

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200955

基于双目标分层优化和 TOPSIS 排序的电动汽车有序充电策略

沈国辉^{1,2}, 陈光^{1,2}, 赵宇^{1,2}, 李晓光^{1,2}, 耿爱国^{1,2}, 袁浩^{1,2}, 刘方^{1,2}

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106;

2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘要: 针对当前有序充电策略控制目标相对单一无法满足用户多方面需求的现状, 提出了基于双目标分层优化的有序充电控制策略。首先, 建立了主站与能源控制器分层协同控制的整体架构。其次, 将控制用户充电成本作为第一层优化目标, 将减小电网负荷波动作为第二层优化目标, 完成双目标分层优化算法模型的设计。最后, 设计了台区负荷越限时电动汽车充电功率动态调整的实时控制策略。从用户充电行为特征出发, 采用 TOPSIS 排序方法确定用户的充电需求优先级, 为有序充电策略的充电计划调度提供依据。电动汽车有序充电策略已投入运行于郑州等地小区, 设计成果既节约用户充电成本, 又实现电力负荷削峰填谷的目标, 验证有序充电策略的实用性和有效性。

关键词: 电动汽车; 有序充电; 分层优化; 实时控制策略; TOPSIS 排序

Orderly charging optimization strategy of an electric vehicle based on double objective hierarchical optimization and TOPSIS ranking

SHEN Guohui^{1,2}, CHEN Guang^{1,2}, ZHAO Yu^{1,2}, LI Xiaoguang^{1,2}, GENG Aiguo^{1,2}, YUAN Hao^{1,2}, LIU Fang^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. Beijing Kedong Electric Power Control System Corporation Limited, Beijing 100192, China)

Abstract: The control target of the current orderly charging strategy is relatively single, and cannot meet the needs of users in many aspects. Thus this paper proposes an orderly charging control strategy based on double objective hierarchical optimization. First, it establishes the overall architecture of hierarchical collaborative control between master station and energy controller. Secondly, the control of user charging cost is taken as the first level optimization objective, and the reduction of grid load fluctuation is taken as the second level objective to complete the design of double objective hierarchical optimization strategy. Last, it designs a real time control strategy to adjust the charging power of the charging pile when the load exceeds the limit. At the same time, based on the characteristics of user charging behavior, it uses the TOPSIS ranking method to determine the priority of user charging demand. This provides the basis for charging planning and scheduling of an orderly charging strategy. In this paper, the optimization strategy for orderly charging of electric vehicles has been put into operation in Zhengzhou and other districts. The design shows that the goal of cost savings and peak load shifting can be achieved, verifying the practicability and effectiveness of the charging strategy.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Key Techniques Research and Demonstration Application of Virtual Energy Storage and Load Control of EV Clusters Optimization” (No. 5418-202018247A-0-0-00).

Key words: electric vehicle; orderly charging; hierarchical optimization; real time control strategy; TOPSIS ranking

0 引言

随着经济的发展, 人民生活水平的提高, 环保

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“电动汽车集群优化虚拟储能与负荷控制关键技术研究及示范应用”(5418-202018247A-0-0-00)

问题受到高度关注, 传统化石能源对环境带来的负面作用日益显现, 转变能源结构, 增大清洁能源的比重势在必行。电动汽车的推广使用可以很大程度上减少人口密集区域污染源的排放, 有效解决节能减排问题, 满足人们对环境质量的要求, 促进经济的增长^[1]。大量电动汽车的无序接入将会对电网的安全经济运行造成冲击, 此外, 充电桩的数量、用

户用车行为习惯等因素一定程度上限制电动汽车大规模接入的能力,因此提出一套合理有效的有序充电策略是非常必要的^[2-4]。有序充电策略是在智能用电的基础上,综合政策、经济等手段完成区域范围内电动汽车充电行为能量调度的过程^[5]。在电网削峰填谷与节约用户用能成本多目标优化方面,文献[6]针对大规模电动汽车接入电网后的实时充电分布式优化问题,应用价格响应与激励响应手段,提出一种计及EV集群充电预测信息,兼顾电网、EV负荷聚合体与车主三方利益的多目标实时分布式优化模型,但尚未考虑越限情况下用户充电行为与充电负荷调度的关联性。文献[7]在考虑配电设备运行安全和用户充电需求的前提下,综合充电负荷和原有负荷的特点,建立了以分时电价为基础,以减小负荷波动率和提高运营商效益为目标的两阶段多目标充电模型,但未从用户充电行为出发建立用户充电需求响应模型。文献[8]提出了考虑用户充电推移时间的电动汽车有序充电策略,将剩余电量与相邻时段充放电限制作为约束,建立以负荷均方差与用户费用最小的多目标优化模型,但未考虑用户的出行特征与充电行为对有序充电策略的影响。在充电计划调度控制方面,文献[9]根据用户意愿将电动汽车在时间层分为接受系统调度集群和不接受系统调度集群,建立不同尺度下的用户满意度函数来充分调动电动汽车用户参与性,在此基础上提出有序充电引导调度策略:在时间层上通过引导车辆的充电时间调节负荷曲线;在空间层上规划各车辆的充电站选择。文献[10]提出基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电控制方法,该方法以削峰填谷为目标,采用启发式算法动态求解接入充电站电动汽车的分时电价时段,由用户自主响应,以实现充电站内电动汽车有序充电,但未对电网负荷波动作出直接的控制。文献[11]针对目前很多型号的电动汽车电池管理系统与居民小区内的慢充充电桩不能正常通信的问题,依据确定性分析法,以倒序递推原则安排电动汽车的充电开始时间,研究了一种不采集电动汽车电池荷电状态来实现小区内电动汽车群有序充电的控制方法,但未对用户的充电成本制定相应策略,对充电成本进行直接控制。

综合上述文献,当前有序充电应用研究存在优化目标相对单一,尤其缺乏对用户的充电需求的定量分析,特别是用户的充电行为对用户充电需求的影响,同时大都未考虑用户的充电需求对有序充电策略设计的影响,通常未制定在区域电网负荷越限情况下充电功率控制策略。鉴于上述原因,本文基于双目标分层优化和TOPSIS排序的电动汽车有序

充电策略解决了文献[10-11]控制目标单一的缺陷;通过定量分析用户的充电需求,为有序充电调度提供依据,解决类似文献[6,8]有序充电策略的设计未考虑用户充电行为、用户充电需求不足的问题。此外,本文制定电网负荷越限时电动汽车充电功率控制策略,解决当前有序充电策略研究中对负荷越限时电动汽车充电功率调节研究不足的缺陷。

1 有序充电控制策略的整体架构

1.1 有序充电策略的应用架构

有序充电策略的应用架构采用由能源控制系统主站(以下简称主站)与能源控制器分层协同控制结构。如图1所示,主要参与方为手机APP、智能设备(能源路由器、能源控制器)与主站控制系统。

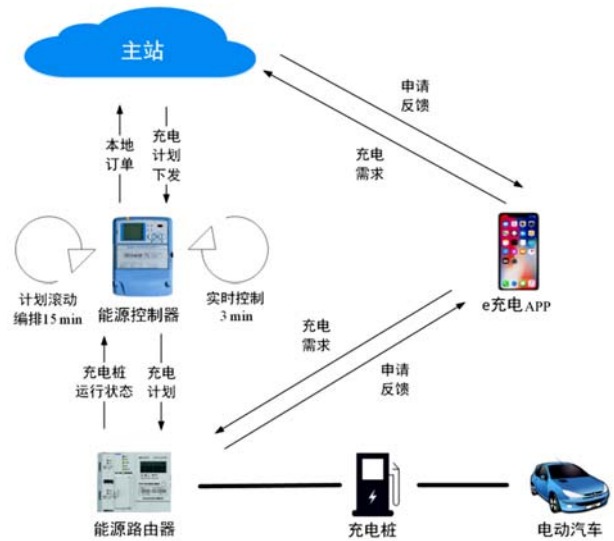


图1 有序充电应用主站与本地协同控制场景

Fig. 1 Master station and local cooperative control scenario of orderly charging application

用户通过APP选择充电类型(正常充电、有序充电)、目标充电电量、预期提车时间,以4G无线通信方式向主站发起充电请求。主站与智能设备接收到充电需求,结合基础负荷曲线、台区负荷限制曲线(越限负荷)及台区工况,制定相应的充电计划,能源路由器执行充电计划启动充电。主站下发给能源控制器的充电计划每15min滚动一次,包括充电功率、充电开始时间、充电结束时间。主站每3min响应充电桩功率实时控制策略,以便当台区负荷发生越限时,对充电桩功率进行动态调整。在主站与能源控制器通信中断的场景下,用户以蓝牙通信方式向能源路由器发送充电请求,由能源控制器进行充电计划本地编排。

1.2 有序充电策略的算法设计

双目标分层优化将控制用户的充电成本作为第一级优化目标, 将平抑区域电网负荷波动作为第二级优化目标, 前一级优化策略求解的电动汽车充电时间窗口作为下一级优化策略电动汽车充电时间的限制区间。通过对电动汽车用户充电时间、充电功率、用户接入数目的控制引导实现双目标分层优化的目的。综合考虑有序充电优化策略和负荷越限时充电功率实时控制策略, 有序充电策略总体流程如图 2 所示。

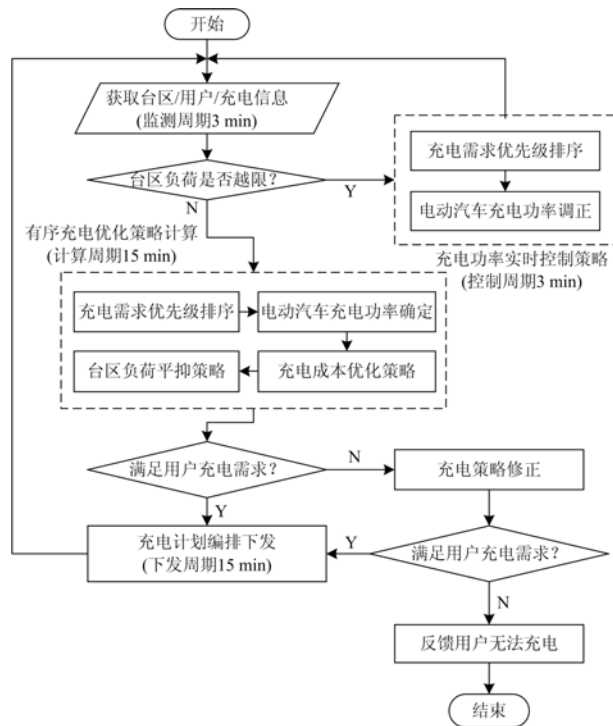


图 2 有序充电策略总体流程

Fig. 2 Overall process of orderly charging strategy

1) 主站预先获取 24 h 台区居民基础预测负荷以及台区负荷的越限值; 动态获取用户提供的充电信息包括充电服务类型、充电需求电量、用户预约的提车时间信息; 以 3 min 为周期监测台区实时运行负荷。

2) 判断台区当前负荷是否越限。

3) 如果出现越限情况, 执行调控周期为 3 min 的充电功率实时控制策略:

(1) 计算越限时刻正在充电的用户充电需求优先级;

(2) 通过顺序调整电动汽车的充电功率将台区负荷稳定在安全区间。

4) 如果台区负荷未发生越限, 进行周期为 15 min 的有序充电优化策略计算:

(1) 对当前已提交充电申请用户的充电需求优先级进行计算并排序;

(2) 考虑台区负荷容量裕度的限制结合用户充电需求优先级确定每辆电动汽车的最大可用充电功率;

(3) 根据控制用户充电成本第一级策略, 计算所有可能的充电时间;

(4) 从第一级策略所有可能的充电时间区间中, 根据平抑电网负荷波动第二级策略, 筛选并确定最优的充电时间。

5) 判断上述策略计算能否满足用户的充电需求(充电电量要求、提车时间要求), 若无法满足用户的充电需求, 进行充电策略修正(扩展临近可用的充电时间窗口), 若修正后依然无法满足, 则通过 APP 反馈无法满足用户充电需求。

6) 主站以每 15 min 为周期下发充电计划, 包括每辆电动汽车的起止充电时间和充电功率。

2 有序充电控制策略的建立

2.1 基于 TOPSIS 排序的用户充电需求优先级

采用 TOPSIS 排序算法, 根据反映用户充电行为特征三个指标, 即用户剩余需充电量 SOC、等待提车时间、已停留时间三个维度对用户的充电需求进行量化分析, 形成用户充电需求优先级。其中剩余需充电量 SOC 指的当前时刻为达到用户需求电量的剩余需充电量 SOC, 已停留时间是指用户接入充电桩时刻至当前时刻停留的时间, 等待提车时间指当前时刻距离用户预期提车时间的需要等待时间。

基于 TOPSIS 排序方法对当前等待加入有序充电的 N 个电动汽车用户的充电需求优先级进行排序, 以便定量描述用户的充电需求。

$$\beta = \{\beta_i | i = 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

其基本思想是: 在确定各属性指标权重的基础上, 归一化原始数据矩阵, 分别计算各评价对象与最优方案和最劣方案间的距离, 获得各评价对象与最优方案的相对接近程度, 并作为评价优劣的依据^[12-14]。具体过程如下:

1) 构建包含 N 辆电动汽车 M 个评价属性的评估矩阵 $A = (a_{ij})_{M \times N}$, 其中第 i 辆车的第 j 个属性为 a_{ij} 。电动汽车的属性包括需充电量 SOC(A1)、等待提车时间(A2)、已停留时间(A3)。对评估矩阵 A 进行标准化、归一化得到 $B = (b_{ij})_{M \times N}$ 。

2) 构建加权规范矩阵 $C = (c_{ij})_{M \times N}$ 。由有序充电策略平台的决策者确定权重向量 W , 其中第 j 个属

性为 ω_j ，那么加权规范矩阵由下式确定。

$$C = WB \quad (2)$$

$$W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M) \quad (3)$$

3) 确定每个属性的正理想解与负理想解。对于第 j 个属性其正理想解为 c_j^* ，负理想解为 c_j^0 。正向属性为 C_j^+ ，即该属性的正理想解 c_j^* 与该属性的最大值相关；负向属性为 C_j^- ，即该属性的正理想解 c_j^* 与该属性的最小值相关。

$$c_j^* = \begin{cases} \left\{ \left\{ \max_i c_{ij} \mid i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,M \right\} \mid j \in C_j^+ \right\} \\ \left\{ \left\{ \min_i c_{ij} \mid i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,M \right\} \mid j \in C_j^- \right\} \end{cases} \quad (4)$$

$$c_j^0 = \begin{cases} \left\{ \left\{ \min_i c_{ij} \mid i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,M \right\} \mid j \in C_j^+ \right\} \\ \left\{ \left\{ \max_i c_{ij} \mid i=1,2,\dots,N; j=1,2,\dots,M \right\} \mid j \in C_j^- \right\} \end{cases} \quad (5)$$

根据实际情况定义，需充电量 SOC(A1)的正理想解与正向属性相关，即需充电量越大，充电需求越高，等待提车时间(A2)的正理想解与负向属性相关，即距离提车时间越短，充电需求越高，已停留时间(A3)与正向属性相关，即已停留时间越长，充电需求越高。

4) 计算每个参与有序充电调度的电动汽车到正理想解 d_i^* 与负理想解的距离 d_i^0 。

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^M (c_{ij} - c_j^*)^2}, i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,M \quad (6)$$

$$d_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^M (c_{ij} - c_j^0)^2}, i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,M \quad (7)$$

5) 计算每个用户电动汽车的充电需求优先级 β_i ：

$$\beta_i = \frac{d_i^0}{d_i^* + d_i^0}, i=1,2,\dots,N \quad (8)$$

为便于在实际工程中有序充电策略的实施，每个用户对应唯一的充电需求优先级，即主站确保每个参与有序充电优化策略的用户的充电优先级各不相同。上式中 β_i 越大，用户参与充电的需求越高，充电需求优先级越大。

2.2 有序充电双目标分层优化策略

在实际的应用场景中，参与有序充电的用户可选择的服务类型分为“有序充”模式和“正常充”模式。“正常充”模式是为“需求刚性用户”尽快完成电能补给而提供的服务模式，该类型用户在提交充电请求时，系统会即时安排正常充模式的电动车

立即充电。当用户对具体充电过程和电量目标不敏感时，系统可以对用户的充电时段和功率进行优化编排调度，该服务模式称为“有序充”，在此模式下，用户需要输入提车时间、目标 SOC(或拟充电电量)。为简化模型，有序充电双目标分层优化策略针对的是选择“有序充”服务模式的用户。

在有序充电场景中，区域范围内的电价分为尖峰平谷四个时间段，通常有如下形式的分时电价模型^[15-16]。

$$l(t) = \begin{cases} l_{\text{top}}, t_4 < t < t_5 \\ l_{\text{peak}}, t_3 < t < t_4 \\ l_{\text{flat}}, t_2 < t < t_3 \\ l_{\text{valley}}, t_1 < t < t_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中： $l(t)$ 为第 t 时段对应的电价； l_{top} 、 l_{peak} 、 l_{flat} 、 l_{valley} 分别为一天 96 个时段中的第 t 时段(以 15 min 作为一个时间单元)对应的尖、峰、平、谷电价，其中 $t = t_1, t_2, \dots, t_{96}$ 。

2.2.1 未越限时电动汽车充电功率的确定

主站下发至充电桩的计划编排充电功率，即要从宏观层面考虑台区范围内负荷限制区间和也要考虑充电桩实际可用的功率空间^[17]。用户发起充电请求时，输入充电服务模式(正常充或有序充)、订单开始时间 T' ，用户提车时间 T'' ，用户充电需求量 Q^n 。从主站获取台区第 t 时段的限制负荷 P_t^L (台区越限负荷)，台区 24 小时基础预测负荷 P_t^B ，台区第 t 时段加入有序充电调度的电动汽车已编排的充电功率 P_t^C 。获取第 t 时段等待加入充电计划编排的电动汽车的充电需求优先级 β 。

当前已发出充电申请，等待加入第 t 时段充电计划编排的用户中，如图 3 所示，对充电需求优先级高的用户，主站优先编排该时段的电动汽车以最大可用充电功率充电(通常在可用充电功率充裕的情况下，电动汽车计划编排的充电功率为额定充电功率 P_{max}^n)，其余等待加入充电计划编排的用户以此

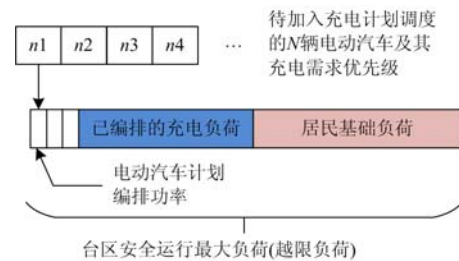


图 3 基于用户充电需求优先级的充电功率编排
Fig. 3 Charging power scheduling based on user charging demand priority

类推。充电需求优先级排序最高的电动汽车充电功率 P_t^n 由下式确定。

$$P_t^n = \begin{cases} P_{\max}^n, P_{\max}^n < P_t^L - P_t^B - P_t^C \\ P_t^L - P_t^B - P_t^C, P_{\max}^n > P_t^L - P_t^B - P_t^C > 0 \\ 0, P_t^L - P_t^B - P_t^C < 0 \end{cases} \quad (10)$$

2.2.2 控制用户充电成本策略

有序充电优化策略优先考虑控制用户的充电成本, 将控制用户的充电成本作为第一级优化目标。用户充电成本优化策略要满足用户的提车时间要求和充电电量要求^[18-19]。当前动态加入有序充电的第 n 辆电动汽车, 控制该用户充电成本的目标函数 F_1 可由下式确定, 其中 T_0 为用户充电开始时间, P_t^n 为该车辆 t 时刻的充电功率, Δt 为 15 min 的时间单元, ΔT_1 为第一级优化策略下满足要求的用户充电时长。

$$\begin{cases} F_1 = \min \sum_{t=T_0}^{T_0+\Delta T_1} P_t^n \Delta t \\ Q^n = \sum_{t=T_0}^{T_0+\Delta T_1} P_t^n \Delta t \\ T_0, T_0 + \Delta T_1 \subset (T', T'') \end{cases} \quad (11)$$

采用滑动递归等启发式算法结合式(10)的电动汽车充电功率分配方程, 可以求解控制用户充电成本策略下满足用户充电需求的电动汽车充电时间窗口。鉴于阶梯电价模型, 事实上满足要求的充电起止时间可以有多段 $(T_{a1}, T_{b1}), (T_{a2}, T_{b2}), \dots, (T_{an}, T_{bn})$, 对所有满足要求的充电时间区间求并集可以得到该级优化策略下完整的可用充电时间区间:

$$(T_a, T_b) = (T_{a1}, T_{b1}) \cup (T_{a2}, T_{b2}) \cup \dots \cup (T_{an}, T_{bn}) \quad (12)$$

2.2.3 平抑电网负荷波动控制策略

研究表明减少配电网的负荷波动可以有效减小配电网线损^[20-22]。将平抑台区总用电负荷的波动即居民基础负荷和充电负荷的叠加负荷作为第二级优化目标。以上一级控制用户充电成本策略求解的充电时间窗口作为下一级优化策略中充电时间的控制区间。对于动态加入有序充电的第 n 辆电动汽车, 该用户平抑电网负荷波动的目标函数为 F_2 ; $P_{\Delta T_2}^{AV}$ 为该用户充电时长 ΔT_2 内的台区总用电负荷的平均值:

$$\begin{cases} F_2 = \min \frac{1}{\Delta T} \sum_{t=T_0}^{T_0+\Delta T_2} (P_t^B + P_t^C + P_t^n - P_{\Delta T_2}^{AV})^2 \\ Q^n = \sum_{t=T_0}^{T_0+\Delta T_2} P_t^n \Delta t \\ T_0, T_0 + \Delta T_2 \subset (T_a, T_b) \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{\Delta T_2}^{AV} = \frac{1}{\Delta T_2} \sum_{t=T_0}^{T_0+\Delta T_2} (P_t^B + P_t^C + P_t^n) \quad (14)$$

采用粒子群等启发式算法对第二级优化策略目标函数 F_2 进行求解, 最终得到每个用户最佳的充电起止时间 (t_a, t_b) 和充电功率 P_t^n , 作为充电计划以每 15 min 为周期下发到能源控制器。

从有序充电的工程应用发现, 由于阶梯电价模型, 第一级用户充电成本优化策略求解的充电时间窗口往往存在多解, 可选择的充电时间窗口较多, 若不进行第二级平抑电网负荷波动的优化策略, 很可能在某个时间窗口内, 参与有序充电的电动汽车集中充电造成新的充电高峰。

2.3 负荷越限时时刻充电功率实时控制策略

满足区域电网的安全稳定运行是有序充电策略的约束条件^[23-24], 台区负荷越限时时刻的充电功率实时控制策略结合了用户充电需求优先级。当台区负荷过载越限情况发生时, 系统根据用户的充电需求优先级实施充电功率削减与恢复策略, 保证区域电网安全、经济运行。

当台区负荷发生越限时, 优先降低充电桩的充电功率, 台区负荷仍越限时, 则暂停或停止充电桩充电。此时对电动汽车充电功率的调整具体要满足下面的关系, 其中 Δp 为每次功率调整下降的功率步长, M 为对充电功率进行周期性(每 3 min 为周期)调整的次数, N 为每个周期进行功率调整的电动汽车数量, P_t^A 为越限时时刻台区实时运行负荷:

$$P_t^A - \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \Delta p \leq P_t^L \quad (15)$$

当台区负荷越限发生时, 按照越限时时刻用户的充电需求优先级从低到高的顺序降低充电功率, 直至台区负荷不越限为止。台区负荷越限发生时, 电动汽车充电功率顺序调整流程如图 4。

- 1) 按照用户的充电需求优先级 β_i 从高到低依次降低“有序充”服务模式用户的充电功率;
- 2) 按照用户的充电需求优先级 β_i 从高到低依次降低“正常充”服务模式用户的充电功率;
- 3) 当台区负荷已经调整至安全运行区间的情况下, 依次逆序启动充电桩并上调充电功率至正常水平, 具体顺序与越限控制策略相反, 故不重复叙述。

综上, 台区负荷越限发生时, 电动汽车充电功率顺序调整流程如图 4 所示。

3 有序充电策略应用成效分析

3.1 有序充电试点应用成效

采用有序充电应用试点订单的实际数据, 展示某一时间段(22:00)电动汽车充电需求优先级的

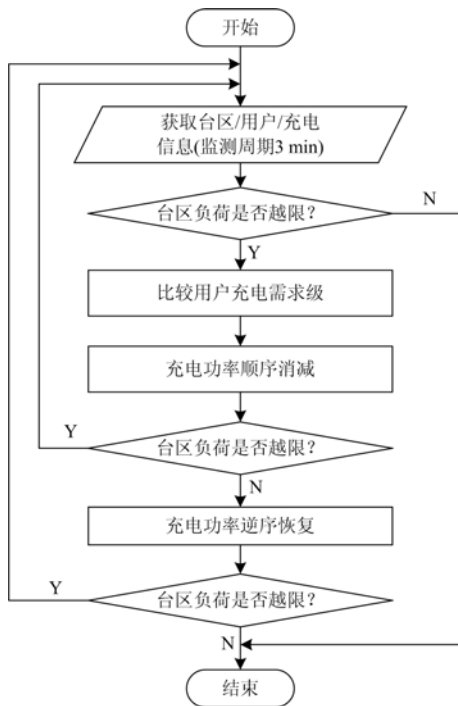


图 4 负荷越限时充电功率顺序调整流程
Fig. 4 Sequence adjustment process of charging power at overload time

TOPSIS 排序。

8 辆已发出充电申请，待参与有序充电的电动汽车车辆信息如表 1 所示。

表 1 参与有序充电车辆信息

Table 1 Information of vehicles participating in orderly charging

序号	充电车辆	需求电量/kWh	接入时间	预期提车时间
1	奇瑞 eQ1	52.8	17:30	08:00
2	江淮 IEVS4	49.2	18:00	08:00
3	江淮 IEV6	50.1	18:30	07:30
4	江淮 IEV7	44.2	17:00	07:30
5	众泰 Z500	48.0	18:00	08:00
6	众泰 T300	58.0	18:30	07:45
7	宝马 530LE	48.0	18:00	07:30
8	宝马 530LE	51.8	15:45	07:00

该时段 8 辆电动汽车，原始属性和排序如表 2 所示。

将满足用户对提车时间的要求放到充电需求中影响因素的首位，确保用户及时用车，其次是考虑每个用户电动汽车的剩余需充电量和用户的停车时间，因此在实际应用中，有序充电平台的决策者确定权重向量为 $W = [0.25 \ 0.5 \ 0.25]$ 。采用 TOPSIS 方法的用户充电优先级排序结果如表 3 所示。

采取郑州试点电价模型，进行电动汽车有序充

电策略仿真，河南省郑州尖峰平谷的电价模型如表 4 所示。

表 2 车辆原始属性与原始排序

Table 2 Vehicle original attributes and original sorting

原始排序	A1: 需充电量 SOC/%	A2: 等待提车 时间/h	A3: 已停留 时间/h
1	80	10.00	4.50
2	79	10.00	4.00
3	70	9.50	3.50
4	77	9.50	3.50
5	81	10.00	4.00
6	72	9.75	3.50
7	72	9.50	4.00
8	85	9.00	6.25

表 3 采用 TOPSIS 方法的用户充电优先级排序

Table 3 Priority ranking of user charging based on TOPSIS

原始排序	d_i^+	d_i^-	β_i	TOPSIS 排序
1	1.517 7	0.549 9	0.266 0	5
2	1.574 0	0.450 8	0.222 6	7
3	1.257 4	0.710 3	0.361 0	4
4	1.101 9	0.785 0	0.416 0	2
5	1.559 5	0.542 5	0.258 1	6
6	1.443 7	0.367 8	0.203 0	8
7	1.125 7	0.729 6	0.393 2	3
8	0.000 0	1.759 2	1.000 0	1

表 4 有序充电郑州试点的分时电价模型

Table 4 Price model for orderly charging Zhengzhou pilot project

电价类型	时段	电价/(元/kWh)
尖峰	18:00—22:00	0.973
高峰	08:00—12:00	0.862
平段	12:00—18:00 22:00—24:00	0.582
低谷	00:00—08:00	0.303

以上述 8 辆电动汽车参与有序充电为例，展示有序充电的具体应用：用户 1 的充电车辆是比亚迪唐 EV600，用户从 APP 输入的充电需求电量是 52.8 kWh，提车时间是第二天 08:00，电动汽车接入充电桩的时间是 17:30，有序充电的开始时间是 00:15，结束时间是第二天 07:30。结合这两天试点台区的总负荷曲线，可以发现，电动汽车的充电开始时间和结束时间均在电价的低谷时段，相比正常充电节省成本 50.69%。

台区内的 8 辆电动汽车未采用有序充电模式时，台区负荷在 18:00 左右发生越限，突破该台区越限负荷 100 kW 的限制。执行有序充电策略后，电动汽车充电负荷转移到了 00:00—8:00 的电网负荷与电价模型的低谷时段，有效规避了台区负荷越

限值, 峰谷差优化量达到 20.18%, 峰均比优化量达到 35.05%, 用户充电成本节省 48.47%, 达到了平抑负荷波动和节省电动汽车用户充电成本的双重目标。该实施例中执行有序充电策略的效果如表 5。

表 5 有序充电策略应用效果

Table 5 Application effect of orderly charging strategy

充电方式	峰谷差率	均峰比率	用户充电平均成本/元
无序充电	68.54%	55.38%	28.82
有序充电	48.36%	35.97%	14.85
优化量百分比	20.18%	35.05%	48.47%

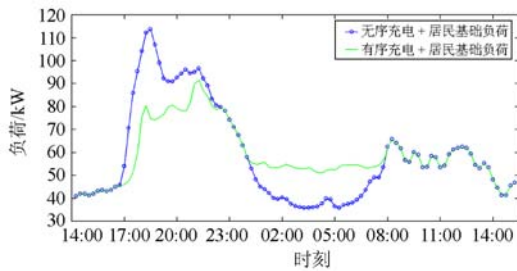


图 5 有序充电策略负荷调控成效

Fig. 5 Load regulation effect of orderly charging strategy

3.2 有序充电仿真验证

鉴于试点台区容量较小, 能够参与有序充电成效验证的电动汽车数量有限, 为进一步说明规模化电动汽车有序充电策略的执行效果, 采用 Matlab 进行仿真。仿真以郑州某台区 24 h 典型居民负荷作为基础负荷, 参与充电的电动汽车的数量为 150 辆、250 辆、350 辆, 其中采用“有序充”服务模式的电动汽车数量与采用“正常充”服务模式的电动汽车数量设置为 4:1; 根据郑州地区电动汽车历史充电信息统计, 采用蒙特卡洛法模拟电动汽车无序充电负荷: 电动汽车无序充电时间在 00:00—12:00、12:00—24:00 分别满足正态分布 $N(8,0.8)$ 、 $N(17,1.2)$, 电动汽车充电电量满足正态分布 $N(32.94,5)$ 、无序充电功率按照 7 kW 计算, 则台区内电动汽车无序充电负荷仿真如图 6。

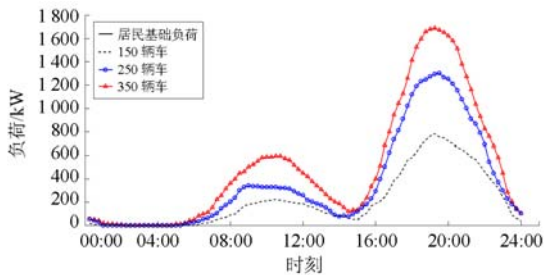


图 6 不同数量电动汽车正常充电负荷仿真

Fig. 6 Simulation of normal charging load for different number of electric vehicles

电动汽车全部正常充电与按照一定比例有序充电(“有序充”服务模式与“正常充”服务模式的电动汽车数量设置为 4:1)的应用成效仿真效果如表 6、表 7 和图 7、图 8 所示。

可看出采用电动汽车集群有序充电策略后, 不同数量的电动汽车仿真效果显示台区运行负荷变化趋于平缓。电动汽车充电高峰 18:00—20:00 的充电负荷转移到台区负荷低谷时段 00:00—08:00, 有效缓解了大规模电动汽车集中充电对电网的调峰和经济运行带来的巨大压力。执行有序充电后, 不同数量

表 6 不同数量电动汽车正常充电时配电网负荷各项指标

Table 6 Indexes of distribution network load under normal charging with different numbers of electric vehicles

参数	原始负荷	150 辆 电动车	250 辆 电动车	350 辆 电动车
负荷峰值/kW	6 601	7 262	7 604	7 933
负荷谷值/kW	2 375	2 375	2 375	2 376
负荷平均值/kW	3 297	4 428	4 291	4 428
峰谷差率/%	64.01	67.28	68.76	70.05
均峰比率/%	40.51	42.89	43.56	44.18
用户平均充电成本/元	—	30.32	30.45	30.38

表 7 不同数量电动汽车一定比例有序充电时配电网负荷各项指标

Table 7 Various indexes of distribution network load under certain proportion of orderly charging with different number of electric vehicles

参数	原始 负荷	150 辆 电动车	250 辆 电动车	350 辆 电动车
负荷峰值/kW	6 601	6 733	6 839	6 932
负荷谷值/kW	2 375	3 059	3 358	3 607
负荷平均值/kW	3 297	4 115	4 254	4392
峰谷差率/%	64.01	54.56	50.89	47.96
均峰比率/%	40.51	38.87	37.80	36.64
用户平均充电成本/元	—	16.01	18.85	21.58

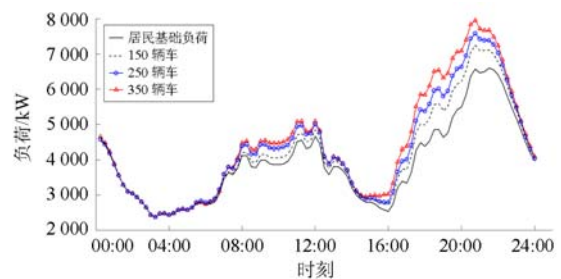


图 7 正常充电台区运行负荷仿真

Fig. 7 Simulation about operation load of transformer area in normal charging

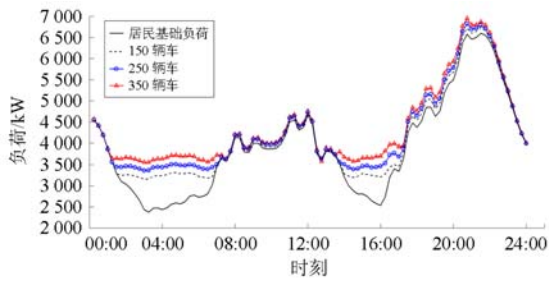


图 8 一定比例有序充电台区运行负荷仿真

Fig. 8 Simulation about operation load of transformer area in certain proportion orderly charging

电动车即 150 辆、250 辆、350 辆电动汽车接入充电桩后,台区负荷峰谷差率分别比原始负荷降低 9.45、13.12、16.05 个百分点,可见参与有序充电电动车充电的数目越多,电动汽车作为移动负荷可调整的区间越大,台区负荷峰谷差率越低,台区负荷变化越平稳。同时,由于采用有序充电,电动汽车的充电时段转移至电价平、谷时段,相较正常充电的充电成本均有所降低。

4 结语

本文以有序充电的实际应用场景为依托,建立有序充电策略模型。在充电优化方面,本文设计双目标分层优化模型,对用户的充电成本进行优化同时兼顾平抑电网的负荷波动。采用的算法模型简单明确,易于工程实现,满足用户侧和电网侧的多方需求,有利于吸纳更多的用户参与有序充电。采用 TOPSIS 排序算法对用户的充电需求进行定量分析。当台区负荷发生越限时,结合不同用户的充电需求优先级对充电功率进行顺序调整。

电动汽车有序充电策略成功运用于河南郑州等地,满足了用户节约充电成本的基本需求,并实现电力负荷削峰填谷的预期目标。今后将在有序充电的需求分析和有序充电多目标优化的算法设计方面继续提升,改进现有的有序充电双目标优化方法,引入多目标、多参数的算法模型,确立均衡优化的系数,提高控制模型的求解能力,并加强对电动汽车充电功率的优化。

参考文献

[1] 国务院. “十二五”节能环保产业发展规划[J]. 中国环保产业, 2012, 5(8): 7-12.
The State Council of China. The development planning of environmental protection in the 12th five-year plan[J]. China Environmental Protection Industry, 2012, 5(8): 7-12.

[2] 于会群, 尹申, 张浩, 等. 考虑电动汽车用户满意度的

微网分层优化调度策略[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 83-91.

YU Huiqun, YIN Shen, ZHANG Hao, et al. Optimization strategy of microgrid hierarchical scheduling considering electric vehicles user satisfaction degree[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 83-91.

[3] 陈旭, 杨柳, 杨振刚. 住宅小区电动汽车有序充电潜力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 122-128.
CHEN Xu, YANG Liu, YANG Zhengang. Assessment of orderly charging potential of electric vehicles in residential areas[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 122-128.

[4] ATIA R, YAMADA N. More accurate sizing of renewable energy sources under high levels of electric vehicle integration[J]. Renewable Energy, 2015, 81: 918-925.

[5] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮. 电动汽车聚合商对备用服务能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 75-81.
WU Ju'ai, XUE Yusheng, XIE Dongliang. Optimization of reserve service capability made by electric vehicle aggregators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 75-81.

[6] 潘振宁, 余涛, 王克英. 考虑多方主体利益的大规模电动汽车分布式实时协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3528-3540.
PAN Zhenning, YU Tao, WANG Keying. Decentralized coordinated dispatch for real-time optimization of massive electric vehicles considering various interests[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3528-3540.

[7] 陈奎, 马子龙, 周思宇, 等. 电动汽车两阶段多目标有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 65-72.
CHEN Kui, MA Zilong, ZHOU Siyu, et al. Charging control strategy for electric vehicles based on two-stage multi-target optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 65-72.

[8] 吴巍, 黄景光, 方伟华, 等. 考虑充电推移时间的居民 EV 有序充放电策略[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(4): 83-88.
WU Wei, HUANG Jingguang, FANG Weihua, et al. EV orderly charge-discharge strategies for residents considering charge delay time[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(4): 83-88.

[9] 蒋怡静, 于艾清, 黄敏丽. 考虑用户满意度的电动汽车时空双尺度有序充电引导策略[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 122-130.
JIANG Yijing, YU Aiqing, HUANG Minli. Coordinated charging guiding strategy for electric vehicles in temporal spatial dimension considering user satisfaction degree[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 122-130.

[10] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 基于动态分时电价的电

- 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.
- [11] 刘志珍, 杨勇, 屈东明, 等. 基于分时电价的电动汽车群有序充电策略研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 21(10): 1-7.
- LIU Zhizhen, YANG Yong, QU Dongming, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicle aggregator based on time-of-use price[J]. Electric Machines and Control, 2020, 21(10): 1-7.
- [12] 付忠广, 杨云溪, 刘炳含. 融合主成分分析的熵权灰色关联度燃气电厂综合评价[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 71-76.
- FU Zhongguang, YANG Yunxi, LIU Binghan. Comprehensive evaluation of gas power plant based on entropy weight grey relevance degree fused with principal component analysis[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 71-76.
- [13] MOJAVER P, KHALILARYA S, CHITSAZ A, et al. Multi-objective optimization of a power generation system based SOFC using Taguchi/AHP/TOPSIS triple method[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020, 38.
- [14] ZHANG X, XU Z. Extension of TOPSIS to multiple criteria decision making with pythagorean fuzzy sets[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2014, 29(12): 1061-1078.
- [15] 苏舒, 李培军, 严辉, 等. 基于 Hotelling 模型的充电服务费双寡头联盟定价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 133-142.
- SU Shu, LI Peijun, YAN Hui, et al. Pricing method of charging service fee duopoly alliance based on Hotelling model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 133-142.
- [16] 魏韡, 陈玥, 刘锋, 等. 基于主从博弈的智能小区代理商定价策略及电动汽车充电管理[J]. 电网技术, 2015, 29(4): 939-945.
- WEI Wei, CHEN Yue, LIU Feng, et al. Stackelberg game based retailer pricing scheme and EV charging management in smart residential area[J]. Power System Protection and Control, 2015, 29(4): 939-945.
- [17] 石进永, 柯慧敏, 李充, 等. 基于分层优化的充电站电动汽车有序充电策略[J]. 电器与能效管理技术, 2018(23): 68-72.
- SHI Jinyong, KE Huimin, LI Chong, et al. A coordinated charging strategy for electric vehicles in charging stations based on hierarchical optimization[J]. Appliance and Energy Efficiency Management Technology, 2018(23): 68-72.
- [18] 王博, 艾欣. 考虑 V2G 用户响应度的峰谷电价时段优化有序充电[J]. 现代电力, 2016, 33(2): 39-44.
- WANG Bo, AI Xi. Coordinated charging of peak-valley time-period optimization by considering V2G user reactivity[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(2): 39-44.
- [19] 李敏, 苏小林, 阎晓霞, 等. 多目标分层分区的电动汽车有序充放电优化控制[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3556-3562.
- LI Min, SU Xiaolin, YAN Xiaoxia, et al. Coordinated charging and discharging of plug-in electric vehicles based on multi-layered and multi-regional optimization[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3556-3562.
- [20] 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.
- [21] 占恺峤, 宋永华, 胡泽春, 等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 11-18.
- ZHAN Kaijiao, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Coordination of electric vehicle charging to minimize active power losses[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 11-18.
- [22] FERNANDEZ L P, GOMEZ S R T, COSSENT R C, et al. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 206-213.
- [23] HE Y, VENKATESH B, GUAN L. Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1095-1105.
- [24] SORTOMME E, HINDI M M, MACPHERSON S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.

收稿日期: 2020-10-11; 修回日期: 2020-11-20

作者简介:

沈国辉(1968—), 男, 硕士, 主要研究方向为电网调度自动化, 智能用电技术; E-mail: sgh315@sina.com

陈光(1982—), 男, 硕士, 主要研究方向为智慧能源电力系统技术, 智能用电技术; E-mail: chenguang_kd@163.com

赵宇(1990—), 男, 硕士, 主要研究方向为综合能源系统, 智能用电技术。E-mail: zhaoyu_kd@163.com

(编辑 姜新丽)