

考虑电动汽车充放电全程功率变化率和用户舒适度的V2H调度策略

邢紫佩^{1,2},王守相^{1,2},梅晓辉³,赵海洲³

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;

2. 天津市电力系统仿真控制重点实验室,天津 300072;

3. 国网河北省电力有限公司衡水供电分公司,河北 衡水 053000)

摘要:目前对居民区电动汽车(EV)充放电的调度缺乏对用户侧需求的研究,特别是难以兼顾EV用户的经济收益和出行需求。为此,在综合分析居民区日负荷特性以及EV用户需求的前提下,提出了一种考虑EV用户舒适度和充放电功率变化率的汽车与家庭互动(V2H)调度策略,基于遗传算法验证了所提调度策略的可行性和对居民区负荷及EV用户的优化效果。研究了不同的EV渗透率下V2H调度策略的适用性,结果表明EV渗透率的增加可以更好地改善居民区负荷的电网接入特性,且随着EV渗透率的增加,虽然EV用户的经济收益会略有下降,但均能保证EV用户的舒适度达到最大。

关键词:电动汽车;V2H;调度策略;功率变化率;舒适度;渗透率

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005001

0 引言

化石能源的枯竭以及新能源技术的崛起,使电动汽车EV(Electric Vehicle)得到迅速发展,EV用户的数量也随之逐年增加。当大规模EV无序地接入配电网进行充电时,将会导致不必要的峰值负荷、谐波注入和功率因数降低等问题^[1-4]。居民区是EV进行充电的主要场所,对居民区EV的充电过程进行智能调度就显得尤为重要。

目前已有众多国内外学者对EV的优化调度进行了研究,主要可以分为以下2个方面。一方面是将EV作为负荷,只考虑EV的充电行为。文献[5-6]针对包含EV负荷的微电网,提出了基于分时电价和政府补贴的调度策略,起到了削峰填谷的作用。文献[7]为了解决大规模EV的充电问题,提出了一种双层优化调度模型,提高了大规模EV充电实时优化调度的响应速度。文献[8]以EV用户的充电费用最少和配电网的负荷峰谷差最小为目标函数,利用改进鸡群算法求解优化调度模型,但仅将充电功率设定为常数。另一方面是基于Amory Lovins提出的车网互动V2G(Vehicle-to-Grid)技术,将EV作为一种储能单元,在负荷高峰时段促进EV放电,在负荷低谷时段控制EV充电^[9-10]。汽车与家庭互动V2H(Vehicle-to-Home)的概念是基于V2G理念提出的,可以将其看作特殊的V2G,只是将与EV进行双向互动的对象换成了家庭住宅配电网^[11]。文献[12]提出了EV与可再生能源的互动策略,可以更好地发挥EV的储能和放电功能,同时在经济上产生了一定的收益。文献[13]提出了基于模糊控制的EV充放电

调度策略,实现了对电网的削峰填谷。以上文献对EV充电调度的研究,主要通过价格引导EV用户的充电行为,只关注于对配电网负荷曲线的优化,而未考虑EV用户的满意度及其对调度策略产生的影响。

EV作为交通工具,其满足用户的需求理应被放在首位。针对EV用户的满意度,文献[14]建立了配电网-充电站双层优化模型,考虑了配电网层的安全性和充电站层EV用户的满意度,但是没有考虑频繁的充放电可能会对电池寿命造成的影响。文献[15]将用户满意度定义为用电方式满意度和用电支出满意度,并以此为目标函数制定最优峰谷电价。以上文献均从用户整体的满意度角度出发对EV进行调度,都没有考虑个体EV用户的满意度。

针对以上问题,本文拟在综合分析居民区配电网负荷特性以及EV用户出行规律的基础上,综合考虑家庭配电网约束、EV用户约束和电池约束,提出考虑EV充放电全程功率变化率和用户满意度的V2H调度策略。以某居民区负荷为例,采用遗传算法对比几种V2H调度策略的优化效果。最后,选取不同的EV渗透率进行仿真实验,进一步验证本文所提V2H调度策略的适用性。

1 V2H调度策略建模

1.1 V2H与V2G

V2G是指EV与电网的互动技术,在V2G模式下EV可作为电能储存设备和备用电源设备。

V2H可视为家庭版的V2G,当EV与家庭连接时,电池可以通过可再生能源和(或)电网为之充电。同时,电池还可以帮助电网满足家庭用户的负荷

需求。

当EV与电网断开连接时, EV通过其自身的电池、发动机或二者共同驱动^[16]。V2G和V2H示意图如图1所示。

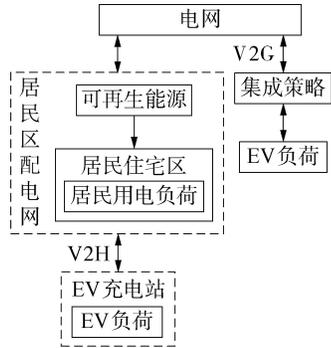


图1 V2G和V2H示意图

Fig.1 Schematic diagram of V2G and V2H

V2H调度根据典型日常规负荷的统计预测数据和EV用户的出行规律,对EV的充放电功率进行规划调度,智能小区内进行调度的EV充放电模型为:

$$X = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,T} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & P_{2,T} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{M,1} & P_{M,2} & \cdots & P_{M,T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, X 为 $M \times T$ 阶矩阵; $P_{m,t}$ ($m = 1, 2, \dots, M; t = 1, 2, \dots, T$) 为第 m 辆EV在 t 时段的充放电功率, M 为EV总数, T 为时段总数, 本文研究时长取为24 h, 以1 h为时段间隔, 即 $T=24$ 。

1.2 目标函数

大多数的EV用户会在一天行驶结束后回到家对EV进行集中充电,这就给V2H调度提供了充分的调度时间。对EV的调度通常需考虑配电容量、负荷平衡等因素,还需考虑用户的充放电成本及电池损耗,以确保EV用户的满意度^[17]。结合分时电价机制,可从居民负荷和EV用户2个层面,在降低负荷波动的同时,提高EV用户的经济满意度和舒适度。为此,选取负荷峰谷差最小、负荷波动均方差最小、EV用户经济满意度最大和EV用户舒适度最大作为目标函数。

1.2.1 负荷峰谷差最小

为了避免EV接入后在用电高峰时段仍大规模进行充电,造成“峰上加峰”的问题,以负荷峰谷差最小为目标,如式(2)所示。

$$\min F_1 = \bar{P} - \underline{P} \quad (2)$$

$$\bar{P} = \max_{1 \leq t \leq T} \left\{ P_{\text{load},t} + \sum_{m=1}^M P_{m,t} \right\} \quad (3)$$

$$\underline{P} = \min_{1 \leq t \leq T} \left\{ P_{\text{load},t} + \sum_{m=1}^M P_{m,t} \right\} \quad (4)$$

其中, \bar{P} 、 \underline{P} 分别为EV接入后一天内波峰处的用电功率、波谷处的用电功率; $P_{\text{load},t}$ 为居民负荷在 t 时段的用电功率。

1.2.2 负荷波动均方差最小

负荷均方差反映了居民区负荷的波动情况,均方差越小,则负荷的变化趋势越平稳。负荷波动均方差最小的目标函数如式(5)所示。

$$\min F_2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{m=1}^M P_{m,t} + P_{\text{load},t} - P_{\text{avg}} \right)^2 \quad (5)$$

$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{m=1}^M P_{m,t} + P_{\text{load},t} \right) \quad (6)$$

其中, P_{avg} 为日平均负荷。

1.2.3 EV用户经济满意度最大

EV用户参与V2H调度的费用由3个部分组成: ①EV用户自到达停车场时刻 t_{arrive} 开始至下一次出行时刻 t_{leave} 为止,对电池进行充电的充电费用; ②为了平抑居民用电的负荷高峰,在负荷高峰时段对居民区配电网进行放电的经济收益; ③电池损耗折合费用。因此, EV用户经济满意度最大的目标函数如式(7)所示。

$$\min F_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \left(u_{m,t} P_{m,t} C_{\text{charge},t} + v_{m,t} P_{m,t} C_{\text{discharge},t} + C_{\text{loss},m} n_{\text{loss},m} \right) \Delta t \quad (7)$$

其中, Δt 为单位时段间隔,取1 h; $u_{m,t}$ 、 $v_{m,t}$ 为 t 时段第 m 辆EV的充放电标志,若EV充电则有 $u_{m,t} = 1$ 、 $v_{m,t} = 0$,若EV放电则有 $u_{m,t} = 0$ 、 $v_{m,t} = 1$,若EV闲置则有 $u_{m,t} = v_{m,t} = 0$; $C_{\text{charge},t}$ 、 $C_{\text{discharge},t}$ 分别为 t 时段的充电、放电费用; $C_{\text{loss},m}$ 为第 m 辆EV的电池损耗折合费用^[18],表征EV放电次数对电池寿命的影响造成的经济损失; $n_{\text{loss},m}$ 为第 m 辆EV在一个调度周期内的放电次数。

1.2.4 EV用户舒适度最大

EV参与V2H调度可以获得一定的经济收益,但EV最主要的作用是保证用户的正常出行并且应尽可能减少调度过程中对EV频繁充放电。因此,从EV用户出行满意度 $\alpha_{1,m}$ 、最终荷电状态(SOC)满意度 $\alpha_{2,m}$ 以及充放电交换次数满意度 β_m 这3个方面定义EV用户舒适度。

(1) EV用户出行满意度 $\alpha_{1,m}$ 。

在实际情况中, EV用户会遇到突发情况临时增加出行需求,即会在EV充电过程中停止充电行为。此时若参与V2H调度的EV过度放电,会影响EV用户的出行,大幅降低其参与V2H的积极性。因此,本文认为EV用户在到达停车场后立即以额定功率 P_{charge} 进行充电,充电至电池SOC上限后就停止充电,在这样的充电模式下EV用户的出行满意度最大。因此当EV参与V2H调度时,各时段的SOC总

是小于或等于出行满意度最大时的SOC,定义两者的差值与出行满意度最大时该时段的SOC的比值为EV用户出行满意度,计算式为:

$$\alpha_{1,m} = \frac{\sum_{t=t_{\text{arrive},m}}^{t_{\text{leave},m}} \left(1 - \frac{\overline{\text{SOC}}_{m,t} - \text{SOC}_{m,t}}{\overline{\text{SOC}}_{m,t}}\right)}{24 - t_{\text{leave},m} + t_{\text{arrive},m}} \quad (8)$$

其中, $\text{SOC}_{m,t}$ 为实施V2H调度时 t 时段第 m 辆EV的SOC; $\overline{\text{SOC}}_{m,t}$ 为用户出行满意度最大时 t 时段第 m 辆EV的SOC。由式(8)可知, $\alpha_{1,m}$ 的取值范围为0~1,其值越大,说明EV用户在本次V2H调度中的出行满意度越高。

(2)最终SOC满意度 $\alpha_{2,m}$ 。

定义EV参与V2H调度结束时,离开时刻的SOC与期望充电结束后达到的SOC的比值为最终SOC满意度,计算式为:

$$\alpha_{2,m} = \min\{1, \text{SOC}_{\text{end},m} / \text{SOC}_{\text{expect},m}\} \quad (9)$$

其中, $\text{SOC}_{\text{end},m}$ 为第 m 辆EV在离开充电站时的SOC; $\text{SOC}_{\text{expect},m}$ 为第 m 辆EV在离开充电站时期望达到的SOC,本文取 $\text{SOC}_{\text{expect},m} = \text{SOC}_{\text{max}}$, SOC_{max} 为电池充电时SOC的上限。由式(9)可知, $\alpha_{2,m}$ 的取值范围为0~1,若EV在一个调度周期结束时 $\text{SOC}_{\text{end},m} = \text{SOC}_{\text{expect},m}$,则最终SOC满意度 $\alpha_{2,m}$ 达到最大值1。

(3)充放电交换次数满意度 β_m 。

文献[18]研究表明,电池频繁充放电对电池的寿命有较大的影响,影响EV用户的舒适程度。因此,本文将充放电交换次数满意度 β_m 作为EV用户舒适度的一部分,计算式为:

$$\beta_m = \min\{1, 1/n_{\text{change},m}\} \quad (10)$$

其中, $n_{\text{change},m}$ 为第 m 辆EV在一个调度周期内的充放电交换次数(例如:若第 m 辆EV在5个时段的充放电功率分别为-2、1、-1、2、4 kW,那么 $n_{\text{change},m}=3$)。 β_m 的取值范围为0~1,若EV在参与调度时段内没有连续交替充放电的行为,则充放电交换次数满意度 β_m 达到最大值1。

基于以上三方面的考虑,将EV用户舒适度定义为EV用户出行满意度、最终SOC满意度和充放电交换次数满意度三者之积,则目标函数为:

$$\min F_4 = -\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \alpha_{1,m} \alpha_{2,m} \beta_m \quad (11)$$

EV用户舒适度的取值范围为-1~0,其值越小,则EV用户舒适度越高。

总目标函数如下:

$$\min F = \omega_1 F_1 / F_{1\text{max}} + \omega_2 F_2 / F_{2\text{max}} + \omega_3 F_3 / F_{3\text{max}} + \omega_4 F_4 \quad (12)$$

其中, $F_{1\text{max}}$ 、 $F_{2\text{max}}$ 分别为EV接入前居民区负荷的峰谷差、波动均方差; $F_{3\text{max}}$ 为EV用户以出行满意度最

大进行充电时的总费用; $\omega_1 \sim \omega_4$ 为加权因子,且满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$ 。

1.3 约束条件

EV充放电调度受到用户每日出行规律、电池容量、电池充放电功率等多种因素的影响和制约。为了充分利用EV电池的充放电特性,提高V2H的调度灵活性,本文采用变功率充电方式。

1.3.1 充放电调度时段约束

EV参与V2H的调度时段为自EV用户当日行驶结束时刻至下一次行程出发时刻,调度周期为24 h。在白天外出期间EV未接入居民区配电网,因此不参与V2H调度。即当 $t_{\text{leave},m} \leq t < t_{\text{arrive},m}$ 时,有式(13)成立。

$$P_{m,t} = 0 \quad (13)$$

1.3.2 SOC约束

为了避免过充电或过放电对EV电池造成损坏,电池SOC有如下约束:

$$\text{SOC}_{\text{min}} \leq \text{SOC}_{m,t} \leq \text{SOC}_{\text{max}} \quad (14)$$

其中, SOC_{min} 为EV放电时SOC的下限。

1.3.3 充放电功率约束

为了避免EV在负荷低谷时向居民区配电网反送电,不允许EV在负荷低谷时段有放电行为,其余时段V2H策略可控制EV充放电,对EV充放电功率进行离散化处理。

在负荷低谷时段有:

$$0 \leq P_{m,t} \leq P_{\text{charge}} \quad (15)$$

在非负荷低谷时段有:

$$P_{\text{discharge}} \leq P_{m,t} \leq P_{\text{charge}} \quad (16)$$

其中, $P_{\text{discharge}}$ 为EV最大放电功率。

1.3.4 SOC对充放电功率的约束

若 t 时段EV的SOC达到最大,则下一时段不能对EV进行充电,若 t 时段EV的SOC降为最小,则下一时段不能对EV进行放电。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{m,t+1} \leq P_{\text{charge}} & \text{SOC}_{m,t} = \text{SOC}_{\text{max}} \\ P_{\text{discharge}} \leq P_{m,t+1} \leq 0 & \text{SOC}_{m,t} = \text{SOC}_{\text{min}} \end{cases} \quad (17)$$

1.3.5 SOC连续性约束

$$\text{SOC}_{m,t} = \begin{cases} \text{SOC}_{m,t-1} + \frac{P_{m,t} \eta_{\text{charge}} \Delta t}{C} & P_{m,t} > 0 \\ \text{SOC}_{m,t-1} + \frac{P_{m,t} \Delta t}{\eta_{\text{discharge}} C} & P_{m,t} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中, C 为EV的电池容量; η_{charge} 、 $\eta_{\text{discharge}}$ 分别为EV的充电、放电效率。

1.3.6 充放电功率变化率约束

当V2H调度采用变功率方式对EV进行充放电调度时,会对EV进行频繁充放电。但对于EV用户而言,频繁的功率变化会对电池造成极大的损伤,影响EV用户的舒适度。为此本文设置式(19)所示充

放电功率变化率约束。

$$\Delta P_{m,t} = (P_{m,t} - P_{m,t-1}) / \Delta t \leq 2 \text{ kW} / \text{h} \quad (19)$$

2 V2H 调度策略求解

利用遗传算法对 V2H 调度策略进行求解,首先在调度管理系统中输入预测的居民区常规负荷数据以及 EV 相关数据,设定算法的个体数目、最大遗传代数、变异概率等数值,进而对模型进行求解。具体的求解过程及算法流程图如图 2 所示。

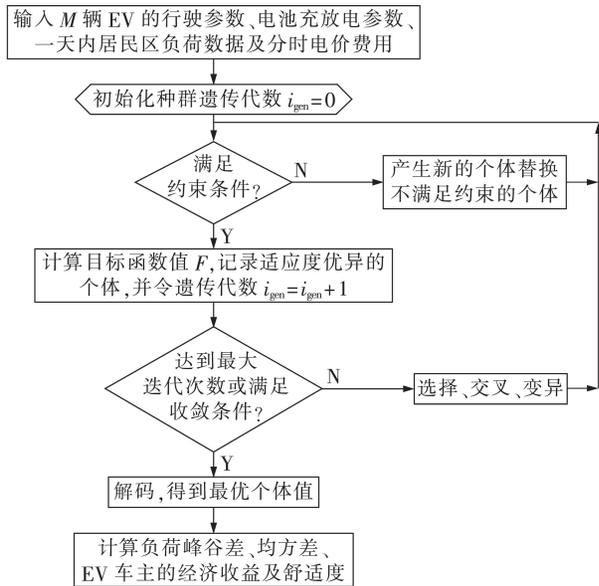


图 2 V2H 调度策略求解流程

Fig.2 Solving process of V2H scheduling strategy

3 算例仿真

3.1 情景及参数设置

选取某居民区作为研究对象,该居民区 EV 保有量为 50 辆, EV 充电桩的设置充足,可以满足该社区内 EV 用户的充电需求。以 24 h 为调度周期模拟日常生活中 EV 用户的出行规律,用户在一天将要结束的时候回到居民区将 EV 接入充电桩进行充电,次日上午驾驶 EV 离开,停车期间利用 V2H 调度策略对 EV 充放电进行智能调度。

(1) EV 用户相关参数。

EV 用户的出行及到达时刻、到达时 EV 电池的 SOC 服从正态分布^[19],假设不同 EV 用户的出行相互独立,互不影响。EV 用户的到达时刻、离开时刻、充电起始 SOC 分别服从正态分布 $N(7, 1.5^2)$ 、 $N(19, 1^2)$ 和 $N(0.4, 0.1^2)$ 。EV 电池参数见附录中表 A1。

(2) 居民用户参数。

设定居民用户为固定负荷,本文根据文献[17]提供的相关数据选取居民负荷参数,其负荷曲线如附录中图 A1 所示。

(3) 分时电价参数。

在文献[6]中分时电价的基础上,为了提升 EV 用户参与 V2H 的调度效果,根据附录中图 A1 所示的居民区典型日负荷曲线,对分时电价时段及价格进行调整,调整后的充放电电价如表 1 所示。

表 1 EV 充放电电价

Table 1 Charging and discharging electricity price of EV

	时段	充电电价 / [元·(kW·h) ⁻¹]	放电电价 / [元·(kW·h) ⁻¹]
峰时段	09:00—13:00	1.0	1.0
	17:00—21:00	1.5	1.5
平时段	13:00—17:00, 21:00—24:00	0.6	0
谷时段	00:00—09:00	0.4	0

3.2 V2H 调度策略设置及对比

(1) 调度策略设置。

根据目标函数的权重以及是否考虑式(19)所示约束条件,共设置 5 种 V2H 调度策略,如表 2 所示。

表 2 调度策略设置

Table 2 Setting of scheduling strategies

调度策略	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	是否考虑式(19) 所示约束条件
1	0.25	0.25	0.25	0.25	否
2	0.25	0.25	0.25	0.25	是
3	0.10	0.10	0.70	0.10	否
4	0.10	0.10	0.40	0.40	否
5	0.10	0.10	0.10	0.70	否

其中,调度策略 1 和调度策略 2(均衡 V2H 调度策略)下各目标函数的权重相等,两者的不同之处在于是否对充放电功率变化率进行限制;调度策略 3 以 EV 用户的经济利益为主;调度策略 4 将 EV 用户的经济利益所占权重下调,提高 EV 用户舒适度的权重;调度策略 5 几乎不考虑 EV 用户的经济利益,而是最大化满足 EV 用户的出行需求。各调度策略的目标函数值如附录中表 A2 所示。

(2) 调度策略对比。

调度策略 1 和调度策略 2 优化后的负荷曲线如图 3 所示。由图可看出,二者均对负荷曲线有了很大的改善。图 4 为调度策略 1 和调度策略 2 下典型 EV 的充放电功率,可以看出相比于调度策略 1,调度策略 2 的充放电功率变化更加平缓。由于式(19)所示约束条件的限制, EV 的充放电功率只能以最大值 2 kW/h 的变化率进行改变,50 辆 EV 的平均充放电交换次数 n_{change} 由原来的 0.54 下降为 0.4,在一定程度上降低了频繁充放电交换对 EV 电池造成的损伤。

当采用调度策略 3 时, EV 用户的充电费用变为负数,表明经过一个调度周期, EV 用户无需支付充电费用,并且可获得 0.72 元的收益,但大幅降低了 EV 用户的舒适度。算例中第 38 辆 EV 在次日离开

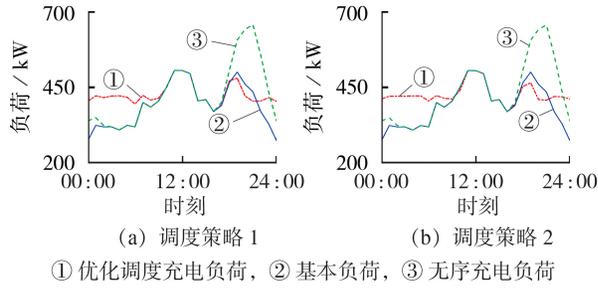


图3 调度策略1、2的负荷曲线

Fig.3 Load curves of scheduling strategy 1 and 2

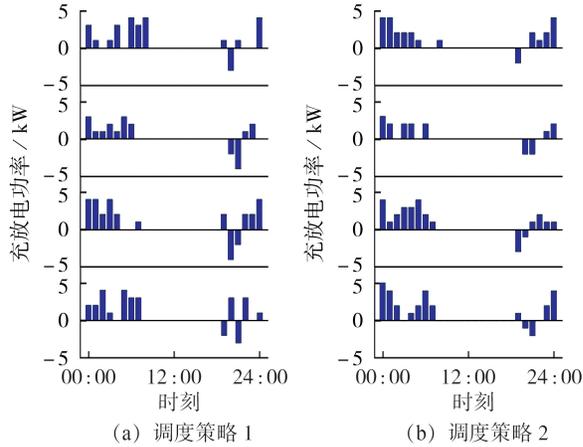


图4 调度策略1、2下典型EV的充放电功率

Fig.4 Charging and discharging power of typical EVs under scheduling strategy 1 and 2

时的SOC仅为0.23。假设EV每行驶100 km的耗电量为12 kW·h,则该EV用户在离开充电站后仅可行驶7.5 km,不能满足EV用户的日常出行需求。

在调度策略4和5下,随着经济利益所占比重的降低,EV用户的舒适度开始提高,当几乎不考虑经济利益时,EV用户的舒适度达到最大,但充放电费用也相对增加,接近无序充电情况下的充电费用。

通过对以上5种V2H调度策略进行对比可知,调度策略2在综合性能方面最好,既平抑了居民区负荷的波动,又同时兼顾了EV用户的经济利益和出行舒适度。

3.3 不同EV渗透率下均衡V2H调度策略的适用性

当EV的渗透率越来越高时,无序充电会加剧负荷的峰谷差,这就更加需要均衡V2H调度策略对EV的充放电功率进行调控。

从负荷峰谷差、负荷均方差、EV用户充放电费用以及EV用户舒适度4个方面对不同渗透率下的优化效果进行对比。

(1) 负荷峰谷差和负荷均方差。

不同EV渗透率下的居民区负荷曲线见图5。由图5可以看出,随着EV渗透率的不断提高,居民区负荷曲线的峰谷差逐渐降低。原始居民负荷的峰谷差为230 kW;当EV渗透率为20%、40%、60%、

80%、100%时,负荷峰谷差分别为204、169、145、135、135 kW。可见,当参与V2H调度的EV数量增大时,居民区配电网的灵活性资源更加充分,使得居民区配电网的负荷特性更好,但由于EV用户在白天出行,无法对10:00—13:00时段的负荷曲线“削峰”,当EV渗透率增加到一定的程度时,均衡V2H智能调度策略对负荷曲线峰谷差的优化效果不再明显,趋于饱和。

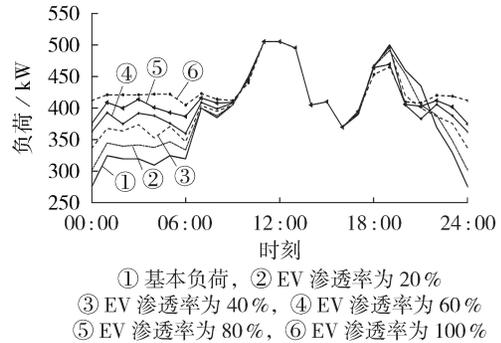


图5 不同EV渗透率下的居民区负荷曲线

Fig.5 Load curves of residential area under different EV permeability

同样地,EV渗透率越高,负荷曲线越平稳,负荷均方差越小。

(2) EV用户的充放电费用。

随着EV渗透率的增加,EV用户的充放电费用也随之增加,如表3所示。这是因为高EV渗透率下负荷峰谷差、负荷均方差减小,EV的可调度空间变得有限,导致EV放电的时间会越来越少,经济收益降低。但即使EV渗透率达到100%,EV用户的充放电费用仍小于无序充电时的费用,均衡V2H调度策略仍具有优势。

表3 EV用户的平均充放电费用

Table 3 Average charging and discharging cost of EV users

EV 渗透率 / %	平均充放电费用 / 元	EV 渗透率 / %	平均充放电费用 / 元
20	3.9	80	5.3
40	4.5	100	6.9
60	4.7		

(3) EV用户舒适度。

当EV渗透率为20%、40%、60%、80%、100%时,EV用户的舒适度分别为-0.6049、-0.6218、-0.6171、-0.6174、-0.6504,可见EV渗透率的变化对用户舒适度的影响不大。说明无论EV的渗透率如何改变,均衡V2H调度策略均能保证EV用户的出行需求。

综上所述,随着EV用户数量的增加,均衡V2H调度策略仍能保证较好的优化效果。

4 结论

本文所提考虑EV充放电全程功率变化率和用户舒适度的均衡V2H调度策略既改善了居民区的负荷特性,也兼顾了EV用户的经济利益和舒适度,利用遗传算法对模型进行优化求解,通过对某居民区的算例进行仿真,所得结论如下。

(1)将无序充电和均衡V2H调度策略进行对比可知,采用均衡V2H智能调度策略一方面可以降低负荷峰谷差以及平抑负荷波动,另一方面可以在保证EV用户出行需求的前提下为EV用户节约充电费用。

(2)均衡V2H调度策略在一定程度上减少了EV电池的充放电交换次数,使充放电功率的变化更加平缓,虽然少量增加了用户的日充放电费用,但延长了EV的整体使用寿命。

(3)随着EV渗透率的提高,居民区的负荷特性得到的改善越明显。虽然EV用户的充放电费用略有增加,但仍能保证其经济利益优于无序充电,且无论EV的渗透率如何改变,均衡V2H调度策略均能最大限度地满足EV用户的出行需求,为今后EV的充放电智能调度提供了一定的思路。

本文的研究重点是EV的充放电调度问题,关于EV充电站的设置及消防安全将是今后的研究与应用方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

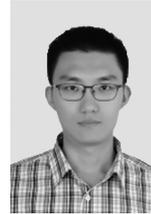
参考文献:

- [1] JARVIS R, MOSES P. Smart grid congestion caused by plug-in electric vehicle charging[C]//2019 IEEE Texas Power and Energy Conference(TPEC). College Station, TX, USA:IEEE, 2019: 1-5.
- [2] 郭建龙,文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9, 30.
GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9, 30.
- [3] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3638-3646.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic time-of-use tariffs[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3638-3646.
- [4] 陈丽丹,张尧, Antonio Figueiredo. 融合多源信息的电动汽车充电负荷预测及其对配电网的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 1-10.
CHEN Lidun, ZHANG Yao, ANTONIO Figueiredo. Charging load forecasting of electric vehicles based on multi-source information fusion and its influence on distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 1-10.
- [5] 徐从启,高瑞林,贾桂芝,等. 考虑分时电价电动汽车负荷的配电网优化调度[J]. 电气工程学报, 2017, 12(11): 12-20.
XU Congqi, GAO Ruilin, JIA Guizhi, et al. Scheduling of mi-
- cro-grid considering electrical vehicles of time-of-use tariffs [J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(11): 12-20.
- [6] 周凌锋,王杰. 考虑用户响应程度的电动汽车分时电价策略[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22): 67-72.
ZHOU Lingfeng, WANG Jie. Time-of-use pricing strategy for electric vehicles considering demand response degree of users [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(22): 67-72.
- [7] 潘振宁,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.
- [8] 吴甲武,邱晓燕,潘胤吉,等. 基于改进鸡群算法的电动汽车有序充电策略研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(9): 97-103.
WU Jiawu, QIU Xiaoyan, PAN Yinji, et al. Research on orderly charging strategy of electric vehicle based on improved chicken swarm optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(9): 97-103.
- [9] 刘晓飞,张千帆,崔淑梅. 电动汽车V2G技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [10] 吕耀棠,管霖,赵琦,等. 充电式电动汽车停车场的V2G模型及接入配电网方案优化研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 1-7, 14.
LÜ Yaotang, GUAN Lin, ZHAO Qi, et al. Research on V2G model of EPVV and its optimal scheme accessing to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 1-7, 14.
- [11] Xavier Yang, 吴俊勇, 牛星岩. 电动汽车V2H应用模式的前瞻性研究[C]//2013年中国电机工程学会年会. 成都, 中国: 中国电机工程学会, 2013: 565-569.
Xavier Yang, WU Junyong, NIU Xingyan. Perspective research of EV's V2H application[C]//2013 Chinese Society of Electrical Engineering Annual Meeting. Chengdu, China: Chinese Society of Electrical Engineering, 2013: 565-569.
- [12] LIU Jian, ZHONG Caifu. An economic evaluation of the coordination between electric vehicle storage and distributed renewable energy[J]. Energy, 2019, 186: 115821.
- [13] 张怡冰,刘其辉,洪晨威,等. 基于模糊控制的区域电动汽车入网充放电调度策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 147-153.
ZHANG Yibing, LIU Qihui, HONG Chenwei, et al. Charging and discharging dispatch strategy of regional V2G based on fuzzy control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 147-153.
- [14] 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.
- [15] 高亚静,王辰,吕孟扩,等. 计及车主满意度的电动汽车最优峰谷分时电价模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 8-13.
GAO Yajing, WANG Chen, LÜ Mengkuo, et al. Optimal time-of-use price model considering satisfaction degree of electric vehicle owners[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 8-13.

- [16] BERTHOLD F, RAVEY A, BLUNIER B, et al. Design and development of a smart control strategy for plug-in hybrid vehicles including vehicle-to-home functionality[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(2):168-177.
- [17] 魏大钧, 张承慧, 孙波, 等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11):2972-2977.
WEI Dajun, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11):2972-2977.
- [18] 李廷钧, 杜欣慧, 姚宏民. 计及用户评价的智能用电社区分层优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(11):3486-3497.
LI Tingjun, DU Xinhui, YAO Hongmin. Hierarchical dispatch optimization for intelligent power community considering electricity evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(11):3486-3497.
- [19] 杨晓东, 张有兵, 翁国庆, 等. 基于虚拟电价的电动汽车充放电优化调度及其实现机制研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17):52-62.
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, WENG Guoqing, et al. Vir-

tual time-of-use tariffs based optimal scheduling and implementation mechanism of electric vehicles charging and discharging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17):52-62.

作者简介:



邢紫佩

邢紫佩(1995—),男,天津人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车接入配电网的分析(**E-mail**:178719927@qq.com);

王守相(1973—),男,山东高密人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为分布式发电与智能配电网(**E-mail**:sxwang@tju.edu.cn);

梅晓辉(1984—)男,河北衡水人,高级工程师,研究方向为电网规划与设计(**E-mail**:meixiaohui03@126.com);

赵海洲(1981—),男,河北饶阳人,高级工程师,硕士,研究方向为电网规划与运行(**E-mail**:zhqwt@126.com)。

(编辑 陆丹)

V2H scheduling strategy considering charging and discharging power change rate of electric vehicles and users' comfort level

XING Zipei^{1,2}, WANG Shouxiang^{1,2}, MEI Xiaohui³, ZHAO Haizhou³

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Power System Simulation and Control, Tianjin 300072, China;

3. Hengshui Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Hengshui 053000, China)

Abstract: At present, there is a lack of research on the user-side demand for charging and discharging scheduling of EVs (Electric Vehicles) in residential areas. In particular, it is difficult to balance economic benefits and travel needs of EV users. Therefore, on the premise of comprehensive analysis of daily load characteristics of residential areas and EV users' demands, a V2H (Vehicle-to-Home) scheduling strategy considering charging and discharging power change rate of electric vehicles and users' comfort level is proposed, whose feasibility and optimization effect on residential load and EV users are verified based on genetic algorithm. The applicability of V2H scheduling strategy under different EV permeability is studied. The results show that the increase of EV permeability can better improve the grid-connected characteristics of residential load, and as the EV permeability increases, although the economic benefits of EV users will decrease slightly, the maximum comfort level of EV users can be guaranteed.

Key words: electric vehicles; V2H; scheduling strategy; power change rate; comfort level; permeability

附录

表 A1 EV 电池参数

Table A1 Battery parameters of EVs

电池参数	数值	电池参数	数值
电池容量 C	30 kW·h	放电效率 $\eta_{\text{discharge}}$	0.95
额定充电功率 P_{charge}	5 kW	电池最大电荷状态 SOC_{max}	0.9
额定放电功率 $P_{\text{discharge}}$	5 kW	电池最小电荷状态 SOC_{min}	0.2
充电效率 η_{charge}	0.95	电池损耗折合费用 C_{loss}	1 元/次

表 A2 调度策略目标函数值对比

Table A2 Comparison of objective function values of scheduling strategies

调度策略	峰谷差/kW	负荷均方差 /kW ²	平均充放电费 用/元	电动汽车用户 舒适度	α_1	α_2	n_{change}
1	135	1284.0	5.80	-0.6107	0.6750	0.9761	0.54
2	135	1092.0	6.90	-0.6504	0.6925	0.9782	0.40
3	175	2528.6	-0.72	-0.2837	0.4935	0.5603	0.49
4	138	1640.2	1.30	-0.4049	0.5536	0.7225	0.55
5	135	1141.5	14.80	-0.8272	0.8951	0.9756	0.69

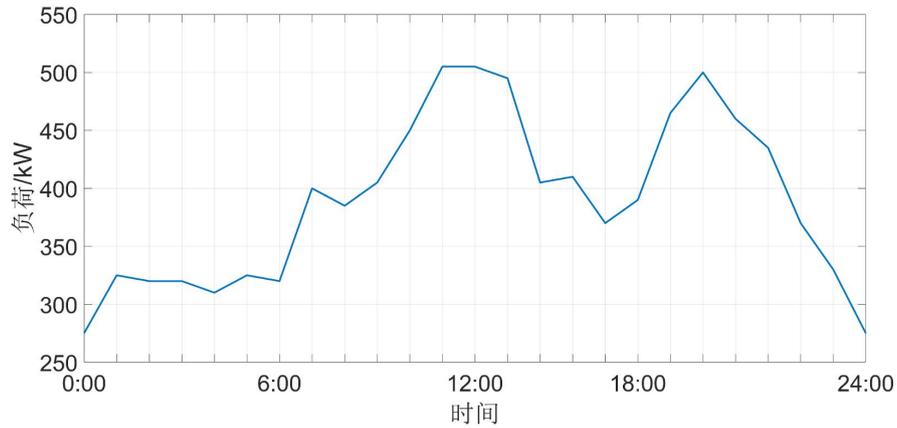


图 A1 居民区典型日负荷曲线

Fig.A1 Typical daily load curve of residential area