DOI:10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 01. 010

居民小区电动汽车有序充电策略研究

Study on orderly charging strategy of electric vehicles in residential areas

董伟杰[1],崔全胜[2*],郝澜欣[1],王义龙[1],刘国琳[1]
DONG Weijie[1],CUI Quansheng[2*],HAO Lanxin[1],WANG Yilong[1],LIU Guolin[1]

(1.北京信息科技大学 机电工程学院,北京 100192;2.特变电工科技投资有限公司,天津 301799)
(1.College of Mechanical and Electrical Engineering,Beijing Information Science and Technology University,Beijing 100192,China;2.TBEA Technology Investment Company Limited,Tianjin 301799,China)

摘 要:针对电动汽车在居民小区无序充电对电网系统产生严重隐患及充电间时过长问题,提出一种采用延迟充电的电动汽车有序充电控制策略,并在分析国内外电动汽车有序充电的研究现状后,设计了居民小区电动汽车有序充电策略的总体框架。该策略采用延迟充电对电动汽车进行有序充电控制,通过计算电动汽车的充电优先级来确定用户开始充电的时间以保证离开时电动汽车的荷电状态,最大程度达到用户期望荷电状态。通过算例仿真分析,证明提出的延迟充电策略可在满足用户对电动汽车充电量期望的同时达到削峰填谷的作用。

关键词:电动汽车;有序充电;延迟充电;削峰填谷;储能
中图分类号:TK 02:TM 615 **文献标志码**:A **文章编号**:2097-0706(2023)01-0082-06

Abstract: In view of the serious hidden danger to the power grid and long charging time caused by the random parking behaviors and disordered charging process of electric vehicles (EVs) in residential areas, an EV orderly charging control strategy with delayed charging is proposed. After analyzing the researches on EV orderly charging at home and abroad, the overall framework of an orderly charging strategy for EVs in urban communities is designed. The strategy can coordinate EV charging behaviors by delayed charging. It can ensure the state of charge (SoC) of the EV at departure time by setting its charging start time which is varies with the calculated charging priority, so as to meet users' demand for SoC to the greatest extent. The simulation analysis on a case show that the proposed strategy with delayed charging can achieve the effect of peak-load shifting on the premise of meeting users' expectations for EV charging results.

Keywords: electric vehicle; orderly charging; delayed charging; peak-load shifting; renewable energy consumption; energy storage

0 引言

随着世界经济的快速发展和人类对能源需求的不断增长,不可再生能源被大量消耗,产生大量的环境污染[1-2]。机动车辆已经成为生产生活中不可或缺的一部分,使用燃油车无疑会增加CO_2的排放[3]。虽然新能源发电被越来越多地引入电网,如光伏发电,风力发电等[4],但由于二者的功率输出是随机波动的,会对电力系统造成影响,产生电能质量问题[5]。因此,减少燃油车的使用,从燃油动力汽车转向电动汽车(Electric Vehicle,EV)是解决汽车造成的环境污染的有效手段[6]。当前电网系统的有序充电对智能电网的发展起着越来越大的作用[7]。随着EV的大规模使用,有序充电对电网及分布式能源的重要性日益增强[8],需要解决EV充电问题。

目前针对EV充电的研究内容主要涉及充电负荷预测[9]、V2G[10-11]、EV参与辅助服务[12]、配电网规划[13]、充电站规划[14]等,也有一些学者对EV充电分层分区调度策略进行了研究[15-17]。

居民小区具有用车规律性强、可控性强、方便调研等优势,因此将居民小区作为研究对象,针对EV在居民小区充电过程中随机停放且无序充电对电网系统产生的严重隐患及充电间时过长的问题,提出一种采用延迟充电的EV有序充电控制策略。

1 EV有序充电策略

1.1 EV有序充电控制架构

EV充电将成为居民区电力需求的重要组成部

基金项目:北京市教委科研计划项目(KM202111232022)
Scientific Research Plan of Beijing Education Commission (KM202111232022)

© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

分，需要从配电网规划原则和负荷分布的影响等方面展开研究。结合概率收费模型和电力消费数据，在标准中定义的不同充电功率下，随机模拟不受控制、限制和价格优化的EV充电产生的影响[18]。将大量EV推迟至用电谷时段进行充电以减小EV充电对小区变压器的冲击，并且考虑到分时电价可减少用户充电费用，提高经济性，保证EV与电网的协调互动发展。EV有序充电控制架构如图1所示。

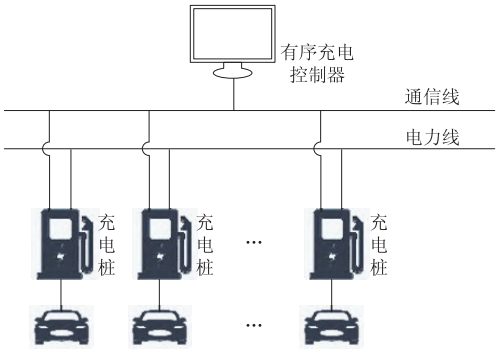

图1　EV有序充电控制框架

Fig. 1　EV orderly charging control framework

1.2　延迟充电的充电变量定义

EV返回后驻车时长的计算方法为[19]

$$T_S = t_{out} - t_{back}, \tag{1}$$

式中：T_S为用户驻车时长，h；t_{out}为用户外出时刻；t_{back}为用户返回时刻。

EV结束充电时刻t_{over}的表达式为

$$t_{over} = t_{start} + T_{cha}, \tag{2}$$

式中：t_{start}为充电开始时刻；T_{cha}为充电时长，h。

设t时刻共有m辆EV进行充电，则EV充电总功率$P_{t,EV}$和功率$P_{a.t}$的表达式为

$$P_{t,EV} = \sum P_{EV}, \tag{3}$$

式中：P_{EV}为EV荷电功率。

$$P_{a.t} = P_{max} - P_{load} - P_{t,EV}, \tag{4}$$

式中：P_{max}为功率限值，kW；P_{load}为除EV充电之外的日常负荷，kW。

EV_i进行有序充电的优先级计算方法为

$$\gamma = 1 - \frac{T_S - T_{cha}}{24 - T_{out}}, \tag{5}$$

式中：γ为EV充电优先级。

在设计EV的充电优先级时，设置当γ=1时的优先级最高，EV最优先进行充电；当γ=0时的优先级最低，EV最后进行充电。为了让EV在车主离开小区时处于满电状态，需要设置车主的优先级γ=1，确保EV电池状态达到满电状态。

1.3　有序充电策略具体执行方式

EV有序充电设计最重要的部分是对延迟充电条件的设置，通过对满足条件的EV延迟充电且不影响用户的期望充电量为基础，完成对居民小区EV有序充电的控制。当用户把EV_i连接到充电桩时，可通过充电桩的人机交互界面对EV的期望荷电状态、用户预计离开时刻进行设定。充电桩通过充电控制系统获得EV_i的电池信息，并将EV的充电负荷信息上传至有序充电控制器，有序充电控制器获得各个EV的充电负荷信息后对EV的充电进行控制，其实施流程如图2所示，具体如下。

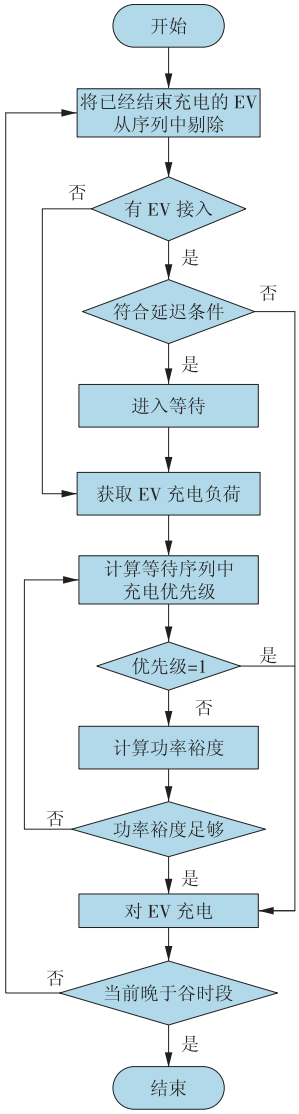

图2　采用延迟充电的EV有序充电流程

Fig. 2　EV orderly charging process with delayed charging

（1）在t时刻将已经充电完成的EV从计算充电序列中剔除。

（2）检测有无EV接入，若有则判断是否符合延迟充电条件，若无EV接入则转入步骤（4）。

（3）延迟充电条件：EV离开时刻在谷时段开始之后，且用户返回时刻到最迟充电完成时刻的时长大于EV充电所需时间。若上述延迟充电条件均满足则EV进入有序充电控制器的充电等待序列中，否则立即对EV充电以保证充电结束时的电池电量

© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

最大程度接近用户期待荷电。

(4)有序充电控制中台采集 t 时刻该小区实时负荷信息,寻找充电等待序列优先级最高的EV。

(5)若EV充电优先级 $\gamma=1$,则有序充电控制器对充电桩下达命令使其对EV进行充电,若充电优先级 $\gamma\neq1$,则采用当日制定的功率限制值计算 t 时刻功率裕度判断功率裕度是否大于EV充电功率。

(6)若功率裕度大于EV充电功率则对EV进行充电,记录开始时间,计算结束时间,并更新功率裕度,继续寻找本时刻最高优先级的EV,判断是否可以进行充电,直到充电优先级 $\gamma\neq1$ 且功率裕度小于EV充电功率(判定优先级 $\gamma=1$ 的逻辑为:当EV在 t 时刻到最迟完成充电时刻等于充电所需时长时开始充电、当停留时长等于充电时长时开始充电。其他充电优先级 $\gamma\neq1$ 的车辆均根据功率裕度判断是否进行充电)。

(7)判断 t 时刻是否晚于谷时段开始时刻,是则结束循环,控制结束,否则重新执行步骤(1)。

为更加直观地展现上述过程,通过问卷收集了15条居民小区EV充电数据,见表1。

表1　居民小区EV充电数据

Table 1　EV charging data of a residential area

车辆编号	开始充电时间	充电时长/h	充满电后停留时长/h
A	14:00	1	0
B	14:00	4	0
C	14:00	1	21
D	14:00	1	0
E	16:00	1	0
F	16:00	5	0
G	17:00	2	16
H	18:00	5	10
I	18:00	5	3
J	21:00	2	8
K	22:00	5	5
L	22:00	3	8
M	24:00	3	0
N	24:00	4	2
O	02:00	4	8

假设该小区的峰谷时段为21:00至次日08:00。在不考虑功率限制、仅满足优先级但不具体根据优先级进行有序充电的情况下,对上述控制逻辑进行简单的模拟,结果如图3所示,并与即充即走的无序充电模式进行对比。图3中蓝色为EV充电时间,红色为EV可以进行充电的时间。由图3可见:C,G,H,I,J,K,L号EV均可在峰谷时进行充电。但由于没有有序充电策略的帮助,导致原本可以延迟充电的EV在到达小区时就立即开始充电,导致用电高峰时有大量EV接入电网进行充电,给小区的变压器带来很大的负担,甚至会产生安全隐患。

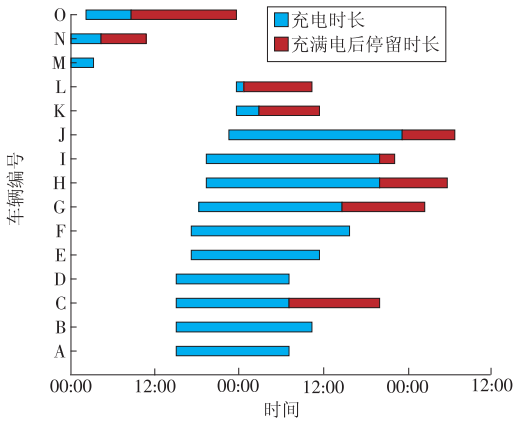

图3　即充即走的无序充电模式

Fig. 3　Disordered plug-and-charge mode

如果采用有序充电策略,如图4所示,21:00前用电高峰阶段进行充电的EV数量明显减少,从9辆减少为5辆。同时,21:00后用电峰谷时段的充电EV由3辆增加至7辆,显著降低了用电高峰期的变压器负荷,同时利用夜晚用电谷时段进行充电,达到了削峰填谷的目的。

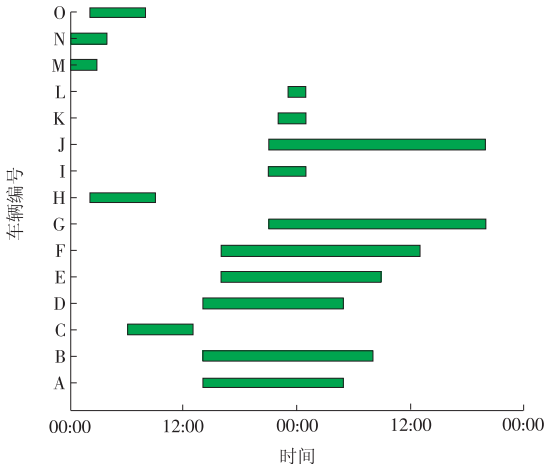

图4　有序充电模式

Fig. 4　Orderly charging mode

2　EV有序充电算例分析

对提出的EV有序充电策略进行试验算例分析,并利用仿真结果证明有序充电策略的有效性。

2.1　参数设置

为进行仿真分析,通过问卷调查获取小区EV回到社区的时间如图5所示。所采访小区的用电负荷高峰出现在20:00,功率峰值约900 kW,其次为12:00,功率峰值约600 kW。EV返回后电池平均剩余容量为50%。通过问卷获取EV离开社区的时间和EV充满电所用时间分别如图6及图7所示。

© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

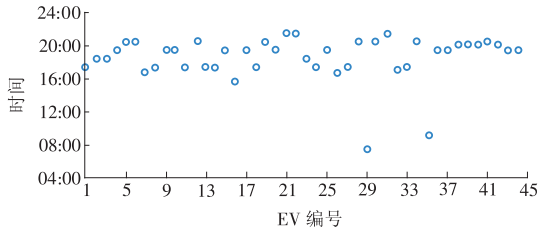

图 5　EV 返回小区时间

Fig. 5　Arriving time of the EV (back to the residential area)

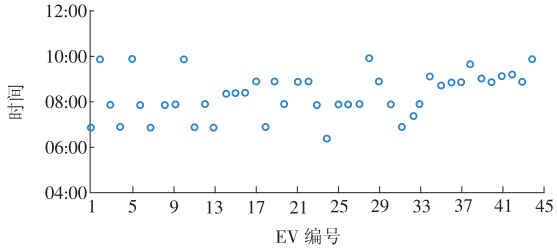

图 6　EV 离开小区时间

Fig. 6　Departure time of the EV (away from the residential area)

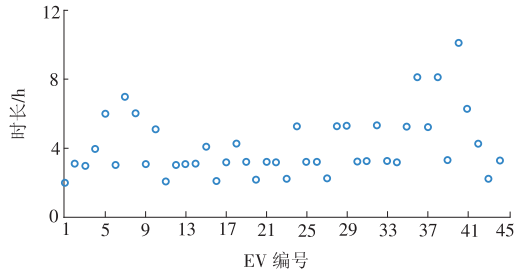

图 7　EV 充电时长

Fig. 7　Charging time of the EV

对用户充电行为进行如下假设。

(1)用户出行数据取自图 5—7，共计 44 辆 EV，充电桩的配比为 1∶1，可随时接入充电桩，等待有序充电控制器的控制。

(2)所用充电桩为慢速交流充电装置，充电功率为 7 kW，谷时段为 22:00—次日 08:00。

(3)EV 每天返回后均进行充电，用户期望驾车离开时 EV 电池电量为 100%。

(4)变压器的负荷红线为 1 100 kW。

2.2　仿真结果

利用提出的 EV 有序充电策略对案例进行仿真分析，可得出有序充电和无序充电波动曲线如图 8 所示。从有序充电和无序充电曲线的波动可以看出，不采用有序充电策略，EV 充电处于大规模无序状态，且 EV 的充电高峰期出现在一天中的用电高峰期到凌晨。此时电网系统的用电量即为负荷的最高峰，电网系统的负荷压力也最大。

而在有序充电模式下，通过合理地安排 EV 充电顺序，可有效缩短 EV 充电时间，并将原本在用电高峰期充电的 EV 安排到其他时间段充电，提高电网的安全运行，降低电网系统的负荷压力。

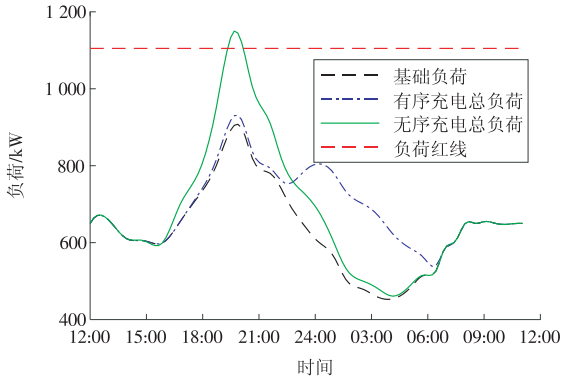

图 8　EV 有序充电与无序充电负荷对比

Fig. 8　Comparison of EV charging results taking orderly charging or disordered charging strategy

为了更直观地体现有序充电的控制效果，计算 44 辆 EV 在无序充电充电模式和有序充电模式下的峰谷差，结果见表 2。

表 2　无序充电模式和有序充电模式下的负荷对比

Table 2　Comparison of the load under orderly charging or disordered charging mode

参数	有序充电模式	无序充电模式
EV 数量	44	44
基础负荷峰值/kW	900	900
总负荷峰值/kW	928	1 161
是否超过红线	否	是
负荷峰谷差/kW	392	703

从表 2 无序充电充电模式和有序充电模式下负荷数据对比可见：在 EV 数量相同的情况下，有序充电模式的负荷总峰值远小于无序充电充电模式时的总峰值，且无序充电充电模式已经超过负荷的红线(1 100 kW)，而有序充电模式可以保证负荷的稳定性；从负荷的峰谷差可以看出，有序充电模式的峰谷差仅为无序充电充电模式峰谷差的 1/2。可见提出的基于 EV 延迟充电的有序充电策略可以有效控制 EV 充电安全，并达到削峰填谷、错峰充电的目的，对 EV 的推广具有一定的积极意义。

3　结束语

EV 的充电周期与人们的生活习惯密切相关。随着全国 EV 保有量逐年增多，EV 大量无序充电的充电模式将对电网产生较大的影响，因此有必要对居民区的 EV 充电进行合理规划，提出合理的家用 EV 充电策略，确保电网充电区域的安全稳定运行。

(1)从 EV 充电的选择策略着手进行研究，介绍了 EV 有序充电的基础理论，分析了大规模 EV 充电过程中遇到的问题。

(3)介绍了 EV 充电策略的理论基础，对 EV 充电的模式进行了分析，然后针对居民小区 EV 无序

© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

充电充电模式提出了一种基于延迟充电的EV有序充电策略，并对充电策略的总体框架进行了分析。

（3）以实际居民小区EV充电为例进行仿真分析，证明了本文提出的EV有序充电策略的方法能够实现EV有序充电，并有效降低充电总峰值，达到削峰填谷、错峰充电的目的，表明提出的有序充电策略方法设计的有效性。

参考文献：

[1]葛磊蛟，崔庆雪，李明玮，等.风光波动性电源电解水制氢技术综述[J].综合智慧能源，2022，44(5)：1-14.
GE Leijiao，CUI Qingxue，LI Mingwei，et al.Review on water electrolysis for hydrogen production powered by fluctuating wind power and PV [J].Integrated Intelligent Energy，2022，44(5)：1-14.

[2]李景丽，时永凯，张琳娟，等.考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J].电力系统保护与控制，2021，49(7)：94-102.
LI Jingli，SHI Yongkai，ZHANG Linjuan，et al.Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles [J]. Power System Protection and Control，2021，49(7)：94-102.

[3]贺瑜环，杨秀媛，陈麒宇，等.电动汽车智能充放电控制与应用综述[J].发电技术，2021，42 (2)：180-192.
HE Yuhuan，YANG Xiuyuan，CHEN Qiyu，et al.Review of intelligent charging and discharging control and application of electric vehicles [J].Power Generation Technology，2021，42 (2)：180-192.

[4]JU X.A new AC charging system with orderly charging for electric vehicles [C]//2013 5th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA).IEEE，2013：1-4.

[5]唐菁敏，王杰，刘思淼.含电动汽车参与的微电网调度策略研究[J].电力科学与工程，2021，37(2)：25-31.
TANG Jingmin，WANG Jie，LIU Simiao. Research on dispatching strategy of microgrid with electric vehicle [J]. Electric Power Science and Engineering，2021，37(2)：25-31.

[6]谢子殿，陈男，孙晓东.精英遗传算法的电动汽车有序充电策略[J].黑龙江科技大学学报，2021，31(1)：105-109.
XIE Zidian，CHEN Nan，SUN Xiaodong. Orderly charging strategy of electric vehicle based on ESGA [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology，2021，31 (1)：105-109.

[7]GE L，LIU H，YAN J，et al.Optimal integrated energy system planning with DG uncertainty affine model and carbon emissions charges [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy，2021，13(2)：905-918.

[8]江明，许庆强，季振亚.基于时序差分学习的充电站有序充电方法[J].电力工程技术，2021，40(1)：181-187.
JIANG Ming，XU Qingqiang，JI Zhenya. Coordinated charging approach for charging stations based on temporal difference learning [J]. Electric Power Engineering Technology，2021，40(1)：181-187.

[9]陈星.电动汽车充电负荷预测及有序充电控制策略研究[D].郑州：郑州大学，2020.
CHEN Xing. Research on charging load prediction and orderly charging control strategy of EV [D]. Zhengzhou：Zhengzhou University，2020.

[10]张永新，闫鹏领，朱国栋.电动汽车充电站站网互动运行优化技术研究与实践[J].综合智慧能源，2022，44(6)：45-51.
ZHANG Yongxin，YAN Pengling，ZHU Guodong.Research and practice on the EV station-to-grid interactive operation optimization technology [J].Integrated Intelligent Energy，2022，44(6)：45-51.

[11]GE L，LI Y，YAN J，et al. Short-term load prediction of integrated energy system with wavelet neural network model based on improved particle swarm optimization and chaos optimization algorithm [J].Journal of Modern Power Systems and Clean Energy，2021，9(6)：1490-1499.

[12]段俊东，李高尚，李一石，等.考虑风电消纳的电动汽车充电站有序充电控制[J].储能科学与技术，2021，10 (2)：630-637.
DUAN Jundong，LI Gaoshang，LI Yishi，et al.Coordinated charging control for EV charging stations considering wind power accommodation [J]. Energy Storage Science and Technology，2021，10(2)：630-637.

[13]俞子聪，龚萍，王植，等.居民区电动汽车有序充放电控制策略[J].科学技术与工程，2021，21(1)：380-386.
YU Zicong，GONG Ping，WANG Zhi，et al. An orderly charging/discharging control strategy for electric vehicles in residential areas [J]. Science Technology and Engineering，2021，21(1)：380-386.

[14]王杰，唐菁敏，刘思淼.基于用户响应度的电动汽车有序充放电策略[J].电子测量技术，2021，44(1)：31-36.
WANG Jie，TANG Jingmin，LIU Simiao. Orderly charging and discharging strategy of electric vehicles based on user responsiveness [J]. Electronic Measurement Technology，2021，44(1)：31-36.

[15]刘星月，唐琳，雷霖，等.计及电动汽车入网的冷热电微网系统优化配置研究[J].成都大学学报(自然科学版)，2020，39(4)：406-410.
LIU Xingyue，TANG Lin，LEI Lin，et al. Optimal configuration research of CCHP micro-grid considering electric vehicles [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science)，2020，39(4)：406-410.

[16]王康平，黄曲粲，张兴科，等.考虑调峰成本的大规模电动

© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

汽车分群调度策略[J].综合智慧能源，2022，44(11)：12-19.
WANG Kangping，HUANG Qucan，ZHANG Xingke，et al. Strategy for large-scale electric vehicles cluster scheduling considering peak-shaving cost [J]. Integrated Intelligent Energy，2022，44(11)：12-19.

[17]李昊，季振亚，刘晓峰，等.基于综合可调度潜力评估的电动汽车优先调度策略[J].综合智慧能源，2022，44(11)：1-11.
LI Hao，JI Zhenya，LIU Xiaofeng，et al. Electric vehicle priority dispatch policy based on comprehensive dispatchable potential assessment model [J]. Integrated Intelligent Energy，2022，44(11)：1-11.

[18]葛磊蛟，王守相，王尧，等.多源异构的智能配用电数据存储处理技术[J].电工技术学报，2015，30(S2)：159-168.
GE Leijiao，WANG Shouxiang，WANG Yao，et al. Storage and processing technology of the multi-source isomerized data for smart power distribution and utilization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(S2)：159-168.

[19]齐先军，李冬伟，纪姝彦.采用功率限制的住宅区电动汽车有序充电控制策略[J].电网技术，2016，40(12)：3715-3721.
QI Xianjun，LI Dongwei，JI Shuyan. A coordinated charging control strategy for electric vehicles in residential area with power limitation [J]. Power System Technology，2016，40(12)：3715-3721.

（本文责编：惠忻）

收稿日期：2022-10-25；**修回日期**：2023-01-04
上网日期：2023-01-25；**附录网址**：www.iienergy.cn

作者简介：

董伟杰(1982)，男，讲师，博士，从事新能源科学与工程、微电网及分布式并网等方面的研究，dongweijie@bistu.edu.cn；

崔全胜*(1976)，男，高级工程师，博士，从事智能配用电及综合能源系统优化方面的研究，little_cui@163.com。

*为通信作者。

****

广　告　索　引

《综合智慧能源》……（后插 1）
郑州科润机电工程有限公司 ……（后插 2）
华电水务科技股份有限公司(跨版) ……（后插 3，4）
华电环保系统工程有限公司(跨版) ……（后插 5，6）
中国华电科工集团有限公司新能源技术开发公司 ……（后插 7）
国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术研发(实验)中心 ……（后插 8）
华电综合智慧能源科技有限公司 ……（后插 9）
华电通用轻型燃机设备有限公司 ……（后插 10）
郑州华电能源科技有限公司(跨版) ……（后插 11，12）
华电重工股份有限公司(跨版) ……（后插 13，14）
中国华电科工集团有限公司能源建设分公司(跨版) ……（后插 15，16）
华电科工安全环境质量科学研究所 ……（后插 17）
山东华电节能技术有限公司 ……（后插 18）
公益广告(降碳节能) ……（后插 19）
华电郑州机械设计研究院有限公司……（封三）
中国华电科工集团有限公司……（封底）

© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.