

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.06.008

计及充电桩利用率均衡性的电动汽车两阶段调度优化

陈凡, 庄志恒, 王曼, 张添辉, 王明深

(南京工程学院电力工程学院、沈国荣学院, 江苏南京 211167)

摘要:现有电动汽车(electric vehicle, EV)调度方案未考虑充电桩利用率均衡性问题, 易造成部分充电桩过载老化而部分充电桩闲置的现象。同时, 车网互动(vehicle to grid, V2G)技术能够实现能量双向流动, 在提升电网调节能力的同时为用户带来放电收益。鉴于此, 文中提出一种基于充电桩分配-充放电调度的EV两阶段调度优化方法。第一阶段, 以充电桩利用率方差最小为目标, 对充电桩分配方案进行优化; 第二阶段, 以台区负荷方差最小、用户充电成本最低和充电桩收益最高为目标, 对EV充放电功率进行优化, 实现三方协同优化。针对所建立的EV双层调度模型, 采用自适应遗传算法(adaptive genetic algorithm, AGA)进行模型求解。算例结果表明, 相较于未考虑充电桩均衡性与未引入V2G技术的传统策略, 所提方法使充电桩利用率方差降低93.6%, 台区负荷方差降低16.5%, 用户净充电成本降低12.0%, 充电站日收益提升14.4%, 充分体现了该方法在降低充电桩利用率方差、减缓负荷波动以及提升多方收益方面的优势。

关键词:电动汽车(EV); 充放电调度; 充电桩利用率; 车网互动(V2G); 自适应遗传算法(AGA); 两阶段优化

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)06-0084-10

0 引言

电动汽车(electric vehicle, EV)作为低碳交通的核心驱动力正快速发展, 预计2030年我国保有量将达8 000万辆^[1-4]。倘若大规模EV充电需求缺乏有序调控, 将加剧充电站压力, 甚至导致电网峰值负荷激增, 威胁电网运行稳定。同时, EV通过车网互动(vehicle to grid, V2G)技术可在削峰填谷、促进可再生能源消纳等方面起关键作用^[5-10]。因此, 对EV充放电行为进行合理调度已成为应对上述挑战、提升电网效益的关键所在。

近年来, 研究人员从多角度围绕EV充电调度问题开展研究。文献[11]提出分层控制策略, 通过概率转移矩阵引导充电行为, 实现负荷平衡与新能源协同消纳。文献[12]引入充电紧急度指标, 构建快慢充切换机制, 有效削减了峰谷差。为提升系统响应能力, 文献[13]采用分层深度强化学习方法, 融合日前电价与日内无功调节, 实现多时间尺度优化。在用户侧, 文献[14]提出考虑电价、电池状态的分散式策略, 通过动态时间步长优化充电行为, 降低用户充电成本。针对公交场景, 文献[15]将车队规模与充电时序联合优化, 引入分时电价与跨线路调度策略以降低运营成本。然而, 上述研究多数仅关注单一主体目标, 缺乏对用户、电网及充电站多方利益的协同优化。针对这一问题, 研究人员通过引入多种机制进行建模优化。文献[16]通过实

时电价动态引导用户调整用能行为, 不仅优化个人用电成本, 还有助于削减电网峰值负荷。在此基础上, 文献[17]进一步融合光伏与储能系统, 构建源荷储协同运行机制, 兼顾可再生能源利用、电网调节能力与运营商经济效益。为协调用户与运营商间的利益冲突, 文献[18-19]通过主从博弈与合作博弈建模, 实现充电资源的有序分配与收益平衡。文献[20]通过分层电价机制区分用户侧与电网侧价格结构, 增强多主体间的价格协调性。上述文献虽涉及EV充电功率的调度问题, 但多局限于单阶段优化, 未能考虑充电桩分配的问题。在多方协同优化的基础上, 部分研究开始引入充电桩资源约束建模。文献[21]在建模中考虑充电桩数量限制, 提出双层规划优化削峰填谷。文献[22]进一步构建双层模型, 明确每辆EV的桩位与充电时间。文献[23]在此基础上引入站容量约束, 提出桩位分配与功率调度的两步优化策略。上述研究普遍忽视了充电桩利用率的均衡性, 易导致部分充电桩长期处于高负荷运行状态, 加速设备老化; 而相邻充电桩则因负载不足而造成资源闲置, 进而降低充电基础设施的整体运行效率。

在V2G模式下, EV可实现能量双向流动, 具备调节电网负荷与提升经济性的潜力。文献[24]通过大规模EV调度提升新能源出力的本地消纳水平。文献[25]通过构建交通-配电网耦合模型, 挖掘EV集群的可调控裕度以提高配电网运行的可靠性。针对极端灾害场景, 文献[26]进一步提出多源协同调度策略, 以提升配电网的韧性与恢复能力。

收稿日期: 2025-07-22; 修回日期: 2025-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52477101)

上述研究在电网侧目标达成方面取得了良好效果,但忽略了用户侧的利益。文献[27]从用户角度出发,提出计及时空特性与出行时间成本的充放电优化模型,有效降低了充电费用,但未能兼顾电网与运营商的整体收益。为实现EV参与下的多方协同优化,文献[28]构建双层优化模型,平衡运营商、电网与用户三方收益,在削峰填谷的同时推动低碳运行。文献[29]进一步引入用户行为差异与负荷不确定性,增强多目标调度模型的适应性与鲁棒性。在此基础上,部分研究将多目标优化拓展至更复杂的运行场景,如文献[30-31]结合强化学习算法,构建可调控频率控制与光伏-EV互补机制,在保障电网稳定性与新能源消纳的同时,提高用户侧经济性,促进多主体协同运行。上述文献表明,V2G技术在提升新能源消纳、优化负荷分布及多方协同收益方面展现出重要价值,值得在EV调度模型中重点考虑。

综上所述,充电桩利用率的均衡度和V2G是影响EV调度运行的两个重要因素,而现有方法未对其进行充分考虑。为此,文中提出一种基于充电桩分配-充放电调度的EV两阶段调度优化方法。首先,构建以充电桩利用率方差最小为目标的分配模型,实现充电资源的均衡配置;其次,引入V2G技术,构建综合考虑台区负荷平衡、用户成本与充电站收益等多方利益的调度模型,实现三方协同优化;最后,提出采用自适应遗传算法(adaptive genetic algorithm, AGA)实现模型的求解。

1 EV 充放电行为建模

1.1 EV 负荷模型

EV负荷模型通常由4个信息组成:到达时间、离开时间、到达时电池的荷电状态(state of charge, SOC)和离开时期望的SOC。文中通过正态分布函数描述EV到达时刻和离开时刻的概率分布特性^[13]。

$$f_1(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) & 0 < t \leq \mu + 12 \\ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-24-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) & \mu + 12 < t < 24 \end{cases} \quad (1)$$

$$f_2(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t+24-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) & 0 < t \leq \mu - 12 \\ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) & \mu - 12 < t < 24 \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ 为期望值; σ 为标准差; $f_1(t)$ 为 $0 \leq t < 12$ 时的概率密度函数; $f_2(t)$ 为 $12 \leq t < 24$ 时的概率密度函数^[13]。EV 到达时的初始 SOC 也可以采用式(1)和式(2)表示。该分布假设主要适用于常规工作日的用户出行特征。

EV 充电是一个连续的过程,EV 到达时间和离开时间均为连续值。文中以 15 min 为最小分辨率,将一天离散化为 96 个时隙,EV 的到达时隙和离开时隙可以表示为:

$$T_n^a = \left\lceil \frac{t_n^a}{\Delta t} \right\rceil \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$T_n^d = \left\lfloor \frac{t_n^d}{\Delta t} \right\rfloor \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中: T_n^a 、 T_n^d 分别为第 n 辆 EV 到达和离开充电站的时隙; N 为 EV 数量; t_n^a 、 t_n^d 分别为第 n 辆 EV 到达和离开充电站的时间; Δt 为单个调度时隙的时间长度。

调度时隙划分过程如图 1 所示,其中单个调度时隙的时间长度为 15 min。当第 n 辆 EV 到达时间 t_n^a 位于时隙区间 $[T\Delta t, (T+1)\Delta t]$ 内时,其有效到达时隙定义为 $T+1$,即下一时隙起始点生效;当第 n 辆 EV 离开时间 t_n^d 位于时隙区间 $[T\Delta t, (T+1)\Delta t]$ 内时,其有效离场时隙定义为 T ,即前一时隙终止点生效。



图 1 EV 参与调度时隙划分示意

Fig.1 Schematic diagram of time slot division for EV participation in scheduling

1.2 EV 电池损耗模型

在 EV 调度中,频繁充放电引发的电池损耗会影响用户收益,进而影响调度策略。为准确评估损耗成本,文中采用等效完全循环(equivalent full cycle, EFC)模型,将非标准充放电过程映射为在标准放电深度(depth of discharge, DOD)下的等效循环寿命衰减。EV 电池损耗模型构建如下:

$$\begin{cases} C_{\text{loss}} = \frac{C_{\text{battery}}}{N_{\text{cycle}}} (N_{\text{charge}} + N_{\text{discharge}}) \\ C_{\text{battery}} = c_{\text{unit}} E_{\text{cap}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_{loss} 为电池损耗成本; C_{battery} 为电池购置成本; N_{cycle} 为厂商标定的循环寿命; N_{charge} 、 $N_{\text{discharge}}$ 分别为充电等效循环次数与放电等效循环次数; c_{unit} 为电池单价; E_{cap} 为电池额定容量。

充电等效循环次数表达式为:

$$N_{\text{charge}} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{ch}}(t) \eta \Delta t}{E_{\text{cap}} D} \quad (6)$$

式中: t 为 EV 充放电时的时隙; $P_{\text{ch}}(t)$ 为 t 时隙内充电功率; η 为 EV 充放电效率; D 为参考放电深度, 取 80%。

放电等效循环次数表达式为:

$$N_{\text{discharge}} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{dis}}(t) \Delta t}{E_{\text{cap}} D \eta} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{dis}}(t)$ 为 t 时隙内 EV 放电功率。

2 EV 两阶段优化调度方法

为描述 EV 的充放电功率, 构建 $N \times T$ 维充放电功率矩阵 \mathbf{P}_{ev} 表征能量交互过程, 其中元素 $\mathbf{P}_{\text{ev}}(n, t)$ 为第 n 辆 EV 在 t 时隙的充放电功率。通过非负矩阵分解将 \mathbf{P}_{ev} 解耦为两个独立的物理量:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_{\text{ev}} = \mathbf{P}_{\text{ev, ch}} - \mathbf{P}_{\text{ev, dis}} \\ \mathbf{P}_{\text{ev, ch}}(n, t) = \max(\mathbf{P}_{\text{ev}}(n, t), 0) \\ \mathbf{P}_{\text{ev, dis}}(n, t) = \max(-\mathbf{P}_{\text{ev}}(n, t), 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{P}_{\text{ev, ch}} \geq 0$ 为充电功率矩阵; $\mathbf{P}_{\text{ev, ch}}(n, t)$ 为第 n 辆 EV 在 t 时隙内的充电功率; $\mathbf{P}_{\text{ev, dis}} \geq 0$ 为放电功率矩阵; $\mathbf{P}_{\text{ev, dis}}(n, t)$ 为第 n 辆 EV 在 t 时隙内的放电功率。

考虑到充电桩数量有限, 需要对 EV 进行分配。将充电桩分配矩阵定义为一个 $M \times N$ 维矩阵 α , M 为充电桩数量, 其中元素 $\alpha(m, n)$ 为:

$$\alpha(m, n) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\alpha(m, n) = 0$ 表示第 n 辆 EV 不在第 m 个充电桩上充电; $\alpha(m, n) = 1$ 表示第 n 辆 EV 在第 m 个充电桩上充电。

EV 充放电功率矩阵 \mathbf{P}_{ev} 与充电桩分配矩阵 α 存在显著的时序耦合特性, 即充电桩的分配结果直接限定了充电时隙的可行性域, 进而约束充电功率的调度空间。为此, 文中采用分阶段优化策略, 上层优化充电桩的分配, 下层实现充放电功率的精细调度。

2.1 充电桩分配模型

2.1.1 充电桩分配模型的目标函数

充电桩分配模型目标是在满足 EV 充电需求的同时使各充电桩利用率方差最小, 实现负载均衡分配, 目标函数为:

$$\min F_1 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\gamma(m) - \bar{\gamma})^2 \quad (10)$$

式中: F_1 为 M 个充电桩的利用率方差; $\gamma(m)$ 为第 m 个充电桩的利用率; $\bar{\gamma}$ 为 M 个充电桩利用率的平

均值。利用率 γ 的计算公式为:

$$\gamma = \frac{E_{\text{day}}}{24 P_{\text{max}}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: E_{day} 为一天内单个充电桩充放电总电量; P_{max} 为充电桩最大充放电功率。

2.1.2 充电桩分配模型的约束条件

(1) EV 充电需求约束。在有限的充电桩资源下, 多辆 EV 可能共享同一充电桩进行有序充电。EV 共用充电桩的示意如图 2 所示, EV1、EV2 与 EV3 被分配至同一充电桩。设 EV2 的到达与离开时隙分别为 T_2^a 和 T_2^d , EV3 对应为 T_3^a 和 T_3^d , 其充电时段存在时间重叠区间。为确保充电功率的合理分配, 系统采用基于到达时间的优先级调度机制: 在重叠时间区间内, 优先满足前序车辆 EV2 的充电需求, 待其完成充电任务后, 剩余功率方可分配给 EV3。

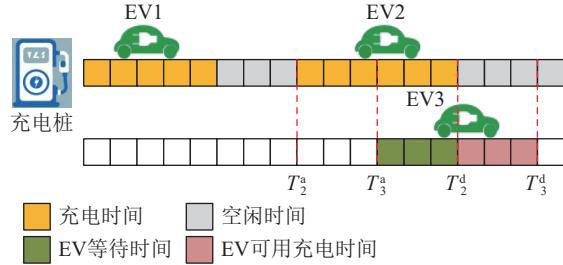


图 2 多辆 EV 共用充电桩示意

Fig.2 Schematic diagram of multiple EVs sharing a charging pile

由此建立如下约束条件: 对于同一充电桩上的任意 l 辆 EV ($l \geq 2$), 若其充电时间窗口存在连续重叠区间, 即 $(T_{l,1}^d > T_{l,2}^a) \wedge \dots \wedge (T_{l,l-1}^d > T_{l,l}^a)$, 则需要满足功率分配时序约束如下。

$$\begin{cases} (T_{l,l}^d - T_{l,1}^a) P_{\text{max}} \Delta t \geq \sum_{n=1}^l E_{\text{ev},n}^{\text{req}} \\ E_{\text{ev},n}^{\text{req}} = (S_{\text{oc},n}^{\text{end}} - S_{\text{oc},n}^0) E_N \end{cases} \quad (12)$$

式中: $T_{l,1}^a$ 为 l 辆 EV 中第 1 辆 EV 的到达时隙; $T_{l,l}^d$ 为 l 辆 EV 中第 l 辆 EV 的离开时隙; $E_{\text{ev},n}^{\text{req}}$ 为第 n 辆 EV 的充电需求电量; $S_{\text{oc},n}^{\text{end}}$ 、 $S_{\text{oc},n}^0$ 分别为第 n 辆 EV 的期望 SOC 和初始 SOC; E_N 为 EV 电池额定容量。

(2) EV 分配约束。每辆 EV 只能在同一个充电桩上充电, 约束条件表示为:

$$\sum_{m=1}^M \alpha(m, n) \equiv 1 \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

2.2 充放电调度模型

2.2.1 充放电调度模型的目标函数

为减少 EV 充放电对电网带来的影响, 同时兼顾充电站与 EV 用户的利益, 充放电调度模型的目标函数分为三部分。

(1) 台区侧。为量化 EV 充放电对台区造成的波动影响, 文中采用负荷方差作为台区运行稳定性的评价指标, 构建如下目标函数:

$$\min F_{2,1} = \frac{1}{96} \sum_{t=1}^{96} (P_{\text{grid}}(t) - \bar{P}_{\text{grid}})^2 \quad (14)$$

$$P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{base}}(t) + \sum_{n=1}^N P_{\text{ev}}(n, t) \quad (15)$$

式中: $F_{2,1}$ 为台区负荷方差; $P_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时隙内台区总负荷; \bar{P}_{grid} 为一天内台区平均负荷; $P_{\text{base}}(t)$ 为 t 时隙内台区基础负荷。

(2) 用户侧。为降低充电费用, 用户以最小充电成本为目标, 考虑充电成本 C_{ch} 、放电收益 C_{dis} 与电池损耗 C_{loss} , 目标函数为:

$$\min F_{2,2} = C_{\text{ch}} - C_{\text{dis}} + C_{\text{loss}} \quad (16)$$

$$C_{\text{ch}} = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{96} P_{\text{ev},\text{ch}}(n, t) \Delta t c_{\text{ch}}(t) \quad (17)$$

$$C_{\text{dis}} = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{96} P_{\text{ev},\text{dis}}(n, t) \Delta t c_{\text{dis}}(t) \quad (18)$$

式中: $F_{2,2}$ 为用户充电成本; $c_{\text{ch}}(t)$ 为 t 时隙内 EV 充电电价; $c_{\text{dis}}(t)$ 为 t 时隙内 EV 放电电价。

(3) 充电站侧。在分时电价机制下, 充电站通过电价差实现套利, 收益来源于购售电价与用户侧电价差, 据此构建如下运营收益目标函数:

$$\begin{aligned} \max F_{2,3} = & \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{96} P_{\text{ev},\text{ch}}(n, t) \Delta t (c_{\text{ch}}(t) - c_{\text{buy}}(t)) + \\ & \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{96} P_{\text{ev},\text{dis}}(n, t) \Delta t (c_{\text{sell}}(t) - c_{\text{dis}}(t)) \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $F_{2,3}$ 为充电站收益; $c_{\text{buy}}(t)$ 为 t 时隙内充电站向电网购电电价; $c_{\text{sell}}(t)$ 为 t 时隙内充电站向电网售电价。

在构建充放电优化调度模型时, 为消除目标函数间的量纲差异并平衡优化方向, 定义归一化综合目标函数如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F_2 = \omega_1 \frac{F_{2,1}}{F_{2,1,\text{max}}} + \omega_2 \frac{F_{2,2}}{F_{2,2,\text{max}}} - \omega_3 \frac{F_{2,3}}{F_{2,3,\text{max}}} \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \end{array} \right. \quad (20)$$

式中: F_2 为归一化后的充放电功率优化模型目标函数; $F_{2,1,\text{max}}$ 、 $F_{2,2,\text{max}}$ 、 $F_{2,3,\text{max}}$ 分别为 $F_{2,1}$ 、 $F_{2,2}$ 、 $F_{2,3}$ 的最大值, 通过独立求解各目标极值获得; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为 $F_{2,1}$ 、 $F_{2,2}$ 、 $F_{2,3}$ 的权重系数。由于该模型是综合考虑电网、EV 用户和充电站三方面的利益, 并未特别强调某一方利益的重要性, 因此取 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1/3$ 。

2.2.2 充放电调度模型的约束条件

(1) 充电站充电功率限制。EV 的充电功率不能超过充电桩的最大充放电功率 P_{max} , 表达式为:

$$|P_{\text{ev}}(n, t)| \leq P_{\text{max}} \quad (21)$$

(2) 充电站最大瞬时功率限制。考虑到充电站的安全运行, 每一时隙充电站的负荷不能大于充电站的最大瞬时功率 P_{g_N} 。其中, 最大瞬时功率即为充电站至配电网接入点的馈线和变压器容量限制, 反映了接入点在物理上所能承载的最大功率。充电站最大瞬时功率限制表达式为:

$$\sum_{n=1}^N P_{\text{ev}}(n, t) \leq P_{g_N} \quad (22)$$

(3) EV 充电需求约束。EV 充电结束后, 充电站应满足用户充电需求, 表达式为:

$$E_{\text{ch},n} \geq (S_{\text{oc},n}^{\text{end}} - S_{\text{oc},n}^0) E_N \quad (23)$$

$$E_{\text{ch},n} = \left(\sum_{t=1}^T P_{\text{ev},\text{ch}}(n, t) \eta - \sum_{t=1}^T P_{\text{ev},\text{dis}}(n, t) / \eta \right) \Delta t \quad (24)$$

式中: $E_{\text{ch},n}$ 为第 n 辆 EV 的净充电电量。

(4) EV 充放电时间约束。EV 无法在可充放电时间以外进行充放电, 表示为:

$$P_{\text{ev}}(n, t) \beta(n, t) \equiv P_{\text{ev}}(n, t) \quad (25)$$

式中: β 为 $N \times T$ 维二元状态矩阵, 用来表征 EV 充放电时间可用性, $\beta(n, t) = 0$ 表示在 t 时隙内禁止第 n 辆 EV 进行充放电操作, $\beta(n, t) = 1$ 表示在 t 时隙内允许第 n 辆 EV 进行充放电操作。

(5) SOC 约束。为保障电池安全与寿命, 需要设置 SOC 边界约束: SOC 低于 0.2 禁止放电, 超过 0.9 禁止充电。限制表达式如下:

$$0.2 \leq S_{\text{oc},n}(t) \leq 0.9 \quad \forall t \in T \quad (26)$$

式中: $S_{\text{oc},n}(t)$ 为第 n 辆 EV 在 t 时隙内的 SOC。

2.3 两阶段模型求解方法

为求解充电桩分配-充放电调度模型, 文中提出使用 AGA 求解两阶段优化模型, 模型求解算法流程如图 3 所示。其中, K 、 L 分别为两模型使用 AGA 求解过程中的迭代次数; $F_{2,\text{best},h}(L)$ 为求解过程中每次迭代产生的历史最优适应度。

在给定 EV 到站信息、离站信息、充电需求、分时电价以及充电站容量约束等输入条件的前提下, 文中提出的两阶段优化调度方法按照“分配-调度”的逻辑逐步求解。首先, 运行第一阶段充电桩分配模型, 以最小化充电桩利用率方差为目标, 得到充电桩分配矩阵 α 以及 EV 充放电时间可用性矩阵 β 。随后, 基于该分配结果, 进入第二阶段的充放电调度模型, 在固定分配方案的条件下, 以台区负荷

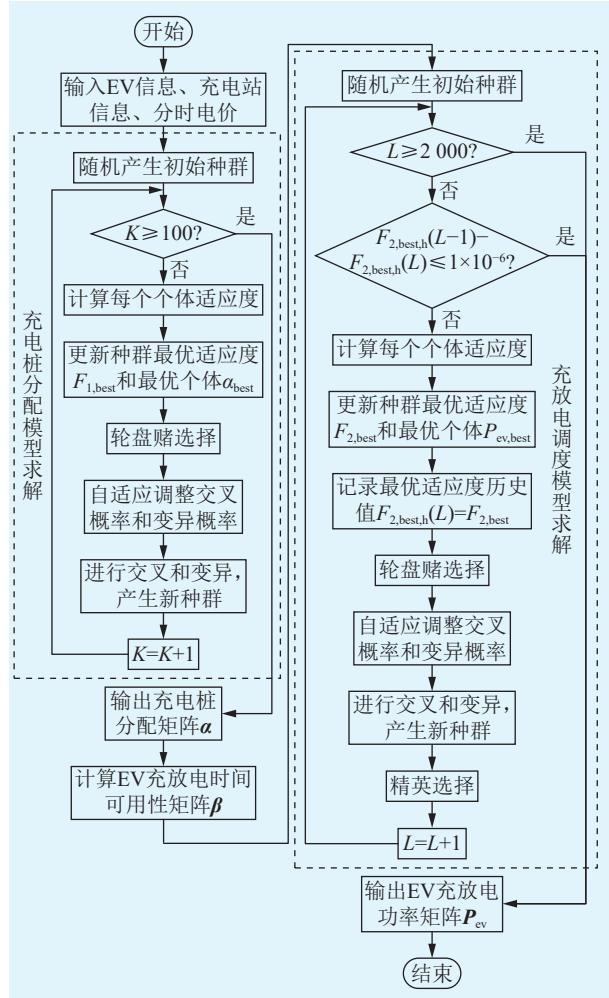


图 3 两阶段优化模型求解过程

Fig.3 Solution process of the two-stage optimization model

方差最小、用户充电成本最低与充电站收益最高为目标,进一步优化各车辆在各时隙的充放电功率,得到充放电功率矩阵 \mathbf{P}_{ev} 。

第一阶段的输出结果不仅作为第二阶段的输入条件,而且在约束层面直接限定了调度模型的可行解空间。其中,充电桩分配矩阵 α 用于固定车辆与充电桩的绑定关系,避免调度过程中出现资源冲突;EV 充放电时间可用性矩阵 β 则界定了各车辆在时间维度上的充放电范围,明确哪些时隙允许EV 参与调度。二者与充电桩充电功率限制、充电站容量限制等约束共同作用,构成了第二阶段优化的完整约束条件。

与标准遗传算法(genetic algorithm, GA)相比,AGA 在保留全局搜索能力的同时,引入交叉概率与变异概率的自适应调节机制,使其能够根据种群适应度分布灵活调整搜索策略,其自适应调整交叉与变异概率的数学表达式为:

$$P_c = \begin{cases} k_1(f_{\max} - f)/(f_{\max} - \bar{f}) & f \geq \bar{f} \\ k_2 & f < \bar{f} \end{cases} \quad (27)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3(f_{\max} - f)/(f_{\max} - \bar{f}) & f \geq \bar{f} \\ k_4 & f < \bar{f} \end{cases} \quad (28)$$

式中: P_c 为交叉概率; P_m 为变异概率; f 、 f_{\max} 分别为种群适应度及其最大值; \bar{f} 为种群适应度平均值; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为常量,且均小于等于1。

由式(27)与式(28)可知,当个体适应度高于平均水平时,交叉和变异概率降低,以避免破坏优良个体,确保其能够在进化过程中得以保留并持续优化;而当个体适应度低于平均水平时,交叉与变异概率则相对升高,从而增加遗传操作的频率,提升种群的多样性,防止算法陷入局部最优。该机制在搜索初期可提升全局探索能力,在中后期则有助于保护优良基因,增强局部探索能力。

3 算例分析

3.1 数据和参数设置

选取某台区典型日负荷为基础负荷曲线。EV 电池额定容量为 100 kW·h,充放电效率为 90%。设置充电桩数量为 10,每个充电桩的最大充放电功率为 50 kW,充电站的容量限制为 400 kW。电价机制采用分时电价,EV 充电电价 c_{ch} 和放电电价 c_{dis} 、充电站向电网购电电价 c_{buy} 和售电电价 c_{sell} 如表 1 所示。

表 1 分时电价

Table 1 Time-of-use price 单位:元/(kW·h)

时段	c_{ch}	c_{dis}	c_{buy}	c_{sell}
08:00—12:00、 17:00—21:00	1.28	0.50	1.10	1.00
12:00—17:00、 21:00—24:00	0.76	0.30	0.70	0.60
00:00—08:00	0.32	0.15	0.26	0.30

采用蒙特卡洛方法模拟含 30 辆 EV 的充电站调度场景。考虑到用户出行目的的差异性,文中将出行目的分为回家、工作、娱乐 3 种。不同出行目的的 EV 出行特征^[13]如表 2 所示。EV 离开时的期望 SOC 设置为[0.8,0.9]的均匀随机分布。

表 2 不同出行目的 EV 出行特征

Table 2 Characteristics of EV trips under different travel purposes

出行 目的	到达时间分布		离开时间分布		初始SOC	
	期望值	标准差	期望值	标准差	期望值	标准差
回家	19:00	1.5	07:30	1.0	0.4	0.1
工作	08:30	1.0	17:00	1.0	0.5	0.1
娱乐	12:00	1.0	20:00	1.5	0.6	0.1

为验证所提充放电调度方法在均衡充电桩利用率、减少台区负荷波动、降低用户充电成本以及提高充电站收益等方面的有效性, 文中对以下 3 种 EV 充放电调度方案进行比较分析。

方案 1: 仅考虑 V2G 技术。

方案 2: 仅考虑充电桩利用率均衡性。

方案 3: 同时考虑充电桩利用率均衡性和 V2G 技术。

3.2 充电桩分配效果分析

图 4 为方案 1 的充电桩分配结果。由图 4 可知, 在未考虑充电桩利用率均衡性时, 用户仅以满足自身充电需求为目标, 造成 15 辆 EV 集中于 1 号、3 号和 9 号充电桩, 而 5 号充电桩仅有 1 辆 EV 使用, 反映出资源分配效率较低。

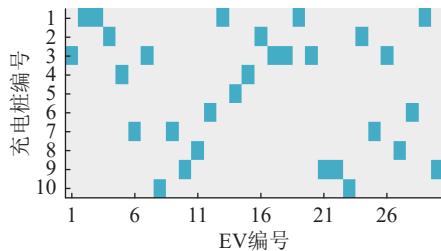


图 4 方案 1 充电桩分配结果

Fig.4 Charging pile allocation results of scheme 1

图 5 为方案 3 的充电桩分配结果。由图 5 可知, 在引入充电桩利用率均衡性指标后, 各充电桩服务的 EV 数量趋于均匀, 分布在 2~4 辆之间, 显著缓解了资源聚集问题, 验证了优化模型在提升充电桩资源配置均衡性方面的有效性。

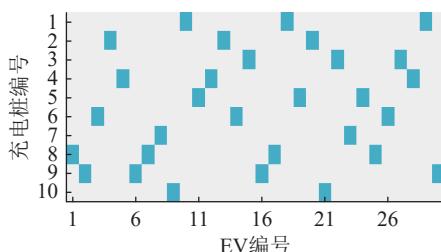


图 5 方案 3 充电桩分配结果

Fig.5 Charging pile allocation results of scheme 3

表 3 展示了 3 种方案下充电桩利用率方差和均值。由表 3 可知, 与方案 1 相比, 方案 3 通过充电桩分配优化使充电桩利用率方差降低 93.6%, 有效实现了各充电桩间的负载均衡。相较于方案 2, 方案 3 在利用率方差上降低 32.4%, 同时将利用率均值提升 19.4%。实验结果表明, V2G 技术不仅能够降低充电桩利用率方差, 还能提升整体充电桩利用率。充电桩负载的均衡分配能够缓解设备在使用过程中的过度压力, 降低因不均衡运行带来的损害风险, 延长充电桩使用寿命。

表 3 不同调度方案下充电桩利用率方差和均值

Table 3 Variance and mean of charging pile utilization rates under different scheduling schemes

调度方案	利用率方差/% ²	利用率均值/%
方案1	71.5	18.2
方案2	6.8	15.5
方案3	4.6	18.5

图 6 为不同调度方案下的充电桩利用率。由图 6 可知, 方案 1 在 3 号充电桩处形成 34.3% 的利用率峰值, 而 5 号仅为 5.8%, 相差近 6 倍, 出现显著失衡现象, 更直观地反映了图 4 中因未引入利用率均衡性指标所致的资源聚集问题。相比之下, 方案 2 与方案 3 的充电桩利用率均匀分布于 10%~25%, 表明优化分配模型显著提升了负载均衡性。此外, 方案 3 引入 V2G 技术, 使 EV 可放电回馈电网, 提升了各桩日均充放电量与整体利用率均值, 同时有效缩小桩间利用率差距, 降低方差, 结合表 3 数据, 验证了方案 3 在提高充电桩资源利用效率与均衡性方面的综合优势。

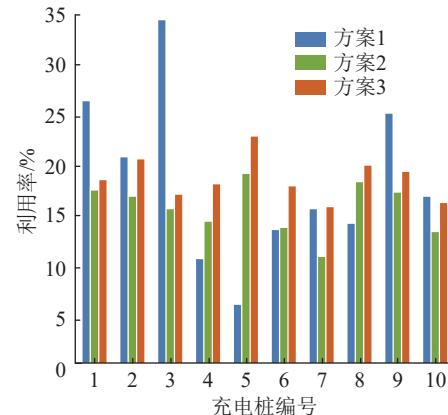


图 6 不同调度方案下充电桩利用率

Fig.6 Utilization rate values of charging piles under different scheduling schemes

图 7 为方案 1 下的充电桩充放电功率。由图 7 可知, 方案 1 因充电桩分配不均, 导致 1、3、9 号充电桩长期处于高负荷运行状态, 易引发设备老化并增加运维成本, 而 5 号充电桩则长期闲置, 存在资源错配问题。

图 8 为方案 3 下的充电桩充放电功率。由图 8 可知, 方案 3 显著改善了功率分布, 通过将高负荷桩部分负载转移至低负荷桩, 实现资源的动态平衡。对比图 7 与图 8 可见, 方案 3 在优化充电桩分配结构方面具有明显优势, 有效提升了系统运行的均衡性与资源利用效率。

3.3 考虑 V2G 的 EV 调度效果分析

图 9 为方案 2 下充电站全天充放电功率与台区

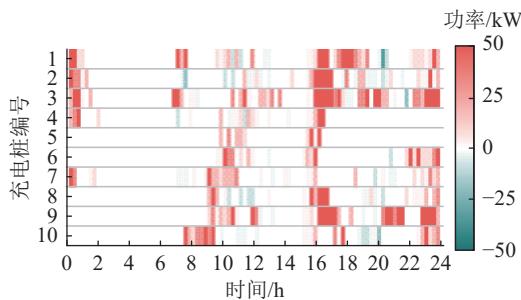


图 7 方案 1 下充电桩充放电功率

Fig.7 Charging and discharging power of charging piles under scheme 1

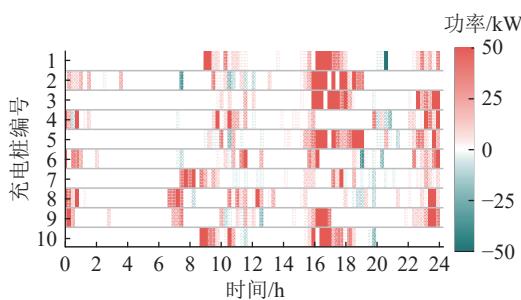


图 8 方案 3 下充电桩充放电功率

Fig.8 Charging and discharging power of charging piles under scheme 3

负荷。由图 9 可知,在 09:00—12:00 和 18:00—21:00 的峰荷时段内,方案 2 的总负荷最大值分别为 976.3 kW 和 1 018.7 kW; 在 15:00—17:00 和 22:00—24:00 的谷荷时段内,方案 2 的总负荷最小值分别为 365.9 kW 和 437.7 kW。

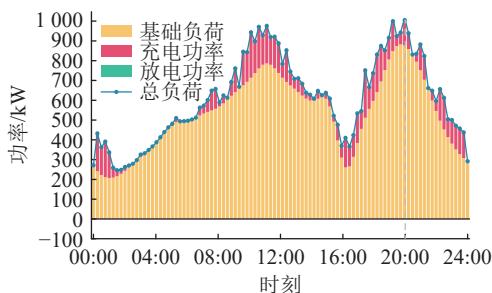


图 9 方案 2 下充电站充放电功率与台区总负荷

Fig.9 Charging and discharging power of the charging station and total transformer district load under scheme 2

图 10 为方案 3 下充电站全天充放电功率与台区负荷。由图 10 可知,方案 3 在 09:00—12:00 和 18:00—21:00 两个峰荷时段的总负荷最大值分别降至 891.4 kW 和 898.7 kW,较方案 2 下降 8.7% 和 11.8%,显著缓解了电网压力;在 15:00—17:00 与 22:00—24:00 的谷荷时段内,总负荷最小值分别上升至 534.2 kW 和 601.8 kW,涨幅达 46.0% 和 37.5%,负荷曲线更趋平稳。该优化效果归因于方案 3 通过 V2G 技术实现“峰时放电+谷时充电”的双向调

节机制,不仅释放峰时电网压力,还增强谷时负荷吸纳能力。相较之下,方案 2 仅依赖时间平移实现有序充电,调节能力有限。结果表明,方案 3 在峰谷协同调控方面显著优于方案 2。

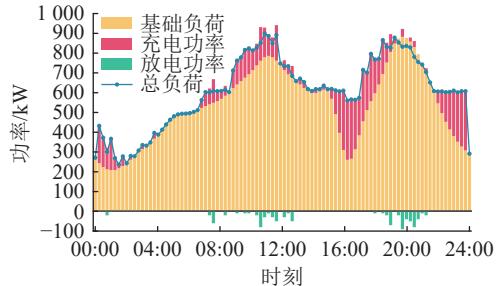


图 10 方案 3 下充电站充放电功率与台区总负荷

Fig.10 Charging and discharging power of the charging station and total transformer district load under scheme 3

表 4 给出不同方案下调度结果的综合效益。由表 4 可知,充放电调度机制在电网优化与多方协同中展现出明显优势。方案 1 与方案 3 的台区负荷方差分别为 $34\ 045.6\text{ kW}^2$ 与 $33\ 120.7\text{ kW}^2$,较方案 2 分别降低了 14.2% 与 16.5%,这表明峰时放电与谷时充电可有效平抑负荷波动。在用户侧,尽管方案 1 和 3 的电池损耗成本略增,但通过放电获得的收益远高于新增成本,使充电净成本分别降至 1 669.4 元与 1 667.2 元,较方案 2 分别下降 11.9% 和 12.0%。在充电站侧,得益于峰谷电价套利,方案 3 的充电站日收益增长至 209.2 元,较方案 2 提升 14.4%。综上,方案 3 通过 V2G 技术实现负荷削峰填谷与经济激励协同,在电网稳定性与多方收益提升方面均优于传统有序充电模式。

表 4 不同调度方案下综合效益

Table 4 Combined benefits under different scheduling schemes

方案	负荷方差/kW ²	用户日充电成本/元	用户日售电收益/元	用户日电池损耗成本/元	用户日充电净成本/元	充电站日收益/元
方案1	34 045.6	1 771	269	167.4	1 669.4	209.2
方案2	39 683.7	1 755	0	139.5	1 894.5	182.8
方案3	33 120.7	1 773	271	165.2	1 667.2	209.2

4 结论

针对现有 EV 充放电调度研究中对充电桩利用率的均衡性和 V2G 考虑不够充分的问题,文中提出一种基于充电桩分配-充放电调度双层模型的 EV 两阶段调度优化方法。算例分析结果表明:

(1) 相较于未考虑充电桩利用率均衡性的调度方法,文中所提出的充电桩分配优化模型使充电桩

利用率方差下降 93.6%, 显著缓解了充电桩过载与闲置并存的问题, 提升了资源分配均衡性;

(2) 相较于未引入 V2G 技术的调度方法, 文中方法使充电桩利用率均值提升 19.4%, 体现出 V2G 技术有利于提升资源使用效率;

(3) 与未考虑 V2G 技术的方案相比, 文中所提方法通过双向能量调节使台区负荷方差下降了 16.5%, 用户净充电成本降低了 12.0%, 充电站日收益提升了 14.4%, 体现了其在平抑负荷波动与提高多方收益方面的优越性。

文中提出的方法可在现有能源管理系统支持下实现具备 V2G 功能的单站调度, 通过实时调用车辆到站时间、离站时间、充电需求、电价等数据, 完成充电桩合理分配与充放电功率优化。未来将结合更大规模的实测数据与出行调查数据, 引入节假日修正因子及多模态分布建模, 从而提升 EV 充放电行为建模的准确性, 并提高充电桩利用率计算的精度。

致 谢

本文得到南京工程学院研究生科技创新基金(TB202517017)资助, 谨此致谢!

参考文献:

- [1] LIU G C, WANG B, LI T, et al. Multi-objective electric-carbon synergy optimisation for electric vehicle charging: integrating uncertainty and bounded rational behaviour models[J]. *Applied Energy*, 2025, 389: 125790.
- [2] WANG Y J, XIE D, ZHAO P F, et al. A coordinated optimization strategy for charging station siting and EV dispatch based on response costs: a case study of Chicago[J]. *Applied Energy*, 2025, 389: 125791.
- [3] 孙毅, 彭杰, 武光华, 等. 电动汽车充电网络的软件定义理论、架构及关键技术[J]. 供用电, 2024, 41(12): 33-46.
SUN Yi, PENG Jie, WU Guanghua, et al. Software-defined theory, architecture, and key technologies of electric vehicle charging networks[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(12): 33-46.
- [4] 陶星宇, 杨健维, 牛牧童, 等. 计及电动汽车充电负荷的电力系统中长期生产模拟方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 18-26.
TAO Xingyu, YANG Jianwei, NIU Mutong, et al. A mid/long-term power system production simulation approach considering charging load of electric vehicles[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 18-26.
- [5] 李怡然, 张姝, 肖先勇, 等. V2G 模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 129-135, 143.
LI Yiran, ZHANG Shu, XIAO Xianyong, et al. Charging and discharging scheduling strategy of EVs considering demands of supply side and demand side under V2G mode[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(3): 129-135, 143.
- [6] 周椿奇, 向月, 童话, 等. 轨迹数据驱动的电动汽车充电需求及 V2G 可调控容量估计[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 46-55.
ZHOU Chunqi, XIANG Yue, TONG Hua, et al. Trajectory-data-driven estimation of electric vehicle charging demand and vehicle-to-grid regulable capacity[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 46-55.
- [7] 骆钊, 聂灵峰, 田肖, 等. 结合车主期望的充换电站辅助调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 90-101.
LUO Zhao, NIE Lingfeng, TIAN Xiao, et al. Auxiliary frequency regulation strategy for charging and swapping stations combined with the expectations of vehicle owners[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(13): 90-101.
- [8] 沙广林, 刘璐, 马春艳, 等. 考虑车联网互动的电动汽车有序充电策略[J]. 供用电, 2023, 40(10): 46-54.
SZA Guanglin, LIU Lu, MA Chunyan, et al. Orderly charging strategy for electric vehicles considering the vehicle-network interaction[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(10): 46-54.
- [9] 侯慧, 何梓娴, 侯婷婷, 等. 大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 177-187.
HOU Hui, HE Ziyin, HOU Tingting, et al. A review of demand response strategies and potential evaluation for large-scale vehicle to grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(14): 177-187.
- [10] 刘嘉彦, 李祖坤, 李畅, 等. 电动汽车与电力-交通耦合网互动: 综述与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 12-24.
LIU Jiayan, LI Zukun, LI Chang, et al. Interaction between electric vehicles and power-transportation coupled networks: current status, challenges and development trends[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(5): 12-24.
- [11] 马苗苗, 任智伟, 刘立成, 等. 考虑新能源消纳的电动汽车有序充电控制策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 94-103.
MA Miaomiao, REN Zhiwei, LIU Licheng, et al. Orderly charging control strategy for electric vehicles considering new energy accommodation[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2024, 45(8): 94-103.
- [12] ZHOU K L, CHENG L X, WEN L L, et al. A coordinated charging scheduling method for electric vehicles considering different charging demands[J]. *Energy*, 2020, 213: 118882.
- [13] 祁向龙, 陈健, 赵浩然, 等. 多时间尺度协同的配电网分层深度强化学习电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 53-64.
QI Xianglong, CHEN Jian, ZHAO Haoran, et al. Multi-time scale cooperative voltage control strategy of a distribution network based on hierarchical deep reinforcement learning[J].

- Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 53-64.
- [14] DAHMANE Y, CHENOUD R, GHANES M, et al. Optimized time step for electric vehicle charging optimization considering cost and temperature[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2021, 26: 100468.
- [15] LU Z Y, XING T Y, LI Y F. Optimization of electric bus vehicle scheduling and charging strategies under time-of-use electricity price[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2025, 196: 104021.
- [16] 王鹤, 汪瑶, 边竞, 等. 基于改进滚动时域法的大规模电动汽车接入电网双层实时调度策略[J/OL]. 电网技术, 2025: 1-12. (2025-03-27)[2025-07-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1646>.
- WANG He, WANG Yao, BIAN Jing, et al. A bi-level real-time dispatch strategy for large-scale electric vehicles into smart grid based on an improved rolling horizon method[J/OL]. *Power System Technology*, 2025: 1-12. (2025-03-27)[2025-07-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1646>.
- [17] 贺宁, 蒋德润, 李若夏, 等. V2B 场景下 BIPV 公共建筑最优配置及调度策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(8): 143-153.
- HE Ning, JIANG Derun, LI Ruoxia, et al. Optimal configuration and scheduling strategy of BIPV public building in V2B scenario[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2025, 57(8): 143-153.
- [18] 朱永胜, 常稳, 武东亚, 等. 考虑充放储一体站与电动汽车互动的主从博弈优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 157-167.
- ZHU Yongsheng, CHANG Wen, WU Dongya, et al. A Stackelberg game optimization scheduling strategy considering the interaction between a charging-discharging-storage integrated station and an electric vehicle[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(7): 157-167.
- [19] 舒征宇, 刘文灿, 李黄强, 等. 基于合作博弈与动态分时电价的电动汽车有序充放电策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(3): 179-187.
- SHU Zhengyu, LIU Wencan, LI Huangqiang, et al. An orderly charging and discharging strategy for electric vehicles based on cooperative game and dynamic time-of-use pricing[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(3): 179-187.
- [20] MENG W Q, SONG D R, HUANG L S, et al. Distributed energy management of electric vehicle charging stations based on hierarchical pricing mechanism and aggregate feasible regions[J]. *Energy*, 2024, 291: 130332.
- [21] ALINIA B, HAJIESMAILI M H, CRESPI N. Online EV charging scheduling with on-arrival commitment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(12): 4524-4537.
- [22] LIU J Y, LIN G, HUANG S H, et al. Optimal EV charging scheduling by considering the limited number of chargers[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 1112-1122.
- [23] WU J, SU H, MENG J H, et al. Electric vehicle charging scheduling considering infrastructure constraints[J]. *Energy*, 2023, 278: 127806.
- [24] 徐冉, 徐潇源, 王晗, 等. 考虑公交车移动特性的电动公交车-充电站-配电网联合调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 36-44.
- XU Ran, XU Xiaoyuan, WANG Han, et al. Coordinated dispatching of electric bus, charging station and distribution network considering bus travelling characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(24): 36-44.
- [25] 邓润琦, 向月, 黄媛, 等. 交通-配电网耦合下电动汽车集群可调控裕度及优化运行策略[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4328-4337.
- DENG Runqi, XIANG Yue, HUANG Yuan, et al. Dispatchable margin and optimal operation strategy of electric vehicle clusters in coupled transportation-distribution network[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4328-4337.
- [26] 王月汉, 刘文霞, 姚齐, 等. 面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 37-45.
- WANG Yuehan, LIU Wenxia, YAO Qi, et al. Pre-layout and dynamic scheduling strategy of mobile energy storage for resilience enhancement of distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(15): 37-45.
- [27] 王鹤, 冷贤达, 潘禹含, 等. 考虑时空特性及时间成本的电动汽车有序充放电策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 86-91, 133.
- WANG He, LENG Xianda, PAN Yuhan, et al. Orderly charging and discharging strategy of electric vehicle considering spatio-temporal characteristic and time cost[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(10): 86-91, 133.
- [28] 王义, 靳梓康, 王要强, 等. 考虑电动汽车共享储能特性的园区综合能源系统低碳运行[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 21-29.
- WANG Yi, JIN Zikang, WANG Yaoqiang, et al. Low-carbon operation of park-level integrated energy system considering shared energy storage features of electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(5): 21-29.
- [29] 骆徐, 程静, 王李鑫, 等. 基于等效负荷实时电价和节点实时电价引导的电动汽车时空优化调度[J/OL]. 电网技术, 2024: 1-17. (2024-09-19)[2025-07-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1417>.
- LUO Xu, CHENG Jing, WANG Lixin, et al. Spatio-temporal optimal scheduling of electric vehicles based on equivalent load real-time tariff and node real-time tariff guidance[J/OL].

- Power System Technology, 2024: 1-17. (2024-09-19)[2025-07-16]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1417>.
- [30] 卢昱宏, 范培潇, 杨军, 等. 基于近端策略优化算法的含电动汽车孤岛微电网智能频率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(10): 135-143.
- LU Yuhong, FAN Peixiao, YANG Jun, et al. Intelligent frequency control strategy for islanded microgrid with electric vehicles based on proximal policy optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(10): 135-143.
- [31] 陈宁, 李法社, 王霜, 等. 基于深度强化学习算法的分布式光伏-EV 互补系统智能调度 [J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1454-1463.
- CHEN Ning, LI Fashe, WANG Shuang, et al. Intelligent scheduling of distributed photovoltaic EV complementary systems based on deep reinforcement learning algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1454-1463.

作者简介:



陈凡

陈凡(1981),女,博士,教授,通信作者,研究方向为电力系统规划与运行分析(E-mail: fanchen_nj@163.com);

庄志恒(2001),男,硕士在读,研究方向为电动汽车充电调度与充电站配置;

王曼(1977),女,硕士,副教授,研究方向为电力系统运行与规划。

Two-stage scheduling optimization for electric vehicles considering the balance of charging station utilization rate

CHEN Fan, ZHUANG Zhiheng, WANG Man, ZHANG Tianhui, WANG Mingshen

(School of Electric Power Engineering, School of Shen Guorong, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Existing electric vehicle (EV) scheduling schemes fail to address the issue of balanced utilization of charging piles, which often leads to overloading and premature aging of certain charging piles while others remain underutilized. Concurrently, vehicle-to-grid (V2G) technology enables bidirectional energy flow, enhancing grid regulation capabilities while providing users with discharge revenue. In light of this, a two-stage EV scheduling optimization method based on charging pile allocation and charge-discharge scheduling is proposed. In the first stage, the allocation of charging piles is optimized with the objective of minimizing the variance in charging pile utilization. In the second stage, the charge-discharge power of EVs is optimized to achieve threefold objectives: minimizing the variance of regional load, minimizing user charging costs, and maximizing charging pile revenue, thereby achieving tripartite collaborative optimization. An adaptive genetic algorithm (AGA) is employed to solve the established bi-level EV scheduling model. The case study results demonstrate that, compared to conventional strategies that neither consider charging pile load balancing nor incorporate V2G technology, the proposed method reduces the variance of charging pile utilization by 93.6%, decreases the variance of transformer area load by 16.5%, lowers users' net charging costs by 12.0%, and increases the charging station's daily revenue by 14.4%. These outcomes fully substantiate the method's superior performance in optimizing charging infrastructure utilization, mitigating load fluctuations, and enhancing multi-stakeholder economic benefits.

Keywords: electric vehicle (EV); charge-discharge scheduling; utilization rate of charging piles; vehicle-to-grid (V2G); adaptive genetic algorithm (AGA); two-stage optimization

(编辑 陆海霞)