

电动汽车充放电多目标优化调度策略研究

徐天奇¹, 冯培磊¹, 李 琰¹, 崔 琳¹, 邓亚琪², 赵 玉¹

(1.云南民族大学电气信息工程学院, 云南 昆明 650500;

2.昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 电动汽车作为新型负荷接入电网给原有的配电网带来一系列问题, 有效的控制策略可以减小电动汽车充放电对电网的影响。针对电动汽车的入网情况和现有的分时电价制度, 从配电网方面考虑以最小化配电网负荷均方差与最小化系统负荷峰谷差为目标函数建立电网负荷波动的数学模型。兼顾电网和用户双方共同的利益, 在用户侧方面以电动汽车用户充放电成本最低作为优化的目标函数建立多目标的电动汽车优化调度模型。基于某商用楼宇负荷进行算例仿真, 采用常惯性粒子群算法进行求解。仿真结果表明, 分时电价引导下的调度策略可以减小峰谷差, 提高用户的经济性。增大平均电价情况下调峰效果显著, 用户成本会因平均电价上浮而增高。

关键词: 电动汽车充放电; 多目标优化; 粒子群算法; 调度策略

Study on multi-objective optimization scheduling strategy of EV charging and discharging

XU Tianqi¹, FENG Peilei¹, LI Yan¹, CUI Lin¹, DENG Yaqi², ZHAO Yu¹

(1.School of Electrical and Information Technology, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China; 2.School of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: As a new type of load, the electric vehicle brings a series of problems to the original distribution network. The effective control strategy can reduce the impact of electric vehicle charging and discharging on the power grid. In order to minimize the load mean variance of the distribution network and minimize the peak valley difference of the system load as the objective function, a mathematical model of the power grid load fluctuation is set up from the distribution network. Taking into account the common interests of both the power grid and the users, the multi-objective optimization scheduling model of electric vehicles is established in the user side with the electric vehicle minimum cost of charging and discharging as the objective function of the optimization. Based on a commercial building load simulation example, the constant inertia particle swarm optimization algorithm is used to solve it. The simulation results show that: the dispatching strategy guided by TOU pricing can reduce the peak valley difference and improve the user's economy. With the increase of average electricity price, the effect of peak shaving is remarkable, and the user cost will increase as the average electricity price rises.

Key words: electric vehicle charging and discharging; multi-objective optimization; particle swarm optimization; scheduling strategy

国家自然科学基金项目 (61761049); 国家自然科学基金项目 (61461055) 云南省应用基础研究计划项目 (2017FD120,2018FD052); 云南民族大学创新基金校级重点项目 (2018YJCXS)

0 引言

电动汽车作为一种新型负荷，大规模接入电网会给配电网带来一系列问题。无序接入会增大负荷的峰谷差，使得电网电压过低增大线路损耗值，配电网局部负荷值增大引起变压器容量越限从而减小变压器的寿命。另一方面，电动汽车也可能作为移动的分布式电源为电网提供反向服务^[1]。文献[2]在V2G控制时将电池的充放电循环次数考虑在内，通过建立的奖励政策，给予放电的电动汽车适当的酬劳。电动汽车集群接入会对配电网变压器的热点温度和使用寿命带来不同程度的影响，基于粒子群算法提出了智能充电控制策略，在满足用户的用电要求条件下，增加变压器的使用年限^[3]。文献[4-5]通过对V2G市场的潜力分析，通过相关的控制策略和一定的商业模式，证明了V2G虽然不适合提供基础负荷的功率，但能够在某种程度上平衡系统的峰值负荷，为旋转备用和频率调节市场提供一定的竞争力。文献[6]构造了大电网环境下V2G技术网络体系，将主动配电网技术考虑在内研究了入网调度架构体系并建立了信息通信系统。椭圆曲线密码体制的层次访问控制密钥管理方案被提出，仿真结果表明可以满足电动汽车网络的控制需求。文献[7]阐述了电动汽车可以实现污染的零排放，考虑到现有的峰谷电价的用电模型，运用随机的多项式logit模型研究电动汽车的充放电习惯，评估了用户的充电效益和对电网产生的影响。合理有效地采用控制策略可以减小电动汽车对电网带来的影响。

电力市场是不断发展的，电动汽车代理商有机会代表电动汽车用户参与竞标与电网公司谈判电价，可以降低电动汽车用户的成本。文献[8]通过构造电动汽车代理商参与电力市场的两层策略的竞标模型，采用随机模糊规划求解方法进行求解。文献[9]基于物理学中的引力模型，根据电价弹性矩阵计算出自弹性系数和互弹性系数。通过建立4类车型充放电响应，基于多目标遗传算法对最优分时电价进行求解。文献[10]基于工程博弈论的思想，考虑分时电价的激励作用，仿真了区域

内的电动汽车调度问题，可以为电动汽车入网提供应对方案。

V2G技术的出现使电动汽车和智能电网的融合成为可能^[11]。文献[12]通过V2G技术建立了以电网总负荷波动最小为目标函数，将用户的充放电时间和充放电需求作为约束条件得到最优的峰谷电价模型，通过对京津唐电网的仿真证明了模型的有效性。文献[13]通过V2G系统对大量电动汽车电池的管理，通过调度控制中心对电能合理的调度，或者根据动态电价来引导电动汽车用户决定充放电过程，提高电网可操作性和灵活性。文献[14]论证了电动汽车有序接入电网的影响要比无序接入电网产生的影响小。文献[15]采用蒙特卡罗仿真方法对电动汽车充电需求和放电容量曲线进行研究，分析单向充电和双向V2G技术下对系统负荷的网络损耗和节点电压偏移的影响。文献[16]提出了在满足用户充电需求的前提下，根据短期负荷趋势的预测，优化每个时段的充电功率，进一步使负荷变化平稳，电能的损耗下降，电压的质量提高。

文献[17]通过改进的粒子群算法进行求解并进一步用实例验证了有效的电动汽车调度很大程度上可以平抑负荷的波动。文献[18]中的模型仅仅考虑了电动汽车的充电，没有考虑到电动汽车的放电，所以最终的优化结果体现在“填谷”的效果比较明显。电动汽车在高峰时段进行放电有助于“削峰”。整体的模型针对于配电网的部分仅仅做到了保持电力系统稳定，并没有考虑电动汽车的充电成本问题。文献[19]综合目标函数中前者表示的系统负荷波动的标准差，后者的单位是用户的收入，没有对量纲进行统一化和直接相加计算，存在着很大的误差。权重分配应该是在电力系统稳定的范围内进行权重调节，从而达到综合最优化。提出的方法在理论上是可行的，在求解的过程中结果的可靠性有待于讨论。文献[20]基于峰谷分时电价的条件，重点考虑配电网的负荷波动以及电动汽车的用户充放电成本。文献[19]通过电量电价矩阵来对电动汽车的放电电价进行求

解,而文献[20]根据当地的实际水平来去制定,电动汽车对电网馈电的电价为固定值。电动汽车的充放电对系统负荷的峰谷差产生一定的影响,电动汽车尚未大面积地接入电网,电动汽车用户充放电的历史相关数据相对较少,准确获得电动汽车的电价电量反应曲线和符合历史数据规律的弹性系数矩阵对电动汽车用户的充放电定价极其重要。

本文提出一种基于分时电价的控制策略来影响电动汽车用户的充放电行为,在供电侧考虑电动汽车入网后的系统负荷波动和峰谷差值最小,在用户侧考虑用户的充放电成本最低,通过建立不同的综合目标函数达到削峰填谷的目的,并通过仿真验证了此多目标优化控制策略模型的有效性。

1 电量电价模型

1.1 电量与电价关系模型

需求曲线是显示价格与需求量关系的曲线,其他条件相同时,物品的需求数量与价格呈反比。电能是一种特殊商品,但电力市场也一样有供求关系存在,电价可以影响用户的直接感官度,并且第一时间作出反馈。从理论上分析电动汽车用户对电价的反应,其响应度与价格需求弹性相关^[21]。

电量电价弹性是指电价的相对变动引起的电能需求量的相对变动,即在一定的时间段内,用电量变化的百分率与相应的价格变化的百分率之比,典型的需求曲线如图1所示。图1中, q 为电量; p 为电价。影响需求量的因素中最主要的是价格,在其他因素不变的情况下,需求量与价格之间成反比。

文献[22]基于经济学将需求关系进行线性化处理,定义电量电价弹性系数,即

$$\xi = \frac{\Delta q/q}{\Delta p/p} \quad (1)$$

式中, Δq 、 Δp 分别为电量 q 和电价 p 的相对增量。

在现实生活中,大多数用户在某一时段的用电量不仅与该时刻的电价相关,而且还受到其他

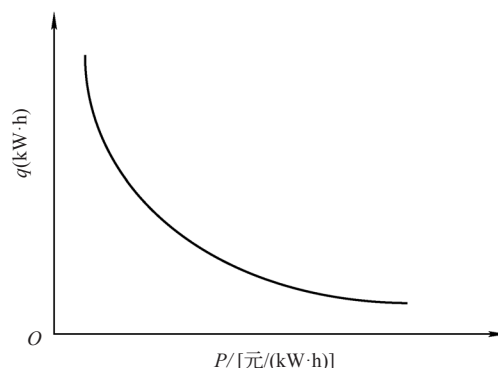


图1 典型供需关系曲线图

Fig.1 Diagram of typical relationship between supply and demand

相邻时刻电价的影响。自弹性系数和交叉弹性系数计算式为

$$\xi_{ii} = \frac{\partial q_i / q_i}{\partial p_i / p_i} \quad (2)$$

$$\xi_{ij} = \frac{\partial q_i / q_i}{\partial p_j / p_j} \quad (3)$$

式中, i 、 j 为不同的时间段。

对于一天中的 n 个时段,可得到如下公式^[11,22-23],即

$$\begin{bmatrix} \partial q_1 / q_1 \\ \partial q_2 / q_2 \\ \vdots \\ \partial q_n / q_n \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \partial p_1 / p_1 \\ \partial p_2 / p_2 \\ \vdots \\ \partial p_n / p_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$E = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \cdots & \xi_{1n} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \cdots & \xi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{n1} & \xi_{n2} & \cdots & \xi_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, E 为 $n \times n$ 的弹性矩阵; ξ_{ii} 为自弹性系数; ξ_{ij} 为互弹性系数。

基于电力市场中的需求响应规律研究电价与用户终端的电量需求关系,重点是研究用户的需求电量对电价的敏感度。文献[9]、文献[22]和文献[24]重点研究了电量电价矩阵方法及求解过程。

1.2 典型的峰谷分时电价模型

合理有效的量化和测量用户对峰谷分时电价的响应度是非常重要的。制定峰谷分时电价时

应充分考虑用户对该政策的满意度。虽然较高的峰谷分时电价的制定可以达到“削峰填谷”的效果，可是用户的满意度下降会比较大。充分考虑电动汽车用户的满意度和响应度等相关因素，运用控制策略使其综合达到最优的效果。图2为峰谷分时电价定价模式对电网的影响。

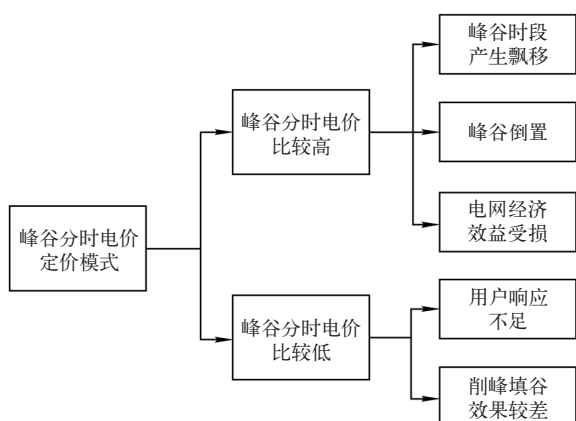


图2 峰谷分时电价定价模式对电网的影响

Fig.2 Impact of peak valley TOU pricing mode on power grid

峰谷分时电价比不同，电动汽车用户的响应度也不一样，执行分时电价可以引起电量的变化。实行峰谷电价后用户用电量变化率列向量为

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1/Q_1 \\ \Delta Q_2/Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n/Q_n \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \mathbf{E} \begin{bmatrix} \Delta P_1/P_1 \\ \Delta P_2/P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n/P_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中， ΔQ_i 为*i*时段用户实行分时电价前后的电量变化值； ΔP_i 为*i*时段用户实行分时电价前后的电价变化值。

实行峰谷分时电价后的用电量为^[25-26]

$$\begin{bmatrix} Q_1' \\ Q_2' \\ \vdots \\ Q_n' \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} Q_1 & & & \\ & Q_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & Q_n \end{bmatrix} \mathbf{E} \begin{bmatrix} \Delta P_1/P_1 \\ \Delta P_2/P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n/P_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中， Q_i' 为实行峰谷分时电价后*i*时段的用电量。

式(7)表示所建立的电动汽车用户对电价的反应度模型，执行分时电价后电动汽车用户会作

出一定范围内的响应。电动汽车用户的电量会随着不同时段电价的变化转移电动汽车的负荷。电网公司通过对负荷的转移，实现削峰填谷。用户根据电价作出适度的反应减少充放电的费用。

2 多目标优化控制策略

2.1 多目标电动汽车充放电优化数学模型

本文提出以电网负荷波动最小、系统负荷峰谷差最小和电动汽车充放电成本最低的多目标优化数学模型。通过对电网负荷波动最小和电动汽车充放电用户成本最低结合分时电价分别建立两个目标函数 $\min F_1$ 和 $\min F_2$ ，采用线性加权法将多目标问题转化为单目标问题，并对目标函数进行归一化处理，得到 $\min T$ ，以最小化系统负荷峰谷差建立目标函数3为 F_3 ，采用线型加权法，并对目标函数 $\min T$ 和 F_3 进行归一化处理，得到综合目标函数 $\min F$ ，具体计算步骤如下。

线性加权法是按各目标的重要性赋予其相应的权系数，然后对其线性组合进行寻优的求解多目标规划问题的方法。对于问题即归结为求下式的最优解

$$\min_{x \in X} \sum_{k=1}^m w_k f_k(x) \quad (8)$$

其中， $w_k \geq 0$ ($k=1, 2, \dots, m$) 为权系数，且

$$\sum_{k=1}^m w_k = 1 \quad (9)$$

对于电网的系统负荷来说，电网负荷的波动情况可以用均方差表示。负荷的均方差数值的大小反映了整体负荷变化的平稳程度。将一天分为24个时段，将每个时段的每辆电动汽车的充放电功率作为控制变量，以负荷波动最小建立目标函数1，即

$$\min F_1 = \sum_{j=1}^{24} (P_{Lj} - \sum_{i=1}^n P_{ij} - P_{av})^2 \quad (10)$$

$$P_{av} = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} (P_{Lj} - \sum_{i=1}^n P_{ij}) \quad (11)$$

式中， P_{Lj} 为不含电动汽车负荷原始电网*j*时段的系统功率； P_{ij} 为电动汽车*i*在*j*时段的充放电功率，其为负值表示充电，其为正值表示放电； n 为电动汽

车的数量。

为使用户的电费成本最低，结合分时电价的实际情况建立目标函数2，即

$$\min F_2 = \sum_{j=1}^{24} \sum_{i=1}^n |P_{ij}| S_j \quad (12)$$

式中， S_j 为j时段的电价水平。

如果电动汽车用户的充放电成本比较低，不能达到用户的心理预期，很难调动电动汽车用户参与调度的积极性，电网的剧烈波动就会比较大，不能从根本上解决；若电动汽车用户的充放电成本可以达到用户的心理预期并且超过用户的心理预期，就能充分调动电动汽车用户的积极性使电动汽车用户积极参与调度，系统负荷的波动水平比较低，同时电动汽车用户也获得自身所期待的收益。

充放电的成本和负荷波动的水平相互影响，采用线性加权法将多目标问题转化为单目标问题进行求解，通过对目标函数的归一化处理得到

$$\min T = \beta_1 \left(\frac{F_1}{F_{1\max}} \right) + \beta_2 \left(\frac{F_2}{F_{2\max}} \right) \quad (13)$$

$$\beta_1 + \beta_2 = 1 \quad (14)$$

式中， $F_{1\max}$ 为原始电网负荷的方差； $F_{2\max}$ 为传统用车习惯下车主的日充电成本； β_1 为目标函数1的权重； β_2 为目标函数2的权重系数。

以最小化系统负荷峰谷差建立目标函数3，即

$$F_3 = \min[\max(P'_{Lj}) - \min(P'_{Lj})] \quad (15)$$

式中， $\max(P'_{Lj})$ 为调整后系统负荷的峰值； $\min(P'_{Lj})$ 为调整后的系统负荷的谷值。

采用线性加权法将多目标问题转化为单目标问题进行求解，通过对目标函数的归一化处理，建立综合目标函数为

$$\min F = \omega_1 \left(\frac{F_1}{F_{1\max}} \right) + \omega_2 \left(\frac{F_2}{F_{2\max}} \right) + \omega_3 \left(\frac{F_3}{F_{3\max}} \right) \quad (16)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \quad (17)$$

式中， $F_{1\max}$ 为原始电网负荷的方差； $F_{2\max}$ 为传统用车习惯下车主的日充电成本； $F_{3\max}$ 为原始系统负荷的峰谷差值； ω_1 为目标函数1的权重系数； ω_2 为目标函数2的权重系数； ω_3 为目标函数3的权重系数。

目标函数 F_1 以负荷波动最小，目标函数 F_3 是实际负荷的削峰填谷，是负荷波动的一个特例，两者都是为了使系统负荷波动平缓为目的。将 F_1 、 F_3 两个多目标转化为单目标实现“削峰填谷”，可以使充电负荷均匀地分布于整个谷时段，在调度结果中效果最优。

将上述单目标优化问题转化为

$$\min F = \lambda_1 \left(\frac{F_1}{F_{1\max}} \right) + \left(\frac{F_3}{F_{3\max}} \right) + \lambda_2 \left(\frac{F_2}{F_{2\max}} \right) \quad (18)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (19)$$

式中， λ_1 为系统波动平缓的权重； λ_2 为电动汽车用户充放电收入的目标函数。

λ_1 、 λ_2 的权重取值情况对于不同的行业区别很大。 λ_1 取值较大说明该地区的峰谷差和系统负荷的波动较为严重， λ_2 取值较大说明电动汽车用户对电价颇为敏感。 λ_1 、 λ_2 是带有主观因素的模糊判断。

2.2 模型对应的约束条件

本文研究的电动汽车的数值有限。考虑小功率充电的方式忽略线路的容量约束，据相关数据显示，超过90%的车辆平均每天行驶的时间大约为1 h，超过95%的时间为闲置状态^[27-29]。未来电动汽车通过集中建设在停车场内的充电桩进行充电，受场地因素的制约比较小。不考虑可用时间的约束，所有电动汽车在24个时段内都可以参与调度。

1) 充放电功率约束为

$$P_{ij\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij\max} \quad (20)$$

式中， $P_{ij\min}$ 为电动汽车i在j时刻的最大充电功率约束； $P_{ij\max}$ 代表电动汽车i在j时刻的最大放电功率。

按照车用锂离子电池的标准充放电功率曲线，电动汽车的充电电流 I_c 限制在C/15以下；电动汽车的放电电流 I_d 不大于C/3。

2) 车用电池的约束一般由电池的荷电状态来表示，SOC表示电动汽车的剩余容量与最大容量的比值

$$\text{SOC}_{ij\min} \leq \text{SOC}_{ij} \leq \text{SOC}_{ij\max} \quad (21)$$

式中， SOC_{ij} 为电动汽车i在j时刻的荷电状态。 $\text{SOC}_{ij\min}$ 为电动汽车i在j时刻荷电状态的下限； $\text{SOC}_{ij\max}$ 为电动汽车i在j时刻荷电状态的上限。考

虑到车用蓄电池安全的前提下, 下限 $SOC_{ij\min}$ 通常取值为0.2; 上限 $SOC_{ij\max}$ 通常取值为0.9。

3 算例仿真

3.1 基本参数设置

算例设定每辆电动车的电池容量为48 kW·h, 初始荷电状态设置为0.3, 共有5辆电动汽车参与调度。固定电价设置为0.75元/(kW·h), 馈电补贴电价统一设置为0.1元/(kW·h), 分时电价1和分时电价2参考文献[20]。表1为商用建筑典型日用电负荷。

表1 商用建筑典型日用电负荷^[30]

Table 1 Typical daily electrical load of commercial buildings^[30]

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
功率/kW	65	64	62	64	64	64	80	77	81	90	101	101
时段	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
功率/kW	99	81	82	74	78	93	100	92	87	74	66	55

当综合目标函数为 $\min T$, $\beta_1=\beta_2=0.5$ 可以达到目标最优^[31]; 学习因子 $c_1=c_2=1.494\ 45$, 常惯性权重取值 $w=0.6$, 粒子种群数目取值为100, 迭代次数取值为2 000; $T_{1\max}$ 取值为4 562, $T_{2\max}$ 取值为140。

在综合目标函数 $\min F$ 中将目标函数 F_1 和目标函数 F_3 合并转化成目标函数, 削峰填谷是利用负荷波动的一个特例, 因为目标函数 F_1 和目标函数 F_3 都是为了减小系统负荷的波动, 将两个目标函数归一化后进行叠加建立新的目标函数 $\min F$ 。最后将多目标转化为单目标处理。

(1) 仿真结果1

综合目标函数为 $\min T$, 基于常惯性权重粒子群算法, 分别对固定电价、分时电价1和分时电价2下电网的负荷波动情况、一天内电动汽车充放电功率变化以及参与调度电动汽车电池的荷电状态变化情况进行仿真分析。

仿真结果如下。

1) 基于常惯性权重粒子群算法进行仿真, 惯性权重 w 值设置为0.6, 迭代次数设置为2 000。固定电价下的仿真结果如图3所示。

2) 执行分时电价1下的仿真结果如图4所示。

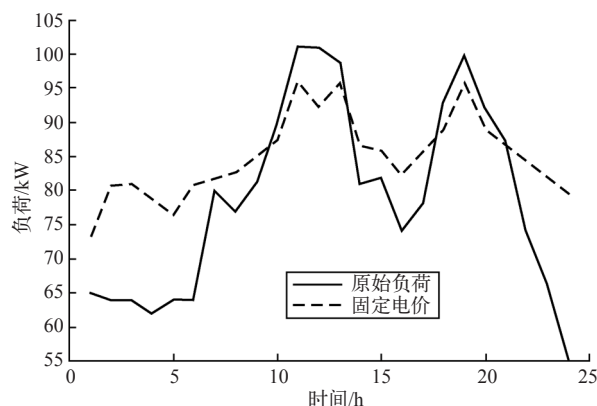


图3 固定电价下优化负荷曲线

Fig.3 Load curve optimized under original load and fixed price

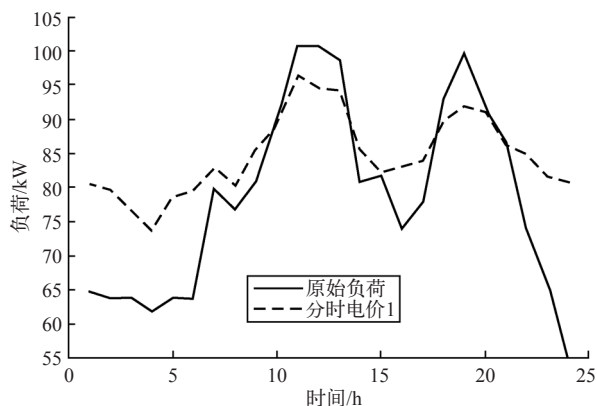


图4 分时电价1下优化负荷曲线

Fig.4 The optimized load curve under the original load and TOU price 1

分时电价1下不同车辆参与电网调度车用电电池的荷电状态变化如图5所示。假设每一辆电动汽车一天24个时段均可以参与调度, 不同车辆在参与调度时会出现不同时段处于不动作的状态。电动汽车作为灵活的储能设备在保证常规用车需求的前提下参与电网的削峰填谷。表2为分时电价1和固定电价优化结果。

表2 分时电价1和固定电价优化结果

Table 2 TOU price 1 and fixed price optimization results

电价制度	负荷均方差/ kW^2	用户成本/元
固定电价	836.379 9	12.746 2
分时电价1	814.328 2	12.898 7

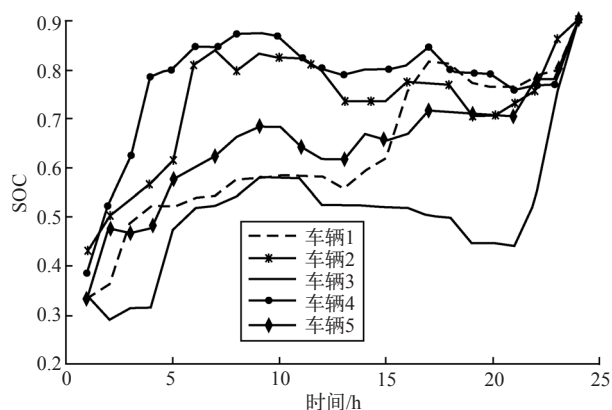


图5 分时电价1下各车辆SOC变化

Fig.5 SOC change of each vehicle at TOU price1

电动汽车充放电调度策略在分时电价1和固定电价下优化的负荷曲线与常规负荷曲线相比，负荷曲线变化比较平缓，波动幅度减小。仿真结果表明，电动汽车参与电网的多目标优化调度策略可以实现电网的“削峰”与“填谷”。分时电价1下的负荷均方差相较于固定电价下的负荷均方差减小了2.6%。分时电价1下的用户成本较固定电价的成本变化量较小。表3为分时电价1与固定电价优化负荷曲线特性。

表3 分时电价1与固定电价优化负荷曲线特性

Table 3 Characteristics of optimal load curve of TOU price 1 and fixed price

电价制度	峰值/kW	谷值/kW	峰谷差值/kW	负荷率(%)
固定电价	96.01	72.9	23.104 3	88.44
分时电价1	96.64	74	22.637 9	87.87

分时电价1相比较与固定电价峰谷差值减小了2.6%。电网的负荷率有所提高。仿真结果表明，电动汽车参与调度可以提高电网负荷特性方面的有效作用。分时电价1和固定电价优化下电动汽车的充放电成本没有太多的变化，在电网稳定的前提下，增大峰谷分时电价差可以减少电动汽车用户充放电的成本。

3) 执行分时电价2下的仿真结果如图6所示。

分时电价相比较于固定电价而言通过价格的杠杆来改变电动汽车用户充放电的行为。通过利益的机制达到用户用电成本最低和系统负荷波动最小

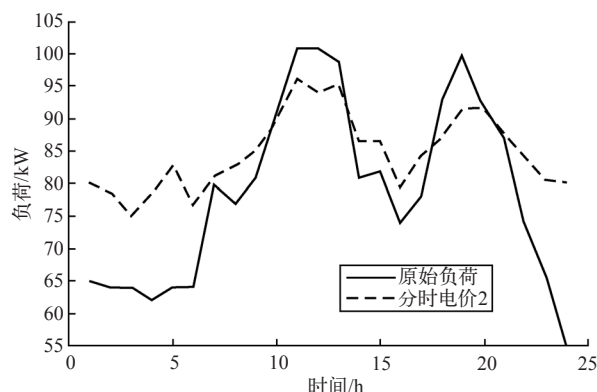


图6 原始负荷和分时电价2下的优化负荷曲线

Fig.6 Optimal load curve of original load and TOU price 2

的效果，不同的分时电价对电动汽车的调度策略影响会有差别。表4为不同的分时电价比较。

表4 不同分时电价比较

Table 4 Comparison of different TOU prices

电价制度	峰谷电价差/[元/(kW·h)]	平均电价/[元/(kW·h)]
分时电价1	0.71	0.705
分时电价2	0.91	0.722

相比较于分时电价1来说，分时电价2的峰谷差值进一步增大，对比分时电价1和分时电价2的平均电价，分时电价2的平均电价提高了2.4%。

仿真结果说明，由于峰谷电价差增大的影响分时电价2比分时电价1增加了1.1%；分时电价2的调度策略同样实现了对电网的削峰填谷，相较分时电价1效果减小。分时电价2增加电动汽车用户充放电的成本。表5为不同分时电价下的优化结果。

表5 不同分时电价下的优化结果

Table 5 Optimization results under different TOU prices

电价制度	负荷均方差/kW ²	用户成本/元
分时电价1	814.328 2	12.898 7
分时电价2	823.362 8	16.552 9

分时电价2较分时电价1而言峰谷差值减小了6.4%，负荷率减小了0.03%。分时电价2虽然减小了负荷的峰谷差和负荷率，却增加了电动汽车用

户充放电的成本。分时电价2更有助于系统的调峰。分时电价2调高了平均用电电价，增加了电动汽车用户日用电成本，在分时电价2执行的条件下通过增加补贴电价弥补增加的电动汽车用户充放电成本。表6为不同分时电价下优化曲线负荷特性。

表6 不同分时电价下优化曲线负荷特性
Table 6 Load characteristics of optimal curve under different TOU prices

电价制度	峰值/kW	谷值/kW	峰谷差值/kW	负荷率(%)
分时电价1	96.64	74	22.637 9	88.14
分时电价2	96.33	75.14	21.192 1	87.87

无论分时电价1或者分时电价2，采用目标函数min T 控制策略都是在有效抑制负荷波动的前提下保证用户的经济利益。

(2) 仿真结果2

综合目标函数为min F ，基于常惯性权重粒子群算法，分别对固定电价、分时电价1和分时电价2下电网的负荷波动情况、一天内电动汽车充放电功率变化以及参与调度的电动汽车的电池荷电状态变化情况进行仿真分析。

1) 固定电价下的仿真结果如图7、表7和表8所示。

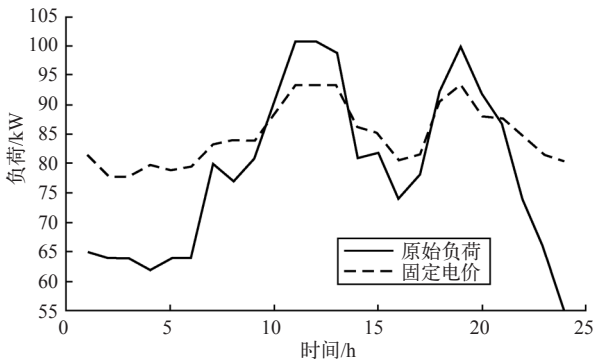


图7 原始负荷与固定电价优化的负荷曲线
Fig.7 Load curve optimized for original load and fixed price

执行固定电价的控制策略下，相较于目标函数 T 负荷均方差减小了23.59%。目标函数 F 比目标函数 T 用户的成本增加了2.148%。固定条件不变的前提

表7 固定电价下不同目标函数优化结果
Table 7 Optimization results of different objective functions under fixed price

电价制度	目标函数	负荷均方差/kW ²	用户成本/元
固定电价	T	836.379 9	12.746 2
	F	639.016 6	13.02

表8 固定电价不同目标函数优化负荷曲线特性
Table 8 Characteristics of load curve under different objective functions of fixed price

电价制度	目标函数	峰谷差/kW	负荷率/%
固定电价	T	23.104 3	88.44
	F	15.737 7	90.73

下，负荷均方差的变化更大，用户的成本变化比较小，考虑当地政府增加补贴的前提下。执行固定电价的多目标控制策略目标函数 F 要优于目标函数 T 。

固定电价策略下，目标函数 F 比目标函数 T 的峰谷差值减小了7.366 kW，负荷率提高了2.29%，电动汽车参与电网优化调度可以提高负荷特性方面的有效性。

2) 分时电价1下的仿真结果如图8、表9和表10所示。

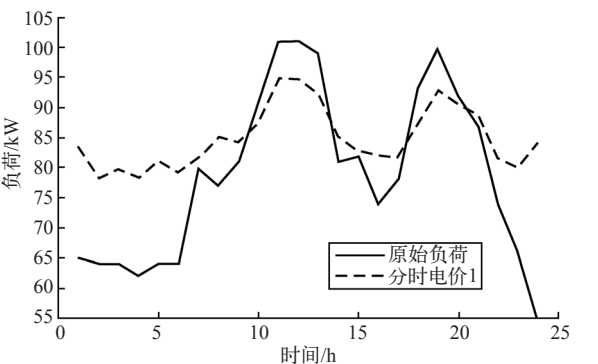


图8 原始负荷与分时电价1下优化负荷的负荷曲线
Fig.8 Load curve of optimized load under original load and TOU price1

表9 分时电价1下不同目标函数优化结果

Table 9 Optimization results of different objective functions under TOU price1

电价制度	目标函数	负荷均方差/kW ²	用户成本/元
分时电价1	<i>T</i>	814.328 2	12.898 7
	<i>F</i>	611.956 3	18.420 2

表10 分时电价1下不同目标函数优化负荷曲线特性

Table 10 Characteristics of load curve under different objective functions of TOU price 1

电价制度	目标函数	峰谷差/kW	负荷率(%)
分时电价1	<i>T</i>	22.637 9	88.14
	<i>F</i>	16.507 8	89.54

执行分时电价1控制策略下，目标函数*F*比目标函数*T*负荷的均方差减小了202.37 kW²；分时电价1控制策略下目标函数*F*对应的系统负荷曲线变化更平缓，相较目标函数*T*更有助于电力系统的稳定。目标函数*F*比目标函数*T*用户的成本增加了29.97%，可以在保证系统稳定的前提下增加用户充放电成本的权重，减小电动汽车用户的充放电成本。

执行分时电价1控制策略下，目标函数*F*对应的峰谷差比目标函数*T*对应的峰谷差降低了6.1 kW，负荷率增加了1.4%。

3) 分时电价2下的仿真结果如图9、表11和表12所示。

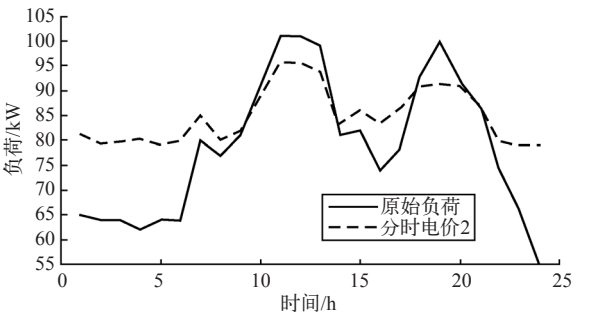


图9 原始负荷与分时电价2下优化负荷曲线

Fig.9 The optimal load curve under the original load and TOU price 2

执行分时电价2控制策略下，目标函数*F*比目

表11 分时电价2下不同目标函数优化结果

Table 11 Optimization results of different objective functions under TOU price 2

电价制度	目标函数	负荷均方差/kW ²	用户成本/元
分时电价2	<i>T</i>	823.362 8	16.552 9
	<i>F</i>	735.019 1	17.600 8

表12 分时电价2不同目标函数优化负荷曲线特性

Table 12 Characteristics of load curve under different objective functions of TOU price 2

电价制度	目标函数	峰谷差/kW	负荷率(%)
分时电价2	<i>T</i>	21.1921	87.87
	<i>F</i>	16.5745	88.82

标函数*T*减小了10.7%，电动汽车的用户充放电成本增加了1.048元。通过提高电动汽车对电网的馈电电价来减小电动汽车的充电成本。

执行分时电价2的控制策略下，目标函数*F*的峰谷差比目标函数*T*减小了21.7%，目标函数*F*比目标函数*T*，负荷率增加了1%。表13为目标函数*F*下的电价优化结果。表14为目标函数为*F*时不同电价下优化曲线负荷特性。

表13 目标函数*F*下电价优化结果

Table 13 Optimization results of electricity price under the objective function *F*

电价制度	负荷均方差/kW ²	用户成本/元
固定电价	639.016 6	13.02
分时电价1	611.956 3	18.420 2
分时电价2	735.019 1	17.600 8

表14 目标函数为*F*时不同电价下优化曲线负荷特性

Table 14 Characteristics of load curve at different prices with objective function *F*

电价制度	峰值/kW	谷值/kW	峰谷差/kW	负荷率(%)
原始负荷	101	55	46	78.14
固定电价	93.57	77.83	15.74	90.73
分时电价1	94.83	78.32	16.51	89.54
分时电价2	95.61	79.03	16.58	88.82

在目标函数为 F 时,降低系统负荷的均方差减小了负荷的波动,有助于电力系统的安全稳定运行,执行不同分时电价的控制策略增加了电动汽车用户的充放电成本。执行电价控制策略有效地降低了系统峰值,提升了负荷的谷值,大幅度地减小原始系统负荷的峰谷差,提升了负荷率,证明了电价调度控制策略可以有效改善电网负荷特性。

4 结束语

1) 本文采用多目标控制策略对某建筑典型日负荷数据进行仿真,采用常惯性粒子全算法求解。仿真结果表明,电动汽车充放电可以有效地实现削峰填谷,在负荷低谷时充电电价比较低。在负荷高峰时,电动汽车集中放电可以换来一定的收益,减小电动汽车的充放电成本。对比分析分时电价与固定电价的调度结果,分时电价下的调度控制策略在实现削峰填谷的同时也可以提高用户的经济性。

2) 不同的分时电价对调度策略的结果影响不同,分时电价的定价方式需要依据当地的经济水平和历史数据。增加峰谷分时电价差对电网的调峰效果明显,但会增加电动汽车用户的充放电成本。本文采用不同的综合目标函数进行实际结果仿真,有序的电动汽车调度可以减小负荷的均方差和系统负荷的峰谷差,提高电网的负荷率。多目标优化调度策略可以有效改善系统负荷曲线的特性。综合目标函数 $\min F$ 相比于目标函数 $\min T$ 优化效果更明显。

3) 分时电价对调度策略可以提高系统的负荷曲线特性。在同时考虑电网的负荷波动与电动汽车用户的充放电成本下,如何使二者达到综合最优受目标函数权重的影响很大。在电网稳定的前提下,提高电动汽车用户充放电成本的权重可以提高电动汽车用户参与调度的积极性。研究多目标优化控制策略权重的动态变化对调度结果的影响和如何合理地调度大规模电动汽车入网的值是进一步研究的问题。

参考文献

- [1] 涂轶昀, 李灿, 承林, 等. 电动汽车接入电网及其对电力系统的影响[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1085-1088.
TU Yiyun, LI Can, CHENG Lin, et al. The influence of electric vehicles on the power grid and its influence on the power system [J]. East China Electric power, 2011, 39 (7): 1085-1088.
- [2] YAQUB R, TARIQ A, CAO Y. A holistic system for enhanced fair value compensation for automated participation of EV in a peak demand event[C]. Proceedings of the 5th India International Conference on Power Electronics, IEEE, 2012: 1-6.
- [3] 孙建龙, 李妍, 胡国伟, 等. 电动汽车接入对配电变压器使用寿命的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3830-3835.
SUN Jianlong, LI Yan, HU Guowei, et al. Influence of electric vehicle access on the service life of distribution transformers [J]. High Voltage Technology, 2015, 41 (11): 3830-3835.
- [4] BROOKS A. Vehicle-to-grid demonstration project: grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle[R]. AC Propulsion December, 2002.
- [5] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle to Grid Implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Power Sources, 2005, 144(1): 280-294.
- [6] 贾涛. 层次访问控制在电动汽车入网中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
JIA Tao. Application of hierarchical access control in electric vehicle network access [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [7] 王晓寅, 刘俊勇, 唐勇, 等. 基于logit模型的电动汽车充放电研究[J]. 华东电力, 2011, 39(2): 198-202.
WANG Xiaoyin, LIU Junyong, TANG Yong, et al. Research on charging and discharging of electric

- vehicles based on logit model [J]. East China Electric Power, 2011, 39 (2): 198-202.
- [8] 宫鑫, 林涛, 苏秉华. 电动汽车代理在电力市场的最优竞标策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2596-2602.
GONG Xin, LIN Tao, SU Binghua. The best bidding strategy for electric vehicle agents in the electricity market [J]. Power Grid Technology, 2016, 40 (9): 2596-2602.
- [9] 高亚静, 吕孟扩, 王球, 等. 基于离散吸引力模型的电动汽车充放电最优分时电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3647-3653.
GAO Yajing, LU Mengkuo, WANG Qiu, et al. Research on optimal TOU price considering electric vehicles charging and discharging based on discrete attraction model [J]. China Journal of Electrical Engineering, 2014, 34 (22): 3647-3653.
- [10] 罗航. 博弈论在含电动汽车区域电网优化调度中的应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
LUO Hang. Application of game theory in optimal dispatching of regional electric network containing electric vehicles [D]. Xi'an : Xi'an University of technology, 2017.
- [11] 张迈, 赵彩虹, 唐小波, 等. 基于PSCAD的电动汽车V2G充放电装置仿真研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2013, 13(2): 7-12, 31.
ZHANG Mai, ZHAO Caihong, TANG Xiaobo, et al. Research on the simulation of V2G charging and discharging device based on PSCAD for electric vehicle [J]. Journal of Nanjing Normal University(Engineering Technology Edition), 2013, 13 (2): 7-12, 31.
- [12] 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与V2G的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 15-25, 2.
XIANG Ding, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Research on optimal peak valley electricity price of electric vehicle participating in V2G [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2013, 33 (31): 15-25, 2.
- [13] 钟伟锋. 智能电网中V2G系统能量管理及应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
ZHONG Weifeng. Research on energy management and application of V2G system in smart grid [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [14] 冯培磊, 董治全, 徐天奇. 电动汽车入网控制策略研究综述[J]. 电气技术, 2017(12): 8-14, 18.
FENG Peilei, Dong Zhiquan, XU Tianqi. Summary of research on control strategy of electric vehicles in [J]. Electrical Engineering, 2017(12): 8-14, 18.
- [15] 王辉, 文福拴, 辛建波. 电动汽车充放电特性及其对配电系统的影响分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(5): 17-24.
WANG Hui, WEN Fushuan, XIN Jianbo. Charge and discharge characteristics of electric vehicle and its influence on distribution system [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2011, 38 (5): 17-24.
- [16] 李惠玲, 白晓民. 电动汽车充电对配电网的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 38-43.
LI Huiling, BAI Xiaomin. Influence of electric vehicle charging on distribution network and countermeasures [J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35 (17): 38-43.
- [17] 韩海英, 和敬涵, 王小君, 等. 基于改进粒子群算法的电动车参与负荷平抑策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 165-169.
HAN Haiying, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. Power grid technology based on improved particle swarm optimization (PSO) for load reduction strategy[J]. Power Grid Technology , 2011, 35 (10): 165-169.
- [18] 和敬涵, 谢毓毓, 叶豪东, 等. 电动汽车充电模式对主动配电网的影响[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 97-102.

- HE Jinghan, XIE Yuyu, YE Haodong, et al. Influence of electric vehicle charging mode on active distribution network [J]. Power Construction, 2015, 36 (1): 97-102.
- [19] 戴诗容, 雷霞, 程道卫, 等. 电动汽车峰谷分时充放电电价研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(7): 77-82, 91.
- DAI ShiRong, LEI Xia, CHENG Daowei, et al. Research on peak and valley time and charge discharge price of electric vehicles [J]. Power Grid and Clean Energy, 2013, 29 (7): 77-82, 91.
- [20] 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 vehicle[J]. Power Grid Technology, 2014, 38 (11): 2972-2977.
- [21] 秦祯芳, 岳顺民, 余贻鑫, 等. 零售端电力市场中的电量电价弹性矩阵[J]. 电力系统自动化, 2004(5): 16-19, 24.
- QIN Zhenfang, YUE Shunmin, YU Yixin, et al. The elasticity matrix of electricity and electricity price in the retail electricity market [J]. Power System Automation, 2004 (5): 16-19, 24.
- [22] 唐小波, 赵彩虹, 吴薛红, 等. 智能电网中电动汽车快速有序充电实时电价优化方法[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2013, 13(4): 13-18.
- TANG Xiaobo, ZHAO Caihong, WU Xuehong, et al. The optimization method of real time electricity price for fast ordered charging of electric vehicles in smart grid [J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering Technology Edition), 2013, 13 (4): 13-18.
- [23] 邹文, 吴福保, 刘志宏. 实时电价下插电式混合动力汽车智能集中充电策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 62-67.
- ZOU Wen, WU Fubao, LIU Zhihong. Intelligent centralized charging strategy for plug-in hybrid electric vehicles under real time tariff [J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35 (14): 62-67.
- [24] 李瑾, 杜成刚, 张华. 智能电网与电动汽车双向互动技术综述[J]. 供用电, 2010, 27(3): 12-14.
- LI Jin, DU Chenggang, ZHANG Hua. Summary on the two-way interaction between smart grid and electric vehicle [J]. Power Supply, 2010, 27 (3): 12-14.
- [25] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995(11): 1942-1948.
- [26] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995(10): 39-43.
- [27] 黄媛, 刘俊勇, 陈井锐, 等. 计及电动汽车入网的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 24-28.
- HUANG Yuan, LIU Junyong, CHEN Jingrui, et al. Taking into account the load frequency control of electric vehicles entering the network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36 (9): 24-28.
- [28] 刘洪霞, 周永权. 一种基于均值的云自适应粒子群算法[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(5): 97-101.
- LIU Hongxia, ZHOU Yongquan. A cloud based adaptive particle swarm optimization algorithm based on mean [J]. Computer Engineering and Science, 2011, 33 (5): 97-101.
- [29] 韦杏琼, 周永权, 黄华娟, 等. 云自适应粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(1): 48-50, 76.
- WEI Xingqiong, ZHOU Yongquan, HUANG Huajuan, et al. Cloud adaptive particle swarm optimization [J]. Computer Engineering and Application, 2009, 45 (1): 48-50, 76.
- [30] 韩海英. V2G参与电网调峰和调频控制策略研究

[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

HAN Haiying. V2G participating in peak load regulation and FM control strategy of power grid

[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

- [31] DAWES R M, CORRIGAR B. Linear models in decision making[J]. Psychological Bulletin, 1974(81): 95-106.

作者简介



徐天奇

徐天奇(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能电网、新能源发电接入和微型电网。

冯培磊(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网、新能源发电。

(收稿日期: 2018-08-14) **EA**