

引用格式:赵津津,钟俊杰,戴洁,等.考虑高峰负荷的电动汽车并网双层低碳优化运行方法[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):108-117.

Citation: ZHAO Jinjin, ZHONG Junjie, DAI Jie, et al. Bi-level low-carbon optimization operation method for electric vehicle grid integration considering peak load[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 108-117.

考虑高峰负荷的电动汽车并网双层 低碳优化运行方法

赵津津, 钟俊杰, 戴洁, 黄子凌

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410004)

摘要: 电动汽车作为一种新兴的绿色能源载体, 凭借其闲置时间长和储能特性, 不仅可以缓解电网负荷压力, 还可通过合理调度实现源荷协同互动, 降低碳排放。因此, 如何充分发挥电动汽车的灵活性, 构建兼顾电网安全、经济和低碳目标的优化运行策略, 成为当前亟须解决的重要问题。为解决此问题, 提出了一种针对高峰负荷的低碳优化调度方法, 重点研究了电动汽车作为车网互动(vehicle to grid, V2G)储能资源的调度策略。为了充分调动电动汽车车主的参与积极性, 考虑车主的经济激励, 提出基于双层优化的调度方法。该方法的上层为电力系统, 目标是通过最小化综合成本来制定 V2G 储能的充放电计划; 下层主体为电动汽车车主, 考虑电池损耗, 目标为最小化车主经济支出。仿真结果表明, 所提双层优化方法不仅能够有效提升电力系统的供电可靠性和低碳性, 还能兼顾车主的经济利益, 从而提高车主参与 V2G 储能调度的积极性和可行性。

关键词: 电动汽车并网; 高峰负荷; 双层优化; 低碳优化; 优化调度

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.011 **中图分类号:** TM863 **文章编号:** 1673-9140(2026)01-0108-10

Bi-level low-carbon optimization operation method for electric vehicle grid integration considering peak load

ZHAO Jinjin, ZHONG Junjie, DAI Jie, HUANG Ziling

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: As an emerging green energy carrier, electric vehicles (EVs), with their long idle time and energy storage characteristics, can not only relieve load pressure of the electric power grid but also achieve coordinated interaction between power sources and loads through rational scheduling, thereby reducing carbon emissions. Therefore, how to fully leverage the flexibility of EVs and develop an optimization operation strategy that takes the objectives of electric power grid safety, economy, and low carbon into account has become an urgent and critical issue. A low-carbon optimization scheduling method for peak loads is proposed, focusing on the scheduling strategy of EVs as an energy storage resource of vehicle to grid (V2G). To incentivize EV owners' willingness to participate, a bi-level optimization scheduling method is introduced by considering the economic incentives of EV owners. In this method, the upper level represents the power system, aiming to develop the charging and discharging plans of V2G energy storage by minimizing the comprehensive cost. The lower level represents the EV owners, aiming to minimize their economic expenditure while considering battery degradation. Simulation results demonstrate that the proposed bi-level optimization method not only enhances the power system's power supply reliability and low-carbon performance but also takes the economic interests of EV owners into account, thereby increasing the willingness and feasibility of EV owners to participate in V2G energy storage scheduling.

Key words: electric vehicle grid integration; peak load; bi-level optimization; low-carbon optimization; optimization scheduling

收稿日期: 2024-11-26; 修回日期: 2025-06-27

基金项目: 湖南省自然科学基金青年基金(2025JJ60372); 长沙理工大学智能电网运行与控制湖南省重点实验室科研平台开放基金(2024Kfj01)

通信作者: 钟俊杰(1994—), 男, 博士, 主要从事综合能源系统及电力系统优化研究; E-mail: zhongjj@csust.edu.cn

随着中国经济的快速发展和城市化进程的不断推进,电力需求呈现持续增长的趋势。尤其是在工业化、信息化、智能化等多个领域的推动下,电力消耗大幅增加,导致电力系统的负荷压力日益增大^[1-2]。与此同时,由于电力需求的地域性差异、季节性波动以及日常用电习惯的不同,电力系统面临的峰谷负荷差异愈加显著。特别是在夏季高温天气或冬季采暖期间,空调、取暖设备以及工业等用电量大幅增加,电网的负荷极易超出其承载能力,导致高峰负荷期间供电不足的情况更加突出^[3]。

为了应对这种供需不匹配的局面,传统的解决方案主要集中在增加电力装机容量^[4]、实施有序用电^[5]以及采取错峰限电等措施^[6]。采取有序用电、错峰限电等措施可实现削峰填谷,优化电网负荷曲线,减少高峰期电网压力。然而,这些传统方法相较于车网互动(vehicle to grid, V2G)技术存在一定局限性。有序用电和错峰限电主要依赖行政或市场机制,而V2G提供了一种主动的、基于电动汽车储能能力的调节方式,使负荷管理更加精准和柔性。同时,有序用电和错峰限电主要依赖需求侧用户的行为调整,而V2G可将电动汽车转化为储能资源,提高电网调节能力。此外,错峰限电和有序用电措施虽然能够在一定程度上缓解高峰期电力供应紧张问题,但难以应对突发的电力需求波动,而且会影响商业生产和用户的用电体验。因此,传统的调度手段和应急响应机制在面对复杂电力需求和日益严格的环境要求时,显得越来越不够灵活和高效^[7-8]。

在这种背景下,电动汽车作为新兴的绿色能源载体,逐渐成为缓解电网负荷压力的潜在解决方案之一^[9-13]。电动汽车不仅具有零排放的环保特性,还因大量处于闲置状态,为其在电网高峰期作为储能装置提供了巨大的潜力。目前,中国私家电动汽车的数量已逐年增加,且这些车辆在一天中的大部分时间内处于停车或非使用状态^[14-17]。这一特点使得电动汽车成为一种理想的移动储能设备。通过将电动汽车集群作为储能资源,并结合V2G技术^[18-19],电动汽车不仅能够在电网供电不足时作为后备电源,向电网提供电力支持,同时还能够在电网负荷较低时进行充电,从而实现对电力供需平衡的调节^[20-21]。更重要的是,电动汽车的这一角色有助于提升电网的绿色供电能力,减少传统燃煤发电所带来的碳排放,实现新型电力系统的低碳化转型^[22]。

文献[23]针对大规模电动汽车并网,提出电动

汽车聚合商管理电动汽车充放电行为的优化运行方法。文献[24]提出考虑整合综合能源系统和电动汽车的三阶段合作决策方法。文献[25]针对电动汽车无序充电行为,提出以分时电价驱动的电动汽车多目标优化运行方法。文献[26]进一步考虑电动汽车无序充电造成的道路堵塞和电网电压问题,提出了“车-路-网”协同运行架构。文献[27]构建了电动汽车集群参与配电网运行的鲁棒优化方法。文献[28]针对V2G的受控和不受控充放电方法、延迟充放电方法、间接控制放电方法、双向充放电方法和智能调度方法进行了综合分析。文献[29]研究了电动汽车集群和虚拟发电厂的协同运行方法,表明电动汽车和虚拟发电厂交互具有巨大的发展潜力和灵活性。

然而,上述文献多侧重于电网对电动汽车集群的集中式优化调度,并以单层优化为主。这种单层优化方法能够在一定程度上优化电动汽车与电网的互动,但其局限性在于忽视了电动汽车车主的个体需求与经济利益^[30]。可能导致充电行为与车主需求之间的不匹配,进而影响整体调度的效率和车主的接受度,难以满足电力系统和车主之间日益复杂的需求和约束。为此,采用具有多主体特性的双层优化模型来协调电力系统与电动汽车车主之间的多重利益,已成为解决这一问题的有效手段^[31-32]。然而,现有的双层优化模型主要关注日常负荷波动下的需求响应优化,较少考虑电力系统在高峰负荷期间的调度问题。同时,传统模型通常针对单独电动汽车个体进行建模,可能导致“维数灾”问题,增加求解复杂度。此外,现有研究较少考虑电动汽车的必要约束,忽略了电动汽车充放电过程对电网稳定性和电池健康的潜在影响。

为此,本文首先提出一种针对高峰负荷的电动汽车并网低碳优化调度方法,旨在通过电动汽车的储能特性有效缓解电网高峰期的负荷压力,并降低碳排放。其次,考虑电力系统和电动汽车车主的双重利益主体,构建了基于V2G储能的双层优化调度架构;最后,提出电力系统向电动汽车中间代理商发送充放电计划,中间代理商根据车主的需求进行具体调度的方法。该方法能够有效避免因车辆数量庞大而引发的“维数灾”问题,从而提升优化求解效率。

1 电动汽车V2G双层交互架构

随着电动汽车在电网中的渗透率逐渐增大,电

网调度机构可能无法针对每辆电动汽车制定个性化的调度计划。鉴于智能电网通信技术和带宽的限制,本文提出对电动汽车进行集群调度的策略来解决优化过程中可能出现的“维数灾”问题,并结合V2G储能调度所涉及的电网与电动汽车车主“双主体”特性而构建了双层优化调度方法。

V2G储能充、放电双层调度架构如图1所示,在这一调度框架中,电力系统作为上层利益主体,负责整体电网的调度;而电动汽车集群车主作为下层主体,关注自身的经济效益。双层优化调度的目标是实现电力系统与电动汽车车主之间的经济双赢。具体而言,电力系统调度机构向电动汽车中介代理商发送V2G储能(由 n 辆电动汽车构成的电动汽车集群)的出力计划;当电力系统的发电能力无法满足用电高峰时,需要调动V2G储能向电网提供电力;相反,如果电力系统的出力满足需求后仍有剩余,则可以将剩余电能用于让V2G储能充电。

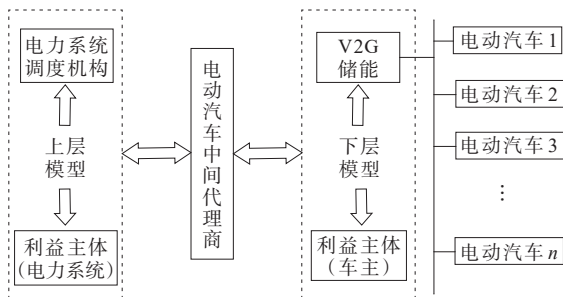


图1 V2G储能充、放电双层调度架构

Figure 1 Bi-level scheduling architecture for V2G energy storage charging and discharging

为了平衡车主的出行需求和电力系统的调度需求,中介代理商在确保车主出行条件不受影响的情况下,指引V2G储能执行电力系统的调度计划。总之,基于所提理论框架,本文构建了电力系统调度机构与电动汽车集群车主之间的双层优化调度框架,旨在提高V2G储能在电力系统调度中的作用和价值。

2 电动汽车V2G双层优化调度模型

2.1 上层电力系统调度主体

在本文的双层优化架构中^[33],上层模型的决策者是电力系统调度机构,因此其优化目标应以全局利益为导向。具体来说,调度机构的任务是通过合理配置V2G储能与传统火发电机组的出力,提升整个电力系统的经济效益。上层优化的核心目标是通过制定火发电机组的出力水平和V2G储能在各个时

段的充放电计划(如充电负荷和放电功率),使得整个电力系统的综合运行成本最小化。在此过程中,上层需要优先考虑全局效益,从而对能源调度进行优化配置,为下层的调度决策提供必要的约束条件。

具体而言,上层电力系统调度主体的综合成本由3个部分组成:一是火发电机组的碳排放成本,二是高峰期可能出现的切负荷惩罚成本,三是给予参与V2G储能的电动汽车车主的经济激励成本。为了实现经济性最优配置,优化问题的目标函数可表述为如下形式:

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \{E_c(t) + P_{ls}(t)V_{ls} + P_d(t)k_d\} \Delta t \quad (1)$$

$$E_c(t) = \sum_{g=1}^G \left[\alpha_g (P_g(t))^2 + \beta_g P_g(t) + \gamma_g \right] \quad (2)$$

式中, F_1 为电力系统的碳排放成本 $E_c(t)$ 、切负荷惩罚成本及给予电动汽车的激励成本之和; $P_{ls}(t)$ 为电力系统的有功功率缺额; V_{ls} 为切负荷成本系数; $P_d(t)$ 为电动汽车作为V2G储能的放电功率; k_d 为V2G储能的放电收益系数; α_g 、 β_g 和 γ_g 为火电机组 g 的碳排放成本系数; $P_g(t)$ 为火电机组 g 的有功出力; G 为发电机集合; T 为时间调度周期内的总时段数;本文调度周期为1d,并分为24个时段。

1) 有功功率平衡约束。

本文假设在电力传输过程中忽略线路损耗,因此在任一时刻,所有传统火发电机组的出力与V2G储能的充放电功率之和应与电网的负荷需求以及可能出现的切负荷总和相等,即

$$\sum_{g=1}^G P_g(t) + P_d(t) - P_c(t) + P_{ls}(t) = P_L(t), \quad \forall t \in [1, T] \quad (3)$$

式中, $P_c(t)$ 为电动汽车V2G储能的充电功率; $P_L(t)$ 为电力系统的总负荷。

2) 传统火电机组出力约束。

根据火发电机组的物理特性,过低的负荷可能导致机组效率降低,甚至无法维持稳定运行,而过高的负荷则可能超出机组的安全运行范围。因此,调度过程中需要保证机组的出力在以下可行范围内:

$$P_{g,\min} \leq P_g(t) \leq P_{g,\max}, \quad \forall t \in [1, T] \quad (4)$$

式中, $P_{g,\min}$ 、 $P_{g,\max}$ 分别为传统火电机组的最小和最大出力。

3) 传统火电机组爬坡约束。

此外,由于火发电机组的燃烧过程、热力学特性

和设备限制,它们在负荷变化时并不能立即响应,而是需要一定的时间和控制来平稳调整输出。因此,爬坡约束用于限制火电机组在一定时间内增减负荷的最大速率:

$$-R_{dg} \leq P_g(t) - P_g(t-1) \leq R_{ug}, \forall t \in [1, T] \quad (5)$$

式中, R_{ug} 、 R_{dg} 分别为传统火电机组的最大向上和向下爬坡率。

4) 电动汽车 V2G 储能可调度功率约束。

由于电动汽车的充放电能力受到电池容量、充电设备的功率、车主需求等因素的影响, V2G 储能的功率调度需要加以约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_c(t) \leq P_{c, \max}, \forall t \in [1, T] \\ 0 \leq P_d(t) \leq P_{d, \max}, \forall t \in [1, T] \end{cases} \quad (6)$$

式中, $P_{c, \max}$ 、 $P_{d, \max}$ 分别为电动汽车 V2G 储能的最大充、放电功率。

2.2 下层电动汽车代理商主体

下层模型的决策者是中间代理商,负责代表所有参与 V2G 储能的电动汽车车主,协调并优化其共同利益^[34]。中间代理商在进行 V2G 储能充放电调度时,需要综合考虑车主的经济利益、日常出行需求以及电池的健康管理。具体来说,代理商在保证车主日常用车需求和电池寿命的前提下,合理安排充放电的时段和功率容量,以实现经济效益的最大化。

下层模型的核心目标是通过经济激励机制,吸引更多车主参与 V2G 储能的调度。为此,下层模型的目标函数是最小化车主的总体成本。车主的成本主要包括两个部分:一是电动汽车充电所产生的费用,二是电池反复充放电所导致的电池损耗费用。然而,车主可以通过将电动汽车与电网连接,进行反向送电,从而获得一定的经济补偿。其数学表达式如下:

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T (P_c(t)k_c + C_b(t) - P_d(t)k_d) \quad (7)$$

$$C_b(t) = k_b (P_c(t) + P_d(t)) \Delta t \quad (8)$$

式中, f_2 为电动汽车车主参与 V2G 储能的成本函数; k_c 、 k_d 分别为 V2G 储能的单位充、放电价格; k_b 为参与 V2G 储能的电动汽车集群的电池损耗费用系数; $C_b(t)$ 为 V2G 储能的电池损耗成本,其值等于电池损耗费用率与对应时段内 V2G 储能充放电总量的乘积; Δt 为调度周期间隔。

由于目前的计量技术尚缺乏统一的动力电池

损耗成本计算方法,精确测量这一成本仍然是一个挑战^[35]。研究表明,当蓄电池进行浅度充放电(如参与二次调频)时,其损耗成本相较于深度充放电(如参与调峰)的成本要低。在本文中,由于 V2G 储能需要在电力系统高峰期进行放电(即进行有序充放电管理),电动汽车将进行深度充放电而产生额外电池损耗费用。其电池损耗费用系数可计算如下:

$$k_b = \frac{1000C_B}{L_c E_b d_{DoD}} \quad (9)$$

式中, C_B 为购买动力电池的费用; L_c 为在特定放电深度下,动力电池可实现的循环次数; E_b 为 V2G 储能系统中动力电池的总容量; d_{DoD} 为与循环次数 L_c 相关联的放电深度。单位损耗成本由购买电池的费用以及该电池在整个使用周期内所传输的总电量共同决定。

1) 不可用时段 V2G 储能约束。

在某些特定的时间段, V2G 储能系统由于电网条件或其他限制,无法与电网进行连接和充放电操作。这些时段可能包括电网过载、系统维护或电网频率不稳定等情况。在这些时段内, V2G 储能系统不能参与电力系统的充电或放电任务:

$$\begin{cases} P_c(t) = 0, \forall t \in [t_s, t_e] \\ P_d(t) = 0, \forall t \in [t_s, t_e] \end{cases} \quad (10)$$

式中, t_s 、 t_e 分别为 V2G 储能接入电力系统和离开电力系统的时间。

2) V2G 储能相邻时段状态变化约束。

V2G 储能接入电力系统后,其聚合后的容量与充、放电之间的关系为

$$E_{V2G}(t + \Delta t) = E_{V2G}(t) + P_c(t) \cdot \Delta t \eta_c - P_d(t) \cdot \Delta t / \eta_d - S_{EVneed}(t) \quad (11)$$

式中, $E_{V2G}(t)$ 为 V2G 储能的容量状态; η_c 、 η_d 分别为 V2G 储能的充、放电效率; $S_{EVneed}(t)$ 为电动汽车出行所需的电量。

3) V2G 储能荷电状态约束。

考虑电动汽车电池的使用寿命以及车主的出行安全,必须确保在各个时刻的荷电状态满足以下要求:

$$S_{SOC, \min} \leq S_{SOC}(t) \leq S_{SOC, \max}, \forall t \in [t_s, t_e] \quad (12)$$

式中, $S_{SOC, \max}$ 、 $S_{SOC, \min}$ 分别为 V2G 储能电池荷电状态的最大值和最小值。

4) 动力电池的充放电功率约束。

为了确保 V2G 储能系统的合理运行,电动汽车

的充放电过程应在合适的范围内进行。本文将电动汽车视为整体进行分析,因此单个电动汽车的充放电功率约束由 V2G 储能系统整体的充放电功率总和来替代。在此, $P_c(t)$ 和 $P_d(t)$ 的约束条件与上层模型时间段的约束条件有所不同:

$$\begin{cases} P_{c,\min} \leq P_c(t) \leq P_{c,\max}, \forall t \in [t_s, t_e] \\ P_{d,\min} \leq P_d(t) \leq P_{d,\max}, \forall t \in [t_s, t_e] \end{cases} \quad (13)$$

式中, $P_{c,\min}$ 、 $P_{d,\min}$ 分别为 V2G 储能中所有电动汽车最小充、放电功率总和。

5) V2G 储能充放电状态的互补约束。

表 1 传统火电机组仿真参数

Table 1 Simulation parameters of traditional thermal power units

火电机组	有功出力上限/MW	有功出力下限/MW	最大向上爬坡率/(MW·h ⁻¹)	最大向下爬坡率/(MW·h ⁻¹)	排放系数 α_g /(美元·(MW·h) ⁻¹)	排放系数 β_g /(美元·(MW·h) ⁻¹)	排放系数 γ_g /(美元·(MW·h) ⁻¹)
1	200	28	40	40	1.2	-5.00	3.00
2	290	20	50	50	2.3	-4.24	6.09
3	190	30	30	30	1.1	-2.15	5.69
4	260	20	50	50	1.1	-3.99	6.20

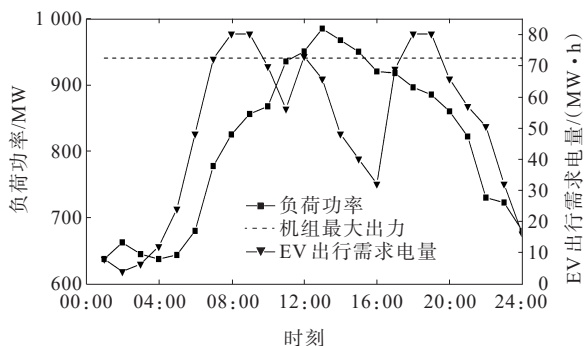


图 2 日负荷功率变化曲线

Figure 2 Variation curves of daily load power

从图 2 可以看出,该地区在 12:00—15:00 这个高峰负荷时段,负荷量均超过所有发电机组的总出力,面临着严重的切负荷风险。为了尽量避免在用电高峰期因电网供电不足导致的切除负荷情况,电网的单位切负荷成本被设定为 2 000 美元/(MW·h)。V2G 储能的最高可调度容量为 1 000 MW,其初始容量为最大容量的一半。各时刻 V2G 储能充放电的最大功率为总容量的 40%。假设参与 V2G 储能的电动汽车集群在并网时的荷电状态呈正态分布,且允许放电的最低 SOC 阈值为 30%,低于此值时,V2G 储能不再向电网反向供电。此外,由于 08:00—09:00 和 18:00—19:00 为上下班高峰期,车主或有自身用车需求,本文设定 V2G 储能在这两个时段不

在 V2G 储能系统中,电动汽车被视为一个整体,因此充电和放电不能同时进行:

$$P_c(t) \cdot P_d(t) = 0, \forall t \in [t_s, t_e] \quad (14)$$

3 案例分析

3.1 仿真情景和参数设置

本文选取 4 个传统火电机组展开仿真,传统火电机组仿真参数如表 1 所示。算例中所用到的基础数据为某一地区典型的日负荷和电动汽车出行所需电量,日负荷功率变化曲线如图 2 所示。本文所提双层优化模型使用 GAMS 商业软件求解。

进行充电。所有参与 V2G 储能的电动汽车充放电电压均为额定电压,且在充电时的转换效率为 95%,放电时的转换效率为 90%。假设 V2G 储能的单位充电价格为 100 美元/(MW·h),单位放电收益为 900 美元/(MW·h),电池的损耗费用为 63 美元/(MW·h)。

3.2 双层模型仿真结果分析

利用 GAMS 求解模型,得到 V2G 储能调度前、后的负荷功率变化曲线、火电机组出力对比分别如图 3、4 所示,V2G 储能调度后的电动汽车集群充、放电功率如图 5 所示。

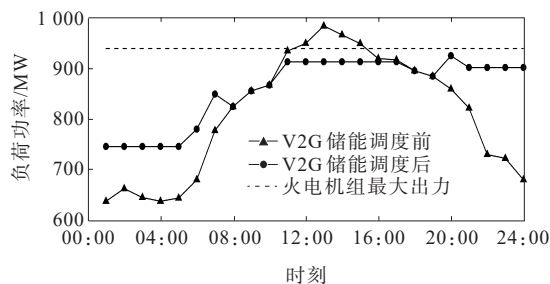


图 3 V2G 储能调度前、后的负荷功率变化曲线

Figure 3 Variation curves of load power before and after V2G energy storage scheduling

由图 3 可知,通过 V2G 储能的合理调节,原来 01:00—06:00 和 22:00—24:00 为负荷低谷期,V2G 储能参与电网调度后有电动汽车集群在这些时段充电(如图 5 所示),所以图 3 中这两个时段的负荷

高于 V2G 储能调度前的负荷,相应地图 4 中火电机组出力也增加;12:00—15:00 为用电负荷高峰期,在 V2G 储能未参与调度时,该时段因火电机组出力不足导致切负荷现象出现;V2G 储能参与调度后,电动汽车集群可在此时作为电源向电网提供反向供电服务(如图 5 所示),使用户侧需求电量得以供应,同时缓解负荷高峰期火电机组发电压力(如图 4 所示)。用电高峰期火电出力总量较 V2G 储能调度前可减少 55.06 MW。

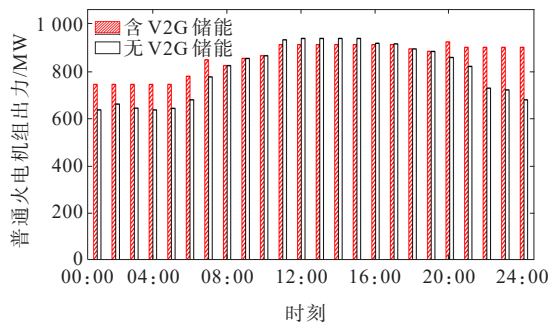


图 4 V2G 储能调度前、后的火电机组出力对比

Figure 4 Comparison of thermal power unit output before and after V2G energy storage scheduling

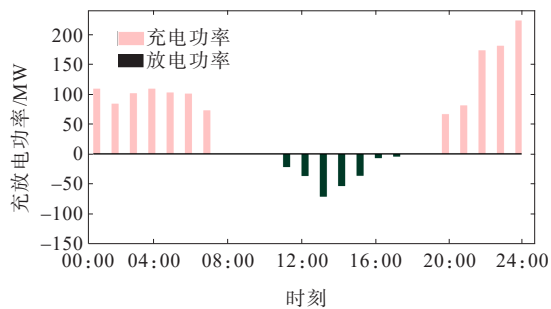


图 5 V2G 储能调度后的电动汽车集群充、放电功率

Figure 5 Charging and discharging power of EV clusters after V2G energy storage scheduling

在自身用电需求得以满足时,电动汽车车主们才会有意愿参与 V2G 储能。这正是电动汽车并网后,电动汽车充电总功率反而大于放电总功率(如图 5 所示)的原因。图 3 中夜间 20:00 左右出现日最高负荷,正是该时段电动汽车充电负荷与原始负荷叠加的结果。综上,本文的双层优化调度模型可以有效平缓电力系统负荷波动,避免用电高峰期切负荷现象的发生,进而提高系统运行可靠性;同时,模型也可大幅度降低火电机组出力波动,减少火电机组设备的维护费用。

V2G 储能并网前、后的仿真结果对比如表 2 所示。由表 2 可知,V2G 储能参与电网调度后,电力系统的综合运行成本增加了 7.6×10^5 美元。有以下两

方面原因:

1) 电力系统需要为 V2G 储能参与电网调度提供经济补偿,导致综合成本上升;

2) V2G 储能在满足自身用电需求的基础上新增了向电网放电的任务,因此其充电功率增加,进而火电机组出力增加,发电侧碳排放成本相应提升。

表 2 V2G 储能并网前、后的仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulation results before and after grid integration of V2G energy storage

V2G 储能	综合成本/ 美元	切负荷量/ MW	车主支出/ 美元
含 V2G 储能	6.67×10^6	0	3.73×10^4
无 V2G 储能	5.91×10^6	91.05	1.90×10^5

与 V2G 储能未参与电网调度时相比,切负荷量减少了 91.05 MW。这一改善源于 V2G 储能的调度,使得电动汽车在用电高峰期间能够向电网提供电力,从而满足了高峰期的负荷需求,避免了弃负荷的情况发生,显著提升了电力系统的供电可靠性。同时,车主的支出费用从 1.90×10^5 美元下降至 3.73×10^4 美元,即通过 V2G 储能调度,参与的电动汽车车主获得了接近 1.53×10^5 美元的收益,这不仅降低了车主的经济负担,还大大提高了他们参与调度的积极性。

3.3 单双层模型仿真结果对比分析

本文将上层模型视为单层模型进行仿真,并与双层模型的仿真结果进行比较,以验证所提双层模型的可靠性和实用性。

双层调度和单层调度负荷功率变化曲线对比如图 6 所示。

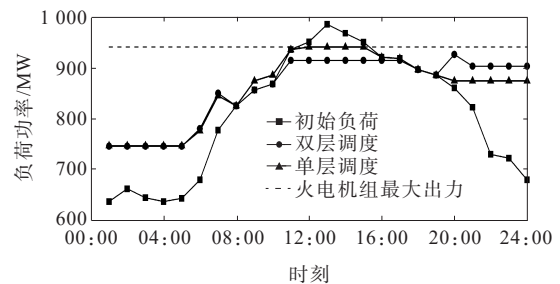


图 6 双层调度和单层调度负荷功率变化曲线对比

Figure 6 Variation curve comparison of load power between bi-level and single level scheduling

从图 6 可以看出,在负荷低谷期(01:00—08:00),两种调度方式的负荷曲线重合率高,说明此时的负荷量接近;在 09:00—15:00,单层调度的负荷明显

高于双层调度;在夜间 20:00—24:00,双层调度的负荷也高于单层调度的负荷。

表 3 展示了双层模型和单层模型的充、放电功率。

表 3 双层模型和单层模型的充、放电功率

Table 3 Charging and discharging power of two-layer model and single-layer model MW

时刻	充电/放电功率	
	双层模型	单层模型
01:00	108.21/0	109.08/0
02:00	83.21/0	84.08/0
03:00	100.71/0	101.58/0
04:00	108.21/0	109.08/0
05:00	101.96/0	102.83/0
06:00	100.09/0	95.74/0
07:00	72.00/0	67.06/0
08:00	0/0	0/0
09:00	0/0	17.83/0
10:00	0/0	17.50/0
11:00	0/21.24	0/0
12:00	0/36.24	0/10.00
13:00	0/70.76	0/44.52
14:00	0/53.15	0/26.91
15:00	0/35.86	0/9.62
16:00	0/6.24	0/0
17:00	0/3.74	0/0
18:00	0/0	0/0
19:00	0/0	0/0
20:00	65.60/0	13.82/0
21:00	80.47/0	51.78/0
22:00	172.41/0	143.72/0
23:00	179.91/0	151.22/0
24:00	222.41/0	193.72/0

由表 3 可知,在 12:00—15:00,V2G 储能在两种模式下都向电网放电。然而,在双层调度模式下,每个时段的放电量都超过单层模式,且双层模式的放电时段还扩展到 11:00 以及 16:00—17:00,整体放电量比单层模式多出 136.15 MW。因放电功率可视为负的充电负荷,双层模式下该时段的负荷曲线明显低于单层模式。夜间 20:00—24:00 时,两种模式下的 V2G 储能均仅有充电功率。且各个时刻双层调度模式充电功率均高于单层模式,总量多出 166.54 MW,因此双层模式下该时段的负荷曲

线也明显高于单层模式。总体而言,相较于单层模式,双层调度模式有效地减小了日负荷峰谷差,并且负荷波动幅度也有所缩小。这表明,双层调度模式不仅减轻了火电机组的负担,还充分发挥了 V2G 储能的调度能力,实现了储能资源的优化配置和高效利用。

表 4 展示了双层模型和单层模型的仿真结果对比。由表 4 可知,两种调度模式下的弃负荷量均为零,均能够避免弃负荷现象的发生。尽管双层调度模式下综合成本比单层调度模式下高出 1.1×10^5 美元,但是单层调度模式下参与 V2G 储能的车主总支出比双层调度模式下高出近 71%。同时,V2G 储能放电总功率也高出近 136.15 MW。双层调度模式下,在使需求侧用电可靠性得到保证的同时,模型还能够兼顾 V2G 储能资源的合理配置,充分利用电动汽车这一清洁能源的反向供电特性使电力系统和车主双方获益。双层调度模式下车主支出更少,故双层调度模式可以更有效地提升车主参与 V2G 储能调度的积极性。

表 4 双层模型和单层模型的仿真结果对比

Table 4 Comparison of simulation results between two-layer model and single-layer model

模型	综合成本/美元	碳排放成本/美元	弃负荷量/MW	车主支出/美元	放电总功率/MW
双层模型	6.67×10^6	6.46×10^6	0	3.74×10^4	227.20
单层模型	6.56×10^6	6.48×10^6	0	1.29×10^5	91.05

双层调度和单层调度碳排放成本对比如图 7 所示。

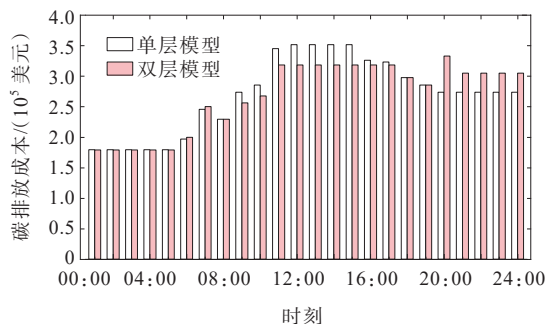


图 7 双层调度和单层调度碳排放成本对比

Figure 7 Comparison of carbon emission cost between bi-level scheduling and single level scheduling

由图 7 可知,在两种调度模式下,单层模型的碳排放成本高于双层模型的碳排放成本,表明双层模式下系统碳排放量更小。这进一步验证了单层模型更加侧重电力系统自身的经济成本,往往

忽视了 V2G 储能这一绿色清洁能源的有效利用。相比之下,双层模型在调度中表现出更强的优势,它能够综合考虑电力系统的经济成本、环境效益以及车主收益等多个目标,做到更全面地优化和权衡。

4 结语

为解决高峰用电期供电中断问题,本文提出了一种新的 V2G 储能双层优化调度模型,考虑了用户的出行时间和电网供电可靠性。该模型的上层侧重于电力系统的综合运行成本,而下层则关注车主的经济利益。模型通过 V2G 技术制定电动汽车集群的充放电计划,实现了电力系统和车主的双赢。主要得到以下结论。

1) 合理安排 V2G 储能参与电网调度可以有效减小负荷的峰谷差,避免高峰期弃负荷现象的发生。同时,V2G 储能还可以使火电机组的出力曲线更加平滑,减轻调峰压力。因此,本文提出的双层优化调度模型显著提高了电网的供电可靠性。

2) 通过对比含有和不含 V2G 储能的电力系统调度结果发现,尽管 V2G 储能的参与会增加电力系统的综合运行成本,但它能够为电动汽车集群车主带来经济收益,降低支出,从而激励更多车主参与 V2G 储能。

3) 通过双层调度模型与单层调度模型的对比结果可知,双层调度模式能进一步减小电力系统的负荷峰谷差,降低碳排放成本,并合理利用 V2G 储能资源,让车主获得更多的经济收益。此外,该模型有助于更好地发挥绿色清洁能源在电力行业中的作用,验证了双层调度模型的有效性与实用性。

受限于当前研究条件,本文对通信延迟和车主响应的不确定性等实际场景问题的深入分析尚未充分展开。未来研究可从以下几个方向进一步完善:首先,针对通信延迟问题,可通过引入低延迟通信协议或优化调度算法中的时间缓冲机制,结合仿真工具量化其对系统性能的影响;其次,对于车主响应的不确定性,可采用概率建模或鲁棒优化方法,设计更贴近实际的激励机制,同时为增强研究的实用性,后续工作计划结合公开数据集或与 V2G 试点项目合作获取实时数据,进一步验证理论模型的有效性;最后,未来可考虑引入阶梯型碳交易机制和碳排放流理论以开展进一步的低碳优化研究。

参考文献:

- [1] 张江丰,苏烨,孙坚栋,等.电网侧电化学储能电站 AGC 控制策略优化及试验分析[J].电力科学与技术学报,2022,37(2):173-180.
ZHANG Jiangfeng, SU Ye, SUN Jiandong, et al. Optimization and test analysis of AGC control strategy for the grid-side electrochemical energy storage power station[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 173-180.
- [2] 邱忠涛,格根敖其,贾跃龙,等.新型电力系统供需协同全要素理论框架[J].中国电力,2025,58(10):147-162.
QIU Zhongtao, GEGEN Aoji, JIA Yuelong, et al. All-factor theoretical framework for supply-demand synergy in new-type power systems[J]. Electric Power, 2025, 58(10): 147-162.
- [3] WANG S, LI F T, ZHANG G H, et al. Analysis of energy storage demand for peak shaving and frequency regulation of power systems with high penetration of renewable energy[J]. Energy, 2023, 267: 126586.
- [4] WIELAND C, SCHIFFLECHNER C, DAWO F B, et al. The organic Rankine cycle power systems market: Recent developments and future perspectives[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224: 119980.
- [5] GOH H H, ZONG L, ZHANG D D, et al. Orderly charging strategy based on optimal time of use price demand response of electric vehicles in distribution network[J]. Energies, 2022, 15(5): 1869.
- [6] CONG M Y, GAO Y Z, WANG W D, et al. Asymmetry stagger array structure ultra-wideband vibration harvester integrating magnetically coupled nonlinear effects[J]. Applied Energy, 2024, 356:122366
- [7] 李军徽,陈国航,马腾,等.高风电渗透率下液流电池储能系统调峰优化控制策略[J].发电技术,2024,45(3):434-447.
LI Junhui, CHEN Guohang, MA Teng, et al. Optimal control strategy of peak shaving of flow battery energy storage system under high wind power permeability[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(3): 434-447.
- [8] 陈智梁,魏苗,胡新源,等.计及绿电交易的风光-梯级混合抽蓄系统多目标调峰优化控制[J].高压电器,2025,61(11):58-70.
CHEN Zhiliang, WEI Miao, HU Xinyuan, et al. Multi-objective optimization for peak shaving of wind-solar-cascade hybrid pumped storage system accounting for green electricity trading[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 58-70.
- [9] EHSANI M, SINGH K V, BANSAL H O, et al. State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles

- [J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(6): 967-984.
- [10] BAARS J, DOMENECH T, BLEISCHWITZ R, et al. Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(1): 71-79.
- [11] 李咸善, 仇成龙, 张远航, 等. 考虑电碳需求响应的电动汽车集群市场化运营策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 163-174.
LI Xianshan, QIU Chenglong, ZHANG Yuanhang, et al. Market-oriented operation strategy for EV clusters considering electricity-carbon demand response[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 163-174.
- [12] 余洋, 钱学尧, 陈晓, 等. 面向 V2G 的电动汽车动态分类及多特征在线聚合方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 37-48.
YU Yang, QIAN Xueyao, CHEN Xiao, et al. Dynamic classification and multi-feature online aggregation method for electric vehicles oriented to V2G[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 37-48.
- [13] 蔡燕春, 张少凡, 汪华, 等. 考虑电动汽车换电站灵活性的配电网经济性与可靠性综合评估研究[J]. 供用电, 2025, 42(12): 58-69.
CAI Yanchun, ZHANG Shaofan, WANG Hua, et al. Research on comprehensive evaluation of distribution network economy and reliability considering flexibility of electric vehicle battery swapping station[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(12): 58-69.
- [14] 张谦, 邓小松, 岳焕展, 等. 计及电池寿命损耗的电动汽车参与能量-调频市场协同优化策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 72-81.
ZHANG Qian, DENG Xiaosong, YUE Huanzhan, et al. Coordinated optimization strategy of electric vehicle cluster participating in energy and frequency regulation markets considering battery lifetime degradation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 72-81.
- [15] YANG D X, LIU H, LI M H, et al. Data-driven analysis of battery electric vehicle energy consumption under real-world temperature conditions[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108590.
- [16] 胡泉, 张泽朕, 杨家全, 等. 融合路网-气象-日期多特征信息的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力建设, 2025, 46(9): 57-70.
HU Xiao, ZHANG Zezhen, YANG Jiaquan, et al. Electric vehicle charging load forecasting by integrating multi-feature information of road network, meteorology, and date[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(9): 57-70.
- [17] 蔡木良, 范瑞祥, 贺贵东, 等. 基于时间规律聚合电动汽车的有源配电网源荷储协同调控[J]. 智慧电力, 2025, 53(1): 54-61.
CAI Muliang, FAN Ruixiang, HE Guidong, et al. Source-load-storage coordinated scheduling for active distribution network based on aggregation of electric vehicles with time pattern[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 54-61.
- [18] WEN S, LIN N, HUANG S X, et al. Lithium battery health state assessment based on vehicle-to-grid (V2G) real-world data and natural gradient boosting model[J]. Energy, 2023, 284: 129246.
- [19] 张宇, 何奇, 王海亮, 等. 基于改进出行链的电动汽车充电负荷预测及其对配电网的影响[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(3): 67-77.
ZHANG Yu, HE Qi, WANG Hailiang, et al. The spatial-temporal prediction of electric vehicle charging load based on optimized trip chain and its impacts on distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(3): 67-77.
- [20] SHANG Y T, LI Z K, LI S, et al. An information security solution for vehicle-to-grid scheduling by distributed edge computing and federated deep learning[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(3): 4381-4395.
- [21] 余洋, 钱学尧, 陈晓, 等. 面向 V2G 的电动汽车动态分类及多特征在线聚合方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 37-48.
YU Yang, QIAN Xueyao, CHEN Xiao, et al. Dynamic classification and multi-feature online aggregation method for electric vehicles oriented to V2G[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 37-48.
- [22] WU T, LI Z Y, WANG G B, et al. Low-carbon charging facilities planning for electric vehicles based on a novel travel route choice model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(6): 5908-5922.
- [23] BAI X Q, QIAO W. Robust optimization for bidirectional dispatch coordination of large-scale V2G [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1944-1954.
- [24] ZAHEDMANESH A, MUTTAQI K M, SUTANTO D. A cooperative energy management in a virtual energy hub of an electric transportation system powered by PV generation and energy storage[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1123-1133.
- [25] 房超运, 杨昆, 柴瑞环, 等. 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.
FANG Chaoyun, YANG Kun, CHAI Ruihuan, et al. 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.
- [26] 姜晓锋, 魏巍, 王永灿, 等. “车-路-网”协同优化下的电动汽车有序充电引导策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(5): 44-56.
- JIANG Xiaofeng, WEI Wei, WANG Yongcan, et al. Orderly charging guidance strategies for electric vehicles under EVs-traffic-distribution collaborative optimization [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(5): 44-56.
- [27] ZHONG J J, CAO Y J, LI Y, et al. Distributed modeling considering uncertainties for robust operation of integrated energy system[J]. *Energy*, 2021, 224: 120179.
- [28] MASTOI M S, ZHUANG S X, MUNIR H M, et al. A study of charging-dispatch strategies and vehicle-to-grid technologies for electric vehicles in distribution networks [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 1777-1806.
- [29] QIN Y D, RAO Y R, XU Z C, et al. Toward flexibility of user side in China: Virtual power plant (VPP) and vehicle-to-grid (V2G) interaction[J]. *eTransportation*, 2023, 18: 100291.
- [30] ZHONG J J, LI Y, WU Y, et al. Optimal operation of energy hub: an integrated model combined distributionally robust optimization method with Stackelberg game[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(3): 1835-1848.
- [31] MENG W Q, SONG D R, HUANG L S, et al. A bi-level optimization strategy for electric vehicle retailers based on robust pricing and hybrid demand response[J]. *Energy*, 2024, 289: 129913.
- [32] NGUYEN Q M, NGUYEN D L, NGUYEN Q A, et al. A bi-level optimization for the planning of microgrid with the integration of hydrogen energy storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 63: 967-974.
- [33] LIU R S, GAO J X, ZHANG J, et al. Investigating bi-level optimization for learning and vision from a unified perspective: a survey and beyond[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44 (12): 10045-10067.
- [34] ZHENG Y C, WANG Y B, YANG Q. Two-phase operation for coordinated charging of electric vehicles in a market environment: From electric vehicle aggregators' perspective[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 171: 113006.
- [35] LIU K L, HU X S, YANG Z L, et al. Lithium-ion battery charging management considering economic costs of electrical energy loss and battery degradation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 195: 167-179.