

V2G模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略

李怡然, 张 姝, 肖先勇, 汪 颖

(四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:随着电动汽车(EV)渗透率日益增长,研究EV的有序充放电策略对缓解EV规模化入网带来的负面影响、保证电网的经济安全运行具有重要的意义。为此,提出了一种计及用户和电网两侧需求的EV日内调度策略。首先,考虑用户响应调度的意愿和能力,确定EV调度可行性;然后,在第一阶段用户侧优化中通过定义平均放电率指标、动态放电损耗成本完善用户侧需求,在第二阶段优化中考虑电网削峰填谷的优化需求;最后,通过两阶段优化求解获得计及供需两侧需求的EV充放电调度策略。与以成本导向为目标的充放电调度策略的仿真结果进行对比可知,所提调度策略有效地降低了用户成本和电池损耗,减小了负荷峰谷差,平抑了负荷波动,实现了电网与EV用户双方的共赢。

关键词:电动汽车;充放电调度策略;日内调度;供需优化

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012023

0 引言

在能源紧缺和环境污染问题备受关注的背景下,高效、清洁的电动汽车EV(Electric Vehicle)规模化入网将是未来的必然趋势^[1]。EV具有灵活性以及集群后的储能特性,在电网中既可以作为用户侧的柔性负荷,也可以作为分布式电源设备,能够实现车网双向互动V2G(Vehicle-to-Grid)。在合理的调度策略下,EV不仅可以帮助电网缓解用电负荷及无序充电下对电网施加的压力、削峰填谷^[2-5],还可以为电网提供调频和备用等辅助服务^[6-9]。然而,如何有效合理地进行EV的充放电调度控制,是当前V2G技术发展面临的一个核心问题。

分时电价是引导EV负荷削峰填谷的一个有效途径。用户为了降低充电成本会在电价低谷时段充电,但这可能会形成谷时段集中充电的负荷高峰,因此有必要结合分时电价信息提出更为合理的策略。基于分时电价,文献[10]提出的充电调度策略在减少充电经济成本的同时也避免了谷时段电价下集中充电的现象;文献[11]综合充电站收益和电网需求,构建了配电网-充电站双层优化充电模型。上述研究都是针对EV充电调度,未考虑其参与V2G进行放电的场景。在V2G模式下,电网可以通过与用户签订相关的协议,根据EV的充电需求及实时电网信息制定针对性的充放电安排计划,实现电网和车主的共赢。文献[12]基于充电代理商,以电网负荷方

差为优化目标提出了分层式的充放电模型,但仅满足了EV用户的充电需求,未深入考虑成本等其他需求;文献[13-14]在对EV进行调度优化时,只是单一地考虑了电网侧或者用户侧的需求,未能同时兼顾两者的利益。

与此同时,用户对策略响应的能力和意愿会直接影响策略的实施效果,是调度中应予以考虑的重要因素。文献[15]在优化过程中只分析讨论了用户对峰谷电价政策的响应度,缺乏考虑用户对调度策略的响应。此外,V2G过程中过于频繁的充放电行为会造成EV的电池损耗,从而影响用户利益。因此,电池损耗也是调度策略中需要考虑的一个重要因素。文献[16]优化了经典的电池损耗模型,建立了EV电池动态损耗模型;文献[17]考虑了电池寿命,提出以最小充电次数为目标的有序充电调度策略。但文献[16-17]在优化时主要考虑用户侧的需求,对电网侧需求欠缺考虑。

根据上述研究现状,综合电网和用户两侧需求的EV调度策略在对用户侧进行考虑时存在不足,主要体现在:针对用户侧大多以较低支付成本为优化目标,而对于EV的调度可行性以及调度时对电池造成的动态损耗未进行综合考虑。基于现有研究成果,本文在分时电价的背景下,提出了一种由集群代理商(aggregator)进行决策的充放电策略,综合考虑供需两侧的利益,解决了现有策略对用户响应调度的能力和意愿以及调度过程对电池造成的损耗未能进行全面考虑的问题。首先,针对每辆入网EV的可调度性进行分析判别,并将其定性细化为调度意愿以及调度能力两部分。然后,建立考虑供需两侧的两阶段优化模型。第一阶段考虑用户侧需求,在优

收稿日期:2020-07-03;修回日期:2020-10-30

基金项目:四川大学专职博士后研发基金资助项目(2019SCU12003)

Project supported by the Full-time Postdoctor Research and Development Fund of Sichuan University(2019SCU12003)

化用户充电成本的基础上,针对V2G中的电池放电损耗,定义了平均放电率指标来量化放电频繁程度,并计及放电损耗成本约束对电池放电深度进行控制。从充电成本和电池损耗2个角度对用户进行了初步考虑。第二阶段以第一阶段的优化结果为约束,以电网负荷峰谷差最小为优化目标从而保证电网的安全经济运行,优化得到最终的调度安排。最后,通过算例仿真对本文所提策略进行分析验证。

1 EV充放电场景架构

由于EV规模日益增大,为了避免计算数据过多所导致的集中式调度策略状态量测处理维数灾和运行复杂性等问题,在电网和用户之间引入集群代理商^[10]进行分布式调度。同时,考虑到EV接入的不确定性,本文采用日内实时调度,如图1所示。将1 d分成96个时段,每个时段的时长为15 min,在每个时段结束时刷新入网EV的信息,对入网EV进行调度安排。

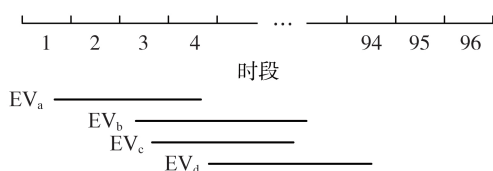


图1 日内调度

Fig.1 Intra-day scheduling

如图1所示,时段1内EV_a入网,则在时段2开始刷新信息,计入EV_a并对其进行调度安排;同理,在时段4对EV_b和EV_c进行调度安排,在时段5对EV_d进行调度安排。在调度过程中,EV的充放电调度由集群代理商决策,通过智能充电装置响应,智能充放电调度架构如附录中图A1所示,具体调度过程如下。

(1)智能充电装置收集整理信息。

EV用户接入智能充电装置,通过人机交互界面根据个人需求输入部分用户信息,如预计离开时间、期望电量及可调度意愿。剩余所需信息可由智能充电装置通过读取电池管理系统获得,如剩余荷电状态SOC(State Of Charge)、EV电池容量等。智能充电装置综合所收集的信息进行需求分析和调度可行性判别,并将信息上传给上层集群代理商。

(2)集群代理商进行信息汇总及调度安排。

集群代理商收集汇总EV和电网的信息,其中电网信息包括日前预测的区域负荷及现阶段电价信息。基于本文所提调度策略对可调度的EV制定针对性的调度计划,并将其反馈至智能充电装置。

(3)充电装置及EV线下响应。

智能充电装置对入网EV执行调度计划,在满足EV充电需求的同时也响应电网需求。

2 EV充电需求分析

EV的电池特性以及用户的出行特性共同决定了充电需求。由于EV充电具有时空随机性,对单个EV用户的出行特性难以建模,但是EV集群出行数据的拟合结果符合概率分布,可以对其进行数学建模。现有研究在分析出行特性时大多基于2009年美国国家公路交通安全管理局NHTS2009(National Household Travel Survey 2009)的车辆出行统计数据,对统计结果进行拟合,用于分析EV的行为特征。

假设私家车EV用户结束行程回家后就连接充电装置充电直至次日出门,则EV_i的结束行程时间和开始行程时间分别对应连接充电装置的时间 T_s^i 和离开充电装置的时间 T_e^i ,其分别符合式(1)所示正态分布 $f_s(x)$ 和式(2)所示正态分布 $f_e(x)$ 。

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

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

其中, $\mu_s = 17.5$; $\sigma_s = 3.5$; $\mu_e = 9.24$; $\sigma_e = 3.16$ 。

日行驶里程符合对数正态分布 $f_d(x)$,如式(3)所示。

$$f_d(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

其中, $\mu = 3.7$; $\sigma = 0.92$ 。

结合EV用户的出行特性,可以计算调度EV_i充电所需时长 T_n^i ,如式(4)所示。

$$T_n^i = \frac{(S_n^i - S_s^i)E_s^i}{\eta_c^i P_c^i} \quad (4)$$

其中, S_s^i 为EV_i的起始SOC; S_n^i 为EV_i的期望SOC; E_s^i 为EV_i的电池容量; η_c^i 、 P_c^i 分别为EV_i的充电效率、充电功率。

根据出行特性所得到的概率分布,可以利用蒙特卡洛采样方法对充电需求进行建模,充分考虑了用户的行驶规律及其充电行为的随机性,为后文的算例提供了数据支撑,从而可以对所提策略进行仿真验证。

3 基于供需两侧需求的EV两阶段优化模型

3.1 调度可行性判别

在EV入网后,先根据智能充电装置收集的信息

进行调度可行性筛选,若EV满足调度需求,则继续上传信息至集群代理商,进行调度安排;否则,直接将该EV剔除,不对其进行调度安排,而是直接进行正常充电。本文根据实际需求将调度可行性定性为调度能力和调度意愿2个方面,分别从主观、客观2个角度进行判别。从客观角度出发,考虑EV的可调度能力,其受时间可调度性和电量可调度性约束,对EV进行充放电调度时需要以满足用户的充电需求为首要原则。

$$T_n^i < T_1^i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中, N 为当前参与调度的EV总数。

式(5)表示:若EV_{*i*}充电至预期电量所需时间 T_n^i 小于其在充电站停留的时间 T_1^i , 则EV_{*i*}的可调度能力满足要求,可对其进行调度;否则, EV_{*i*}直接正常充电。

从主观角度出发,在实际调度中用户对策略的响应意愿会影响最终的调度效果,所以有必要充分考虑每个EV用户的调度意愿。考虑到存在用户不受经济激励,可以通过智能充电装置的人机交互界面提供“只需尽快满足充电需求而不愿意响应调度”的选择权,当用户选择不愿参与调度的意愿后,调度计划便安排充电装置根据其需求对其进行正常充电。完成判别筛选后,设置可调度EV的充电决策变量 $L_{c,k}^i$ 、放电决策变量 $L_{d,k}^i$, 分别表示EV_{*i*}在 k 时段的充电、放电状态,取值为1表示处于相应的状态;取值为0表示不处于相应的状态。

$$L_{c,k}^i = \begin{cases} 0 & \text{处于非充电状态} \\ 1 & \text{处于充电状态} \end{cases} \quad (6)$$

$$L_{d,k}^i = \begin{cases} 0 & \text{处于非放电状态} \\ 1 & \text{处于放电状态} \end{cases} \quad (7)$$

3.2 基于用户侧需求的第一阶段优化

为了实现优化调度,首先需要在满足用户需求的基础上,充分考虑EV用户的利益以提高EV用户的响应度。因此,对用户侧的需求及利益进行如下考虑。

(1) 支付成本优化。

在分时电价的背景下,将最小支付成本设置为用户侧的优化目标。同时,在EV可以实现V2G后,为了引导削峰填谷,电网在峰谷电价的基础上对峰时段EV的放电行为设置激励,给予一定的价格补偿。因此,用户支付成本 C 的表达式如式(8)所示,其只考虑了当下实际支付的充电费用和获得的放电收益,电池成本由于已提前支付而不计入当下的支付成本中,所以只作为约束考虑。

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{96} \left(P_{c,k}^i \eta_c^i L_{c,k}^i \Delta t c_{c,k} - \frac{P_{d,k}^i L_{d,k}^i \Delta t c_{d,k}}{\eta_d^i} \right) \quad (8)$$

其中, $P_{c,k}^i$ 、 $P_{d,k}^i$ 分别为EV_{*i*}在 k 时段的充电、放电功

率; η_d^i 为EV_{*i*}的放电效率; $c_{c,k}$ 、 $c_{d,k}$ 分别为 k 时段的充电、放电电价; Δt 为单位调度时段的时长,在本文策略中取值为15 min。

(2) 电池损耗优化。

在实际的调度过程中, EV可能会出现频繁放电的情况,这会对电池造成损耗。因此,在降低充电成本的基础上,需要尽可能减少调度过程中EV的放电次数。为了直观反映对比放电频繁程度,本文提出平均放电率指标 $\bar{\sigma}$, 如式(9)所示。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{95} |L_{d,k+1}^i - L_{d,k}^i|}{N} \quad (9)$$

该指标表示调度过程中放电次数占所调度EV数量的比例,可以反映可调度EV参与放电的平均程度。本文在对用户侧进行优化时,将最小充放电次数作为用户侧的另一优化目标进行多目标优化,采用线性加权方法确定优化目标。同时,由于2个目标函数的量纲不同,需要分别进行归一化处理,最终得到优化目标如式(10)所示。

$$\min F_1 = \lambda_1 \frac{C_k}{C_{k,\max}} + \lambda_2 \frac{\bar{\sigma}_k}{\bar{\sigma}_{k,\max}} \quad (10)$$

其中, C_k 、 $\bar{\sigma}_k$ 分别为 k 时段用户支付成本、平均放电率指标的优化计算结果,优化对象为该时段刷新入网信息的EV; $C_{k,\max}$ 、 $\bar{\sigma}_{k,\max}$ 分别为 C_k 、 $\bar{\sigma}_k$ 的最大值; λ_1 、 λ_2 为目标权重。考虑到用户较看重支付成本,本文根据主观赋值法将 λ_1 、 λ_2 的取值分别设置为0.7、0.3,从而保证最小支付成本这一目标可以得到优先考虑。

在优化过程中,为了保证电网经济安全运行和满足用户需求,需要计及如下约束条件。

(1) SOC安全性约束。

由于过度充电和过度放电都会对电池造成损耗,考虑到电池的容量以及安全性,充放电过程中EV_{*i*}在任意时段的SOC都应保持在安全约束范围内,即:

$$S_{\text{SOC},\min} \leq S_k^i \leq S_{\text{SOC},\max} \quad (11)$$

$$S_k^i = S_{k-1}^i + \frac{(P_{c,k}^i \eta_c^i L_{c,k}^i - P_{d,k}^i L_{d,k}^i / \eta_d^i) \Delta t}{E_s^i} \quad (12)$$

其中, S_{k-1}^i 、 S_k^i 分别为EV_{*i*}在 $k-1$ 、 k 时段的SOC; $S_{\text{SOC},\max}$ 、 $S_{\text{SOC},\min}$ 分别为SOC的上、下限。

(2) 放电动态损耗约束。

电池放电会引起容量衰减,从而产生放电损耗成本。放电损耗成本与起始SOC、放电深度等息息相关,其中放电深度是影响电池损耗程度的一项重要指标,计算式如式(13)所示。

$$D_{\text{DoD}} = S_1 - S_2 \quad (13)$$

其中, D_{DoD} 为放电深度; S_1 、 S_2 分别为放电前、后的

SOC值。

放电深度与单次放电损耗成本正相关,根据文献[16]所提锂电池动态损耗成本的计算式(如式(14)所示),计及用户利益设置损耗经济效益约束式

(15),在充放电调度中进行放电损耗成本 $\sum_{n=1}^{L_d^i} K_{DoD,n}^i$ 与放电收益 C_d^i 的博弈,确保放电收益始终大于电池的放电损耗成本。

$$K_{DoD} = \frac{C_{bat}}{2 \cdot 151 D_{DoD}^{-2.301}} \quad D_{DoD} \in [0, 0.9] \quad (14)$$

$$\sum_{n=1}^{L_d^i} K_{DoD,n}^i < C_d^i \quad (15)$$

其中, K_{DoD} 为单次放电损耗成本; C_{bat} 为电池的购置成本; $K_{DoD,n}^i$ 为 EV_i 在第 n 次放电时的放电损耗成本; L_d^i 为 EV_i 的放电总次数。在决策过程中,可通过控制放电深度的大小确保放电收益大于放电损耗成本,从而保证用户的利益。对于电池放电深度过大的EV,对其进行只充电不放电的安排。

(3)充放电唯一性约束。

EV在任意时段最多只能处于充电、放电中的一种状态,即充、放电决策变量满足如下约束:

$$L_{c,k}^i + L_{d,k}^i \leq 1 \quad (16)$$

(4)配电变压器容量约束。

在任意时段,区域的基础负荷 $P_{load,k}$ 加上所有EV的充放电负荷都不应使配电变压器过载,即:

$$\sum_{i=1}^N (P_{c,k}^i - P_{d,k}^i) + P_{load,k} \leq S_T \quad (17)$$

其中, S_T 为变压器的容量限值。

(5)用户出行需求约束。

理想的充电方案应该满足大规模EV用户的充电需求,保证用户离开充电装置时的SOC S_e^i 应达到用户设置的期望SOC S_n^i ,且电量不超过电池容量,即:

$$S_n^i \leq S_e^i \leq 1 \quad (18)$$

(6)可调度时间约束。

EV的充放电行为只在其并网阶段进行,入网前和离开后的充电决策变量 $L_{c,k}^i$ 和放电决策变量 $L_{d,k}^i$ 均设置为0,不进行调度,即EV的并网调度时间满足:

$$T_S^i < T_{V2G}^i < T_e^i \quad (19)$$

其中, T_{V2G}^i 为 EV_i 并网过程中处于V2G调度状态的时间。

3.3 考虑电网侧需求的第二阶段优化

在分时电价的基础上,对用户侧进行以成本为主的优化时可能会导致EV在谷时段集中充电、在峰时段放电,规模过大时会产生“峰谷颠倒”的现象,在谷时段形成新的负荷高峰,危及电网的安全运行。

因此,在第一阶段满足了用户侧需求的基础上,同时需要计及电网的需求。规模化EV接入电网后,最为显著的影响是电网负荷出现新的峰值,加大了负荷峰谷差,从而引发一系列如变压器过载、电压偏差等负面影响。所以,在第二阶段针对电网侧的需求优化中主要考虑将最小化该区域负荷的峰谷差设置为优化目标,其决策函数仍是充电决策变量 $L_{c,k}^i$ 、放电决策变量 $L_{d,k}^i$ 。目标函数为:

$$\min F_2 = P_{Z,max} - P_{Z,min} \quad (20)$$

其中, $P_{Z,max}$ 、 $P_{Z,min}$ 分别为计及EV负荷后该局部配电网总负荷的最大值、最小值。在进行第二阶段优化时,为了不影响用户的利益,在第一阶段设置的约束保持不变的基础上,以第一阶段优化后的支付成本 C_1 和平均放电率指标 $\bar{\sigma}_1$ 为约束,确保在第二阶段求解得到的解不劣于第一阶段的解。

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_1, C = C_1 \quad (21)$$

3.4 调度策略的求解流程

本文所提调度策略的求解流程见附录中图A2,具体步骤如下。

(1)在调度开始时段,对可调度EV进行信息采集,根据调度可行性进行筛选,设置不可调度EV进行正常充电,将可调度EV的信息上传给集群代理商决策中心,同时决策中心更新收集的电网负荷及电价信息。

(2)进行基于用户侧需求的第一阶段优化。以最小支付成本以及最低平均放电率指标为目标,同时计及配电变压器以及电池等多方面约束进行优化计算。

(3)进行基于电网侧需求的第二阶段优化。以最小化总负荷峰谷差为优化目标,在原有约束的基础上,将第一阶段优化结果作为约束得到不劣于第一阶段的结果。

(4)将优化结果反馈至智能充电装置,由其和EV进行执行。调度时段更新后返回步骤(1)进行循环优化求解。

本文采用MATLAB的优化工具箱YALMI编程调用CPLEX对所提策略进行求解。

4 算例分析

4.1 算例场景设置

为了对本文所提充放电调度策略进行仿真验证,对仿真场景进行如下假设。

(1)EV所用锂电池的容量^[18]为32 kW·h,每行驶100 km的耗电量为19.5 kW·h,电池的购买价格为20000元。EV起始SOC服从正态分布 $N(0.2, 0.3)$, 用户期望SOC满足[0.8, 0.9]范围内的均匀分布,同时基于拟合得到的概率函数,对EV出行情况进行模

拟,采用蒙特卡洛抽样方法得到EV的充电需求。

(2)智能充电装置为常规充电方式,采用恒功率充放电,充放电功率为7 kW,充放电效率为90%。计及安全性将SOC上、下限分别设置为90%和10%。

(3)仿真场景为含有200辆EV的居民小区,该小区由4台容量为1 600 kV·A的变压器供电,其功率因数为0.85,效率为95%。

(4)所提调度策略基于分时电价背景,具体电价设置见附录中表A1,其中计及合理的经济激励设置了放电电价^[18]。

(5)EV参与V2G的行为完全出于自愿,愿意响应调度的用户与电网签订协议从而执行调度安排。仿真中针对调度意愿和调度能力的不确定性,引入用户响应度进行调度可行性的判别。本文策略中设置了25%、50%、75%、100%这4个响应度。对于无法响应调度的EV用户群体而言,基于概率密度函数对其出行情况进行预测,计算无序充电负荷后计入基础负荷。实际中的响应度由并网EV的判别结果决定。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 不同的调度策略分析

为了更好地说明本文所提调度策略的有效性,设置不同的充放电策略进行对比验证。同时为了更为直观地对比仿真效果,本节将各策略的响应度设置为100%。

无序充电策略:不进行充放电调度,设定EV入网后立即进行不间断充电使其达到预期电量,充满即停。

有序充电策略1:考虑电网和用户两侧的需求,进行有序充电调度,EV不参与放电。

有序充电策略2:在峰谷电价下,用户以最低成本为优化目标进行充放电调度。

有序充电策略3:本文所提计及供需两侧利益进行协同优化的充放电策略。

基于4.1节中设置的算例场景,对上述不同策略进行仿真分析。该居民区EV在4种调度策略下的负荷曲线如图2所示,其中充放电功率为正值表示充电,为负值表示放电。不同策略调度下的优化结果对比如表1所示。

由图2(a)可以看出,当EV进行无序充电时,在只考虑出行需求的情况下会尽早完成充电,但其充

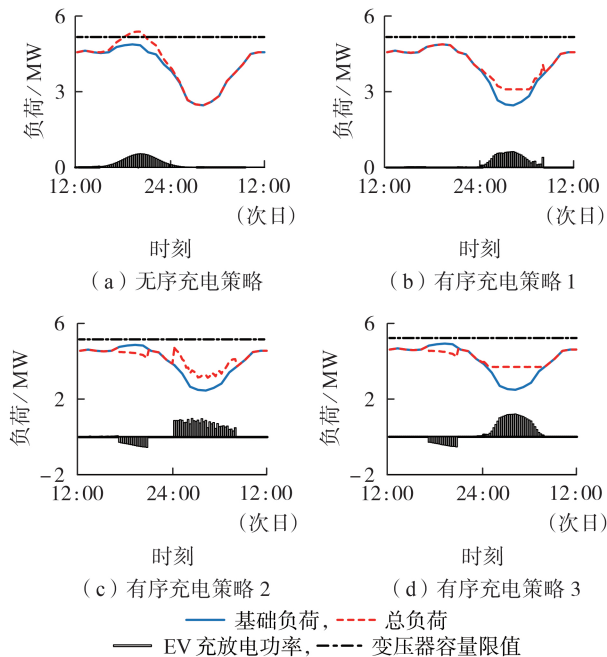


图2 不同调度策略下的负荷曲线

Fig.2 Load curves of different scheduling strategies

电时间会与居民区的用电高峰时间重叠,在18:00—23:00时段形成负荷高峰,形成“峰上加峰”的现象,新的负荷峰值达到5.3824 MW,使变压器过载,同时也加大了负荷峰谷差,使负荷波动过大,给电网带来负担,且用户也会产生较高的支付成本。由图2(b)可以看出,当EV按照有序充电策略1进行充电调度时,在分时电价的刺激下用户的充电时间集中在夜间的谷时电价时段(00:00—08:00),显著将用户的支付成本减小至1 092.47元,同时有序充电策略1在计及电网安全的情况下进行填谷,有效地减小了负荷峰谷差和负荷波动方差,改善了电网的总负荷。由图2(c)可以看出,当EV按照有序充电策略2进行充电调度时,单一考虑了用户侧的成本需求,基于分时电价在最低支付成本的优化目标导向下,EV用户会在峰时电价聚集放电,在谷时电价下集中充电,以至于产生“峰谷颠倒”的现象,谷时段的聚集充电行为形成了新的负荷高峰,峰值达到4.7240 MW,规模较大时可能会使设备过载。同时,有序充电策略2对于用户侧的考虑较为单一,虽然用户支付成本明显降低,但在频繁的充放电控制下的平均放电率相对较大,会对电池造成损耗。

表1 不同调度策略下的优化结果对比

Table 1 Comparison of optimization results among different scheduling strategies

调度策略	负荷峰谷差/kW	负荷峰值/kW	负荷谷值/kW	负荷方差/kW ²	支付成本/元	放电次数	平均放电率/%
无序充电	2922.30	5382.4	2460.1	839110.00	3160.60	0	0
有序充电策略1	1782.50	4875.6	3093.1	386640.00	1092.47	0	0
有序充电策略2	1585.66	4724.0	3138.4	223956.85	489.65	219	110
有序充电策略3	1068.13	4720.0	3651.9	158284.14	517.72	162	81

由图2(d)和表1可以看出,相较于其他策略,本文所提有序充电策略在保证用户较低支付成本的情况下,有效地实现了削峰填谷,负荷峰谷差减小至1068.13 kW,同时平缓了负荷波动,对负荷有较为明显的改善。此外,相比于有序充电策略2,本文所提策略在维持用户支付成本为500元左右的情况下,将平均放电率从110%降低至81%,可见EV的放电损耗得到了改善。

某辆EV在不同调度策略下的充放电安排如图3所示,读取到该EV的并网时间为17:30,预期离开时间为次日07:15,起始SOC为27%,预期SOC为80%。由图可知,该EV的充放电行为与集群EV的负荷趋势一致,且在策略引导下EV的充电行为与电价变动呈现一定的关系:在无序充电策略下,EV并网后立刻充电不受电价的影响;在有序充电策略1下,EV集中在电价谷时段充电;在有序充电策略2下,EV并网后在电价峰时段进行放电,在谷段时电价开始时刻进行充电;在本文所提策略下,EV在电价峰时段放电,在电价谷时段进行充电,且充电行为

被安排集中在常规负荷的低谷时期。

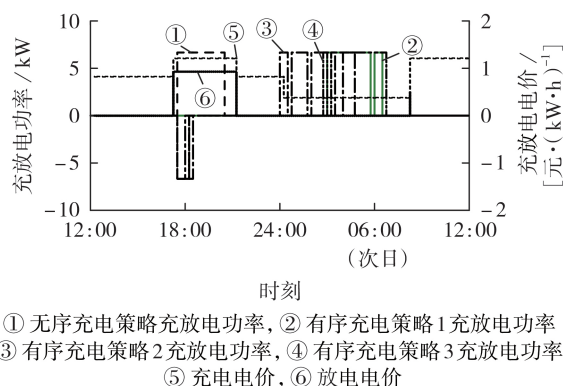


图3 某辆EV在不同策略下的充放电安排

Fig.3 Charging and discharging arrangements of an EV under different strategies

4.2.2 不同用户响应度分析

考虑到不同个体的调度意愿和调度能力不同,本节针对调度可行性筛选后的策略响应度进行分析,获得在不同的响应度下本文所提策略的优化结果,如表2和图4所示。

表2 不同用户响应度下的优化结果

Table 2 Optimization results under different values of user responsiveness

用户响应度 / %	负荷峰谷差 / kW	负荷峰值 / kW	负荷谷值 / kW	负荷方差 / kW ²	支付成本 / 元	放电次数	平均放电率 / %
25	2343.1	5062.1	2719	604687.95	2314.30	33	66
50	1719.0	4815.0	3096	448613.41	1855.60	74	74
75	1441.0	4767.0	3356	281101.36	1156.40	116	77
100	1063.0	4720.0	3657	158284.14	517.72	162	81

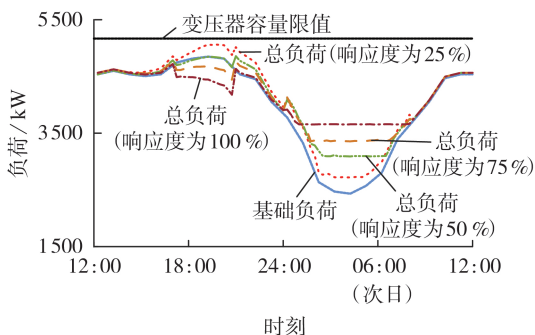


图4 基于本文所提调度策略时不同用户响应度下的负荷曲线对比

Fig.4 Comparison of load curves among proposed scheduling strategy with different values of user responsiveness

表2和图4的仿真结果表明,同一策略在不同用户响应度下的效果仍有一定的区别。其中当用户响应度为25%时,较大比例的EV用户的充电行为仍是无序的,所以仍存在一定的“峰上加峰”现象,而随着用户响应度的增加,虽然EV的平均放电率有略微上升,但对电网侧负荷及用户侧支付成本的优化效果也随之更为明显。

5 结论

本文在V2G模式下提出了一种计及供需两侧需求的EV日内调度策略。首先提出由智能充电装置根据输入信息对参与调度的EV进行识别,从用户主观调度意愿以及客观调度能力两方面评价EV的调度可行性。在优化过程中以最小化用户支付成本、降低电池放电损耗及减小负荷峰谷差为目标,对EV进行调度安排。以管理集群代理商下某居民区的充电场景为算例进行仿真验证,由结果可得如下结论。

(1)相比于无序充电及已有有序充电策略,本文所提策略在V2G模式下对EV进行合理充放电调度,降低了用户充电的支付成本,有效地减小了负荷峰谷差及波动方差,提高了EV入网后配电网运行的经济性和安全性,保证了电网与EV车主的利益。

(2)相比于以最低成本为导向的充放电策略,本文所提策略在计及最低充电成本的基础上,提出了平均放电率指标和放电动态损耗成本约束,对用户侧利益进行了更为全面的考虑;在降低用户支付成本的同时,通过优化放电次数、控制放电深度有效地降低了电池的损耗。

(3)所提策略在考虑电网侧的需求以及用户的电池损耗时,其支付成本相比于以最低成本为导向的充放电策略会略有提升,因此可以考虑基于调度策略对充放电电价进行进一步的完善。如何合理制定充电电价以及放电激励是下一步值得深入研究的方向。

(4)所提策略在对放电损耗进行考虑时,主要针对放电深度与电池SOC对电池容量衰减的影响来计及放电损耗成本,采用的模型仍进行了一定的简化。进一步考虑电池温度、电池种类、充放电电流大小对充放电效率的影响,建立更为完善的电池损耗模型也是未来值得研究的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] CLEMENT-NYNS K, HAESEN E, DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [2] DALLINGER D, LINK J, BUTTNER M. Smart grid agent: plug-in electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 710-717.
- [3] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10, 25.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.
- [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] HE Y F, VENKATESH B, GUAN L. Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1095-1105.
- [6] TAN Z, YANG P, NEHORAI A. An optimal and distributed demand response strategy with electric vehicles in the smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 861-869.
- [7] 占恺峤, 宋永华, 胡泽春, 等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 11-18, 213.
ZHAN Kaiqiao, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Coordination of electric vehicle charging to minimize active power losses [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 11-18, 213.
- [8] 王毅, 陈进, 麻秀, 等. 采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 77-85.
WANG Yi, CHEN Jin, MA Xiu, et al. Interactive scheduling strategy between electric vehicles and power grid based on group optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 77-85.
- [9] CALLAWAY D S, HISKENS I A. Achieving controllability of electric loads [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 184-199.
- [10] 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.
- [11] 王行行, 赵晋泉, 王珂, 等. 考虑用户满意度和配网安全的电动汽车多目标双层充电优化 [J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2165-2172.
WANG Xingxing, ZHAO Jinquan, WANG Ke, et al. Multi-objective bi-level electric vehicle charging optimization considering user satisfaction degree and distribution grid security [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2165-2172.
- [12] 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.
- [13] 王建, 吴奎华, 刘志珍, 等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 47-52.
WANG Jian, WU Kuihua, LIU Zhizhen, et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 47-52.
- [14] RIVERA J, GOEBEL C, JACOBSEN H A. Distributed convex optimization for electric vehicle aggregators [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1852-1863.
- [15] 葛少云, 王龙, 刘洪, 等. 计及电动汽车入网的峰谷电价时段优化模型研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2316-2321.
GE Shaoyun, WANG Long, LIU Hong, et al. An optimization model of peak-valley price time-interval considering vehicle-to-grid [J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2316-2321.
- [16] 刘利兵, 刘天琪, 张涛, 等. 计及电池动态损耗的电动汽车有序充放电策略优化 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 83-90.
LIU Libing, LIU Tianqi, ZHANG Tao, et al. Orderly charging and discharging strategy optimization for electric vehicles considering dynamic battery-wear model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 83-90.
- [17] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.
- [18] 王秉晶. 需求响应机制下电动汽车充放电策略及电价研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
WANG Bingjing. The strategy and price research of EV charging and discharging based on demand response [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

作者简介:



李怡然

李怡然(1996—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车并网调度策略(E-mail:624515756@com);

张 姝(1988—),女,四川自贡人,助理研究员,博士,通信作者,主要研究方向为配电网保护与故障诊断、电力负荷预测(E-mail:ZS20061621@163.com);

肖先勇(1968—),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电能质量与优质供电、超导电力及其应用、智能电网等;

汪 颖(1981—),女,重庆人,副教授,博士,主要研究方向为电能质量与优质供电。

(编辑 陆丹)

(下转第143页 continued on page 143)

Ordered charging of electric vehicles considering grid-station-user multi-party demands and decision-making behavior characteristics

LIN Xiaoming¹, QIAN Bin¹, XIAO Yong¹, LUO Xiner², YANG Jingxu¹

(1. China Southern Power Grid Research Institute, Guangzhou 510670, China;

2. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: In order to solve the security problems caused by the integration of large-scale charging load into the distribution network when the construction of charging facilities and distribution network is not fully matched to the popularization speed of EVs (Electric Vehicles), an ordered charging model with the participation of power grid company, charging station operator and EV users (all three are called grid-station-user for short) is established. The demands and decision-making behavior characteristics of all parties are analyzed. The concept of price regulation cost is proposed and a subsidy mechanism considering the price regulation cost is established. Based on the decision-making behavior characteristics of all parties, the decision-making behavior model of grid-station-user is built. The cost and benefit of each party involved in ordered charging are modeled, and the net income model of power grid company is established by integrating the security of distribution network and the economic cost of power grid company, based on which, the comprehensive objective function of ordered charging is set up. Through simulation examples, the demand change of each party under different charging price strategies are analyzed to verify the rationality of the proposed subsidy mechanism and the effectiveness of the established ordered charging model.

Key words: electric vehicles; ordered charging; price regulation cost; decision-making behavior; operation risk; subsidy mechanism

(上接第135页 continued from page 135)

Charging and discharging scheduling strategy of EVs considering demands of supply side and demand side under V2G mode

LI Yiran, ZHANG Shu, XIAO Xianrong, WANG Ying

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of EVs (Electric Vehicles), it is of great significance to study the ordered charging and discharging strategy of EVs to mitigate the negative impact of EVs' large-scale grid-connection and ensure the safe and economic operation of power grid. To this end, an intra-day scheduling strategy of EVs considering the demands of both user side and grid side is proposed. Firstly, EV scheduling feasibility is determined by considering users' willingness and ability to respond to scheduling. Then, in the first stage of user side optimization, the average discharging rate index and dynamic discharging loss cost are defined to improve the user side demand. In the second optimization stage, the peak load shifting optimization demand of power grid is considered. Finally, the charging and discharging scheduling strategy of EVs considering the demands of supply side and demand side is obtained through two-stage optimization solution. Simulative results of the proposed control strategy are compared with that of cost-oriented charging and discharging scheduling strategy, which shows that the proposed scheduling strategy effectively reduces the users' cost and battery loss, decreases the peak and valley load difference, smoothes the load fluctuation, and realizes a win-win situation for both the power grid and EV users.

Key words: electric vehicles; charging and discharging scheduling strategy; intra-day scheduling; supply and demand optimization

附录

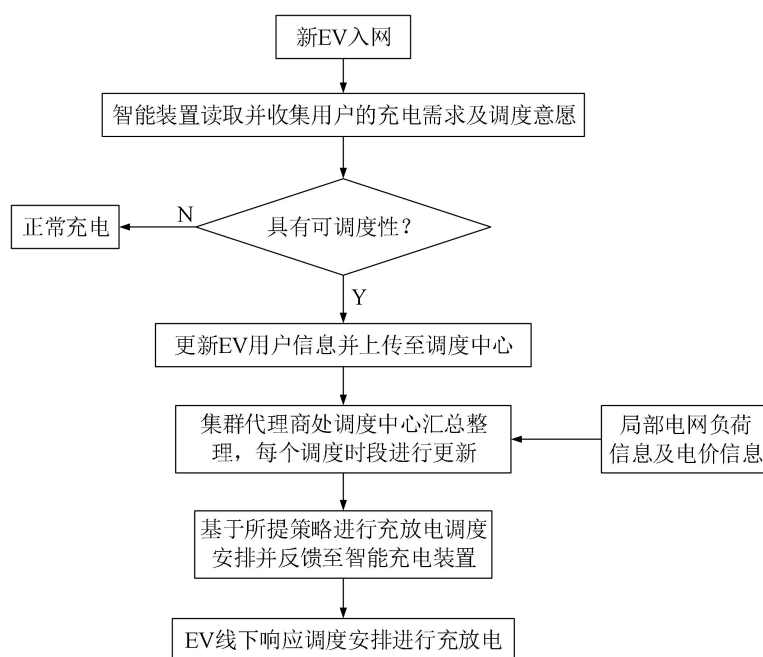


图 A1 智能充放电调度架构
Fig.A1 Scheduling architecture of intelligent charging and discharging

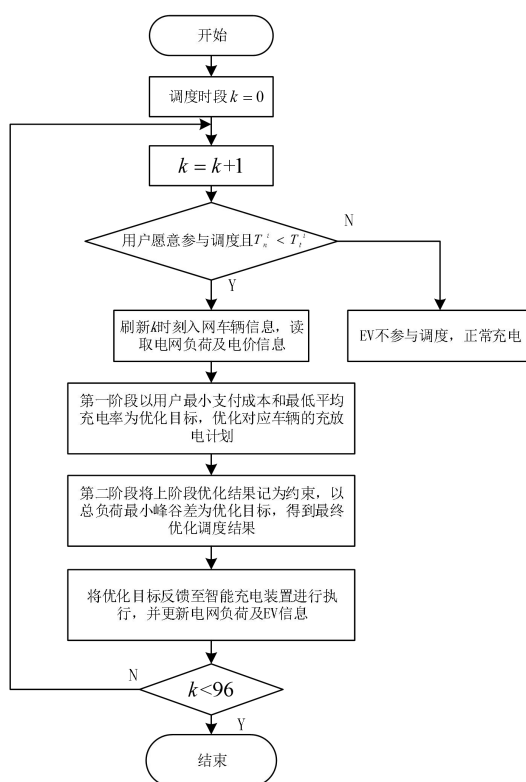


图 A2 调度策略求解流程
Fig.A2 Flowchart of solving scheduling strategy

表 A1 分时充放电电价
Table A1 Time-of-use charging and discharging electricity price

时段		充电电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	放电电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
谷时段	00:00—08:00	0.34	—
峰时段	08:00—12:00, 17:00—21:00	1.20	0.96
平时段	12:00—17:00, 21:00—24:00	0.80	—