

引用格式:房超运,杨昆,柴瑞环.分时电价下含电动汽车的微电网群双层多目标优化调度[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):124-133.

Citation: FANG Chaoyun, YANG Kun, CHAI Ruihuan. Two-layer multi-objective optimal dispatching of microgrid group with electric vehicles under time-of-use electricity prices[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 124-133.

分时电价下含电动汽车的微电网群双层 多目标优化调度

房超运, 杨 昆, 柴瑞环

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘 要:为解决大规模电动汽车无序充电导致电网出现“峰上加峰”现象,依据电动汽车充电地点的不同将配电网划分为居民区、办公区、商业区微电网,提出基于峰谷差、分时电价、用户充电满意度多目标下的电动汽车充电模式,建立了微电网内运营商峰谷差最小—用户充电费用最少和充电满意度最大的双盈多目标优化调度模型,采用上海市实际居民办公商业混合体,基于 MATLAB/NSGA-II 算法求解负荷整形度;采取粒子群优化算法求解电动汽车车主达到充电最优满意度;实现对电动汽车充电时刻和充电功率的引导。实际算例仿真结果表明,该方法能有效降低配电网负荷峰谷差,提高电动汽车充电效率,满足用户充电需求。

关 键 词:微电网群;电动汽车;分时电价;多目标优化调度;双层优化

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.012 **中图分类号:** TM933 **文章编号:** 1673-9140(2024)01-0124-10

Two-layer multi-objective optimal dispatching of microgrid group with electric vehicles under time-of-use electricity prices

FANG Chaoyun, YANG Kun, CHAI Ruihuan

(College of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To address the "peak upon peak" phenomenon caused by unorganized charging of electric vehicles on a large scale, this study divides the distribution network into microgrids for residential, office, and commercial areas based on the location of electric vehicle charging. A multi-objective electric vehicle charging mode is proposed, considering peak-to-valley difference, time-of-use electricity prices, and user satisfaction. A dual-profit multi-objective optimization scheduling model is established to minimize the peak-to-valley difference for microgrid operators while minimizing user charging costs and maximizing charging satisfaction. Real mixed residential, office, and commercial complexes in Shanghai are used as a case study, and the MATLAB/NSGA-II algorithm is employed to solve the load shaping degree. The particle swarm optimization algorithm is used to solve the optimal charging satisfaction for electric vehicle owners, guiding the timing and power of electric vehicle charging. Simulation results of the actual case demonstrate that this method effectively reduces the peak-to-valley difference in the distribution network, improves the efficiency of electric vehicle charging, and meets user charging demands.

Key words: microgrid group; electric vehicle; time-of-use price; multi-objective optimal dispatch; two-tier optimizations

为了应对全球气候变暖和化石能源日益短缺的挑战,中国提出了“双碳”目标。国家电网公司发

布了“碳达峰、碳中和”行动方案^[1]。开发和利用各种新型清洁能源,将电动汽车(electric vehicle, EV)

收稿日期:2022-12-06;修回日期:2023-05-17

基金项目:国家自然科学基金(52207121)

通信作者:杨 昆(1982—),女,博士,讲师,主要从事电力系统调度优化及电力市场方面的研究;E-mail: 1670760492@qq.com

与分布式能源相结合,对实现多种能源的优势互补具有十分重要的意义。大量电动汽车接入微电网,对微电网群的协调优化运行带来了新的挑战^[2]。随着分布式新能源的发展,传统的单一微网模式已经处于劣势^[3]。微电网群将多个单一的微电网结合在一起,增强了微网系统的稳定性,使可再生能源能够灵活满足电力的多元化需求,并减少了电动汽车充电负荷对传统大电网的影响^[4]。在城市中,电动汽车数量众多,其电池具有电源与负荷的双重特性,与分布式电源具有互补性^[5]。发展城市风光储一体化,可以减少远距离输电损耗,实现能源利用的最大化^[6]。

电动汽车充电难、充电价格不合理等问题日益突出。文献[7-8]提出了电价引导的策略,通过制定动态电价引导EV车主进行有序充电,降低系统峰谷差,减少运行成本。文献[9]提出电动车智慧传输路径,通过云传输来实现电动车的充电协调与资源优化匹配功能。文献[10-11]通过在楼宇中安装风力发电机,模拟了电动汽车在楼宇中的充电行为特征,验证了其在城市中的应用可能性。EV充电站具有分布式特点,在经济相对发达充电站密集的区域,辅以光伏发电,一定程度上减轻了电网负担,并提高了供电可靠性^[12]。以往对于EV优化调度的研究以单层优化、单目标优化为主,但EV优化调度是复杂的多目标优化问题,因此文献[13]建立了包含EV的双层优化模型,通过博弈实现了充电站收益与电动汽车车主利益之间的平衡。随机性与不确定性是EV充电时空需求方面的明显特点,导致充电桩利用率不高^[14],因此需要在电动汽车充电优化调度方面进行研究。

基于以上背景,本文针对基于负荷变化制定分时充电电价的电动汽车有序充电优化调度策略进行了研究。我们构建了运营商—用户双层多目标优化调度模型,将配电网划分成居民区、办公区、商业区微电网。在此基础上,以微电网内电动汽车为研究对象,依据负荷的变化制定日前分时充电电价,兼顾电网供电可靠性与电动汽车用户的利益,引导电动汽车用户参与有序充电。

1 含电动汽车的微电网群与日前分时电价

通过微电网群能量管理系统对微电网进行控制,控制平台在前一天将微网内部基本用电负荷、

光伏与风力发电机出力以及电动汽车行为信息上传至管理系统,从而对次日的微电网群内电动汽车进行调度。微网群结构示意图如图1所示。

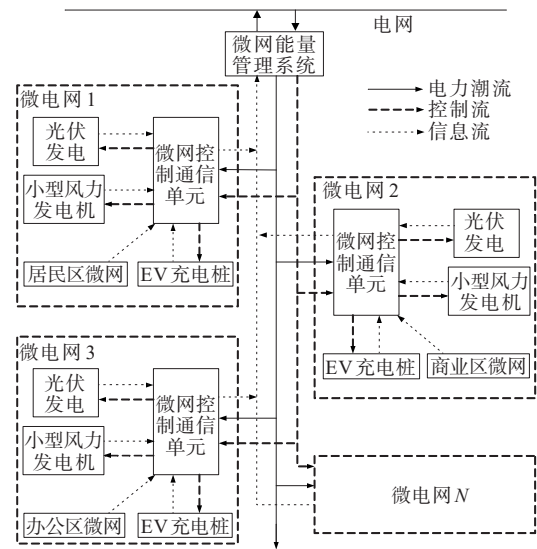


图1 微电网群结构

Figure 1 Schematic diagram of microgrid group structure

1.1 光伏发电模型

光伏发电的发电功率受到光照强度、外界温度等多种因素的影响^[15]。其输出功率可近似表示为

$$P_{PV} = f_{PV} P_{stc} \frac{A}{A_s} [1 + \alpha(T_s - T_{stc})] \quad (1)$$

式中, P_{PV} 为光伏发电输出功率; f_{PV} 为发电功率系数; P_{stc} 为基准情况下输出的额定功率; A 为实际受到的光照强度; A_s 为额定光照强度; α 为发电功率温度系数; T_s 为光伏板表面温度; T_{stc} 为标准条件下额定表面温度。

1.2 风力发电模型

风力发电机的效率受多种因素影响,包括风速大小、风向以及风速持续的时间等。垂直轴风力发电机组具有风能利用率高、启动风速低等优点。在低风速下,结构更简单的垂直轴风力涡轮机将提供自启动功能,并且不需要任何偏航机构^[16]。由于城市中高层建筑物数量众多,建筑物顶部的风速相对较大,这为小型风力发电机的安装和使用提供了条件。风电出力具有很大的不确定性,很难直接得到风机安装地点的风速,常用以下公式近似表示风力发电机功率:

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho S V_{\infty}^3 C_P = 0.14 \rho S V_{\infty}^3 \quad (2)$$

式中, P_{WT} 为风力发电功率; ρ 为空气密度; S 为转

子扫掠面积; V_∞ 为风速; C_p 为转子功率系数, 取 0.28。

1.3 电动汽车充电方式

目前, 常见的电动汽车充电有交流充电、直流充电与换电 3 种方式^[17]。交流充电应用最广, 在充电时电流较小, 适用于家庭充电。直流充电是将交流电整流成直流电供给电池充电, 多用在集中充电站, 其充电电流大, 输出功率高, 在对充电速度要求高的情况下使用。换电是通过更换已充满电的电池组来达到充满电的效果, 但是由于不同汽车品牌的电池型号不统一, 成为制约换电措施的因素^[18]。

电动汽车充电桩的功率由 EV 的数量和充电时间长短决定, 充电时间长短取决于初始化荷电状态 (state of charge, SOC), 表示电池当前的电量, 起始时刻的荷电状态和充电时长分别为

$$S = (1 - d/d_m) \times 100\% \quad (3)$$

$$t = \frac{(1 - S) \cdot E}{P_n \cdot k} \quad (4)$$

式中, S 为起始时刻的荷电状态; d 为充满电之后的日行驶里程; d_m 为充满电之后能行驶的最远距离; t 为充电时间; E 为汽车电池容量; P_n 为充电功率; k 为充电效率。

1.4 电动汽车行为特性

电动汽车充电时间与行驶里程等特征不确定性大^[19], 用对数正态分布描述其行驶距离的概率, EV 初始充电时间与结束时间的概率用正态分布表示。EV 行驶距离的概率密度函数如下:

$$f_s(x) = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (5)$$

式中, f_s 为行驶距离的概率密度函数; x 为行驶里程; μ_s 、 σ_s 分别为期望和方差。

电动汽车初始充电时间与充电结束时间的概率密度函数分别为

$$f_{t1}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right), & \mu_t - 12 < x < 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - (\mu_t - 24))^2}{2\sigma_t^2}\right), & 0 < x < \mu_t - 12 \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{t2}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right), & \mu_t + 12 < x < 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[x - (\mu_t + 24)]^2}{2\sigma_t^2}\right), & 0 < x < \mu_t + 12 \end{cases} \quad (7)$$

式中, f_{t1} 、 f_{t2} 分别为充电时间与充电结束时间的概率密度函数; μ_t 、 σ_t 分别为期望和方差。

用电动汽车到达和离开微电网的时间来描述电动汽车的行为特征, 虽然每台电动汽车出行以及充电时间有很大的不确定性, 但相同类型的微电网内电动汽车行为特征具有相似性^[20]。在大量数据分析的基础上, 不同的微电网有各自独特的规律。

电动汽车充电行为受价格的影响较大, 当电动汽车充电价格较低时, 会有较多的电动汽车选择充电, 电动汽车的参与度较高, 反之则会减少电动汽车参与调度的可能性。定义参与度 λ 为所有响应电网调度的电动汽车充电占电动汽车总数量的比例。

$$\lambda = \frac{N_p}{N} \times 100\% \quad (8)$$

式中, λ 为参与度; N_p 为参与电网调度的电动汽车数量; N 为电网中电动汽车总数量。

1.5 日前分时电价模型

制定灵活合理的 EV 充电电价能调动车主参与电网调度的积极性, 但目前 EV 充电电价多以固定电价的形式存在, 电价形式较为单一, 不能反映不同时段和负荷情况下的供需关系, 这限制了 EV 充电电价的灵活性和适应性。因此, 为鼓励车主参与电网调度, 实现电网的高效稳定运行, 提前一天对微网内用电情况预测, 依据每时间段负荷的不同, 根据负荷变化确定日前分时电价, 作为电动汽车用户的充电电价, 即

$$C_t = C_B + \frac{P_{t,t} + \sum_{i=1}^N P_{i,t} x_{i,t}}{P_{\max}} C_s \quad (9)$$

式中, C_t 为 EV 在 t 时段充电电价; C_B 为固定电价; $P_{t,t}$ 为 t 时段的除 EV 外的用电负荷; N 为 EV 数量; $P_{i,t}$ 为 t 时段 EV i 的充电功率; P_{\max} 为一天内负荷最大值; C_s 为浮动电价; $x_{i,t}$ 为 t 时段 EV 充电状态, 具体表示为

$$x_{i,t} = \begin{cases} 0, & \text{第 } i \text{ 辆车在 } t \text{ 时段不充电} \\ 1, & \text{第 } i \text{ 辆车在 } t \text{ 时段充电} \end{cases} \quad (10)$$

依据负荷变化制定的分时电价,当负荷较高时,有大量电动汽车接入会导致充电电价升高,对一些用户而言会选择换个时间段充电,从而实现对用户充电行为的引导。

2 微网群双层多目标优化调度

考虑微电网与电动汽车用户双方利益,建立含电动汽车的微网群双层多目标优化调度模型。外层兼顾微网系统稳定性与参与电动汽车调度的用户充电费用,依据制定的日前分时充电电价对电动汽车充电行为进行引导;内层以电动汽车用户充电满意度最大为目标,构建双层模型,实现微网群的优化运行。

2.1 外层优化

为保证电网系统运行稳定性,以微电网内消纳新能源出力后的净负荷波动最小作为目标函数1,公式为

$$\min f_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} [(P_{\text{load}}^k(t) + P_{\text{EV}}^k(t) - P_{\text{PV}}^k(t) - P_{\text{WT}}^k(t)) - \bar{P}_{\text{load}}^k] \quad (11)$$

式中, f_1 为目标函数1; K 为微电网的数量; $P_{\text{load}}^k(t)$ 为微电网 k 在时段 t 的基本负荷; $P_{\text{PV}}^k(t)$ 、 $P_{\text{WT}}^k(t)$ 分别为第 k 个微电网在时段 t 的光伏发电、风力发电预测出力; $P_{\text{EV}}^k(t)$ 为第 k 个微电网在时段 t 的电动汽车充电功率; \bar{P}_{load}^k 为微电网 k 的平均负荷功率,计算公式为

$$\bar{P}_{\text{load}}^k = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{load}}^k(t) + P_{\text{EV}}^k(t) - P_{\text{PV}}^k(t) - P_{\text{WT}}^k(t)) \quad (12)$$

从电动汽车用户的角度考虑,将参与调度的电动汽车用户充电费用最少作为目标函数2,公式为

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_k} (C_t P_{i,t}) \quad (13)$$

式中, f_2 为目标函数2; K 为微电网的数量; N_k 为第 k 个微电网中参与调度的电动汽车数量; C_t 为在时段 t 电动汽车充电价格; $P_{i,t}$ 为在时段 t 电动汽车 i 的充电平均功率。

外层优化需要考虑系统功率平衡约束,风机、光伏出力约束,传输线路容量约束。

1) 系统功率平衡约束。

$$p_{\text{WT}}(t) + p_{\text{PV}}(t) + p_{\text{grid}}(t) = p_{\text{Load}}(t) + p_{\text{CP}}(t) \quad (14)$$

式中, $p_{\text{WT}}(t)$ 、 $p_{\text{PV}}(t)$ 、 $p_{\text{grid}}(t)$ 分别为 t 时刻风力发电

机、光伏发电、主电网出力; $p_{\text{Load}}(t)$ 、 $p_{\text{CP}}(t)$ 分别为普通负荷、充电桩消耗功率。

2) 风力发电机出力约束条件。

$$0 \leq p_{\text{WT}}^k(t) \leq p_{\text{WT}}^{\text{max}}(t) \quad (15)$$

式中, $p_{\text{WT}}^{\text{max}}(t)$ 为风机在 t 时刻最大出力。

3) 光伏发电出力约束条件。

$$0 \leq p_{\text{PV}}^k(t) \leq p_{\text{PV}}^{\text{max}}(t) \quad (16)$$

式中, $p_{\text{PV}}^{\text{max}}(t)$ 为光伏发电在 t 时刻最大出力。

4) 传输线路容量限制。

考虑到第 k 个微电网与其他微电网有电能交换,受传输线路容量限制,设其与外电网的联络线允许的最大传输功率为 $P_{l,k}^{\text{max}}$,有

$$P_{g,k}^t \leq P_{l,k}^{\text{max}} \quad (17)$$

式中, $P_{g,k}^t$ 为在 t 时外电网向微网输送的功率。

2.2 内层优化

用电动汽车SOC值来描述电动汽车电量,电动汽车车主达到出行满意是充电结束时电动汽车的SOC达到自己的期望值。因此内层目标函数为电动汽车车主达到最优满意度,公式为

$$\min f = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_k} (S_i^{\text{end}} - S_i^{\text{expect}})^2 \quad (18)$$

式中, f 为内层目标函数; S_i^{end} 为第 i 辆EV充电结束时的SOC, S_i^{expect} 为第 i 辆EV车主期望充电结束时的SOC。

内层优化需考虑充电功率与电动汽车的SOC约束。

1) 充电功率约束。

$$0 \leq P_i(t) \leq P_{\text{charge}}^{\text{max}} \quad (19)$$

式中, $P_i(t)$ 为第 i 辆EV的充电功率; N^k 为第 k 个微电网中EV充电数量; $P_{\text{charge}}^{\text{max}}$ 为EV最大充电功率。

2) 电动汽车SOC约束。

$$S^{\text{min}} \leq S_i(t) \leq S^{\text{max}} \quad (20)$$

式中, S^{min} 为电动汽车SOC允许最小值; S^{max} 为电动汽车SOC允许最大值; $S_i(t)$ 为电动汽车在时段 t 的SOC值。

2.3 双层多目标优化求解流程

外层采用NSGA-II算法解决同时也要考虑系统负荷波动与电动汽车用户充电费用最少的多目标优化问题。以微网群内电动汽车充放电计划为自变量,根据评判标准从外层优化的Pareto解集中选出某一组解,作为电动汽车参与调度的整体充放电计划。再通过内层以电动汽车车主充电期望值最大为目标函数,得到每辆电动汽车车主最满意的

充电量,采用粒子群算法求解。当所得解不满足实际情况时,返回至外层多目标优化阶段,重新选择一组解,继续进行内层优化,直到得到的解满足实际情况。优化求解整体流程如图2所示。

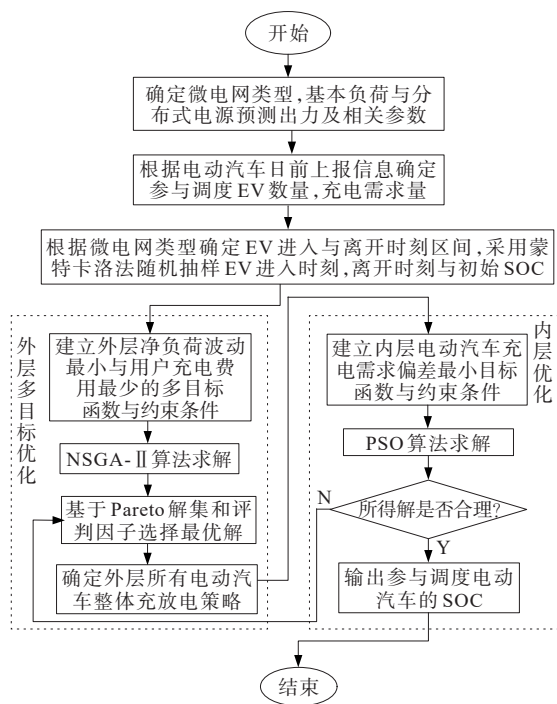


图2 优化求解流程

Figure 2 Optimization solution flow chart

3 算例分析

3.1 参数模型设置

将某区域分成居民区、办公区和商业区微电网,且每个微网都安装有光伏发电与风力发电系统,规定光伏与风力发电最大消纳功率分别为250 kW、200 kW。假设该区域共有电动汽车 $N=1\ 000$ 辆,私家车与网约车数量比为4:1,电动汽车用户调度意愿分别为 $\lambda=20\%$ 、 40% 、 60% ,即分别有200辆、400辆和600辆电动汽车参与的情况下,研究EV在微电网中的优化调度。假设EV充电结束后SOC为0.8~0.95,车主满意的平均SOC为0.88。电动汽车无序充电时的电价以居民峰谷电价加服务费的形式制定,并保证一天内电动汽车充电电价的平均值为恒定值,取1元/(kW·h),与有序充电电价的平均值一致,私家车与网约车电池参数如表1所示。对微网内基本负荷及新能源出力进行预测,得到的各微网内负荷与新能源出力曲线如图3所示。

表1 电动汽车参数

Table 1 Electric vehicle parameters

参数	电池容量/(kW·h)	SOC 上下限	最大充电功率/kW	充电效率/%
私家车	30.0	0.1/0.95	7	95
网约车	52.5	0.1/0.95	50	95

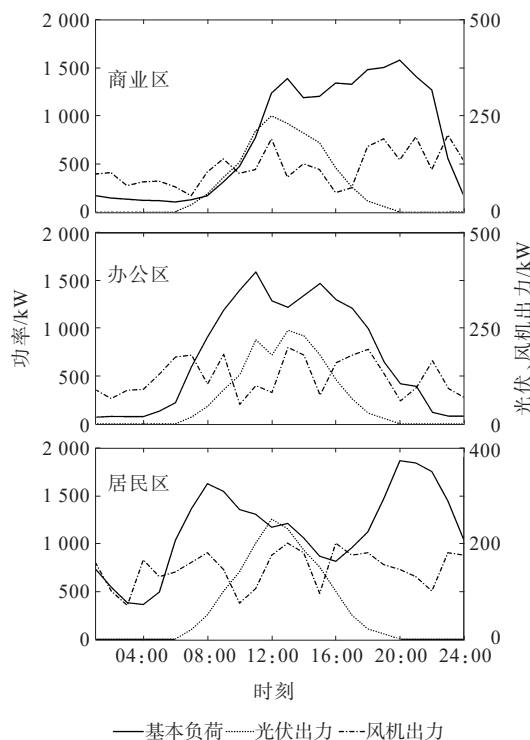


图3 各微网内负荷与新能源出力曲线

Figure 3 Curves of load and new energy output in microgrids

3.2 结果分析

针对电动汽车行为特征,采用蒙特卡洛模拟电动汽车到达与离开时的概率分布,得到如图4所示的概率分布。若选择到达时即充电,则居民区电动汽车充电集中在16:00至次日06:00,办公区集中在07:00至16:00,商业区集中在10:00至20:00。

提前一天对负荷进行预测,得到依据负荷变化制定的日前分时充电电价与无序充电时的峰谷电价如图5所示。

由图5可知,制定的分时充电电价与无序充电电价相比有更好的灵活性,在夜间充电电价较低,吸引更多的车主选择此时充电,17点之后因用电负荷开始增大,通过提高电价减少用户在此时段充电,以降低负荷高峰期的用电量。

当 $\lambda=20\%$ 时,参与有序充电调度的电动私家车和网约车数量分别为160辆和40辆,不参与调度的电动汽车使用无序充电方式,采用NSGA-II算法

对外层目标进行求解,设置种群规模为 100,迭代次数最大为 1 000 次,得到 Pareto 前沿如图 6 所示。

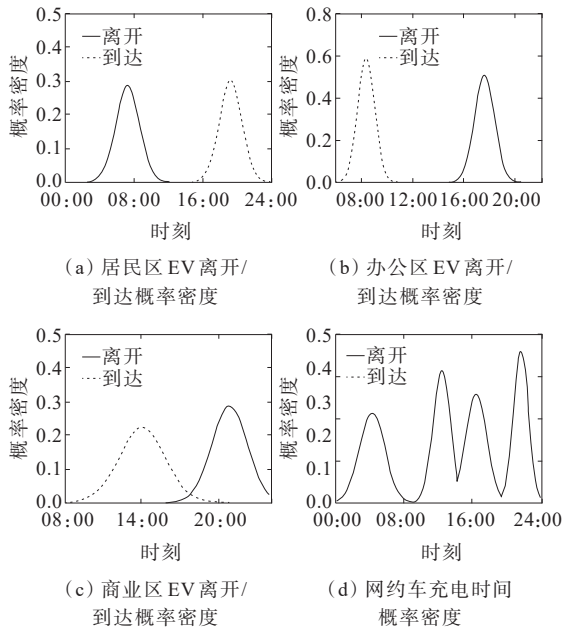


图 4 电动汽车到达与离开概率密度

Figure 4 Probability density of arrival and departure of EV

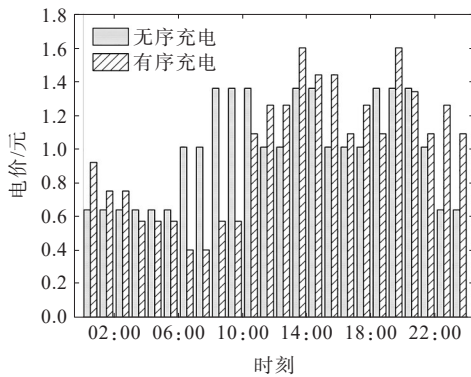


图 5 日前分时充电电价

Figure 5 Time-of-use charging electricity price

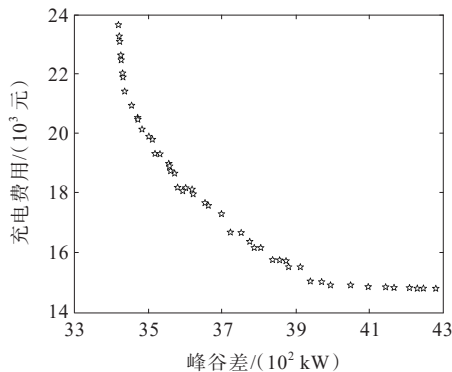


图 6 20% 参与度下 Pareto 前沿

Figure 6 Pareto front with 20% participation

将目标函数和最大值之差与目标函数最大值、最小值之差的比值作为目标函数的评判因子,将目标函数 1、2 评判因子的平均值作为综合评判因子,得到的综合评判因子的最大解作为结果。20% 参与度下电动汽车充电费用与各微电网负荷峰谷差情况如表 2 所示。

表 2 20% 参与度下电动汽车充电费用与峰谷差

Table 2 Electricity revenue and peak-to-valley difference with 20% participation

微网类别	EV 参与情况	峰谷差/kW	EV 充电费用/元
居民区	EV 不参与	1 638	—
	EV 无序	2 126	9 651
	20% 有序	1 490	9 113
办公区	EV 不参与	1 478	—
	EV 无序	1 733	6 772
	20% 有序	1 404	5 994
商业区	EV 不参与	1 488	—
	EV 无序	1 606	4 379
	20% 有序	1 428	3 958
配电网	EV 不参与	3 679	—
	EV 无序	4 088	20 307
	20% 有序	3 524	19 065

表 2 中,无序充电时增加了负荷峰谷差,导致了“峰上加峰”的现象。对整个配电网而言,有序充电能够有效降低峰谷差,无序充电时一天内的峰谷差最大,从 EV 无序充电的 4 088 kW 降至 3 524 kW。与无序充电相比,有序充电能够减少负荷尖峰现象,使负荷曲线变得较为平滑。在 EV 有序充电之后,不仅减少了负荷峰谷差,还降低了用户的充电费用。

将微电网内消纳新能源出力后作为净负荷,无序充电和有序充电均为叠加电动汽车充电功率后的负荷功率,其优化调度后负荷曲线如图 7 所示。当电动汽车以无序充电方式接入微电网时,由于其充电行为不受微电网控制,容易出现负荷“峰上加峰”的现象。尤其是在居民区微电网中,19:00 至 22:00 为普通用电负荷高峰,与蒙特卡洛模拟的电动汽车充电时间一致,此时车主选择回家后即给电动汽车充电,导致电动汽车接入微电网时增加了总用电负荷。当电动汽车以有序充电方式接入微电网时,在用电低谷时进行充电,由于充电电价较低,在用电高峰时停止或减少对电动汽车的充电,能够降低负荷峰谷差。相比于无序充电,有序充电能够

明显改善微电网的运行情况。在光伏与风力发电机并网之后,还能够减少高峰期从外电网输送电能的压力,起到一定的削峰作用。

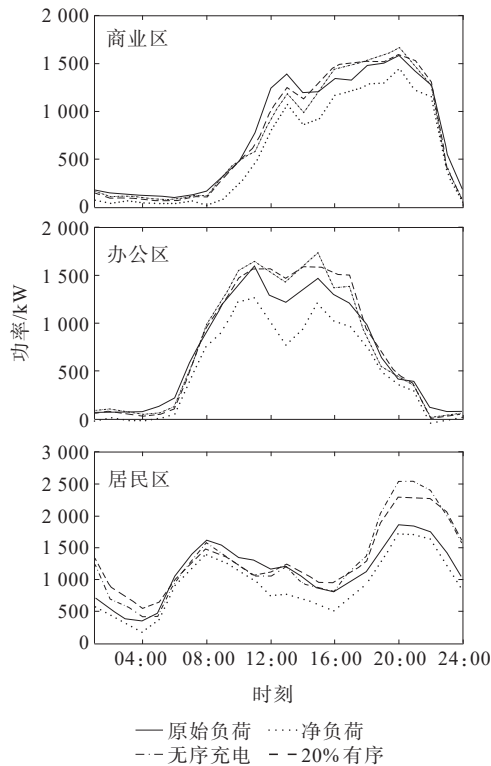


图7 20%汽车参与时负荷曲线

Figure 7 Load curve with 20% EV participation

外层基于 Pareto 解集和综合评判因子选择最优解,使其兼顾微电网系统稳定性与参与 EV 调度用户的充电费用,确定外层所有 EV 整体充放电策略后,分析内层车主实际充电与期望充电偏差。内层采用粒子群算法对目标函数进行求解,设置种群大小 100,迭代次数最大为 1 000 次。通过观察电动汽车充电前后的 SOC 变化判断充电结束后是否满足车主预期充电目标。选取 500 辆电动汽车的 SOC 状态研究,其开始充电时 SOC 值如图 8 所示。

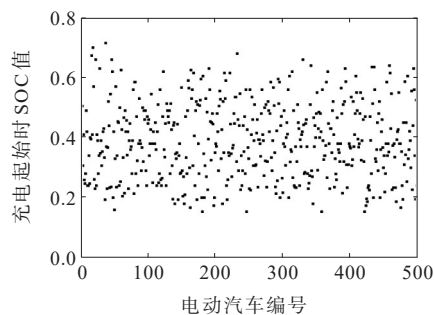


图8 EV 充电开始 SOC 状态

Figure 8 EV charging start SOC

充电结束时 SOC 状态如图 9 所示。EV 在充电前 SOC 值多集中在 0.2 至 0.6,平均 SOC 值为 0.372,经过内层优化后,EV 在充电结束时的 SOC 值集中在 0.8 至 0.95,平均 SOC 值为 0.887,整体而言达到车主期望的平均 SOC 值。考虑到 EV 行驶的距离不远,出行目的地基本固定,在充电时可以随用随充,此方式下可以满足 EV 车主的日常充电需求。

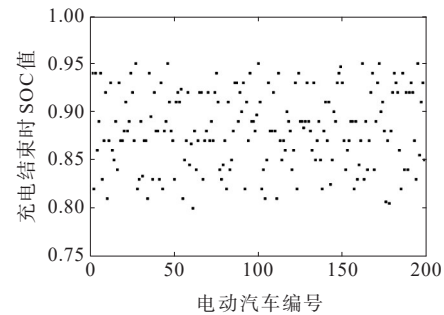


图9 20%参与度下EV 充电结束 SOC 状态

Figure 9 EV charging end SOC state with 20% participation

表 3 对比分析了参与度分别为 40% 和 60% 情况下 EV 充电费用与峰谷差,可以看出,当 EV 参与度变高时,大量 EV 以有序充电方式接入电网参与调度,有利于电网的稳定运行。在居民区微电网中,峰谷差由 1 336 kW 降到 1 025 kW,办公区和商业区微电网中的峰谷差也得到有效降低。对车主而言,采用随负荷变化制定的分时充电电价,在不同区域中的 EV 充电费用均得到下降。

表3 40%、60%汽车参与度下电动汽车充电费用与峰谷差
Table 3 Electricity revenue and peak-to-valley difference with 40% and 60% participation

微网类别	EV 参与情况	峰谷差/kW	EV 充电费用/元
居民区	40%有序	1 336	8 917
	60%有序	1 025	8 776
办公区	40%有序	1 382	5 709
	60%有序	1 230	5 336
商业区	40%有序	1 404	3 823
	60%有序	1 268	3 688
配电网	40%有序	3 318	18 449
	60%有序	2 824	17 800

图 10 为 40% 和 60% 汽车参与时的负荷曲线,可以看出,与无序充电方式相比,有序充电可以减少电网负荷尖峰情况出现,60% 汽车参与度下微电网负荷曲线变得更为平滑,能够很好地实现“填谷”的效果。

不同 EV 参与度下的配电网总功率如图 11 所示,对整个配电网而言,EV 在电网调度中的参与度越高,配电网的峰谷差以及波动率越低,改善负荷曲线的效果越明显。

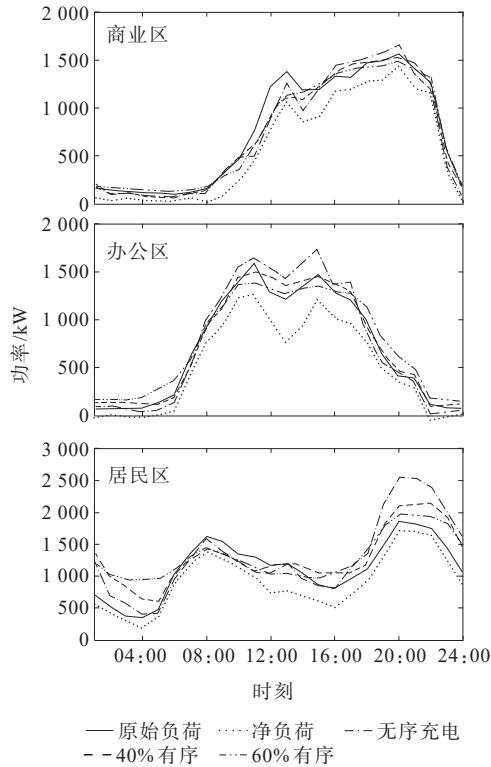


图 10 40%、60% 汽车参与时负荷曲线

Figure 10 Load curve with 40% and 60% EV participation

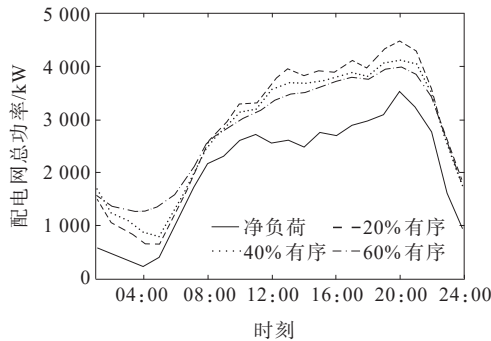


图 11 不同参与度下配电网总功率

Figure 11 Total power diagram of distribution network under different participation

EV 在 40% 和 60% 参与度下的内层优化结果分别如图 12、13 所示,其中 60% 参与度选取 500 辆 EV SOC 状态。由图 12、13 可知,经过内层优化调度后,40% 和 60% EV 参与度下充电结束后的 SOC 集中在 0.8 以上,平均 SOC 值达到 0.89 以上,同样满足 EV 车主的充电需求。

不同参与度下电动私家车与网约车充电前后 SOC 变化情况如表 4 所示。可以看出,不同参与度下的电动汽车充电结束后平均 SOC 值均在 0.89 左右,达到预设的期望平均值为 0.88 的目标。私家车在充电前的平均 SOC 值略高于网约车,充电结束后网约车平均 SOC 略高于私家车,这与网约车的出行特征有关。网约车平均行驶里程较长,对电能的需求量大,私家车平均行驶里程较短,且出行目的地较为固定,在满足基本需求出行的条件下,相比于网约车,私家车对充电结束后的电量要求较低,结束后的平均 SOC 值略低于网约车。

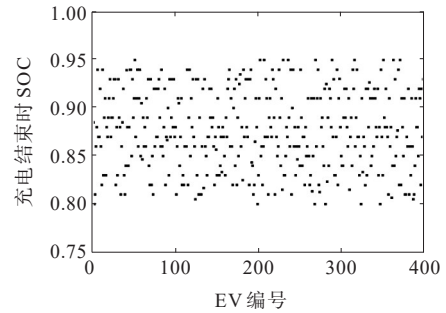


图 12 40% 参与度下 EV 充电结束 SOC 状态
Figure 12 EV charging end SOC state with 40% participation

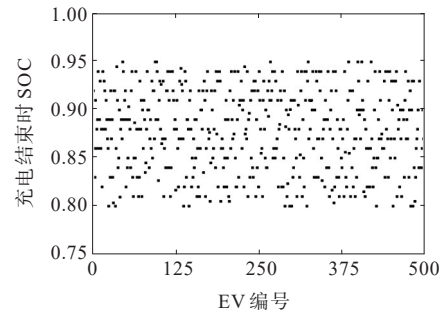


图 13 60% 参与度下 EV 充电结束 SOC 状态
Figure 13 EV charging end SOC state with 60% participation

表 4 不同参与度下电动汽车充电前后 SOC

Table 4 SOC of EVs before and after charging under different participation degrees

SOC 状态	参与度	SOC 值		
		私家车	网约车	平均
充电前	—	0.396	0.278	0.372
	20%	0.882	0.907	0.887
充电后	40%	0.884	0.895	0.886
	60%	0.886	0.892	0.887

4 结语

针对电动汽车在微电网中的优化调度问题,文中以EV充电地点的不同,将配电网划分居民区、办公区、商业区微电网,基于负荷变化制定日前分时电价,实现对电动汽车充电行为的引导,提出了双层多目标优化调度模型,兼顾微电网与EV车主的利益,并进行算例分析。

1) 建立的含EV的微电网群优化调度模型降低了微电网中的负荷峰谷差,提高EV充电效率,满足不同类型EV用户充电需求,可兼顾微电网和EV车主的利益,同时促进了新能源的就地消纳,实现能源的优势互补。

2) 依据负荷变化制定的分时充电电价有效地引导了用户参与微电网调度,与无序充电相比,降低了一部分负荷波动,大规模EV接入电网后效果将更加明显。中国的电价朝着实时电价的趋势发展,还需进一步研究实时电价下EV在微电网系统中的优化调度。

参考文献:

- [1] 别朝红,任彦哲,李更丰,等.“双碳”目标下城市能源系统的形态结构和发展路径[J].电力系统自动化,2022,46(17):3-15.
BIE Chaohong, REN Yanzhe, LI Gengfeng et al. Morphological structure and development path of urban energy system for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(17):3-15.
- [2] 孙科,陈文钢,陈佳佳,等.基于电动汽车的极端场景多微电网韧性提升策略研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(24):53-65.
SUN Ke, CHEN Wengang, CHEN Jiajia, et al. A resilience enhancement strategy for multi-microgrid in extreme scenarios based on electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(24):53-65.
- [3] 闫佳佳,滕云,邱实,等.计及供能可靠性动态约束与碳减排的充能型微电网互联系统优化模型[J].电工技术学报,2022,37(23):5956-5975.
YAN Jiajia, TENG Yun, QIU Shi, et al. Optimization model of charging microgrid interconnection system considering dynamic constraints of energy supply reliability and carbon emission reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 5956-5975.
- [4] 符杨,邢馨月,李振坤,等.基于主从博弈的微电网群多阶段鲁棒优化规划[J].电力自动化设备,2022,42(4):1-8.
FU Yang, XING Xinyue, LI Zhenkun, et al. Multi-stage robust optimization planning of microgrid clusters based on master-slave game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(4):1-8.
- [5] 林婷,高亮.含电动汽车的微电网规划研究[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):53-58.
LIN Ting, GAO Liang. Planning research of micro-grid with electric vehicle[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021,36(4):53-58.
- [6] 李龙,贺瀚青,张钰声,等.配电网接纳电动汽车充电负荷能力的评估方法[J].电网与清洁能源,2022,38(11):107-116.
LI Long, HE Hanqing, ZHANG Yusheng, et al. Evaluation of electric vehicle charging load capacity of distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11):107-116.
- [7] 王琼,邹晴,李乐,等.基于多智能体强化学习的电动汽车充放电调控算法[J].供用电,2023,40(9):83-90.
WANG Qiong, ZHOU Qing, LI Le, et al. Multi-agent reinforcement learning algorithm for charging/discharging control of electric vehicles [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 83-90.
- [8] CHEN Q F, WANG F, HODGE B M, et al. Dynamic price vector formation model based automatic demand response strategy for PV-assisted EV charging stations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2903-2915.
- [9] 杨庆新,张献,章鹏程.电动车智慧无线电能传输云网[J].电工技术学报,2023,38(1):1-12.
YANG Qingxin, ZHANG Xian, ZHANG Pengcheng. Intelligent wireless power transmission cloud network for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023,38 (1):1-12.
- [10] YANG Y, JIA Q S, DECONINCK G, et al. Distributed coordination of EV charging with renewable energy in a microgrid of buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):6253-6264.
- [11] HYEONMU JANG, YECHAN HWANG, INSU PAEK, et al. Performance evaluation and validation of H-darrieus small vertical axis wind turbine[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2021,8:1687-1697.
- [12] 刘映娟,陈云龙,刘继彦,等.基于集成学习的分布式光伏发电功率日前预测[J].中国电力,2022,55(9):38-45.
LIU Yijuan, CHEN Yunlong, LIU Jiyan, et al. Ensemble learning-based day-ahead power forecasting of distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power,

- 2022,55(9):38-45.
- [13] 冯小,张传林,崔承刚,等.基于 Stackelberg 博弈的孤岛式光储充电站调度优化[J].电网技术,2022,46(10):3989-4001.
FENG Xiao, ZHANG Chuanlin, CUI Chenggang, et al. Scheduling optimization of islanded electric vehicle charging station based on Stackelberg game[J]. Power System Technology, 2022, 46(10):3989-4001.
- [14] 吴小汉,张谦,粟尧嘉,等.基于区块链的私有充电桩共享平台交易策略[J].发电技术,2022,43(3):439-451.
WU Xiaohan, ZHANG Qian, SU Yaojia, et al. Sharing platform trading strategy of private charging pile based on blockchain[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3):439-451.
- [15] 祁晓笑,程静,王维庆,等.基于 SC 的光伏发电并网系统次同步振荡抑制方法[J].智慧电力,2023,51(5):88-95.
QI Xiaoxiao, CHENG Jing, WANG Weiqing, et al. Sub-synchronous oscillation suppression of photovoltaic grid-connected system based on SC[J]. Smart Power, 2023, 51(5):88-95.
- [16] GHASEMIAN M, NAJAFIANASHRAFI Z, SEDAGHAT A. A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 149:87-100.
- [17] 于会群,蔡国顺,时珊珊,等.含规模化充电桩的微电网运行优化方法[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(1):16-25.
YU Huiqun, CAI Guoshun, SHI Shanshan, et al. Operation optimization method of microgrid with large scale charging pile[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2022, 34(1):16-25.
- [18] 王晞,汪伟,王海燕,等.计及用户电池损耗的电动汽车分布式两阶段调度策略[J].电测与仪表,2022,59(1):120-126.
WANG Xi, WANG Wei, WANG Haiyan, et al. Distributed two-stage scheduling strategy of EV considering user battery consumption[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1):120-126.
- [19] 张夏韦,梁军,王要强,等.电动汽车充电负荷时空分布预测研究综述[J].电力建设,2023,44(12):161-173.
ZHANG Xiawei, LIANG Jun, WANG Yaoqiang, et al. Overview of research on spatiotemporal distribution prediction of electric vehicle charging[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12):161-173.
- [20] 杨钰君,于艾清,丁丽青.基于停车需求的电动汽车移动储能多目标充放电协调控制[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):65-77.
YANG Yujun, YU Aiqing, DING Liqing. Multi-objective coordinated control of charging and discharging for mobile energy storage of electric vehicles based on parking demand[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):65-77.
- [21] 袁性忠,王辉,贾宏刚,等.基于储能型 APF 的微电网电能质量综合治理[J].高压电器,2022,58(8):238-244.
YUAN Xingzhong, WANG Hui, JIA Honggang, et al. Comprehensive power quality control for microgrid based on APF with energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):238-244.
- [22] 宋扬,石勇,刘宝泉,等.基于反向变异麻雀搜索算法的微电网优化调度[J].电力工程技术,2022,41(2):163-170.
SONG Yang, SHI Yong, LIU Baoquan, et al. Optimal dispatch of microgrid based on reverse mutation sparrow search algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2):163-170.

(上接第 123 页 Continued from page 123)

- [32] 王浩林,张勇军,毛海鹏.基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J].电力自动化设备,2019,39(3):207-213.
WANG Haolin, ZHANG Yongjun, MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3):207-213.
- [33] 张美霞,孙铨杰,杨秀.考虑多源信息实时交互和用户后悔心理的电动汽车充电负荷预测[J].电网技术,2022,46(2):632-645.
ZHANG Meixia, SUN Quanjie, YANG Xiu. Electric vehicle charging load prediction considering multi-source information real-time interaction and user regret psychology[J]. Power System Technology, 2022, 46(2):632-645.
- [34] 闫威,李南,沈月秀,等.基于 CNN-GAN 与半监督回归的电动汽车充电负荷预测[J].浙江电力,2023,42(2):83-89.
YAN Wei, LI Nan, SHEN Yuexiu, et al. Electric vehicle charging load forecasting based on CNN-GAN and semi-supervised regression[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(2):83-89.
- [35] 赵厚翔,沈晓东,吕林,等.基于 GAN 的负荷数据修复及其在 EV 短期负荷预测中的应用[J].电力系统自动化,2021,45(16):143-151.
ZHAO Houxiang, SHEN Xiaodong, LÜ Lin, et al. Load data restoration based on generative adversarial network and its application in short-term load forecasting of electric vehicle[J]. 2021, 45(16):143-151.