

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005377

基于用户响应度的电动汽车有序充放电策略*

王杰 唐菁敏 刘思淼

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650500)

摘要: 针对大规模电动汽车接入对微电网经济运行造成不利影响的问题,提出基于峰谷分时电价的电动汽车有序充放电控制方法。采用传递闭包法对峰谷电价时段进行划分,并考虑到用户的响应度,分析车主不同充放电行为对于微电网负荷的影响,构建在保证微电网稳定前提下,增加微电网收益的电动汽车有序充放电的优化调度数学模型,并采用混沌理论改进灰狼算法对问题进行求解。通过仿真,证明所提的策略能合理分配电动汽车充电时段,激励用户参与电价响应,增加微电网的收益,实现电动汽车与微电网的协调运行。

关键词: 有序充电;用户响应度;经济效益;混沌理论

中图分类号: TM732 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: U469.72

Orderly charging and discharging strategy of electric vehicles based on user responsiveness

Wang Jie Tang Jingmin Liu Simiao

(School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the problem that large-scale electric vehicle access has adverse effects on the economic operation of microgrids, an orderly charging and discharging control method for electric vehicles based on peak-valley time-of-use electricity prices is proposed. The transmission closure method is used to divide the peak and valley electricity price periods, and taking into account the user's responsiveness, the impact of different charging and discharging behaviors of car owners on the load of the microgrid is analyzed, and an electric vehicle that increases the revenue of the microgrid under the premise of ensuring the stability of the microgrid. The mathematical model of optimal scheduling for orderly charging and discharging, and the improved gray wolf algorithm using chaos theory to solve the problem. Through simulation, it is proved that the proposed strategy can reasonably allocate the charging period of electric vehicles, encourage users to participate in the electricity price response, increase the revenue of the microgrid, and realize the coordinated operation of electric vehicles and microgrid.

Keywords: orderly charging; user responsiveness; economic benefit; chaos theory

0 引言

环境污染和能源问题变得越来越严重,在当前提倡发展低碳经济的战略环境下,电动汽车(electric vehicle, EV)因其节能减排的特点,在国内外的汽车产业发展中也得到大量的支持。我国新能源车预计在2030年达到6000万辆^[1],大规模电动汽车接入到微电网中, EV的随机充电以及负荷特性必然会对电网的稳定运行产生影响。通过对EV的有序充放电引导,能减少对电网的冲击,还能增加微电网的收益^[2]。文献[3]分析了EV以及空调等柔性负荷的合理调度能实现配电网供需平衡,削峰填谷,有助于电

网运行的稳定性和安全性。文献[4]提出降低微电网运行成本,提高环境效益的电动汽车有序充放电优化控制策略,应用差分进化算法验证EV有序充电对微电网运行优化控制的影响。文献[5]以电网的负荷波动和用户成本为优化目标,并基于分时电价制度建立EV充放电模型,在减小峰谷差上有明显的效果。以上研究都是假设用户完全响应分时电价,没有考虑到用户响应意愿,不符实际。文献[6]研究不同响应度下EV充电对于电网负荷的影响,但是没有分析电价对于用户响应度的影响。文献[7]提出基于用户消费心理学的EV用户需求响应模型,虽然减小了用户充电成本,但是没有考虑用户不同响应度对于电网稳定性的影响。

收稿日期:2020-11-18

*基金项目:国家自然科学基金(61761025)项目资助

本文在风光储微电网环境中,在保证微电网稳定性的前提下,提出计及 EV 响应度的充放电策略,在提升用户响应意愿的同时,增加微电网的收益。根据上海市某区域典型日负荷数据,对峰谷电价时段进行精确划分,建立 EV 充放电数学模型,采用改进的灰狼算法对所提出的模型进行仿真,验证了所提策略有利于保证微电网稳定,增加微电网收益。

1 EVs 充放电对微电网的影响

随着国家鼓励和提倡新能源车的使用,地区内电动汽车的密度增大,当电动汽车数量达到一定规模时,无序充电对微电网稳定性造成的影响越来越大,增加微电网负荷的波动的同时增加了微电网的运行成本^[8]。假设 EV 用户开始充电时刻为每天最后出行结束时刻,也即两者概率密度相同,则上海市某区域微电网某个典型日的负荷曲线与充电概率如图 1 所示。

对图 1 中微电网典型日负荷曲线进行分析可以发现,典型日负荷曲线一天中有两个明显的负荷波峰,分别在 11:00 和 20:00 附近,有一个明显的负荷低谷,在 4:00 左右。电动汽车充电概率在 20:00 时达到最大,但此时也是电网负荷的高峰时段,而在 2:00~7:00,系统负荷和电动汽车充电概率均非常低。EV 充电的自发性,在接入微电网后,无序充电开始充电时刻与系统负荷的峰时段相重叠,使电网负荷峰谷差率增大,造成了系统波动,给微电网的稳定经济运行带来负面的影响。同时加大了分布式发电单元的运行费用,降低设备运行的寿命。

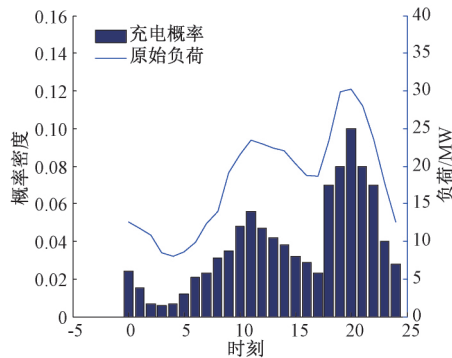


图 1 系统负荷曲线与 EV 充电概率

所以,针对目前有序充放电策略的不足,本文在不改变原有分时电价的基础上,对充放电时段进行优化,对原有有序充放电策略加以改进。

2 基于峰谷分时电价的 EV 响应策略

2.1 峰谷分时电价时段划分

微电网公司主要根据当地的负荷情况制定峰谷分时电价^[9],而在制定峰谷分时电价时很少会考虑到 EV 充电负荷。所以需要原有的峰谷分时电价进行优化,以提高

EV 的响应度,促进更多 EV 用户进行有序充电。

为了解决传统峰谷电价时段界线模糊,时段遗漏的问题,本文采用模糊聚类的方法。通过引入描述模糊性的隶属度,用迭代算法计算每个样本点对所有类中心的隶属度,根据隶属度来进行聚类。对这个日负荷曲线进行时段划分的原则是:用模糊数学概念来表示峰时段和谷时段的隶属度,即负荷曲线上最大负荷定义为峰时段,则这一点属于峰时段的隶属度为 1;相反,该点处于谷时段的隶属度值为 0。将负荷曲线上最小负荷定义为谷时段,这一点属于谷时段的隶属度为 1;相反,该点处于峰时段的隶属度值为 0。基于图 1 中原始负荷的曲线数据,首先利用隶属度函数(1)、(2)计算各个负荷点的隶属度。

$$\omega_{nj} = \frac{P_{loadj} - \min P_{load}}{\max P_{load} - \min P_{load}} \quad (1)$$

$$\omega_{mj} = \frac{\max P_{load} - P_{loadj}}{\max P_{load} - \min P_{load}} \quad (2)$$

式中: P_{load} 表示某个时刻的负荷,由式(1)、(2)则得到 t_j 点的分类对象为:

$$t_j = (\omega_{nj}, \omega_{mj}), j = 1, 2, \dots, 24 \quad (3)$$

应用模糊聚类对日负荷曲线进行时段划分的步骤为:

1) 首先根据式(1)、(2)计算各个时刻峰、谷隶属度,并构成一个用时间集合表示的指标矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_{24} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2) 数据标准化处理

经过上面指标矩阵得到的数据都不在 $[0, 1]$ 范围内,所以要经过标准差转换。用式(5)进行处理。

$$\omega'_{kj} = \frac{\omega_{kj} - \bar{\omega}_k}{\alpha_k} \quad (5)$$

式中: k 包含峰、谷; $\bar{\omega}_k$ 为隶属度的平均值; α_k 为标准差。

3) 构造模糊相似矩阵

采用加权绝对值减数法,建立 t_i 和 t_j 的相似关系,得到 r_{ji} 的表达式为:

$$r_{ji} = 1 - c \sum_{k=1}^2 |\omega'_{kj} - \omega'_{ki}|, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\text{式中: } c = \min \left[\frac{1}{1 + c \sum_{k=1}^2 |\omega'_{kj} - \omega'_{ki}|} \right]$$

最后得到相似系数矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{124} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{241} & r_{21} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

在这个相似系数矩阵中每个元素都包含峰、谷两个值,这个相似关系矩阵每个元素的计算方法如下:

$$r_{ji} = 1 - c (|\omega'_{nj} - \omega'_{ni}| + |\omega'_{mj} - \omega'_{mi}|) \quad (8)$$

4) 聚类分组

为了使不具有传递性的相似系数矩阵 R 达到传递性,应用传递闭包法^[10],即采用平方法依次计算 R^2, R^4, R^8, \dots ,找到 k 值使得 $R^k R^k = R^k$,得到一个模糊等价关系矩阵。随后在不同的置信水平 λ 下对该等价关系矩阵的元素按式(8)进行替换,则:

$$r'_{ji}(\lambda) = \begin{cases} 0, & r_{ji} < 0 \\ 1, & r_{ji} \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据得到的截距矩阵,将相同的行或列分为一类。

应用以上的方法,将该区域内微电网负荷进行时段的划分,得到峰谷电价时段划分情况如表 1 所示。

表 1 峰谷电价时段

峰时段	平时段	谷时段
10:00~12:00	12:00~17:00	0:00~6:00
17:00~19:00	6:00~10:00	23:00~24:00
19:00~21:00	21:00~23:00	

2.2 EV 对电价的响应度分析

不同车主对电价的敏感程度不同,主要是通过改变充电时刻来响应电价。但是,并不是所有车主都有意愿参与响应,那么用 τ 来表示用户响应的比例,则可以得到:

$$m_{ev} = \tau M_{ev} \quad (10)$$

式中: M_{ev} 表示车辆总数; m_{ev} 为参与响应的汽车数量。用户的响应度一般都是基于某个地区的电价区间水平,在当峰谷电价差较小时,用户对电价不太敏感,所以很少有用户响应;当电价差逐渐增大的时候,用户响应逐渐增多;当电价差较大的时候,用户的响应就不再增加,只在某个区间内响应电价的变化。

假设现在实行的峰谷电价分别为 s_p, s_v 。实际上车主是否更多的参与响应,在一定程度上与电价差有关,根据消费心理学建立用户响应度模型^[11],则用户响应度与电价存在以下的关系:

$$\tau = \frac{s_p - s_v}{s_p} \quad (11)$$

3 EV 充放电调度数学模型

3.1 目标函数

在风光储微电网环境下,EV 无序充放电增加了系统的负荷波动^[12],在保证风光储微电网稳定运行的前提下,提高微电网的经济效益。微电网的收益要由风、光、蓄电池发电的成本、微网与大电网之间买卖电费用、微电网给予用户放电的补贴费用以及微电网售电给用户的收益组成。所以得到微电网收益 F_1 目标函数表示为:

$$F_1 = \sum_t [(P_{ev}^{ch} C_{in}^t - P_{ev}^{dis} C_{out}^t) \Delta t + R_s(t) - g_M] \quad (12)$$

式中: P_{ev}^{ch} 表示 EV 的充电功率; P_{ev}^{dis} 分别为电动汽车在 t

时刻的放电功率, C_{in}^t 表示充电电价; C_{out}^t 分别为 t 时刻对应的放电电价。

式(13)表示微电网与大电网的交互的费用 $R_s(t)$,即向大电网购电和卖电。

$$R_s(t) = \begin{cases} C_{buy} P_t(t) \Delta t, & P_t(t) \geq 0 \\ C_{sell} P_t(t) \Delta t, & P_t(t) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: C_{buy} 为微电网购电的电价; C_{sell} 为微电网售电的电价; $P_t(t)$ 为微电网与大电网交互的功率。

风、光、蓄电池发电的成本 g_M 由式(14)表示。

$$g_M = P_w C_w^t + P_{lig} C_{sys}^t + P_b^t C_{bat}^t \quad (14)$$

式中: P_{lig}^t 为光伏发电系统的发电功率; C_w^t, C_{tw}^t 分别为风光发电系统的发电成本系数; P_b^t 为蓄电池的功率; C_{bat}^t 为储能系统的成本系数。

3.2 约束条件

在微电网系统内一般都会设置最大负荷量,允许他在这个临界值内波动,超过最大负荷量就会对系统设备造成损害,影响系统稳定性,通过对电动汽车的负荷控制来平衡峰谷^[13]。故系统内的负荷应该满足式(15)、(16)。

$$P_{ld, \min}(t) < P_{ld}(t) < P_{ld, \max}(t) \quad (15)$$

$$P_{ld}(t) = P_{ld}'(t) + \nu P_{balance}(t) \quad (16)$$

式中: $P_{ld, \max}(t), P_{ld, \min}(t)$ 分别是微电网内总负荷的上下限; $P_{balance}(t)$ 为电动汽车削峰填谷的功率变化; ν 为常数。

式(17)表示的整个系统能量的平衡。对于参与调度的 EV 来说,每次充放电都有一个上下限的限制,为了延长电池使用时间,所以 EV 的充电功率满足式(18)。

$$\sum_{t=1}^{24} (P_{ld}(t) + P_b(t)) = \sum_{t=1}^{24} (P_{lig}(t) + P_{wind}(t) + P_t(t)) \quad (17)$$

$$P_{EV}^{\min} \leq P_{EV}^{avg} \leq P_{EV}^{\max} \quad (18)$$

式中: $P_{EV}^{\max}, P_{EV}^{\min}$ 为 EV 充放电功率的最大值和最小值。蓄电池过度的充放电对电池造成的损害是不可逆的,用户在参与响应的时刻也会考虑到对电池的损伤,需满足式(19)中对蓄电池充电的功率约束,放电时满足式(20)。

$$SOC(k, t) + \frac{P_c(k, t) \mu}{C_{ba}} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

$$\lambda - SOC(k, t) + \frac{P_d(k, t)}{\mu C_{ba}} \leq 0 \quad (20)$$

式中: $SOC(k, t)$ 为第 k 辆电动汽车在 t 时刻的电池电量情况; μ 为充电效率; C_{ba} 为电池容量; λ 为电池的最低电量。

在获得微电网最大收益的同时,也要兼顾到系统的负荷波动,故系统的方差应该满足式(21),使得方差小于在无序充电模式下负荷的最大方差 S_{max}^2 , 寻求在系统允许的方差范围内的最大微电网收益^[14]。

$$\frac{1}{K} \sum_{t=1}^K (P_L(t) + P_{EV}(t) - P_{avg})^2 \leq S_{max}^2 \quad (21)$$

4 灰狼算法及其改进

在本文提出的以微电网最大收益为目标的优化模型中,如果采用基本的灰狼算法,对于微电网收益函数优化问题上,无法得到全局最优解,搜索精度也达不到要求,且容易陷入局部最优,故采用混沌理论改进灰狼算法。

4.1 基本灰狼算法

在灰狼算法中,灰狼被分为首领狼 α 、副首领狼 β 、普通狼 δ 和底层狼 ω ,狼群具有严格的等级制度。在求解问题中 α 是最适合的解,而 β 、 δ 和 ω 代表第 2、3 和 4 个最佳解。 ω 跟随 α 、 β 和 δ 进行改进。灰狼用式(22)和(23)更新猎物周围的位置^[15]。

$$D = |C \cdot X_p(j) - X(j)| \quad (22)$$

$$X(j+1) = X_p(j) - A \cdot D \quad (23)$$

式中: X 为狼的位置;迭代次数用 j 来表示; X_p 为猎物所在的位置; A 和 C 是系数向量,分别由式(24)、(25)表示。

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (24)$$

$$C = 2r_2 \quad (25)$$

式中: a 表示系数向量; r_1 、 r_2 是随机向量。 a 的取值是在 $[2,0]$ 线性递减的, r_1 、 r_2 是 $[0,1]$ 之间的随机向量。刚开始的时候 a 的值在 $[1,2]$ 之间, A 在适当的时候在 $[-1,1]$ 之间,这样这有助于灰狼从目前认定的猎物中脱离出来,找到更好的猎物。当 a 减小并处在 $[0,1]$ 内, A 在 $[-1,1]$ 内,灰狼会逐渐向最佳的位置移动。

探索与开发之间的适当平衡保证了对全局最优值的准确估计。基本的探索和开发使算法无法找到全局最优解,也会导致局部最优停滞。因此,必须在开发和探索之间取得平衡。在该算法中,利用 A 和 a 的自适应值来实现开发和探索之间的转换,进行算法迭代时, a 的指数衰减函数如式(26)所示。

$$a = 2 \left(1 - \frac{m^2}{n^2} \right) \quad (26)$$

式中: m 是最大迭代次数; n 是当前迭代次数。

4.2 改进的灰狼优化算法

为了提高搜索效率,减少陷入局部最优的可能性,在灰狼优化(grey wolf optimization,GWO)算法中引入具有不规则性的混沌结构和随机性^[16],以避免局部解的出现,从而提高全局收敛性。与经典的 GWO 方法相比,混沌序列在 GWO 中的应用有助于更容易地逃离局部极小。在本文中混沌搜索过程为:

1) 设定 $k=0$,将决策变量 x_j^k 映射到混沌变量 s_j^k ,其中 $x_{\min,j}$ 、 $x_{\max,j}$ 是寻优范围的上下限^[17],其表达式如下:

$$s_j^k = \frac{x_j^k - x_{\min,j}}{x_{\max,j} - x_{\min,j}} \quad (27)$$

2) 求解下一次迭代的混沌变量。

$$s_j^{k+1} = \mu \times s_j^k (1 - s_j^k) \quad (28)$$

3) 利用式(28)将混沌变量 s_j^{k+1} 转换成决策变量 x_j^{k+1} 。

$$x_j^{k+1} = x_{\min,j} + s_j^{k+1} (x_{\max,j} - x_{\min,j}) \quad (29)$$

4) 如果新的解获得了更好的性能或达到了最大迭代次数,则将新解作为混沌局部搜索;否则,将变量加 1 并返回步骤 2)。

为了尽快得到全局最优解,采用加权方法改进。位置更新表达式在每次迭代中加权,如式(30)所示,系数向量由式(31)和(32)获得,其中 A_1 、 A_2 、 A_3 由式(24)得到^[17]。

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha - X| \\ D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta - X| \\ D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta - X| \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha \\ X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta \\ X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta \end{cases} \quad (31)$$

$$X(j+1) = \omega_1 \cdot X_1 + \omega_2 \cdot X_2 + \omega_3 \cdot X_3 \quad (32)$$

式中: ω_1 、 ω_2 、 ω_3 是权重系数。

改进后的 GWO 优化算法的流程如下。

- 1) 在上限和下限之间初始化参数;
- 2) 随机生成初始种群;
- 3) 计算种群中每只灰狼的适应度值,依据适应度值对他们进行排序,对 α 、 β 、 ω 的位置进行选择;
- 4) 利用式(27)将头狼 α 的位置映射成混沌向量,利用迭代技术计算混沌序列,用式(28)和(29)将转换后的混沌序列表示为新的位置,并计算了新位置序列的适应度^[18];
- 5) 使用式(30)~(32)更新当前灰狼的位置;
- 6) 更新式(24)和(25)中的系数 A 和 C 以及式(26)中的参数 a 。
- 7) 对新种群中灰狼的最优解 α 、 β 、 ω 进行更新,直至达到全局最优。
- 8) 重复步骤 2)~7),直到达到最大迭代次数。

因为使用混沌映射后的种群分布规律是在定义域空间内是均匀分布的。均匀分部的种群会使算法在寻优的过程中,更容易在全局搜索中找到最优解。这样便能提高算法的全局搜索能力。取 50 个种群个体为例在自变量 $[0,100]$ 区间的种群分布,对比混沌初始化前后的种群特点,得到种群定义域空间分布更加均匀,有利于算法迭代寻优。

混沌灰狼算法在电动汽车优化调度中的应用流程图 2 所示。

5 算例分析

5.1 实验场景及数据

本文针对上海市某区域微电网的数据进行分析,EV 的充电负荷通过蒙特卡洛模拟得到,微电网的相关参数如下:微电网与大电网之间的功率交换为 700~900 kW,本文用到的相关参数如表 2 和 3 所示^[19]。

5.2 仿真结果分析

基于本文的优化调度模型,使用 MATLAB 进行模型优化,设置种群大小为 100,最大迭代次数为 100。用户通

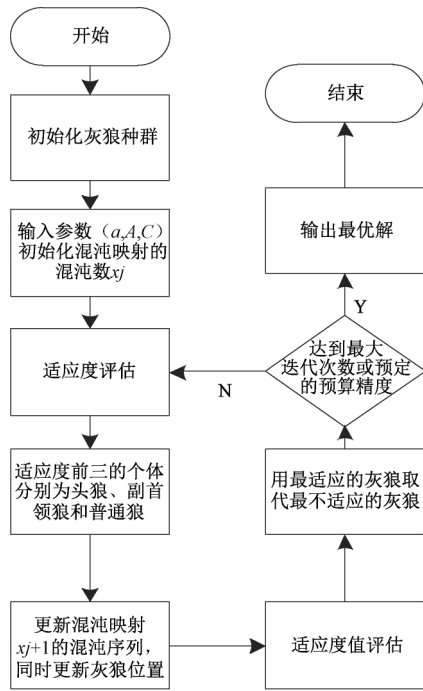


图 2 混沌灰狼算法应用流程

表 2 电动汽车相关参数

参数	初值
额定充电功率 $P_c / (\text{kW}\cdot\text{h})$	3.2
汽车容量 $C_{\text{bat}} / (\text{kW}\cdot\text{h})$	24
充放电效率 η_c, η_d	0.95
电动汽车数量/辆	1 000

表 3 分布式电源相关参数

	功率/kW	成本系数/ $(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$
风力电机	60	0.029 6
光伏电池	100	0.009 6
蓄电池	12	0.012 0

过对电价的响应来进行有序充放电,因为用户的响应度与电价差有关,而用户的响应度在一定程度上影响了微电网的整体收益,在不同响应度下对比分析电动汽车有序充电对微电网的影响。在本文中采用的 3 组分时电价^[7]如表 4 所示。

表 4 3 组分时电价 元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$

类别	峰时段	平时段	谷时段
第 1 组	0.870	0.687	0.365
第 2 组	1.290	0.723	0.332
第 3 组	1.341	0.746	0.210

针对图 1 中 EV 无序充电增加了微电网的负荷波动,

采用改进的灰狼算法对电动汽车的有序充放电优化调度进行求解,得到图 2 中 EV 在响应 3 组分时电价后的充电负荷曲线。根据 EV 响应度模型,得到 3 组电价下用户响应度分别为 58%、74%、84%。

如图 3 所示,在峰谷分时电价的引导下,以及微电网给予的放电补贴,用户的充电时间发生转移,以前的用电低谷 3:00~4:00 期间也有更多的电动汽车参与充电,用电功率增加,实现了“填谷”。又因为一部分用户开始响应放电,所以负荷高峰得到降低。随着用户响应度由 58% 提高到 84%,负荷峰值由 33.020 MW 降到 28.220 MW,负荷波动得到减小。经过优化求解得到不同响应度下微电网运行费用和负荷曲线方差的比较如表 5 所示。

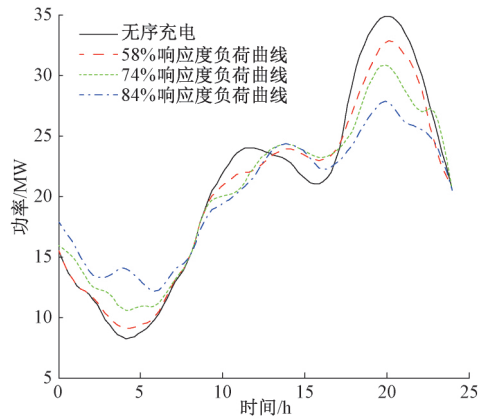


图 3 EVs 充放电负荷曲线

表 5 运行费用和负荷方差

响应度/%	微电网运行费用/元	负荷方差/ $(\text{MW})^2$
58	91 872.82	55.103 6
74	92 257.54	42.168 2
84	92 894.69	41.593 9

通过分析表 5 可以得到, EV 参与响应的比例越高,负荷曲线的方差会越小,微电网的收益也有所增加,但是从 74% 提升到 84%,方差的减小幅度比较小,对微电网的收益的影响也在减小。因为对于车主来说,放电在一定程度上确实减少了充电成本。当响应度比较低的时候,在用电高峰期,用电量,对 EV 的放电的需求量较大, EV 大量放电的情况下,所以微电网运行费用得到大幅度减少;但是当用户响应度比较高的时候,对电量需求就被大幅稀释,运行的费用就无法降低。所以响应度从 74%~84%,微电网收益增加得没那么明显,只增加了 637.15 元。

另一方面在各个分布式电源能够满足负荷的用电需求下,在 22:00~3:00 期间,多余的电能就能出售给电网,获得收益;而在峰时段,这时的电价是最高的,买电就会增加成本,蓄电池也会选择在高电价放电,低电价充电,就能增加微网的收益。在 12:00~15:00、19:00~23:00 是用电高

峰期,车主因为响应调度策略,会在这段时间把多余的电能提供给其他负荷,系统的负荷方差从 55.103 6 降低到 41.593 9,系统的负荷波动明显减少,提高了系统的稳定性。

6 结 论

本文在含有电动汽车的风光储微电网环境下,采用模糊聚类的方法对峰谷时段进行划分,基于分时电价机制,建立以微电网最大收益的电动汽车充放电优化模型,在不降低用户响应度,保证微电网稳定性的前提下,协调电动汽车的充放电策略,并采用混沌理论改进灰狼算法对模型进行优化求解。最后通过仿真分析在不同的用户响应度下电动汽车充放电对于微电网经济效益和稳定性的影响。表明了一定条件下用户响应度的提高,能够增加微电网的经济效益,稳定性和可靠性也提到提高。

参考文献

- [1] 毛玉荣. 电动汽车充放电与微电网运行的协调优化[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [2] YANG H, PAN H, LUO F, et al. Operational planning of electric vehicles for balancing wind power and load fluctuations in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 592-604.
- [3] 孙功伟,周克楠,马喆非,等. 考虑柔性负荷的智能电网调度策略研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(3): 40-46.
- [4] 孙丛丛,王致杰,江秀臣,等. 分时电价环境下计及电动汽车充放电影响的微电网优化控制策略[J]. 可再生能源,2018,36(1):64-71.
- [5] 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.
- [6] 孙晓明,王玮,苏粟,等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(1): 191-195.
- [7] 王扬,雷小林,唐红艳. 考虑用户响应度的电动汽车有序充放电策略[J]. 东北电力技术,2019,40(9):1-6,14.
- [8] 吴斌,杨超. 基于双层优化的电动汽车有序充电策略研究[J]. 电力科学与工程,2019,35(11):49-54.
- [9] 徐婷,张海峰,杨昊,等. 数据中心微电网能量管理随机优化模型研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(8): 101-107.
- [10] 尕藏才让. 正传递模糊矩阵及其闭包[J]. 青海师范大学学报(自然科学版),2018,34(4):19-21.
- [11] 杨晓东,张有兵,任帅杰,等. 含高渗透率光伏发电并网型微网中的电动汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(18):15-23.
- [12] 金鹏,艾欣,许佳佳. 基于序列运算理论的孤立微电网经济运行模型[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25): 52-59.
- [13] SUN J W, WAN Y F, ZHENG P W, et al. Coordinated charging and discharging strategy for electric vehicles base on demand side management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 64-69.
- [14] TONG J J, WEN J Q, WANG D, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [15] MIRJALILI S, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69:46-61.
- [16] AYAN K, KILIC U, BARAKLI B. Chaotic artificial bee colony algorithm based solution of security and transient stability constrained optimal power flow[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64:136-147.
- [17] 唐菁敏,马含. 基于混沌粒子群优化的微电网短期负荷预测[J]. 云南大学学报(自然科学版),2019,41(6): 1123-1129.
- [18] ROUSTRAY A, SINGH R K, MAHANTY R. Harmonic reduction in hybrid cascaded multilevel inverter using modified grey wolf optimization [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2):1827-1838.
- [19] 徐辉,张会林,叶玉凤. 智能电网下用户用电系统多目标调度策略研究[J]. 电子测量技术,2017,40(7): 20-25.

作者简介

王杰,硕士研究生,主要研究方向为智能电网。

E-mail:1225040313@qq.com

唐菁敏,博士,副教授,主要研究方向为无线协作通信、认知无线网络、Ad-hoc网络和物联网技术、智能电网。

E-mail: 2315675246@qq.com

刘思淼,硕士研究生,主要研究方向为智能电网。

E-mail: 1050037557@qq.com