

电动汽车接入微网优化调度模型建立及其算例*

金商鹤¹, 张宇^{1,2}, 王育飞¹, 时珊珊², 王皓靖²

(1.上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2.国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 为了解决风、光出力波动性和电动汽车接入电网无序充电问题, 根据电动汽车用户对激励因素的敏感程度不同, 建立电动汽车分类接入微网两阶段优化调度模型, 并开展算例分析。研究表明, 与无序充电相比, 电动汽车两阶段调度微网在负荷峰、谷时段的 α 值都明显减小, 储能单元基本能满足微网运行需求, 风光利用率高达 95.43%, 联络线交换功率仅为 24.2 kW, 显著减小微网风光出力波动对大电网的影响。随着 III 类电动汽车占比逐渐增加, 风光利用率明显上升。算例分析证明所提出的两阶段优化调度模型能有效降低微网外购电量, 提高风光利用率, 改善微网功率波动对大电网的影响。

关键词: 接入微网; 电动汽车; 调度模型; 风光利用率; 算例分析

中图分类号: TP33

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200179

中文引用格式: 金商鹤, 张宇, 王育飞, 等. 电动汽车接入微网优化调度模型建立及其算例[J]. 电子技术应用, 2021, 47(1): 82-85, 107.

英文引用格式: Jin Shanghe, Zhang Yu, Wang Yufei, et al. Establishment of optimal scheduling model for electric vehicles connected to microgrid and calculation examples[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(1): 82-85, 107.

Establishment of optimal scheduling model for electric vehicles connected to microgrid and calculation examples

Jin Shanghe¹, Zhang Yu^{1,2}, Wang Yufei¹, Shi Shanshan², Wang Haojing²

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract: In order to solve the problem of fluctuation of wind-power output and disordered charging of electric vehicles connected to the power grid, a two-stage optimal dispatching model of electric vehicles connected to the micro grid by classification was established according to the sensitivity of electric vehicle users to the incentive factors, and a case study was carried out. The research results show that compared with disordered charging, the two-stage dispatching micro grid of electric vehicles significantly reduces the value in load peak and valley periods, the energy storage unit can basically meet the operation demand of the micro grid, the wind-energy utilization rate is up to 95.43%, and the connection line exchange power is only 24.2 kW, which significantly reduces the impact of wind-energy fluctuations of the micro grid on the large power grid. With the increase of the proportion of class III electric vehicles, the utilization rate of wind-power increased obviously. An example shows that the proposed two-stage optimal dispatching model can effectively reduce the power purchased from the micro grid, which improves the utilization rate of wind and wind, and improves the influence of micro grid power fluctuations on the large power grid.

Key words: access micro network; electric cars; scheduling model; wind utilization rate; the example analysis

0 引言

近年来微网和电动汽车发展突飞猛进, 风、光出力波动性和电动汽车接入电网无序充电问题亟待解决^[1]。为此国内外学者构想将电动汽车与微网协调运行, 以缓解两者单独接入电网的不利影响, 促进两者的应用和发展^[2-5]。在微电网中连接电动汽车进行储能时, 可以有效避免发生间歇性新能源出力的情况, 现阶段已有许多学

者研究了将电动汽车与微网进行连接时的优化调度技术。例如, 文献[6]-[8]设计了一种对含有电动汽车的微网系统进行多目标调度的分析模型, 结果发现采取有序充放电的方式可以获得比无序充电入网方式更高的经济性; 文献[8]报道了由电动汽车构成的光、风、储能微电网调度模型, 通过引入更加协调的运行模式能够有效减小系统的运行成本并降低电动汽车运行费用; 文献[9]同时分析了微网发电成本及其对环境造成的影响, 对分布式电源的出力状况进行了动态分析, 因此能够实现

* 基金项目: 国家电网公司总部科技项目(520940170017)

低发电成本条件下获得更优的环境效益;文献[10]根据微网内存在的不确定因素设计得到了具有良好鲁棒性的经济调度模型,并达到了较低的电动车损耗,同时满足鲁棒性与经济性要求。现有文献多通过直接负荷控制的方式满足实施方需求,其对电动汽车特殊性的考虑不够充分,较少关注单辆电动汽车参与激励型需求响应项目后的实际响应效果^[11-14]。文献[15]-[16]以负荷峰值削减为目标,制定有序的电动汽车充电策略,该方法通常缺少对电动汽车参与响应的效果评估,忽略用户侧需求^[17]。上述文献较少考虑电动汽车车主响应意愿,单方面认为入网的电动汽车皆可参与充放电调度;其次,优化调度通常直接针对单辆电动汽车,电动汽车数量较多时容易引发“维数灾”问题。

本文从电动汽车用户响应意愿角度出发,建立两阶段优化调度模型,两阶段优化方法的决策变量数显著减少,有利于大量电动汽车充放电优化问题的快速求解。

1 两阶段优化调度模型建立

1.1 日前集群调度模型

1.1.1 目标函数

日前集群调度以风光利用率最大为目标:

$$\max F_{pw} = \max \frac{\sum_t P_{wv,t}}{\sum_t (P_{w,t} + P_{pv,t})} \quad (1)$$

$$P_{wv,t} = \min(P_{w,t} + P_{pv,t}, P_{load,t} + P_{EV,t} + P_{B,t}) \quad (2)$$

式中, $P_{w,t}$ 、 $P_{pv,t}$ 、 $P_{wv,t}$ 分别为微网在 t 时段的风电、光伏出力预测值以及风光利用功率, $P_{load,t}$ 为 t 时段微网基本负荷, $P_{EV,t}$ 为 t 时段电动汽车总的充放电功率, $P_{B,t}$ 为 t 时段微网中储能电池的充放电功率。

1.1.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

微网为维持功率平衡,在 t 时段的购电量 q_t 为:

$$q_t = P_{EV,t} + P_{B,t} + P_{load,t} - P_{wv,t} \quad (3)$$

(2) 电动汽车集群充放电功率约束

$$-\sum_{l \in N_d} P_{d,max,t} \leq P_{EV,t} \leq \sum_{l \in N_c} P_{c,max,t} \quad (4)$$

式中, $P_{c,max,t}$ 、 $P_{d,max,t}$ 为电动汽车的充、放电功率上限。

(3) 储能电池约束

储能电池的安全运行需考虑荷电状态 S_B 约束,且其充放电功率 $P_{B,t}$ 受其最大充放电功率约束,故有:

$$S_{B,min} \leq S_B \leq S_{B,max} \quad (5)$$

$$-P_{B,d,max} \leq P_{B,t} \leq P_{B,c,max} \quad (6)$$

$$S_{B,t} = \begin{cases} S_{B,t-1} + \frac{P_{B,t} \eta_{B,c} \Delta t}{C_B}, & P_{B,t} \geq 0 \\ S_{B,t-1} + \frac{P_{B,t} \Delta t}{\eta_{B,d} C_B}, & P_{B,t} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $S_{B,max}$ 、 $S_{B,min}$ 分别为储能电池荷电状态上、下限, $P_{B,c,max}$ 、 $P_{B,d,max}$ 分别为储能电池充、放电功率最大值, $\eta_{B,c}$ 、 $\eta_{B,d}$ 分

别为储能电池的充、放电效率, C_B 为储能电池容量。

从安全性和可持续性角度出发,储能电池在整个调度周期的充放电电量需维持平衡。

$$0.25 \sum_t P_{B,t} = 0 \quad (8)$$

1.2 日内实时调度模型

1.2.1 目标函数

计及风电、光伏出力预测误差,结合电动汽车分类,日内实时调度以与日前集群调度结果偏差最小为目标:

$$\min F_{dev} = \min \sum_t \left[\sum_{l \in N_l} P_{l,t} - (P_{EV,t} + \Delta p_t) \right]^2 \quad (9)$$

$$\Delta p_t = P_{w,t} + P_{pv,t} - P_{w,t} - P_{pv,t} \quad (10)$$

式中, $P_{l,t}$ 为电动汽车 l 在 t 时段的充放电功率, $P_{w,t}$ 、 $P_{pv,t}$ 分别为微网中风电和光伏的实际出力值, Δp_t 表示 t 时段的风光出力预测误差。

1.2.2 约束条件

(1) 功率约束

$$\begin{cases} P_{l,t} = P_{c,max,t}, & l \in N_{d1} \\ -P_{c,max,t} \leq P_{l,t} \leq 0, & l \in N_{d2} \\ -P_{d,max,t} \leq P_{l,t} \leq P_{c,max,t}, & l \in N_{d3} \end{cases} \quad (11)$$

式中, N_{d1} 、 N_{d2} 和 N_{d3} 分别为恒功率充电、响应充电和响应充放电的电动汽车数量。

(2) 荷电状态约束

$$S_{l,min} \leq S_{l,t} \leq S_{l,max} \quad (12)$$

$$S_{l,t} = S_{l,t-1} + \frac{P_{l,t} \eta(p_{l,t}) \Delta t}{C_l} \quad (13)$$

$$\eta(p_{l,t}) = \begin{cases} \eta_{l,c}, & p_{l,t} \geq 0 \\ \frac{1}{\eta_{l,d}}, & p_{l,t} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\eta_{l,c}$ 、 $\eta_{l,d}$ 分别为电动汽车 l 的充、放电效率。

(3) 出行需求约束

电动汽车 l 接入微网的持续时间为: $T_{con,t} = T_{out,t} - T_{in,t}$,

$T_{con,t}$ 包含的时间段集合为 T_{pc}^l ,则电动汽车在离开时要满足期望电量要求:

$$S_{0,t} + \sum_{t \in T_{pc}^l} \frac{P_{l,t} \eta(p_{l,t}) \Delta t}{C_l} \geq S_{E,t} \quad (15)$$

式中, $S_{0,t}$ 为电动汽车 l 接入微电网的初始荷电状态。

1.3 两阶段优化调度流程图

电动汽车分类接入微网两阶段优化调度流程如图1所示。

本文在MATLAB环境下应用Yalmip工具箱调用Gurobi求解器方法,先后对两阶段优化调度模型进行求解。

2 算例分析

2.1 基本参数

将一天分为96个时段,调度间隔15 min。有100辆电动汽车接入微网充电,电动汽车容量统一为25 kW·h,

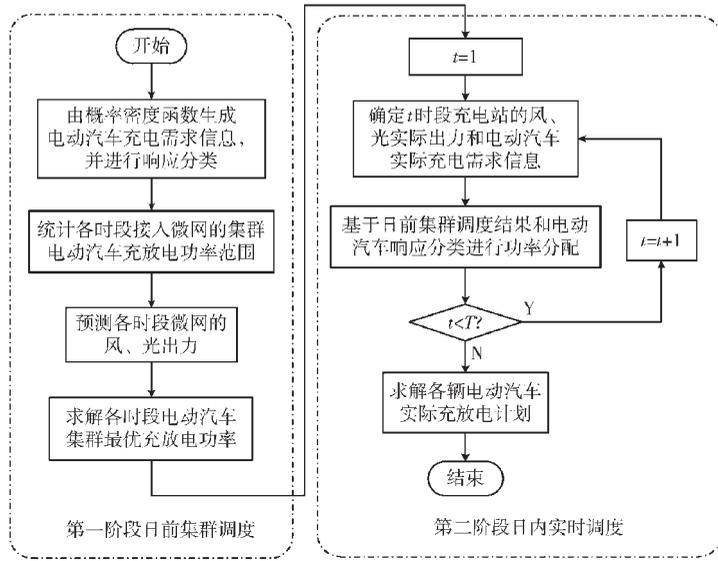


图1 两阶段优化调度流程图

充、放电功率上限为 3.6 kW，充、放电效率分别为 0.95、0.9，荷电状态上、下限分别为 1、0.2，由电动汽车功率需求模型随机生成电动汽车充电需求信息，假设 I 类、II 类和 III 类电动汽车分别占比 20%、30% 和 50%。假设风光出力预测误差服从正态分布，预测误差方差为 0.2。日前微网源荷信息如图 2 所示，包括微网中的基本负荷、日前风电和光伏出力预测，以及电动汽车各时段的无序充电需求。

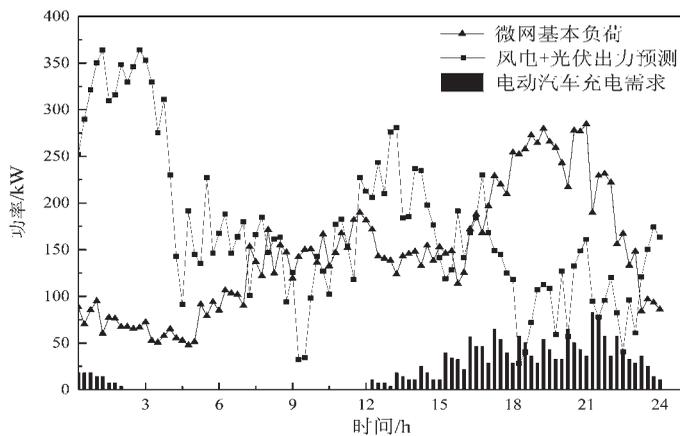


图2 日前微网源荷信息

2.2 结果分析

2.2.1 电动汽车日前集群调度与日内实时调度

电动汽车日前集群调度和日内实时调度计划如图 3 所示。由图 3 可知，日前集群调度和日内实时调度当日电动汽车充放电计划不完全重合，但两条曲线整体趋势近似一致，在风电过剩的 0 时~7 时，电动汽车选择充电响应；在风、光出力不足的 17 时~23 时，电动汽车选择放电响应。

2.2.2 3 类单辆电动汽车充放电计划

随机抽取 I、II、III 类电动汽车各一辆，其充放电计

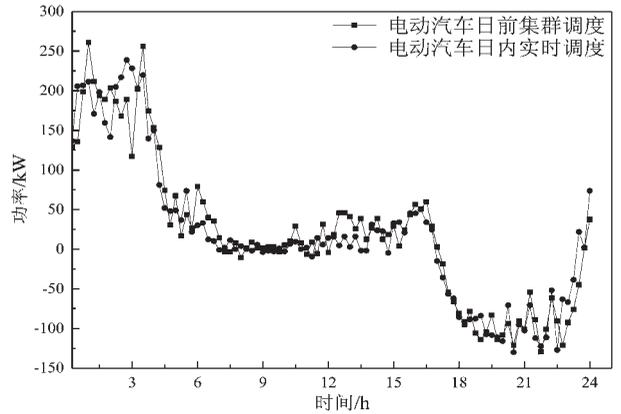


图3 电动汽车日前集群调度和日内实时调度计划

划如图 4 所示。由图可知，当日行程结束接入微网后，I 类电动汽车直接以最大功率充电，II 类电动汽车选择在风光出力充足时段充电，III 类电动汽车在当日行程结束入网的一段时间内优先放电响应，这是因为该段时间内风光出力不足，III 类电动汽车为满足微网基本负荷和部分电动汽车充电负荷的电量需求向微网反向供电，24 时后风光出力先后逐渐盈余，电动汽车按实时调度计划充满电量。

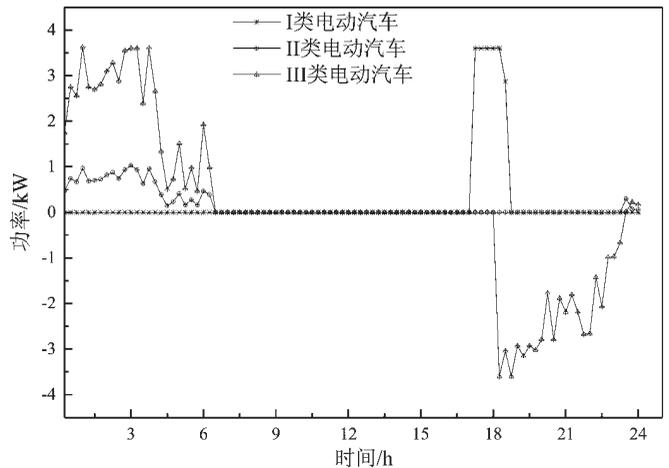


图4 3类单辆电动汽车充放电计划

2.2.3 电动汽车无序充电与两阶段调度对比

用微网内负荷与风光出力的差值 α 衡量微网源荷供需平衡情况。 $\alpha=0$ 表示微网内风光出力与各类负荷供需平衡； $\alpha<0$ 表示风光出力过剩； $\alpha>0$ 表示微网供电不足。电动汽车无序充电与两阶段调度方式下 α 值变化如图 5 所示。可以看出，与无序充电相比，对电动汽车进行两阶段调度的微网，在负荷峰、谷时段的 α 值都有明显减小，且基本维持在 120 kW 以内，即此时的储能单元基本能满足微网运行需求。

电动汽车无序充电与两阶段优化调度结果对比如表 1 所示。由表可得，对电动汽车实施两阶段优化调度的微网风光利用率高达 95.43%，与无序充电方式对比，

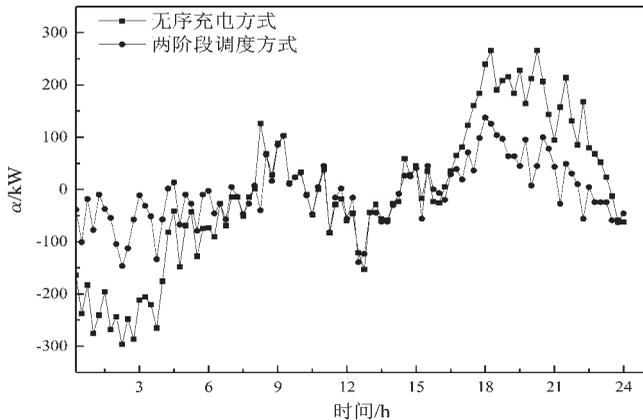
图5 两种方式下 α 值变化对比

表1 电动汽车无序充电与两阶段优化调度结果对比

调度方式	风光利用率/%	微网购电量/(kW·h)	微网 α 最大值/kW
无序充电	80.21	1 224.7	273.9
两阶段优化	95.43	95.9	144.2

风光利用率提高了 15.22%；无序充电时，微网从大电网的购电量是两阶段调度的近 13 倍，两阶段优化调度策略的购电量仅为 95.9 kW·h，说明对风光出力的高效利用基本能满足微网基本负荷和电动汽车的电量需求，使得微网购电成本显著降低。电动汽车无序充电时，微网 α 最大值为 273.9 kW，而储能单元的放电功率上限为 120 kW，两阶段优化调度方式下联络线交换功率仅为 24.2 kW，则显著减小了微网风光出力波动对大电网的影响。

综上，电动汽车分类接入微网的两阶段优化调度策略可以显著提高风光利用率，降低微网购电量，改善微网功率波动对大电网的影响。

2.2.4 响应充放电调度比例灵敏度分析

由图 1 可知，微网给予电动汽车用户的激励程度不同时，II 类和 III 类的电动汽车占比会相应变化，电动汽车分类接入微网两阶段优化调度后的风光利用率也会有所区别，故此对响应充放电调度比例灵敏度分析如图 6 所示。

由图 6 可以看出，随着 III 类电动汽车占比的逐渐增加，微网的风光利用率呈明显的上升趋势，且 III 类电动汽车占比在 0~50% 的风光利用率上升曲线陡峭，占比 50% 后的上升趋势明显减缓。这是因为 I 类电动汽车对激励不敏感，该部分调度容量不能高效利用，III 类电动汽车占比在 50% 之后，其对风光利用率的调节能力逐渐逼近上限。但通过增大 III 类电动汽车占比来提高风光利用率也会相应增加微网运行的激励支出，故此微网运营商应根据实际的电动汽车的入网规模，合理优化设置相应的激励形式和激励水平。

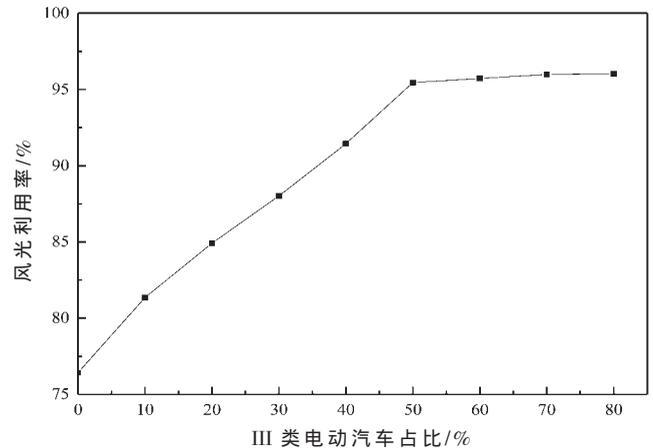


图6 响应充放电调度比例灵敏度

3 结论

本文根据电动汽车用户对激励因素的敏感程度不同，建立电动汽车分类接入微网两阶段优化调度模型，算例分析得到：

(1) 在风电过剩的 0 时~7 时，电动汽车选择充电响应；在风、光出力不足的 17 时~23 时，电动汽车选择放电响应。

(2) 当日行程结束接入微网后，I 类电动汽车直接以最大功率充电，II 类电动汽车选择在风光出力充足时段充电，III 类电动汽车在当日行程结束入网的一段时间内优先放电响应。

(3) 与无序充电相比，对电动汽车进行两阶段调度的微网，在负荷峰、谷时段的 α 值都有明显减小，储能单元基本能满足微网运行需求。对电动汽车实施两阶段优化调度的微网风光利用率高达 95.43%，两阶段优化调度方式下联络线交换功率仅为 24.2 kW，则显著减小了微网风光出力波动对大电网的影响。

(4) 随着 III 类电动汽车占比的逐渐增加，微网的风光利用率呈明显的上升趋势，且 III 类电动汽车占比在 0~50% 的风光利用率上升曲线陡峭，占比 50% 后的上升趋势明显减缓。

参考文献

- [1] 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.
- [2] PAPANIMITRIOU C N, KLEFTAKIS V A, HATZIARGYRIOU N D. Control strategy for seamless transition from islanded to interconnected operation mode of microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(2): 169-176.
- [3] 苏粟, 蒋小超, 王玮, 等. 计及电动汽车和光伏一储能的微网能量优化管理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 164-171.

(下转第 107 页)

- by the use of phase stepping[J]. Applied Optics, 1996, 35(1): 51-60.
- [15] SCHWIDER J, BUROW R, ELSSNER K E, et al. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J]. Applied Optics, 1983, 22(21): 3421-3432.
- [16] LARKIN K G, OREB B F. Design and assessment of symmetrical phase-shifting algorithms[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(10): 1740-1748.
- [17] MALACARA-DOBLADO D, DORRÍO B V, MALACARA-HERNÁNDEZ D. Graphic tool to produce tailored symmetrical phase-shifting algorithms[J]. Optics Letters, 2000, 25(1): 64-66.
- [18] HIBINO K, OREB B F, FARRANT D I, et al. Phase-shifting for nonsinusoidal waveforms with phaseshift errors[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(4): 761-768.
- [19] HIBINO K, OREB B F, FARRANT D I, et al. Phase shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform phase shifts[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(4): 918-930.
- [20] SCHMIT J, CREATH K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1995, 34(19): 3610-3619.
- [21] PHILLION D W. General methods for generating phase-shifting interferometry algorithms[J]. Applied Optics, 1997, 36(31): 8098-8115.
- [22] 李泾渭, 辛青, 侯昌伦. 通过傅里叶变换测量多表面面形[J]. 光学精密工程, 2019(6): 1277-1285.
- (收稿日期: 2020-07-15)
- 作者简介:**
- 李泾渭(1994-), 男, 研究生, 主要研究方向: 通过激光干涉技术检测多表面面形的技术。
- 辛青(1981-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 纳米材料与器件的制备与研究。
- 侯昌伦(1976-), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 光学检测、光学成像和微光学传感器, E-mail: hou_cl@hdu.edu.cn。

(上接第 85 页)

- [4] MENDES P R D C, NORMEY-RICO J E, ALBA C B. Economic energy management of a microgrid including electric vehicles[C]. Innovative Smart Grid Technologies Latin America, 2016.
- [5] 刘新天, 秦稳稳, 郑昕昕. 电动汽车无线充电系统拓扑与控制策略研究[J]. 电子技术应用, 2017, 43(5): 155-158.
- [6] 谢檬, 赵录怀, 王娟. 分布式发电微网控制系统的设计[J]. 电子技术应用, 2017, 43(6): 151-154, 158.
- [7] 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. 电工技术学报, 2014(S1): 374-382.
- [8] 茆美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35.
- [9] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微电网经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 111-117.
- [10] 吴红斌, 侯小凡, 赵波, 等. 计及可入网电动汽车的微网系统经济调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 77-84.
- [11] 梁子鹏, 陈皓勇, 王勇超, 等. 含电动汽车的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2017(8): 256-267.
- [12] 阮文骏, 王蓓蓓, 李扬, 等. 峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 86-93.
- [13] 朱兰, 刘伸, 唐陇军, 等. 充放电不确定性响应建模与电动汽车代理商日前调度策略[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3305-3314.
- [14] 王蓓蓓, 孙宇军, 李扬. 不确定性需求响应建模在电力积分激励决策中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 93-99.
- [15] 杨晓东, 任帅杰, 张有兵, 等. 电动汽车可调度能力模型与日内优先调度策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 84-93.
- [16] 张莉, 张松. 电动汽车充电站的充放电控制策略研究[J]. 电子技术应用, 2018, 44(11): 150-153, 157.
- [17] 李睿雪, 胡泽春. 电动公交车光储充电站日运行随机优化策略[J]. 电网技术, 2017(12): 41-49.
- (收稿日期: 2020-03-10)
- 作者简介:**
- 金商鹤(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力设计。
- 张宇(1970-), 通信作者, 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 电力设计, E-mail: zhangyuxue637388@126.com。
- 王育飞(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力设计。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所