

采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略

王 毅^{1,2,3}, 陈 进¹, 麻 秀¹, 侯兴哲², 郑 可², 陈文礼²

(1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065;

2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 400014;

3. 国网重庆市电力公司博士后科研工作站, 重庆 400014)

摘要:大规模电动汽车(EV)无序充电将会威胁电网的安全运行。为此,提出一种采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略。首先,根据EV的电池约束、时间约束及充放电转换次数约束,将各时段的EV动态划分为常规车群和调控车群,常规车群进行无序充电,调控车群包含充电车群和放电车群;然后,在控制中心以车群划分情况和车群负荷信息为约束条件,优化调控车群的可调度负荷使研究时段内的总负荷方差最小化;最后,根据EV的出行约束计算EV的权系数,采用功率分配算法控制充放电功率不高于可调度负荷值。所提方法能保证EV在满足出行需求的情况下,对电网进行削峰填谷。算例结果验证了所提方法的合理性和有效性;所提调度策略方案实施简单,效果明显,有利于进行实际应用。

关键词:电动汽车;电动汽车与电网互动;分群优化;功率分配;削峰填谷;调度策略

中图分类号:U 469.72;TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004010

0 引言

为了缓解日益严重的能源危机和环境污染等问题,电动汽车(EV)因具有良好的环保性和以多能源为动力等优势得到了大力推广及使用。随着充电设施的不断扩增与完善,EV的保有量也在逐年不断增加。但EV集中充电时产生巨大的充电功率,势必会对电网频率和电压造成强烈的扰动冲击^[1]。若能合理调控EV的充放电过程,将有利于实现对电网的调峰/调频、平抑波动及提供备用电源等作用。

关于EV无序充电对电网稳定运行造成的影响,已有大量文献对此开展研究。文献[2]将电池充电过程划分为5个阶段,考虑行程结束时间与每日行驶里程的概率分布,结合分时电价与电池在各阶段的充电功率,得到每个时段内EV的充电负荷期望值,根据中心极限定理计算所有车辆充电的分布情况来降低EV充电对电网的不利影响。文献[3]以谷电价时段为研究时段,针对满足延迟充电的EV按比例分别采用以谷时段开始时为其充电起始时段的正序充电模式和以谷时段结束时为其充电结束时间段的倒序充电模式。文献[4]采用主成分分析和模糊聚类相结合的方法预测EV的续驶里程,同时计算车辆

每次充电的充电量,根据配电网的负荷曲线调度EV充电以减少配电网负荷的峰谷差。文献[5]提出了改进初始种群生成和拥挤度比较算子相结合的非支配排序遗传算法(NSGA-II),以EV充电容量和配电变压器容量限制为约束条件,构建以单位电量充电费用最少、电网侧负荷方差最小为目标的EV充电站多目标充电模型,并采用基于信息熵的序数偏好法从最终 Pareto 解集中选择最优折中充电方案来提高电网侧的负荷水平和用户的充电性价比。然而上述研究主要集中在将EV单纯作为用电负荷与电网进行协调调度的问题,通过控制EV的充电时间来减少其对电网的影响,并未考虑放电的情况。

而针对EV充放电控制,目前已有学者从群体调度和个体调度2个方面开展研究。个体调度适用于车辆规模较小的控制场景,文献[6-7]针对每辆EV的出行需求条件,建立充放电优化的实时调度模型,能满足每辆EV的充电需求,但当入网车辆数增多时,变量维数的增加会使计算量呈指数倍增长,求解困难甚至无解。群体调度则是对电网中的EV进行集群,对群整体进行调度^[8-10]。文献[8]根据EV出行结束时刻、所需充电时长等出行特征进行分群调度,并对每个子群内的EV分别制定延时充放电策略;文献[9]在上层模型中优化各EV代理商的调度计划,在下层模型则对代理商下的EV优化充放电时间;文献[10]根据接入EV不同的期望充电完成时间,将其划分为若干个不同优先级的EV集群,建立了以负荷方差最小化为目标的EV群体优化模型。上述群体调度策略虽能降低模型求解计算的复杂度,但是未考虑集群内部单辆EV的调度优先级及能量分配的公平性。

收稿日期:2019-04-10;修回日期:2020-02-11

基金项目:中国博士后基金资助项目(2015T80961);重庆市教委科学研究项目(KJ120531);国家科技支撑计划项目(2015BAG10B00)

Project supported by China Postdoctoral Science Foundation (2015T80961), the Scientific Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ120531) and the National Key Technology Support Program of China (2015BAG-10B00)

针对上述问题,本文对充放电过程中单辆EV的具体功率分配开展研究,结合集群调度原理,根据实时负荷动态调整EV的充放电状态,提出了一种分群优化的电动汽车与电网互动(V2G)方法。本文基于大量汇聚的充电信息将EV按电池约束和时间约束条件划分成群,根据当前电网的实际状况以及各子群的电能需求和充放电能力对EV总的充放电功率进行优化控制,进而生成功率分配算法公平控制每辆EV的充放电过程。算例仿真结果表明,所提策略能在保证用户满意度的情况下有效地降低负荷方差,实现削峰填谷,并减少充电成本。

1 分群优化思路

本文研究的目的是充分利用EV充电时间的可调节性,最大限度地发挥EV的储能潜力以达到削峰填谷的效果。对EV进行分群优化调度的思路如图1所示。

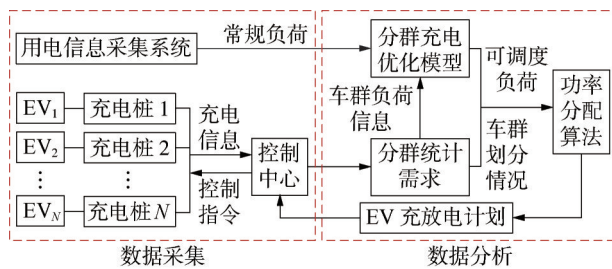


图1 EV分群优化调度思路

Fig.1 Group-based optimization scheduling idea of EV

具体实施步骤如下。

(1)数据采集:通过用电信息采集系统获取电网的实时负荷信息;通过EV的电池管理系统获取接入车辆的电池信息,包括额定功率、电池容量、电池荷电状态(SOC)等;同时用户通过充电桩上的人机交互界面输入预期电量状态、预计取车时间等出行数据,以及是否接受为电网提供调控服务等信息。

(2)数据分析:将电网信息与充电信息通过有线或无线的通信方式上传至控制中心,并提取EV的历史出行数据和充电完成情况,在控制中心建立EV互动调度策略模型。该策略模型包括分群充电优化模型与功率分配算法。

a. 分群充电优化模型:制定分群判别标准并下发至每个充电桩,汇总车群划分情况,统计各车群负荷信息。建立以最小负荷方差为目标的优化模型,优化各车群的可调度负荷限制值。

b. 功率分配算法:将满足用户行驶需求置于首要位置,根据车群划分情况,通过可调度负荷限制值控制EV的充放电功率,输出车群的充放电方案。

(3)方案执行:将控制中心根据时隙更新的充放电计划发布至充电桩,控制充电桩的充放电功能及

输入、输出功率,从而控制EV的充放电行为。

2 分群优化的互动调度策略

2.1 变量定义及计算公式

本文基于电网信息和车辆的实时输入信息,由控制中心动态更新分群的需求统计和充电优化模型,根据电网的波动状况集中调控EV的充放电任务。即将1d按时段划分为多个充电控制时段,分别优化各控制时段内EV的充放电计划。在设置更新数据信息的时隙长度 Δt (单位为min)时,应结合实际车辆的接入情况而决定。本文的研究控制时间为00:00—24:00,研究控制时段数为 $24 \times 60 / \Delta t$ 。用 n 表示时段的序号,例如 $n=1$ 表示时段1,即00:00—01:00。文中涉及的变量定义如下。

(1)本文采用文献[11]调研得到的典型工商业区的EV在工作日的停车需求拟合结果表示EV的到达时刻 $t_{\text{start},i}$,其概率密度函数 $f_s(t)$ 如式(1)所示。

$$f_s(t) = 0.30 + 0.72 \exp \{ -[(t - 13.52)/5.09]^2 \} \quad (1)$$

(2)用户出行时EV i 的荷电状态 $\text{SOC}_{\text{de},i}$ 应满足:

$$\text{SOC}_{\text{ex},i} \leq \text{SOC}_{\text{de},i} \leq 1 \quad (2)$$

其中, $\text{SOC}_{\text{ex},i}$ 为EV i 的预期荷电状态。

(3)EV i 的充/放电功率 p_i 不能超出其额定功率 $p_{\text{EV},i}$,即:

$$-p_{\text{EV},i} \leq p_i \leq p_{\text{EV},i} \quad (3)$$

(4)为了满足用户的出行需求,根据EV i 在时段 n 的荷电状态 SOC_i^n ,根据式(4)计算EV i 在时段 n 的需求充电时长 $T_{\text{need},i}^n$ 。

$$T_{\text{need},i}^n = (\text{SOC}_{\text{ex},i} - \text{SOC}_i^n) W_i / (p_i \eta) \quad (4)$$

其中, W_i 为EV i 的电池容量,单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; η 为充电桩的充电效率。

(5)EV i 在控制时段 n 的剩余停留时长 $T_{\text{stay},i}^n$ 为:

$$T_{\text{stay},i}^n = T_{\text{stay},i} - (n \Delta t - t_{\text{start},i}) \quad (5)$$

其中, $T_{\text{stay},i}$ 为EV i 的停留时长。

2.2 分群判别标准及可调度负荷需求统计

(1)分群判别标准。

根据EV的自身属性,控制中心综合车辆类型、荷电状态、停车时长及车主意愿4个指标,将时段 n 的EV划分为常规(非调控)车群 S_1 与调控车群 S_2 。其中 S_1 具有不可调控的绝对性,当充电桩检测接入的EV符合 S_1 的标准时,将自动进入充电模式,直到满足荷电状态要求或到达出行时刻。 S_2 能通过充电桩提供双向功率流到正在运行的电网进行调峰或者为电网提供辅助服务,该车群的充电起始时间可以在出行时刻前进行灵活调节^[12]。因此当充电桩检测到接入的EV符合 S_2 的标准时,将处于等待充放电指令下发阶段。分群判别标准次序如下。

a. 首先检测接入的EV类型,当EV为租赁型

EV、纯电动出租车时,由于该类型EV的停车时间短且有紧急充电需求,不宜调控其充电时间,故将其编入车群 S_1 。

b. 然后查看车主的意愿,当车主拒绝为电网提供调控服务时,将其编入车群 S_1 。

c. 最后进行条件判定:其余EV类型如私家车和商务车,需根据电池约束、时间约束及充放电转换次数约束进行判定。当 EV_i 满足式(6)~(9)时,将其编入车群 S_1 ;否则,将其编入车群 S_2 。

$$SOC_i^n < SOC_{ex,i} \quad (6)$$

$$T_{need,i}^n < T_{stay,i}^n \quad (7)$$

$$U_{i,t} = |X_{i,t} - X_{i,t-1}| \quad (8)$$

$$U_i = \sum_{t \in W_i^n} U_{i,t} > U_L - \sum_{t \in \bar{W}_i^n} U_{i,t} \quad (9)$$

其中, W_i^n 为 EV_i 在时段 n 的控制时间窗口,即 $W_i^n = \{t | t_{start,i}/\Delta t \leq t \leq n\}$; $X_{i,t}$ 为 EV_i 在时刻 t 的充放电状态,用来确定前一时刻开始到结束时是否发生充放电转换,充电时取值为0,放电时取值为1; $U_{i,t}$ 为 EV_i 在时刻 t 的充放电转换状态变量; U_i 为 EV_i 在控制时间窗口内的充放电转换次数; U_L 为充放电转换次数限值; $\bar{W}_i^n$ 为 EV_i 除控制时间窗口 W_i^n 外的时段集合。

式(6)和式(7)分别为 EV_i 的电池约束和时间约束,表示若 EV_i 在有限的停留时间内持续充电未能满足预期的荷电状态,应将 EV_i 编入车群 S_1 ,并立即为 EV_i 进行充电;式(8)和式(9)为充放电转换次数约束,表示 EV_i 的充放电转换次数超出了限定次数,应停止对 EV_i 的调度,将 EV_i 编入车群 S_1 。

(2)可调度负荷需求统计。

控制中心通过连接车群 S_1 的充电桩获取接入EV的电池信息,统计车群 S_1 在时段 n 的充电需求负荷 $P_{S_1}^n$ 。目前EV的动力电池主要以锂电池为主,锂电池的充电过程是先恒流、后恒压充电,且恒流充电状态维持的时间最长。因此将车群 S_1 内的EV视为恒流充电,其充电功率为额定功率。 $P_{S_1}^n$ 的计算公式如下:

$$P_{S_1}^n = \sum_{EV_i \in S_1} p_i \quad (10)$$

$$p_i = p_{EV_i} \quad (11)$$

控制中心通过连接车群 S_2 的充电桩上传充电信息,分析车群 S_2 在时段 n 参与电网削峰填谷的可调度能力(包括充电存储和放电出力),由充电优化模型确定车群 S_2 的充放电指令。从行驶要求和电池寿命考虑,V2G应用时应控制较小的放电倍率和较浅的放电深度^[12]。因此将车群 S_2 内EV的充放电功率均设为低功率 p_s 。

在评估车群 S_2 的充电存储能力时,为了防止 S_2 中EV电池过充,将 S_2 中具有存储空间的EV标记为

S_{21} (充电车群),负责充电。统计车群 S_2 在时段 n 的可充电负荷 $P_{S_{21}}^n$ 为:

$$P_{S_{21}}^n = \sum_{EV_i \in S_{21}} p_i \quad (12)$$

$$p_i = p_s \quad (13)$$

在评估车群 S_2 的放电出力能力时,需保证 EV_i 在出行时满足预期电荷量,并防止 S_2 中EV电池过放,导致电池受损。因此将 S_2 中满足式(14)和式(15)的EV标记为 S_{22} (放电车群),负责放电。

$$SOC_i^n - \frac{p_s \Delta t}{W_i} + \frac{(T_{stay,i}^n - \Delta t) p_s}{W_i} \geq SOC_{ex,i}^n \quad (14)$$

$$SOC_i^n > 0.2 \quad (15)$$

因此车群 S_2 在时段 n 的可放电负荷 $P_{S_{22}}^n$ 为:

$$P_{S_{22}}^n = \sum_{EV_i \in S_{22}} p_i \quad (16)$$

$$p_i = -p_s \quad (17)$$

2.3 充电优化模型

控制中心根据各车群的负荷信息及常规负荷信息情况,对各车群的负荷进行优化限制。但常规车群 S_1 仅作为充电负荷接入电网,不参与电网调度,因此不对常规车群的充电功率进行限制。调控车群 S_2 是参与电网削峰填谷的主力,需计算采用何种可调度负荷限制值对调控车群进行有序充放电控制以达到最小化负荷波动的目的,为了保证用户的受益情况,还应考虑可调度负荷限制值对用户充电费用的影响。

假设分时放电电价与充电电价相等,建立时段 n 的优化模型使时段1~ n 的电网整体负荷方差最低,且参与调控的充电总费用低于无序充电的总费用,优化变量为时段 n 调控车群 S_2 的可调度负荷限制值 P_{V2G}^n 。时段 n 的优化模型为:

$$P_{V2G,op}^n = \argmin J(P_{V2G}^n) \quad (18)$$

$$\text{s.t. } P_{S_{22}}^n \leq P_{V2G}^n \leq P_{S_{21}}^n \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^n (P_{S_1}^j + P_{V2G}^j) \Delta t^j c^j < \sum_{j=1}^n P_{wx}^j \Delta t^j c^j \quad (20)$$

$$J(P_{V2G}^n) = \sum_{j=1}^n (P_{LD}^j + P_{S_1}^j + P_{V2G}^j - P_{av}^n)^2 \quad (21)$$

$$P_{av}^n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{LD}^j + P_{S_1}^j + P_{V2G}^j) \quad (22)$$

其中, P_{LD}^j 和 P_{wx}^j 分别为时段 j 的常规负荷和EV无序充电所需总负荷,单位为kW; P_{V2G}^j 为时段 j 车群 S_2 的可调度负荷限制值,单位为kW; Δt^j 为时段 j 的时长; c^j 为时段 j 的分时电价,单位为元/(kW·h)。

2.4 EV充放电计划

常规车群 S_1 由充电桩自主感应,采用无序充电方式。经优化模型求解得到时段 n 的最佳可调度负

荷之后,控制中心根据该值确定调控车群 S_2 的充放电状态以及对群内各EV的充放电功率进行公平调节,并下发充放电计划至连接调控车群的充电桩。

带权最大最小公平分配算法^[13]根据用户权值对有限的资源进行调度,是用于解决无线通信时资源中带宽的公平分配问题的一种调度算法^[14]。因此本文结合带权最大最小公平分配算法实现有限电力资源的公平分配,制定 S_2 的充放电方案流程如下。

(1)根据 P_{V2G}^n 判定调控车群 S_2 的充放电状态:若 $P_{V2G.op}^n > 0$,则控制中心向调控车群 S_2 中的充电车群 S_{21} 下发充电指令, S_{21} 从电网存储 $P_{V2G.op}^n$ 的电量,执行步骤(2);若 $P_{V2G.op}^n < 0$,则向 S_2 中的放电车群 S_{22} 下发放电指令, S_{22} 向电网中反馈 $P_{V2G.op}^n$ 的电量,执行步骤(3);若 $P_{V2G.op}^n = 0$, S_2 将继续等待下发指令直至时段 $n+1$ 。

(2)若 $P_{V2G.op}^n > 0$,计算 S_{21} 中EV的充电权重,优化充电功率,步骤如下。

a. 由于 S_{21} 内的EV对充电需求的迫切程度和电能存储空间不尽相同,荷电状态越小、剩余停留时长越短、需充电时长越长的EV的充电功率应越大。但EV很可能在上报的停留时长内脱离电网,考虑到车主用车的随机性将诚信度 ρ 引入功率分配算法中。EV的诚信度越高,则越优先调度,充电功率应越大。若EV按上报计划离开电网,则EV的诚信度 $\rho=1$;若EV在计划时段内突然脱离电网,设定其诚信度为上报电量和脱离电网缺失的可用电量之差与其上报电量的比值。定义用户的诚信度为^[15]:

$$\rho = \frac{\overline{\text{SOC}}_{\text{ex}} - \bar{\Delta}_{\text{SOC}}}{\overline{\text{SOC}}_{\text{ex}}} \quad (23)$$

其中, $\overline{\text{SOC}}_{\text{ex}}$ 为历史平均上报预期荷电状态; $\bar{\Delta}_{\text{SOC}}$ 为历史平均差额荷电状态,表示车辆离开电网时带走的剩余上报荷电状态。

因此将时段 n 各EV的荷电状态 SOC_i^n 和剩余停留时长 $T_{\text{stay},i}^n$ 按逆向指标处理,诚信度 ρ_i 和需充电时长 $T_{\text{need},i}^n$ 按正向指标处理。基于熵权法^[16]求得 S_{21} 内EV i 的客观评价价值,将数值进行标准化后作为功率分配的充电权系数 s_{chi} ,用以表征EV之间的调度公平性。权系数 s_{chi} 的计算过程如下。

将各评价指标数据进行归一化处理:

$$Y_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min \{X_i\}}{\max \{X_i\} - \min \{X_i\}} & \text{正向指标} \\ \frac{\max \{X_i\} - X_{ij}}{\max \{X_i\} - \min \{X_i\}} & \text{逆向指标} \end{cases} \quad (24)$$

其中, X_{ij} 为EV i 的第 j 项指标; Y_{ij} 为标准化数据。

求各项指标的信息熵为:

$$E_j = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N p_{ij} \ln p_{ij} \quad (25)$$

$$p_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^N Y_{ij} \quad (26)$$

其中, N 为充电EV数量。若 $p_{ij} = 0$,则 $\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

确定各指标权重:

$$\lambda_j = (1 - E_j) / \left(k - \sum_{j=1}^k E_j \right) \quad (27)$$

其中, k 为指标个数,在本文中 $k=4$ 。

计算EV i 的评价系数:

$$v_i = \sum_{j=1}^k Y_{ij} \lambda_j \quad (28)$$

计算EV i 的充电权值 s_{chi} :

$$s_{\text{chi}} = v_i / \min \{V\} \quad (29)$$

其中, $V = \{v_1, \dots, v_i, \dots, v_N\}$ 为评价系数的集合; $\min \{V\}$ 为集合 V 中的最小元素。

b. 将 $P_{V2G.op}^n$ 基于 S_{21} 中EV i 的权系数进行第1个阶段的功率分配:

$$P_i(1) = P_{V2G.op}^n \frac{s_{\text{chi}}}{\sum_{EV_i \in S_{21}} s_{\text{chy}}} \quad (30)$$

c. 统计第 $j(j=1, 2, \dots)$ 个阶段分配后的总剩余负荷 $P_{\text{able}}(j)$ 与分配功率未达到最大充电功率的EV的充电权系数总和 $\lambda_{\text{ch}}(j)$ 。计算公式如下:

$$P_{\text{able}}(j) = \sum (p_i(j) - p_s) \quad p_i(j) \geq p_s \quad (31)$$

$$\lambda_{\text{ch}}(j) = \sum s_{\text{chi}}(j) \quad s_{\text{chi}}(j) \in \{s_{\text{ch}S_{21}}(j) \mid p_i(j) < p_s\} \quad (32)$$

其中, s_{chi} 和 $s_{\text{ch}S_{21}}(j)$ 分别为第 j 个阶段分配结束之后的分配功率未达到最高充电功率的车辆权系数和权系数集合。

d. 当检测到 $P_{\text{able}}(j) > 0$ 且 $\lambda_{\text{ch}}(j) > 0$ 时,继续进行第 $j+1$ 个阶段的功率分配;否则,表明在第 j 个阶段功率分配结束后,不存在剩余负荷或功率未得到满足的EV,此时转步骤g。

e. 进行第 $j+1$ 个阶段的分配:将第 j 个阶段的剩余负荷补给功率未得到满足的EV,分配功率不超过 p_s 。第 $j+1$ 个阶段的分配功率为:

$$p_i(j+1) = \begin{cases} p_s & p_i(j) \geq p_s \\ p_i(j) + P_{\text{able}}(j) \frac{s_{\text{chi}}(j)}{\lambda_{\text{ch}}(j)} & p_i(j) < p_s \end{cases} \quad (33)$$

f. 转步骤c,继续执行阶段分配。

g. 将输出的第 j 个阶段的分配功率 $p_i(j)$ 作为EV i 在时段 n 的实际充电功率,向连接的充电桩下发该值与充电指令。

(3)若 $P_{V2G.op}^n < 0$,计算 S_{22} 中EV的放电权重,优化放电功率。

a. 由于 S_{22} 内EV电池的放电空间不尽相同,荷电状态越大、剩余停留时长越长、需充电时长越短的

EV的放电功率应越大,其诚信度越高越优先调度。因此将EV_i在时段 n 的诚信度 ρ_i 、荷电状态 SOC_i^n 、剩余停留时长 $T_{\text{stay},i}^n$ 作为正向指标,需充电时长 $T_{\text{need},i}^n$ 为逆向指标,计算 S_{22} 内每辆EV的放电权系数 $s_{\text{dis},i}$ 。

b. 将 $P_{\text{V2G},\text{op}}^n$ 基于 S_{22} 中每辆EV的权系数进行第1个阶段的功率分配:

$$P_i(1) = P_{\text{V2G},\text{op}}^n \frac{s_{\text{dis},i}}{\sum_{\text{EV}_j \in S_{22}} s_{\text{dis},j}} \quad (34)$$

c. 统计在第 j ($j=1,2,\dots$)个阶段分配后的总剩余负荷 $P_{\text{able}}(j)$ 与未达到最高放电功率的EV的放电权系数总和 $\lambda_{\text{dis}}(j)$,计算公式分别为:

$$P_{\text{able}}(j) = \sum (-p_i(j) - p_s) \quad p_i(j) \leq -p_s \quad (35)$$

$$\lambda_{\text{dis}}(j) = \sum s_{\text{dis},i}(j) \quad s_{\text{dis},i}(j) \in \{S_{\text{dis},S_{22}}(j) | p_i(j) > -p_s\} \quad (36)$$

其中, $s_{\text{dis},i}(j)$ 和 $S_{\text{dis},S_{22}}(j)$ 分别为第 j 个阶段分配结束之后分配的放电功率未达到最高放电功率的EV的权系数和权系数集合。

d. 当检测到 $P_{\text{able}}(j) > 0$ 且 $\lambda_{\text{dis}}(j) > 0$ 时,继续进行第 $j+1$ 个阶段的分配;否则,表明在第 j 个阶段分配结束后,不存在剩余负荷或功率未得到满足的EV,此时转步骤g。

e. 进行第 $j+1$ 个阶段分配:调整第 j 个阶段的分配功率,将第 j 个阶段的剩余负荷补给功率未得到满足的EV。该阶段的分配功率为:

$$p_i(j+1) = \begin{cases} -p_s & p_i(j) \leq -p_s \\ p_i(j) - P_{\text{able}}(j) \frac{s_{\text{dis},i}(j)}{\lambda_{\text{dis}}(j)} & p_i(j) > -p_s \end{cases} \quad (37)$$

f. 转步骤c,继续执行阶段分配。

g. 输出第 j 个阶段的分配功率 $p_i(j)$ 为EV_i在时段 n 的实际放电功率,连同放电指令下发至连接EV_i的充电桩。

2.5 引导机制

参与调控的EV数将会直接影响对电网削峰填谷的效果。因此为了保证EV用户受有序充放电的引导程度,本文提出了一种补偿思路:即通过放电收益和补偿收益激励用户参与调度。在EV脱离电网前,在参与放电时段内获得与相应时段充电电价(单位为元/(kW·h))等价的放电收益。在全天电网调控结束后,统计在有序充放电引导下的充电成本为 a ,采用无序充电后产生的充电成本为 b ,充电站设施维护成本为 c ,显然因部分EV参与有序充放电带来的补偿收益为 $b-a-c$ 。 $b-a-c$ 只为进行有序充放电的EV分摊,分摊比例为每辆参与充放电调控EV的负荷量占所有有序充放电总负荷总量之比。

3 算例仿真

3.1 算例参数

某城市商业区典型的常规日负荷曲线如附录中图A1所示,07:00—20:00处于用电高峰期,日最大负荷峰值为1055 kW。商业区充电站的配电设施维护成本一般为配电成本的3%左右,大约每年6万元^[17],每日维护费用约为164元。并且充电站采用国内工业用电分时电价^[18],假设放电电价与充电电价相等,如附录中表A1所示。

假定商业区充电站内充放电装置的数量规模较大,EV的电池容量为20~60 kW·h,慢充最大功率为4 kW,额定充电功率为15~20 kW,充放电效率均取为0.95,并设定EV一天内的充放电转换次数不超过4次。本文根据文献[6]关于公司附近停车场EV的行驶特性进行充电模拟,其中设定商业区EV在到来时的初始荷电状态和预期荷电状态分别在0.2~0.8和0.4~0.7范围内呈均匀分布,停留时长服从均值为10 h、方差为9 h²的正态分布。所有EV的到来时刻和充电时长根据2.1节求取。此外假设了EV历史平均上报预期荷电状态 $\overline{\text{SOC}}_{\text{ex}}$ 在0.6~0.8范围内呈均匀分布,历史平均差额荷电状态 $\bar{\Delta}_{\text{soc}}$ 在0~0.3范围内呈均匀分布。

3.2 分群优化仿真结果

为了直观地反映分群优化调度方案的控制效果,假设更新数据的时隙长度为15 min。根据图1所示的分群优化流程,对每个时段EV的分群优化调度进行时序仿真,并与分群优化前默认采用的无序充电模式进行对比。在无序充电模式下,EV的充电时间不受限制,用户习惯于将EV接入充电桩后立即以额定功率充电,直到荷电状态达到最大允许值或接近出行离开时间。

图2为当充电EV规模分别为200、300、400、500辆时的日负荷分布曲线,可以看出:

(1)在采用分群优化方案前,商业区EV在无序充电模式下的充电负荷高峰会与电网原有用电高峰重合,导致商业区的负荷峰谷差增大,将会对电网的用电安全造成威胁;

(2)在采用分群优化管理后,调控车群根据电网的波动情况进行充放电调节,在用电高峰期放电缓解了电网的供电压力,降低了负荷峰值,并且在用电低谷时段存储电网过剩的发电力,可以极大地降低电网峰谷差,起到削峰填谷的作用;

(3)当接入的EV数量增多时,从曲线的变化趋势可看出,采用分群优化调度方案使负荷波动趋近平缓,削峰填谷的效果更为显著。

500辆EV在分群优化管理前、后的充电负荷分布如图3所示,具体分析结果如附录中表A2所

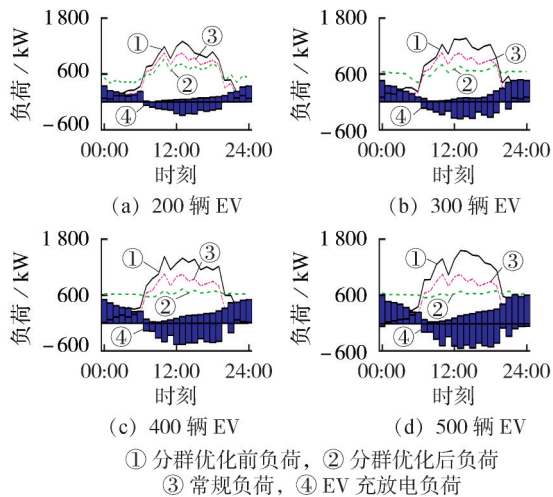


图2 不同EV规模下的负荷曲线

Fig.2 Load curves with different numbers of EVs

示。采用分群优化管理后,系统的峰谷差率从84.01%降低到22.44%,有效地解决了由EV无序充电带来的“峰上加峰”问题,并高效地利用夜间负荷资源,提高了配电设备的运行效率;日负荷利用率从55.10%上升到88.01%,日负荷率的增加提高了电气设备的利用程度;负荷方差从 $2.29 \times 10^5 \text{ kW}^2$ 减少到 $1.01 \times 10^3 \text{ kW}^2$,降低了负荷的波动范围。

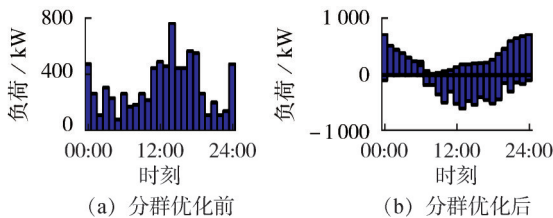


图3 分群优化前、后500辆EV的充放电负荷

Fig.3 Charging and discharging load of 500 EVs before and after group-based optimization

此外,利用分群优化管理也将用户的充电成本从8632元降到5208.50元,EV用户通过放电获得了7054.10元的电价补偿。人均充电费用从优化前的17.26元减少至10.42元,并获得了额外的参与收益20.09元。对于电力部门而言,该策略有效缓解了电网的供电压力,提高了负荷曲线的平滑性;对于充电用户而言,参与分群优化管理不仅节省了充电费用,同时获得了相应的参与收益。

为了客观地验证本文所提分群优化调度策略的有效性,对该方案在不同规模EV接入时依次进行200次循环仿真,得到日负荷曲线的方差分布情况如图4所示。由图可知,当EV为200辆时,得到的200个方差值的跨度为 $19\,852 \sim 35\,429 \text{ kW}^2$,中值为 $29\,292 \text{ kW}^2$,50%的数值在 $24\,980 \sim 29\,229 \text{ kW}^2$ 范围内分布;当EV为500辆时,200个方差数值的跨度为 $422 \sim 3\,915 \text{ kW}^2$,中值为 $1\,554 \text{ kW}^2$,50%的数值在

$1\,099 \sim 2\,213 \text{ kW}^2$ 范围内分布。仿真结果都远小于常规负荷的方差 $3.20 \times 10^6 \text{ kW}^2$,并且随着EV数量的增多,方差的分布范围逐渐减小,显示对电网更强劲的调节力度。负荷方差的降低可以极大地提高电网的运行效率 and 安全性,证实了所提方案能高效地利用V2G功能对原有电网的负荷进行优化调节。

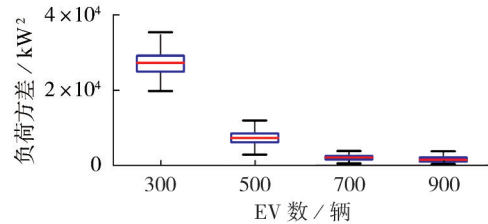


图4 日负荷曲线的方差分布

Fig.4 Variance distribution of daily load curves

3.3 不同模式的仿真结果对比

根据文献[7]的场景设定,由蒙特卡洛方法模拟某居民区300辆EV一天的充电情况。将本文所提分群优化策略与采用集中式充电模型的车辆到住宅(V2H)策略[7]进行比较,日负荷变化曲线如图5所示,调度结果如表1所示。

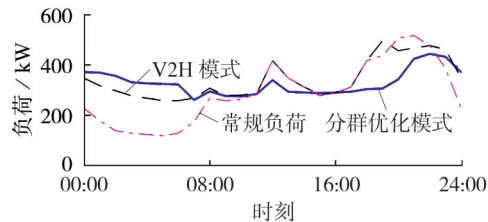


图5 分群优化模式和V2H模式下的日负荷曲线比较

Fig.5 Comparison of daily load curve between group-based optimization mode and V2H mode

表1 分群优化模式和V2H模式下的调度结果比较

Table 1 Comparison of dispatch result between group-based optimization mode and V2H mode

模式	负荷 / kW		峰谷差 / kW	均方差 / kW^2
	峰荷	谷荷		
常规负荷	520	120	400	124.60
V2H模式	500	260	240	79.20
分群优化模式	447	263	214	50.62

由表1可知,V2H模式和分群优化模式都明显降低了居民区配电系统原有的峰谷差和负荷均方差。相较于V2H模式,分群优化模式的峰谷差更低,负荷均方差也更小,表明分群优化模式能有效提高系统运行的安全性和可靠性。两者的区别在于:V2H模式是以一定的运行目标对各EV的充放电时刻进行优化;而分群优化模式是在各时段数据更新时,会依据电网的波动幅度调节当前可调控车群的充放电状态,充分利用了EV的停留时长,向电网提供充足的可调度容量进行平滑调峰。

4 结论

本文提出了一种分群管理和动态优化手段相结合的V2G调度策略,对接入的EV进行分群管理,采取不同的充电方案。分别建立了分群需求统计模型、充电优化模型和功率分配算法。在分群统计模型中将到达充电站的EV划分为常规车群与调控车群,统计常规车群的需求负荷总量与调控车群的可调控负荷总量。在充电优化模型中对调控车群的可调控负荷总量进行优化,通过功率分配算法根据计算的车辆权重调节每辆EV的充放电功率,以保证EV在离开前达到用户期望的荷电状态。所得结论如下:

(1)在实际的调度过程中,由时隙更新的EV的实际充电参数将会实时更新其充放电调度,可保证用户的出行需求;

(2)该策略根据EV的电池约束、时间约束及充放电转换次数约束,在满足EV充电需求的前提下,调度尽可能多的EV对电网进行削峰填谷;

(3)能高效利用EV可间断充电的潜力配合电网的调整,以实时消纳、填补由生活用电和常规车辆充电负荷叠加引起的负荷高峰和低谷,降低负荷方差,减少充电成本;

(4)兼顾用户的心理作用,在充放电过程中客观分析EV之间的公平性,合理调整了EV的充放电功率。

本文所提方法操作简单、效果明显,为实际系统中每辆EV的调度提供了合理的指导。该策略同样也适用于公司和居民区停车场等为EV进行集中式控制充电的场所。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

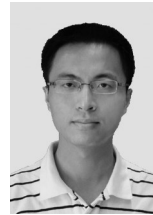
参考文献:

- [1] SCHNEIDER K, GERKENSMEYER C, KINTNER-MEYER M, et al. Impact assessment of plug-in hybrid vehicles on Pacific northwest distribution systems[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008: 1-6.
- [2] 张振夫, 黄小庆, 曹一家, 等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 24-29.
ZHANG Zhenfu, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Charging load calculation considering TOU for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 24-29.
- [3] 苏海峰, 梁志瑞. 基于峰谷电价的家庭电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 17-22.
SU Haifeng, LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 17-22.
- [4] 苏粟, 刘紫琦, 王世丹, 等. 基于用户驾驶行为特性的电动汽车有序充电策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 63-71.
- SU Su, LIU Ziqi, WANG Shidan, et al. Ordered charging strategy of electric vehicles based on users' driving behavior[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 63-71.
- [5] 王育飞, 蔡传高, 薛花. 基于改进NSGA-II的社区电动汽车充电站优化充电策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 109-115.
WANG Yufei, CAI Chuangao, XUE Hua. Optimized charging strategy of community electric vehicle charging station based on improved NSGA-II[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 109-115.
- [6] JIAN L N, ZHENG Y C, XIAO X P, et al. Optimal scheduling for vehicle-to-grid operation with stochastic connection of plug-in electric vehicles to smart grid[J]. Applied Energy, 2015, 146: 150-161.
- [7] DI GIORGIO A, LIBERATI F. Near real time load shifting control for residential electricity prosumers under designed and market indexed pricing models[J]. Applied Energy, 2014, 128: 119-132.
- [8] 黄一诺, 郭创新, 王力成, 等. 考虑用户满意度的电动汽车分群调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 183-191.
HUANG Yinuo, GUO Chuangxin, WANG Licheng, et al. A cluster-based dispatch strategy for electric vehicles considering user satisfaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 183-191.
- [9] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 30-37.
YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37.
- [10] 潘振宇, 张孝顺, 余涛, 等. 大规模电动汽车集群分层实时优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 96-104.
PAN Zhenning, ZHANG Xiaoshun, YU Tao, et al. Hierarchical real-time optimized dispatching for large-scale clusters of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 96-104.
- [11] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 13-20.
ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [12] 艾圣芳, 林湘宁, 万云飞, 等. 考虑V2G模式的含多个电动汽车充电站有源配电网规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 122-129.
AI Shengfang, LIN Xiangning, WAN Yunfei, et al. Study of the active distribution network planning considering multiple electric vehicle charging stations participating in V2G applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 122-129.
- [13] 刘文红, 杨小亮, 张宏科. 带权快速Max-Min公平分配算法[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(2): 33-35, 47.
LIU Wenhong, YANG Xiaoliang, ZHANG Hongke. Weighing and fast Max-Min fair allocation algorithm[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006, 30(2): 33-35, 47.
- [14] TASSIULAS L, SARKAR S. Maxmin fair scheduling in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1): 163-173.
- [15] 张谦, 蔡家佳, 刘超, 等. 基于优先权的电动汽车集群充放电优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 117-125.
ZHANG Qian, CAI Jiajia, LIU Chao, et al. Optimal control strategy of cluster charging and discharging of electric vehicles based on the priority[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 117-125.

- [16] 张立军,袁能文. 线性综合评价模型中指标标准化方法的比较与选择[J]. 统计与信息论坛,2010,25(8):10-15.
ZHANG Lijun, YUAN Nengwen. Comparison and selection of index standardization method in linear comprehensive evaluation model[J]. Statistics & Information Forum, 2010, 25(8): 10-15.
- [17] 前瞻产业研究院. 充电桩盈利遥遥无期 详解成本收益情况[R/OL]. (2016-06-24)[2019-04-01]. <https://bg.qianzhan.com/trends/detail/506/160624-073ebc2b.html>.
- [18] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):38-43.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J].

Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.

作者简介:



王 毅

王 毅(1981—),男,重庆人,副教授,博士,主要研究方向为宽带电力线载波通信、智能电网用电信息采集系统(**E-mail**: wangyi81@cqupt.edu.cn);

陈 进(1996—),女,江西吉安人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充放电管理、智能用电(**E-mail**: S180101044@stu.cqupt.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Interactive scheduling strategy between electric vehicles and power grid based on group optimization

WANG Yi^{1,2,3}, CHEN Jin¹, MA Xiu¹, HOU Xingzhe², ZHENG Ke², CHEN Wenli²

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China; 3. Postdoctoral Workstation of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China)

Abstract: The disordered charging of large scale EVs (Electric Vehicles) will threaten the safe operation of power grid. Therefore, an interactive scheduling strategy between EVs and power grid based on group optimization is proposed. Firstly, according to the constraints of battery, time and charging/discharging conversion number, the EVs are dynamically divided into regular EV group and controllable EV group in each period. The regular EV group is charged disorderly, and the controllable EV group includes charging EV group and discharging EV group. Then, in the control center, the division condition of EV groups and their load information are taken as constraints, and the schedulable load of the controllable EV group is optimized to minimize the variance of the total load in the study period. Finally, the weight coefficients of EVs are calculated based on EVs' travel constraints, and the power allocation algorithm is adopted to control the charging/discharging power not higher than the schedulable load value. The proposed method can ensure that EVs can realize peak load shifting for power grid under the condition of meeting the travel demand. The example results verify the rationality and validity of the proposed method. The proposed scheduling strategy scheme is simple and effective, which is beneficial to practical application.

Key words: electric vehicles; vehicle to grid; group optimization; power allocation; peak load shifting; scheduling strategy

附录

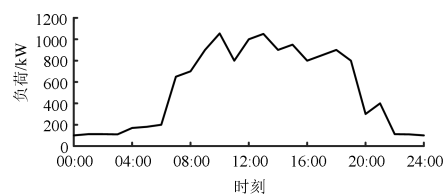


图 A1 商业区常规负荷曲线
Fig.A1 Regular load curve of commercial area

表 A1 商业区峰谷时段电价
Table A1 Peak-valley electricity prices of commercial area

时段		充电价格/ [元/(kW·h) ⁻¹]	放电价格/ [元/(kW·h) ⁻¹]
峰时	07:00—20:00	1.378	1.378
谷时	20:00 至次日 07:00	0.365	0.365

表 A2 500 辆 EV 日充电数据对电网的影响
Table A2 Effect of 500 EVs' charging data on distribution network

参数	数值	
	分群优化前	分群优化后
EV 数/辆	500	500
EV 充电量/(kW·h)	7830	7820
EV 放电量/(kW·h)	0	5641
日峰时段总电量/(kW·h)	17355	9048
日谷时段总电量/(kW·h)	3736	6392
日总用电量/(kW·h)	21091	15440
总峰负荷/kW	1595	731
总谷负荷/kW	255	567
总峰谷差率/%	84.01	22.44
日负荷利用率/%	55.10	88.01
负荷方差/kW ²	2.29×10 ⁵	1.01×10 ³
配电设施维护成本/元	164	164
日充电成本/元	8632	5208.50
日放电收益/元	0	7054.10
日补偿收益/元	0	2989.50
人均充电费用/元	17.26	10.42
人均参与收益/元	0	20.09

注：总负荷为商业区原有负荷和 EV 负荷的累加值；
日负荷率=（日总用电量/总时段）/总峰负荷×100%；
日充电成本=日充电量×充电价格；
日放电收益=日放电量×放电价格；
补偿收益=分群优化前充电成本-分群优化后充电成本-设施维护成本；
人均充电费用=日充电成本/500；
人均参与收益=(日放电收益+日补偿收益)/500。