 EV 充电持续时间的计算公式为:

$$T_C = \frac{DW_{100}}{100P_C} \quad (4)$$

其中,  $T_C$  为充电持续时间;  $D$  为日行驶里程;  $W_{100}$  为百公里耗电量;  $P_C$  为充电功率。

假设 EV 日行驶里程与充电功率之间两者相互独立,则根据式(4)可得出 EV 充电持续时间的函数为:

$$f_{T_C}(x) = \frac{1}{1.61 \times 0.15} \int_2^3 \frac{1.61 \times 0.15}{x\sigma_D\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \ln 1.61 - \ln 0.15 + \ln p - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] dp \quad (5)$$

## 1.2 规模化 EV 无序充电对电网负荷的影响

为了说明 EV 在规模化入网后给电网负荷带来的影响,根据 1.1 小节的 EV 模拟充电功率,并考虑将在不同 EV 渗透率下的 EV 无序充电功率与原始负荷相叠加,以此作为等效的负荷曲线,针对负荷曲线的方差、峰谷差率和峰值等各项负荷指标进行分析。结果如图 3 所示。结果数据见表 1。

由图 3 和表 1 可以看出:一方面,大规模 EV 无序充电将导致电网负荷“峰上加峰”,同时增加负荷峰谷差,加剧负荷波动;另一方面,由于 EV 渗透率的不断增加,使得负荷峰值变大,负荷波动和负荷峰谷差也随之增加<sup>[14]</sup>。为了避免 EV 的无序充电加

大峰值负荷,增加对系统容量的需求和电力系统常规机组的调峰压力,可采取智能 V2G 充电方式,对 EV 充电需求进行调度,为实现电网调度的经济 and 环保目标提供保障。

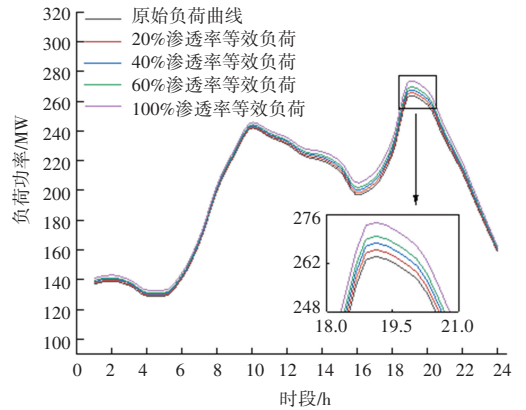


图 3 不同 EV 渗透率下的等效负荷曲线

Fig. 3 The equivalent load curves at different EV permeability

表 1 不同 EV 渗透率下等效负荷的各项指标

Tab. 1 The indicators of equivalent loads under different EV permeability

预测值	负荷方差/MW <sup>2</sup>	峰谷差率/%	负荷峰值/MW
原始负荷	1 754.94	51.11	263.88
20%渗透率	1 777.28	51.18	265.85
40%渗透率	1 800.03	51.25	267.81
60%渗透率	1 823.17	51.32	269.78
100%渗透率	1 870.69	51.46	273.71

## 2 V2G 模式下考虑用户满意度的动态经济/排放调度模型及求解

### 2.1 目标函数

(1) 负荷峰谷差最小<sup>[15]</sup>。研究推得的数学公式可写为:

$$\begin{cases} f_1 = \min(\text{Load}_{\max} - \text{Load}_{\min}) \\ \text{Load}_{\max} = \max(P_{L,t} + P_{ev,t}) \\ \text{Load}_{\min} = \min(P_{L,t} + P_{ev,t}) \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{ev,t} = \eta_c P_{ch,t} \Delta t - \frac{1}{\eta_D} P_{dis,t} \Delta t \quad (7)$$

其中,  $\text{Load}_{\max}$ ,  $\text{Load}_{\min}$  分别为调度期内总负荷的最大、最小值;  $P_{L,t}$  为  $t$  时刻典型日负荷值;  $P_{ev,t}$  为  $t$  时刻电动汽车集群充放电功率,  $P_{ev,t} > 0, P_{ev,t} < 0$  分别表示电动汽车充电、放电;  $P_{ch,t}, P_{dis,t}$  分别为电动汽车集群在  $t$  时刻的充、放电负荷;  $\eta_c, \eta_D$  分别为充、放电效率;  $\Delta t$  为调度时间间隔。

(2) 经济调度。以最小化调度期内系统所有发电机总的煤耗成本为目标。此处需用到的数学公式为:

$$F_1 = \min \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T F(P_{Gi,t}) \quad (8)$$

$$F(P_{Gi,t}) = a_i P_{Gi,t}^2 + b_i P_{Gi,t} + c_i \quad (9)$$

其中,  $N_G$  为发电系统中发电机组总数;  $T$  为调度总时段数;  $F(P_{Gi,t})$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的煤耗成本;  $P_{Gi,t}$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的有功出力;  $a_i$ 、 $b_i$  和  $c_i$  为发电机组  $i$  的发电成本系数。

(3) 环保调度。以调度期内系统所有发电机总的污染物排放量最少为目。该值可由如下数学公式求得:

$$F_2 = \min \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T H(P_{Gi,t}) \quad (10)$$

$$H(P_{Gi,t}) = 10^{-2} (\alpha_i P_{Gi,t}^2 + \beta_i P_{Gi,t} + \gamma_i) + \zeta_i e^{\lambda_i P_{Gi,t}} \quad (11)$$

其中,  $H(P_{Gi,t})$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的污染气体排放量,  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $\zeta_i$  和  $\lambda_i$  为常规机组  $i$  的排放系数。

## 2.2 约束条件

(1) 系统功率平衡约束。具体数学公式可写为:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t} - P_{D,t}^{Sum} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})] = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} Q_{i,t} - Q_{D,t}^{Sum} - V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j [G_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\delta_{ij})] = 0 \quad (13)$$

$$P_{D,t}^{Sum} = P_{L,t} + P_{ev,t} \quad (14)$$

其中,  $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$  分别为机组  $i$  在  $t$  时刻的有功、无功出力;  $P_{D,t}^{Sum}$  为  $t$  时刻计及 V2G 后的系统总有功负荷;  $Q_{D,t}^{Sum}$  为  $t$  时刻系统总无功负荷;  $V_i$ 、 $V_j$  分别为母线  $i$  和  $j$  的电压值;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为母线  $i$  与  $j$  之间的转移电导、电纳;  $\delta_{ij}$  为母线  $i$  与  $j$  之间的功角差;  $N_b$  为母线总数。

### (2) 系统不等式约束

① 发电机母线不等式约束。对此数学公式可表示为:

$$\begin{cases} V_{Gm,\min} \leq V_{Gm,t} \leq V_{Gm,\max} & m = 1, 2, 3, \dots, N_G \\ P_{Gm,\min} \leq P_{Gm,t} \leq P_{Gm,\max} & m = 1, 2, 3, \dots, N_G \\ Q_{Gm,\min} \leq Q_{Gm,t} \leq Q_{Gm,\max} & m = 1, 2, 3, \dots, N_G \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $V_{Gm,t}$  为  $t$  时刻发电机节点  $m$  的节点电压

值;  $V_{Gm,\max}$ 、 $V_{Gm,\min}$  分别为第  $m$  个机组所在母线电压上、下限;  $P_{Gm,t}$ 、 $Q_{Gm,t}$  分别为  $t$  时刻发电机节点  $m$  的机组有功、无功出力;  $P_{Gm,\max}$ 、 $P_{Gm,\min}$  分别为第  $m$  个机组的有功出力上、下限;  $Q_{Gm,\max}$ 、 $Q_{Gm,\min}$  分别为第  $m$  个机组的无功出力上、下限。

② 负荷母线不等式约束。对此数学公式可表示为:

$$V_{Ln,\min} \leq V_{Ln,t} \leq V_{Ln,\max}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N_{lb} \quad (16)$$

其中,  $V_{Ln,t}$  为  $t$  时刻第  $n$  个负荷节点电压值,  $V_{Ln,\max}$ 、 $V_{Ln,\min}$  分别为第  $n$  个负荷节点的节点电压上、下限。

③ 线路容量约束<sup>[16]</sup>。对此数学公式可表示为:

$$P_{l,\min} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\max} \quad (17)$$

其中,  $P_{l,t}$  为  $t$  时刻线路  $l$  流过的有功功率,  $P_{l,\max}$ 、 $P_{l,\min}$  分别为线路  $l$  允许流过的最大、最小有功功率。

### (3) 火电机组约束

① 备用容量约束。相应数学公式具体如下:

$$0 \leq P_{i,\max} - P_{i,t} \leq R_{i,\max+} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{i,t} - P_{i,\min} \leq R_{i,\max-} \quad (19)$$

其中,  $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$  分别为机组  $i$  的有功出力上、下限;  $R_{i,\max+}$ 、 $R_{i,\max-}$  分别为机组  $i$  的备用容量上、下限。

② 爬坡约束。相应数学公式具体如下:

$$0 \leq P_{i,t} - P_{i,(t-1)} \leq \delta_{i,\max+} \quad (20)$$

$$0 \leq P_{i,(t-1)} - P_{i,t} \leq \delta_{i,\max-} \quad (21)$$

其中,  $\delta_{i,\max+}$ 、 $\delta_{i,\max-}$  分别为机组  $i$  的爬坡上、下限。

### (4) 电动汽车约束

① EV 电池剩余电量约束。其运算公式见如下:

$$S_{ev,\min} \leq S_{ev,t} \leq S_{ev,\max} \quad (22)$$

$$S_{ev,t} = S_{ev,t-1} + P_{ev,t} \Delta t - S_{hd,t} \quad (23)$$

其中,  $S_{ev,t}$  为电动汽车在  $t$  时刻参与 V2G 调控的集群电池总电量;  $S_{ev,\max}$ 、 $S_{ev,\min}$  分别为电动汽车参与 V2G 调控的集群电池最大、最小总电量;  $S_{hd,t}$  为行驶过程中的电动汽车在  $t$  时刻所消耗的电量。

② EV 充、放电功率约束。其数学公式见如下:

$$\begin{cases} P_{ch,t} \leq P_{Nch} \\ P_{dis,t} \leq P_{Ndis} \end{cases} \quad (24)$$

其中,  $P_{Nch}$ 、 $P_{Ndis}$  分别为电动汽车集群充电功率和放电功率的额定值, 此处取为相等。



(5) 用户满意度约束。根据文献[17], 定义用户满意度为 EV 用户的用电舒适度。计算公式为:

$$\begin{cases} H_{S,t} \geq H_{S,\min} \\ H_{S,t} = 1 - \frac{|F_{S,t}|}{2P_{Nch}} \\ F_{S,t} = P_{ev,t} - N_{ev}E_t \end{cases} \quad (25)$$

其中,  $H_{S,t}$  为在各个时刻电动汽车集群的用电方式满意度;  $H_{S,\min}$  为在决策中电动汽车集群用电方式满意度所允许的最小值;  $F_{S,t}$  为电动汽车集群响应 V2G 前后的用电量在统计周期内各个时段的变化值;  $N_{ev}$  为参与 V2G 的电动汽车数量;  $E_t$  为单台 EV 在无序充电情况下  $t$  时刻的等效充电功率。

### 2.3 求解方法

为了兼顾用户侧的舒适度, 在 2.2 小节提出的模型中考虑了用户满意度约束, 以平衡电网与用户侧双方的利益, 既能满足电网对 EV 入网的管理, 又不影响用户正常的用车舒适度。

由于本文建立的模型约束多、维度高, 为简化文章的计算复杂性, 充分利用 EV 参与 V2G 的削峰填谷特性, 提出了如图 4 所示的分阶段优化调度策略<sup>[18-19]</sup>。首先, 文章在考虑用户满意度约束以及 EV 集群约束的基础上以负荷峰谷差最小为目标函数, 并利用 PSO 对模型进行求解, 得出最优的 EV 充放电功率调度结果以及优化后的负荷曲线。其次, 将优化后的负荷曲线作为输入, 考虑火电机组约束以及系统潮流约束等约束, 建立了兼顾经济性与环境性的经济/排放多目标调度模型, 并利用多目标粒子群优化算法 (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)<sup>[20]</sup> 对模型进行求解, 输出最终的调度策略。

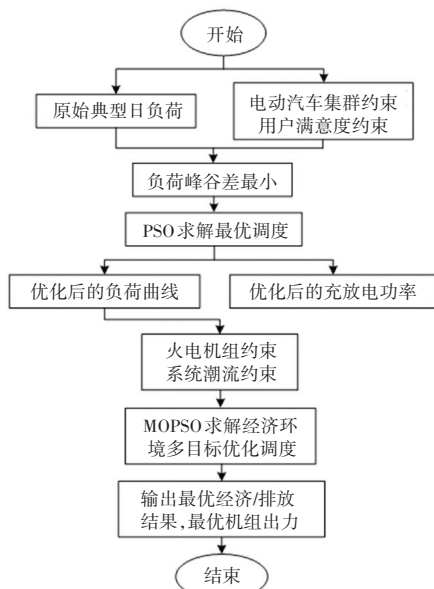


图 4 提出模型流程图

Fig. 4 The flow chart of the proposed model

## 3 算例分析

### 3.1 仿真系统与数据

本文利用图 5 中一个修改的 IEEE 6 机 30 节点系统进行实验分析, 其机组参数见表 2。选取 24 h 作为调度周期, 调度时间间隔设定为 1 h。

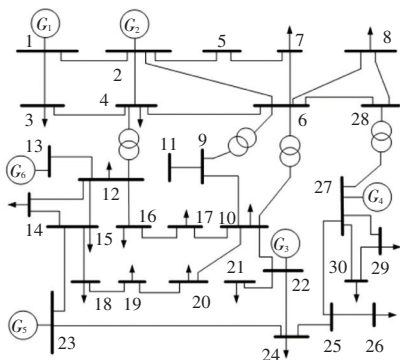


图 5 修改的 IEEE 6 机 30 节点系统

Fig. 5 The diagram of a modified IEEE 6-machine and 30-node system

表 2 火电机组参数

Tab. 2 The parameters for thermal power units

机组	出力上限/ MW	出力下限/ MW	爬坡率/ (MW · h <sup>-1</sup> )	$a$	$b$	$c$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\zeta$	$\lambda$
1	80.0	24.0	40.0	2.00E-02	2.00	10	6.49E-04	-5.55E-02	4.091	2.00E-04	2.86E-02
2	100.0	30.0	50.0	1.75E-02	1.75	10	5.64E-04	-6.05E-02	2.543	5.00E-04	3.33E-02
3	50.0	15.0	25.0	6.25E-02	1.00	20	4.59E-04	-5.09E-02	4.258	1.00E-06	8.00E-02
4	55.0	16.5	27.5	8.34E-03	3.25	10	3.38E-04	-3.55E-02	5.326	2.00E-03	2.00E-02
5	30.0	9.0	20.0	2.50E-02	3.00	20	4.59E-04	-5.09E-02	4.258	1.00E-06	8.00E-02
6	40.0	12.0	20.0	2.50E-02	3.00	10	5.15E-04	-5.56E-02	6.131	1.00E-05	6.67E-02

假设该系统内共有 20 000 辆电动汽车参与调度,每辆的电池容量均为 42 kW · h,每 100 km 耗电量均为 13.7 kW · h,最低允许荷电状态(State Of Charge, SOC)设定为电池额定容量的 5%,车载电池的充、放电效率设定为 0.85,用户最低满意度值设定为 0.6。

### 3.2 不同模型优化调度结果分析

为了对提出模型的有效性进行验证,本文分析了以下 3 种场景:

场景 1:EV 无序充电情况下的经济/排放调度;

场景 2:V2G 模式下不考虑用户满意度的经济/排放调度;

场景 3:V2G 模式下考虑了用户满意度的经济/排放调度。

3 种场景下负荷曲线与原始负荷曲线如图 6 所示,3 种场景下负荷的各项指标见表 3。由图 6、表 3 可以看出:原始负荷峰谷差为 135 MW,场景 1、场景 2 和场景 3 的负荷峰谷差分别为 146.94 MW、73.04 MW 和 101.25 MW;相对于原始负荷,当 EV 采用无序充电的场景 1 接入时,其负荷峰谷差反而增加了 11.94 MW,而在场景 2 和场景 3 下,负荷峰谷差分别减少了 61.96 MW 和 33.75 MW;而且还可以看出:与场景 3 相比,场景 2 的负荷峰谷差减少了 28.21 MW。场景 1、场景 2 和场景 3 的负荷峰值分别为 283.68 MW、230.44 MW 和 243.52 MW,与场景 1 相比,场景 2 和场景 3 的负荷峰值分别减少了 53.24 MW 和 40.16 MW。3 种场景下的负荷波动值分别为 45.22 MW、30.99 MW 和 38.21 MW。

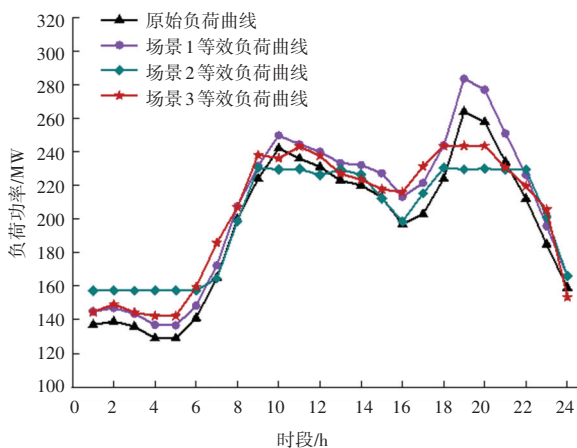


图 6 不同场景下的等效负荷曲线

Fig. 6 The equivalent load curves under different scenarios

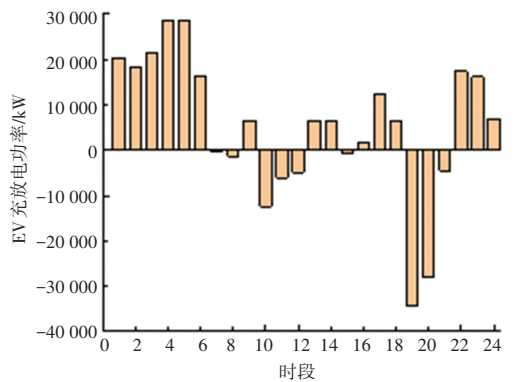
表 3 3 种场景下负荷特性指标对比

Tab. 3 The load characteristic index comparison of the three scenarios

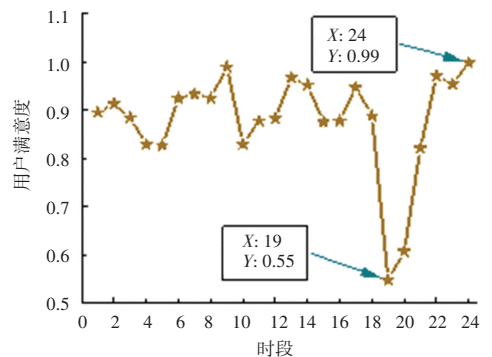
场景	峰值/MW	波动值/MW	峰谷差率/%
原始负荷	264.00	42.39	51.13
场景 1	283.68	45.22	51.80
场景 2	230.44	30.99	31.69
场景 3	243.52	38.21	41.58

由此可以看出,在电动汽车 V2G 模式下,可以实现削峰填谷的效果,减少系统负荷峰谷差,平滑负荷曲线。从电网的角度来看,场景 3 考虑了用户满意度约束,因此在电网负荷优化程度上各项指标较场景 2 较差,这表明在 V2G 模式中,电网的优化与用户的用电方式满意度之间存在着明显的博弈关系,但是相较于原始负荷曲线,在场景 3 下优化后的负荷曲线依旧保持了明显的削峰填谷效果。

为了说明考虑用户满意度前后对电动汽车用户用电的影响,图 7(a) 和图 7(b) 分别展示了一个调度周期内,在不考虑用户满意度的情况下 EV 集群的充放电过程和用户满意度的变化情况。图 8(a) 和图 8(b) 分别展示了一个调度周期内,在考虑用户满意度的情况下 EV 集群的充放电过程和用户满意度的变化情况。



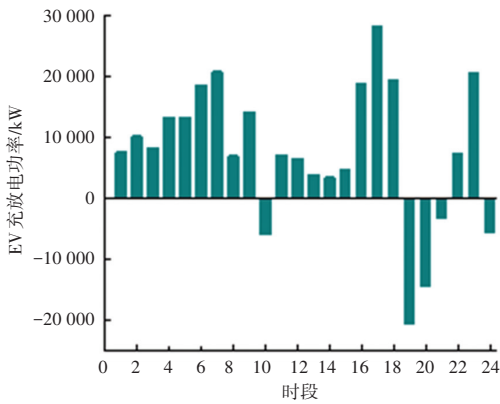
(a) 各时段 EV 充放电功率



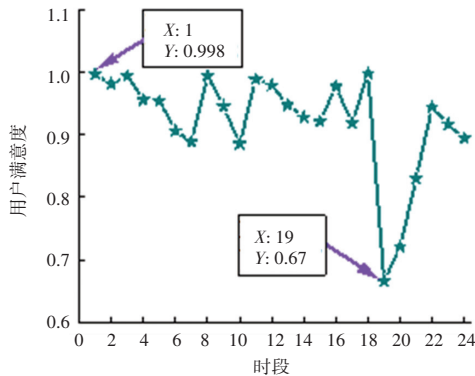
(b) 各时段用户满意度

图 7 不考虑用户满意度时的 EV 集群充放电功率

Fig. 7 The charging - discharging power of EV cluster without considering user's satisfaction



(a) 各时段 EV 充放电功率



(b) 各时段用户满意度

图8 考虑用户满意度时的 EV 集群充放电功率

Fig. 8 The charging-discharging power of EV cluster considering user's satisfaction

由图7可以看出:在不考虑用户满意度的情况下, EV 集群用电方式满意度的变化情况明显。满意度值在 24:00 时达到了 0.99, 接近满意度最大值;而在负荷高峰时段 19:00 时, 满意度值达到了最低, 仅有 0.55, 这是由于 EV 集群在负荷高峰时段的填谷作用所导致的, 同时 EV 集群充放电功率的波动幅度也比较大, 在  $-34\ 461.82\ \text{kW} \sim 28\ 410.06\ \text{kW}$  之间波动。由图8可以看出:当考虑用户满意度后, EV 集群充放电功率的波动幅度相对较小, 在  $-20\ 477.04\ \text{kW} \sim 28\ 191.28\ \text{kW}$  之间波动, 且用户的用电方式满意度最低值为 0.67, 符合将用户满意度控制在 0.6 以上的最低要求。此外, 2 种场景下的 EV 集群充放电功率的总体变化趋势几乎没有变化, 依旧体现了 V2G 模式下的削峰填谷效果。

3 种场景下的最优调度结果见表 4。由表 4 可以看出, 相较于场景 1 的无序充电模式, 场景 2 中的 EV 以不考虑用户满意度的 V2G 模式接入电网时, 系统内机组的最优燃料费用和最优污染物排放量分

别减少了 0.5 万元和 0.07 吨; 当采用场景 3、即考虑用户满意度的 V2G 模式接入电网时, 系统内机组的最优燃料费用和最优污染物排放量分别减少了 0.28 万元和 0.06 吨。

表 4 3 种场景下的最优调度结果对比

Tab. 4 The comparison of optimal scheduling results under three scenarios

场景	目标	燃料费用/万元	污染物排放量/吨
场景 1	经济最优	12.27	5.13
	环境最优	12.16	5.24
	折中解	12.19	5.15
场景 2	经济最优	11.77	5.06
	环境最优	11.69	5.17
	折中解	11.73	5.09
场景 3	经济最优	11.99	5.07
	环境最优	11.88	5.18
	折中解	11.91	5.13

由此可以看出:相比于场景 1, 采用智能的 V2G 模式进行充放电, 可以有效进行能量之间的双向交换, 并且对负荷削峰填谷的效果明显, 有利于减轻火电机组在负荷高峰时期的压力, 降低机组燃料费用和污染物排放量。通过对比场景 2 和场景 3, 可以看出考虑用户满意度时, 机组燃料费用和污染物排放量均比不考虑用户满意度时要高, 这是由于 EV 在参与 V2G 过程中用户的用电方式满意度与电网经济调度之间的对弈关系造成的, 使得在考虑用户满意度的情况下调度结果稍差。但是, 相比于场景 2、场景 3 对经济性与环境性的改善依旧明显。因此, 本文提出模型的有效性得到了验证。

限于篇幅, 为了说明本文调度策略的正确性, 图 9 和表 5 给出了场景 3 中最优折中解的具体情况。由此可以看出系统功率满足平衡关系。

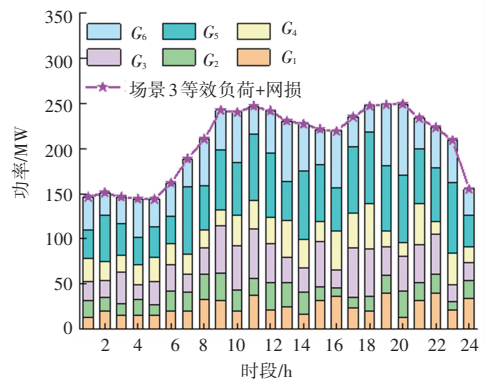


图9 场景3的功率平衡验证

Fig. 9 The power balance verification for scenario 3

表 5 场景 3 的最优折中解

Tab. 5 The optimal compromise solutions for scenario 3

时段	常规发电机组出力/MW						网损/ MW	典型日负荷/ MW	充放电功率/ MW
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6			
1	36.145	31.465	26.366	20.628	18.899	12.811	1.688	137	7.625
2	25.206	50.898	21.027	19.230	14.616	19.993	1.732	139	10.238
3	29.765	34.806	18.538	35.275	13.060	14.707	1.841	136	8.310
4	42.241	30.000	22.326	16.500	17.994	14.974	1.756	129	13.278
5	31.156	33.029	27.420	25.631	11.517	15.102	1.577	129	13.278
6	36.184	30.741	23.442	29.036	22.293	19.823	1.956	141	18.564
7	31.149	74.399	22.447	20.120	20.472	19.915	2.712	165	20.790
8	51.231	49.206	20.209	28.908	27.648	33.058	3.250	200	7.009
9	44.560	65.576	17.703	53.176	30.000	31.578	4.439	224	14.153
10	55.044	58.690	34.484	48.465	23.386	20.092	4.048	242	-5.887
11	31.426	73.198	31.369	55.000	18.923	37.087	3.928	236	7.076
12	46.894	70.415	30.128	43.459	30.000	20.781	4.074	231	6.603
13	67.611	43.131	40.231	28.646	26.677	24.320	3.664	223	3.952
14	51.996	76.423	31.400	26.171	24.545	16.746	3.851	220	3.431
15	39.561	62.760	22.527	49.515	15.983	31.015	3.587	213	4.773
16	63.220	47.559	42.782	20.425	9.000	36.380	3.420	197	18.946
17	33.313	72.766	38.830	55.000	11.313	23.813	3.843	203	28.191
18	28.596	80.293	49.782	52.407	16.337	19.984	3.877	224	19.523
19	67.196	73.156	16.462	32.262	19.760	39.670	4.983	264	-20.477
20	78.950	74.651	15.000	38.175	30.000	12.530	5.782	258	-14.477
21	33.691	60.948	45.643	41.626	19.961	31.869	3.086	234	-3.348
22	44.092	59.467	15.000	44.071	20.582	40.000	3.713	212	7.498
23	46.536	78.064	35.087	19.515	9.293	20.629	3.455	185	20.669
24	28.514	35.571	17.993	19.541	19.998	33.548	1.783	159	-5.618

#### 4 结束语

环境经济调度一直都是一个值得关注的问题, 基于新能源汽车入网这一背景, 本文提出了 V2G 模式下考虑用户满意度的动态经济/排放调度模型。具体工作如下:

(1) 根据电动汽车用户的用电行为, 基于蒙特卡洛法对 EV 的充电功率进行模拟, 并分析了不同 EV 渗透率下无序充电对电网负荷的影响, 结果表明了无 V2G 参与的情况下大规模的 EV 入网会引起电网总负荷峰值以及负荷波动的增加。

(2) 针对无序充电给电网负荷特性带来的不利影响, 在综合考虑电网和用户双侧利益的基础之上, 建立了考虑用户满意度约束和计及 EV 可调度 V2G 模式的经济/排放多目标调度模型。该模型不仅能够兼顾经济与环境双重效益, 同时还能兼顾电网与

用户双方之间的利益。此外, 从实验结果还可以看出, 电动汽车在 V2G 模式下能够有利于系统减少污染气体排放和机组燃料费用。

(3) 以修改的 IEEE 6 机 30 节点系统进行仿真计算, 并分析了不同的调度方案, 结果验证了本文提出调度模型的合理性及有效性。

#### 参考文献

[1] DUVALL M, KNIPPING E. Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles. Volume 1: Nationwide greenhouse gas emissions [R]. Palo Alto, USA: Electric Power Research Institute, 2007.

[2] 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(04): 1-10, 25.

[3] WANG Bo, DEGHANIAN P, ZHAO Dongbo. Chance-constrained energy management system for power grids with high proliferation of renewables and electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2324-2336.



- [4] 葛少云, 王龙, 刘洪, 等. 计及电动汽车入网的峰谷电价时段优化模型研究[J]. 电网技术, 2013, 37(08): 2316-2321.
- [5] 田壁源, 戚红艳, 张新燕, 等. 基于MO-APSO的含风电场电力系统动态环境经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 57-64.
- [6] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power fundamentals; Calculating capacity and net revenue [J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [7] 何明杰, 彭春华, 曹文辉, 等. 考虑电动汽车规模化入网的动态经济调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(09): 82-88.
- [8] SABERA Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [9] GHOLAMIA, ANSARI J, JAMEI M, et al. Environmental/economic dispatch incorporating renewable energy sources and plug-in vehicles [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(12): 2183-2198.
- [10] 朱永胜, 王杰, 瞿博阳, 等. 含电动汽车的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 16-23.
- [11] LIANG Huijun, LIU Yungang, LI Fengzhong, et al. Dynamic economic/emission Dispatch including PEVs for peak shaving and valley filling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(4): 2880-2890.
- [12] 石文超, 吕林, 高红均, 等. 考虑需求响应和电动汽车参与的主动配电网经济调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 41-51.
- [13] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
- [14] 严俊, 严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 127-134.
- [15] 侯建朝, 侯鹏旺, 孙波. 计及需求响应的电动汽车和可再生能源多阶段动态经济环境调度优化模型[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(09): 104-112.
- [16] 王明松. 风-光-蓄-火联合发电系统的两阶段优化调度策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(05): 75-82.
- [17] 李晖, 康重庆, 夏清. 考虑用户满意度的需求侧管理价格决策模型[J]. 电网技术, 2004, 4(23): 1-6.
- [18] 赵玉, 徐天奇, 李球, 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.
- [19] 谢琳宇, 唐忠, 黄星宇, 等. 考虑分布式电源和电动汽车不确定性的双层动态配网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 1-11.
- [20] 张子冰, 仇梦林, 李莎. 基于多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 1-10.

(上接第87页)

- [4] 李航, 邓颖红. 基于注意力机制优化EDM机场客流量预测[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(10): 307-311.
- [5] YANG Qiang, LIU Yang, CHENG Yong, et al. Federated Machine Learning: Concept and Applications [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2019, 10(2): 12.
- [6] ARMKNECHT F, BOYD C, CARR C, et al. A guide to fully homomorphic encryption [J]. IACR Cryptol. ePrint Arch., 2015, 2015: 1192.
- [7] PAILLIER P. Public-key cryptosystems based on composite degree residuosity classes [C]// Advances in Cryptology-EUROCRYPT '99. Berlin: Springer, 1999: 223-238.
- [8] HARDY S, HENECKA W, IVEY-LAW H, et al. Private federated learning on vertically partitioned data via entity resolution and additively homomorphic encryption [J]. arXiv preprint arXiv: 1711.10677, 2017.