

住宅小区内电动汽车有序充电优化模式

刘星平¹ 李世军^{1,2} 于浩明² 张磊²

(1. 湖南工程学院电气信息学院 湘潭 411101

2. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘要 规模化电动汽车无序充电会给电网的安全运行带来风险和负担。为此,提出两种电动汽车有序充电模式即自动开断充电模式和平滑调节充电模式,在现有住宅小区配电网的基础上,对应地建立以配电变压器、线路容量等为约束条件,以传输给电动汽车电能最大为目标的两种有序充电优化模型,并结合随机模拟和改进粒子群算法求解。以深圳某住宅小区内建立小区充电站为例,分别采用无序充电模式和两种有序充电模式对电动汽车进行充电模拟,比较三种模式下的电压分布和具有响应系数的有序充电模式,计算小区充电站盈利额和负荷波动性等指标,并提出节省成本概念,给予参与有序充电的用户费用补偿。仿真结果表明,两种有序充电模式均能提高电网和用户满意度。充电管理系统可根据需求自行选择其中一种模式运营。

关键词: 电动汽车 住宅小区 有序充电模式 充电功率 小区充电站 节省成本

中图分类号: TM721

Coordinated Charging Optimization Mode of Electric Vehicles in the Residential Area

Liu Xingping¹ Li Shijun^{1,2} Yu Haoming² Zhang Lei²

(1. Hunan Institute of Engineering Xiangtan 411101 China

2. Hunan University Changsha 410082 China)

Abstract The uncoordinated charging of large-scale electric vehicles (EVs) will bring great risks and burdens for safe operation of the grid. Therefore, two kinds of EVs' coordinated charging modes are proposed, that is, the automatic on-off charging mode and the charging mode of the smooth adjustment. On the basis of the existing distribution network of the residential area, two kinds of coordinated charging optimization model were proposed to maximize transmitting electric energy correspondingly, using distribution transformer and line capacity as the constraints. The models were solved by stochastic simulation and improved particle swarm algorithm. Taken the charging station established at a residential district of Shenzhen as an example, the uncoordinated charging mode and two coordinated charging modes of EVs were used. The voltage distributions of the three modes and responding factors of two coordinated charging modes were compared. The amount of profit and the parameters such as load volatility at the residential charging station were also calculated. The concept of saving cost was proposed, to compensate the cost of users who took part in coordinated charging mode. Simulation results showed that both of the coordinated charging modes can improve the satisfaction from the grid and the users, and charging management system can choose either mode according to their own demands.

Keywords: Electric vehicles, residential area, coordinated charging mode, charging power, residential charging stations, saving cost

0 引言

电动汽车能减少有害温室气体排放和对进口石油的依赖,在发达国家受到普遍关注。因此,汽车制造商开始研发各种类型电动汽车,包括纯电动汽车和插电式混合动力电动汽车。全球已开始推广和鼓励电动汽车的使用,未来化石燃料成本增加将会进一步推动电动汽车的发展。

《节能与新能源汽车产业发展规划(2012~2020年)》对电动汽车确定了“充电为主,换电为辅”的原则^[1]。关于电动汽车与电网互动(Vehicle To Grid, V2G)及有序充电研究,国内外学者从不同方面开展了相应的研究工作^[2-11]。电动汽车有序充电控制根据电网的运行状态,一般以经济性最优^[2]或对电网的影响最小^[3-5]为目标,综合考虑电池性能约束与用户充电需求^[10],协调电动汽车充电过程,控制的手段为充电时间和充电功率的大小^[12]。

电动汽车作为可移动、可控制负荷,利用电动汽车负荷特点可以优化电网负荷曲线。根据用户充电规律,文献[2]通过动态响应电网分时电价,以充电站运营收益最大为目标,建立电动汽车有序充电模型。文献[3]以用户充电费用最小和电池起始充电时间最早为目标建立模型,能有效减小峰谷差,并提高用户满意度。文献[4]以充电站收益最大和峰谷差最小为目标,建立两阶段优化模型,对增大充电站经济效益和减小峰谷差等均有显著作用。文献[5]以配电网网损最小为目标,建立电动汽车充电优化模型,起到平抑负荷变化和改善电压水平的作用。文献[6]采用动态规划来优化电动汽车充电时间,降低用户充电成本。文献[7]基于动态响应分时电价,通过启发式算法以最小化用户充电成本和削峰填谷为目标建立有序充电模型。文献[8]基于二次规划和动态规划两种方法比较在无电动汽车接入、电动汽车无序充电和有序充电三种情景下配电网网损大小,评估电动汽车充电对配电网影响。文献[9]分别以馈线损耗、负载率和负荷变化方差为目标建立有序充电模型,用以降低配电网损,提高计算速度。

上述参考文献均通过某一指标或某几个指标来衡量所提出的有序充电策略的优势,主要针对电动汽车充电顺序进行合理优化,但对优化每辆电动汽车充电功率研究较少。本文首先从单辆电动汽车充电功率着手,提出自动开断充电模式和平滑调节充电模式。其次,考虑到目前国内电动汽车数量不断上升,未来极有可能在住宅小区内建立小区充电站,

在原有配电小区不升级改造的前提下,提出一种小区有序充电优化策略:以最大化传输给电动汽车电能为目标,满足所有用户充电需求,并且保证小区配电网安全稳定运行。最后,以深圳某住宅小区为例,采用 Monte-Carlo 方法模拟用户充电行为,通过改进粒子群算法进行求解,比较分析了不同充电模式下的仿真结果。

1 电动汽车出行习惯

据分析中国电动汽车发展现状,电动汽车主要类型有私家车、公交车、出租车和公务车等^[13],2021~2030年电动汽车将加速发展,比例不断攀升。2013年,国家电网调整思路,对私人领域的慢充设施开始放开;政府还提出新小区配套充电桩的新思路,打通电动汽车产业化的“最后一公里”。北京新能源汽车车主可以先跟小区物业联系,确定安装位置和供电电容,而后汽车销售方就可以协调相关部门安装私人充电桩。

本文旨在研究小区充电优化策略,而小区基本以停放私家车为主,因此本文不考虑公交车、出租车和公务车充电情况。私家车主要被用于车主日常工作及休闲娱乐等,具有在居民停车场白天停放时间较短、夜晚较长、能够进行慢速充电等特点,因此有必要专门针对夜间时段制定有序充电策略。

现场数据统计调查发现^[14],用户每天的行驶里程基本集中在20~60km,平均在49km,大多数用户会在电动汽车电量20%~50%选择充电^[3]。如果条件满足,58%的用户会选择在家即所在住宅小区内充电。假设电动汽车用户下班后到达小区即开始充电,选取的充电起始时刻基本服从 $(19,1.5^2)^{[13]}$,即以19:00为均值,1.5h为标准差的正态分布。采用 Monte-Carlo 拟合电动汽车用户出行习惯。

2 充电模式分析

在无序充电模式下,用户将电动汽车连接到交流充电桩即开始以4kW额定充电功率进行充电,充至95%时以1.5kW充电功率充电,直至充满电才断开充电连接。

在有序充电模式下,当电动汽车驶入小区充电站进行充电时,车载充电机连接交流充电桩,电池能量管理系统(Electric Management System, EMS)选择相应充电模式对电动汽车进行充电,并通过网络协议与小区充电站进行信息交互。小区充电站管理人员利用车载EMS控制优化每辆电动汽车充电

功率,从而实现整个小区充电站的有序充电过程。

2.1 自动开断充电模式

自动开断充电模式指根据协议程序在任一时间段内自动开启或终止某一车载充电机充电过程的操作。在某一时段小区负荷接近配电变压器额定容量时,充电管理系统自动断开某一辆或几辆电动汽车充电;当在某一时段小区普通负荷不断下降时,充电管理系统自动选择某一辆或几辆电动汽车再次接入电网充电。

2.2 平滑调节充电模式

平滑调节充电模式指在任一时间段内自动连续调整各车载充电机充电功率的大小。充电机的额定充电功率一般取4kW,在平滑调节充电模式下,充电功率在0~4kW范围内连续变化对电动汽车进行充电。

3 有序充电优化模型

3.1 优化目标

本文的有序充电优化策略目标是在现有住宅小区配电网容量裕度的基础上,调节控制各充电机的充电功率,使传输给电动汽车的电能最大,满足用户充电需求。

3.2 自动开断充电模式下的有序充电模型

根据住宅小区配电网的历史普通负荷,可以预测当日普通负荷曲线,采用96点日负荷曲线预测法,时间间隔为15min。假设在住宅小区内有 N 台交流充电桩,电动汽车大多采用慢充方式进行充电。在自动开断充电模式下,充电机采用恒功率对电动汽车锂电池充电^[15]。

以研究时段内传输给电动汽车电能最大为优化目标

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{EV} x_i(t) \Delta t \quad (1)$$

式中, P_{EV} 为电动汽车额定充电功率;在 t 时段,当第 i 个充电桩没有连接电动汽车或电动汽车充满电时, $x_i(t)=0$,当第 i 个充电桩连接电动汽车且电动汽车未充满电时, $x_i(t)=1$; Δt 为充电时段长度。

约束条件为:

(1) 住宅小区可允许的电压范围约束。电动汽车负荷的接入会使配网节点处产生电压下降,电压下降取决于电动汽车的接入点和充电功率等因素,充电桩处的电压维持额定范围为

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (2)$$

式中, V_i 为第 i 个充电桩的电压; V_{\max} 、 V_{\min} 分别为小区配电网允许的最大、最小电压值。

(2) 变压器容量约束。在 t 时段,住宅小区普通负荷和电动汽车在线充电额定负荷之和应不大于变压器额定输出功率,即

$$\sum_{i=1}^N P_{EV} x_i(t) + P(t) \leq \mu S_N \cos \varphi_N \quad (3)$$

式中, $P(t)$ 为 t 时段住宅小区的普通负荷; S_N 为变压器额定容量; $\cos \varphi_N$ 为变压器额定功率因数,一般取0.95; μ 为变压器负载率,视变压器类别、型号而定,本文假设运行范围30%~65%。

(3) 为避免电动汽车负荷因突然大量接入或切除而对负荷曲线产生大范围波动,应在相邻充电时间段内限制小区充电站内充电功率变化,即

$$\left| \sum_{i=1}^N P_{EV} x_i(t) - \sum_{i=1}^N P_{EV} x_i(t-1) \right| \leq \Delta P_0 \quad (4)$$

式中, ΔP_0 为当前时间段与上一时间段小区充电站的充电功率变化范围,本文取20kW。

(4) 充电容量约束

$$\sum_{t=1}^T P_{EV} x_i(t) \Delta t = (1 - \text{SOC}_{i,0}) \omega_i \quad (5)$$

式中, $\text{SOC}_{i,0}$ 为第 i 辆电动汽车动力电池的初始荷电状态; ω_i 为第 i 辆电动汽车动力电池容量。

(5) 荷电状态连续性约束

$$\text{SOC}_{i,t} = \text{SOC}_{i,t-1} + \frac{P_{EV} x_i(t) \Delta t}{\omega_i} \quad (6)$$

式中, $\text{SOC}_{i,t}$ 为第 i 辆电动汽车在 t 时间段末电池的荷电状态; $\text{SOC}_{i,t-1}$ 为第 i 辆电动汽车在 $t-1$ 时间段末电池的荷电状态。

(6) 由于充电管理系统在 Δt 监测一次处于充电状态的电动汽车EMS,可能在下一时间段内充满电,防止出现过充现象,即

$$P_{EV} \Delta t > (1 - \text{SOC}_{i,t}) \omega_i \quad (7)$$

(7) 线路热负荷约束。网络元件的热负荷指流经该元件视在功率与其额定功率的比值。本文考虑连接变压器线路的热负荷,即

$$L_{MC} \leq L_{MC\max} \quad (8)$$

式中, L_{MC} 、 $L_{MC\max}$ 分别为线路的热负荷、最大热负荷。

3.3 平滑调节充电模式下的有序充电模型

为使所有电动汽车充电功率更均匀的分布和保

证低荷电状态的电动汽车优先高的充电功率，对上一目标函数进行改进，引入 SOC 因子。在平滑调节充电模式下，假设充电功率可以连续变化调节，以研究时段内传输给电动汽车的电能最大为优化目标

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (1 - \text{SOC}_{i,t}) P_{\text{EV}_i}(t) x_i(t) \Delta t \quad (9)$$

式中， $P_{\text{EV}_i}(t)$ 为连接在第 i 个充电桩上的电动汽车 t 时刻的充电功率。

约束条件为：

(1) 电动汽车充电需求不能超过额定输出充电功率，即

$$0 \leq P_{\text{EV}_i}(t) \leq P_{\text{EV}} \quad (10)$$

(2) 针对目前电池技术，为避免充电功率大范围波动，充电功率变化范围约束为

$$P_{\text{EV}_i}(t-1) - \Delta p_0 \leq P_{\text{EV}_i}(t) \leq P_{\text{EV}_i}(t-1) + \Delta p_0 \quad (11)$$

式中， Δp_0 为当前时间段与上一时间段电动汽车充电功率的最大变化范围，不包括电动汽车的投入和切除转变情况，一般取 0.5kW 。

(3) 住宅小区可允许的电压范围约束同式 (2)。

(4) 变压器容量约束。在 t 时段，住宅小区普通负荷和电动汽车在线充电负荷之和应不大于变压器额定输出功率，即

$$\sum_{i=1}^N P_{\text{EV}_i}(t) x_i(t) + P(t) \leq \mu S_N \cos \varphi_N \quad (12)$$

(5) 充电容量约束

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{EV}_i}(t) x_i(t) \Delta t = (1 - \text{SOC}_{i,0}) \omega_i \quad (13)$$

(6) 荷电状态连续性约束

$$\text{SOC}_{i,t} = \text{SOC}_{i,t-1} + \frac{P_{\text{EV}_i}(t) x_i(t) \Delta t}{\omega_i} \quad (14)$$

(7) 由于目标函数引入 SOC 因子，对高 SOC 电池进行低充电功率充电，不会出现过充现象，可不予考虑。

(8) 线路热负荷约束计算方法同式 (8)。

3.4 有序充电控制算法

结合随机模拟，本文采用改进粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) [16] 求解输送给电动汽车最大电能的问题。利用其随机性与遍历性的优势生成初始粒子，可以增强算法搜索的多样性；通过引入算法停滞变异机制，可以增大跳出局部最优并实现全局寻优的机率，避免算法早熟收敛 [17]。此外，为了在迭代过程中更好地平衡算法全局与局部搜索的能力，本文采用动态惯性因子 w 。

$$w = w_{\max} - t' \frac{w_{\max} - w_{\min}}{T_{\max}} \quad (15)$$

式中， w_{\max} 、 w_{\min} 分别为惯性因子的最大、最小值，一般 $w_{\max} = 0.9$ ， $w_{\min} = 0.4$ ； t' 、 T_{\max} 分别为当前迭代次数与设置的最大迭代次数。

使用 PSO 算法进行优化求解时，将第 i 辆电动汽车在 j 时段的充电功率变量 x_{ij} 作为粒子的位置坐标，如式 (16) 所示，粒子维数为 $N \times M$ 。

$$X_I = (\overbrace{x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,M}}^{\text{EV}_1 \text{各时段充电功率}}, \dots, \overbrace{x_{N,1}, x_{N,2}, \dots, x_{N,M}}^{\text{EV}_N \text{各时段充电功率}}) \quad (16)$$

本文只讨论 16:00~次日 6:00 之间的 14h 的充电过程，以 1 次/min 速度上传数据，则可以上传 840 次数据，即 $M=840$ ；若以 24h 作为研究对象，则上传 1 440 次数据，即 $M=1 440$ 。建立的电动汽车有序充电优化模型通过 Matlab 软件仿真编程求解，其算法流程如图 1 所示。

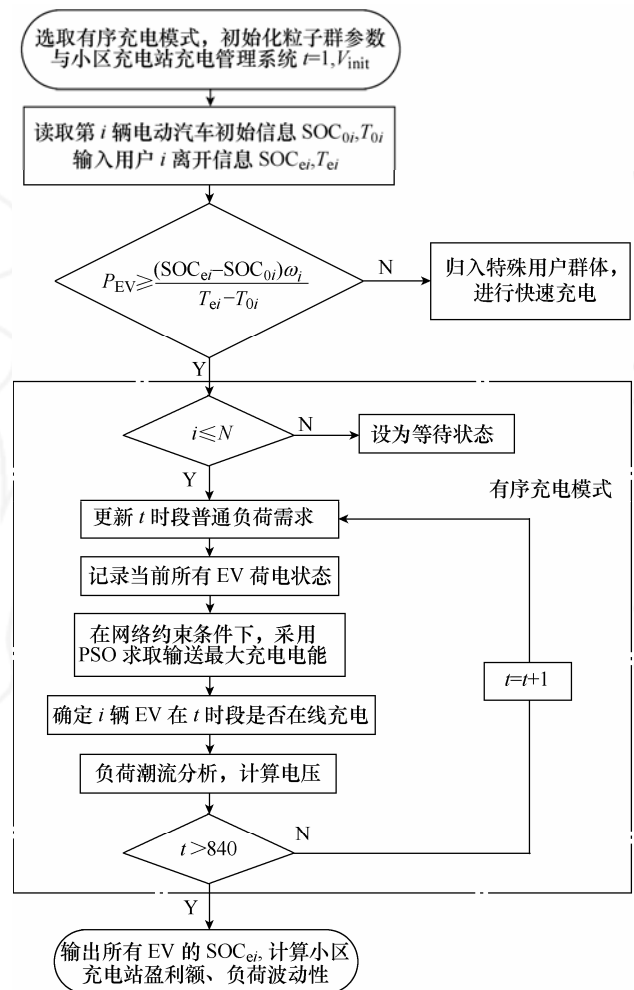


图 1 有序充电优化算法流程

Fig.1 Flowchart of proposed coordinated charging optimization algorithm

4 仿真算例

4.1 住宅小区配电网

以深圳市某住宅小区为例,其模型参数^[18]:两台配电变压器容量为 $630\text{kV}\cdot\text{A}$,电压比 $10\text{kV}/0.4\text{kV}$,三相线路 2.8km ,单相电缆 1.2km ,500家住宅用户,低压配电网电压在额定电压 $220/380\text{V}$ 允许的 $+10\%\sim-10\%$ 范围内波动。

假设:该住宅小区内电动汽车充电规模为100辆,设有60个充电桩,根据普通负荷分布,不均等地将充电桩分为A、B两区。当充电桩全部连接电动汽车时,其他电动汽车设为等待状态。电动汽车电池容量为 $20\text{kW}\cdot\text{h}$,在次日早上 $6:00$ 电动汽车要充满电,以方便用户上班工作^[18]。

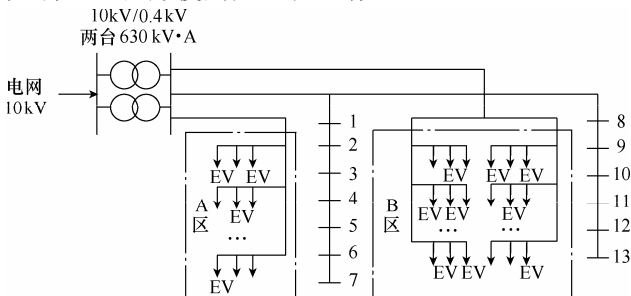


图2 深圳市某住宅小区低压配电网馈线简化模型

Fig.2 The feeder simplified model for a low-voltage distribution in the residential area of Shenzhen city

本文提出的两种有序充电模式,保证连接在充电桩上的电动汽车在用户上班之前充满电或充电至90%以上,满足用户的充电需求。

4.2 三种充电模式比较

4.2.1 电动汽车无序充电模式

电动汽车无序充电通过 Monte-Carlo 随机模拟每辆电动汽车到达时刻和不同的 SOC,并开始充电。在无序充电过程中,所有电动汽车在接入充电桩时即开始以额定功率进行充电,直至充满电才断开充电连接。计及用户普通负荷,负荷曲线往往容

易造成“峰峰叠加”现象,如图3所示。在傍晚电动汽车用户到达住宅小区即开始充电,充电桩数量不足时,电动汽车等待其他电动汽车充满电,再接入充电。如果一台变压器退出检修,单台变压器独自运行,可能会导致在 $21:45\sim 22:30$ 时间段内出现变压器严重过载的现象,线路过热,这在现实情况下是不允许的。

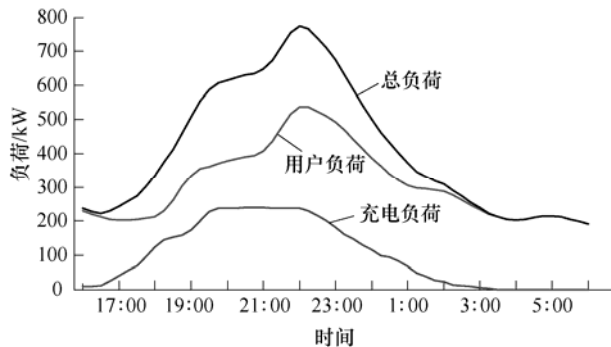


图3 无序充电模式的各负荷变化曲线

Fig.3 The load curve of the uncoordinated charging mode

4.2.2 自动开断充电模式

鉴于在住宅小区内用户出行习惯,基本选取晚上充电,则暂不考虑白天充电,研究当日傍晚 $16:00\sim$ 明日早上 $6:00$ 时间段内有序充电策略。在自动开断充电模式下,根据充电管理系统自动控制充电机的开断状态,用以满足小区配电网安全稳定运行和用户的充电需求^[19]。

如图4所示,在自动开断充电模式下,第11辆到达住宅小区的电动汽车选取在 $20:15$ 充电,为避开负荷高峰 $21:15$ 断开充电, $23:15$ 再次接入充电, $2:15$ 充满电。

当所有电动汽车接入充电时,自动开断充电模式可以在普通负荷量低时选取电动汽车充电,在普通负荷量高时选取断开充电连接,起到了“移峰填谷”的作用,如图5所示。

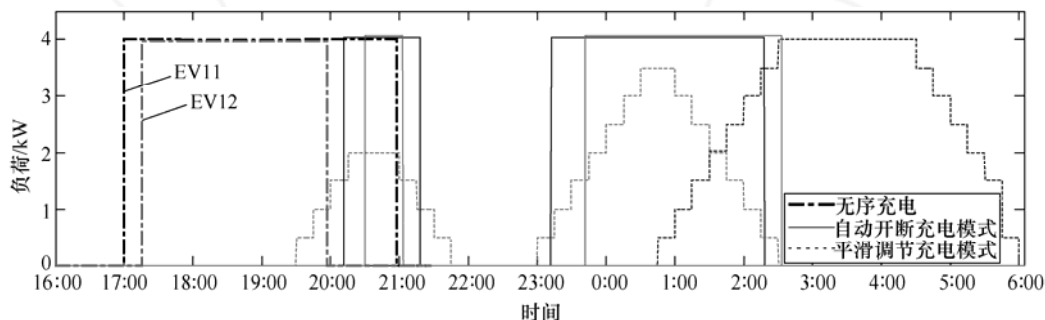


图4 单辆电动汽车在不同充电模式下的充电功率变化

Fig.4 The charging power variation of one electric vehicle at the different charging modes

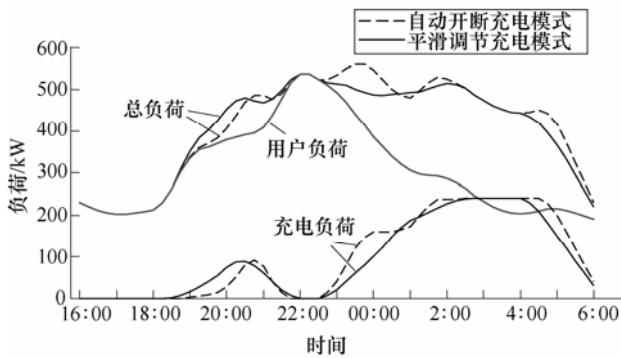


图 5 有序充电模式的各负荷变化曲线

Fig.5 The load curve of the coordinated charging modes

从曲线变化趋势看, 自动开断充电模式降低了无序充电总负荷幅值, 其最高负荷不超过用户最高负荷, 配电变压器和线路能够保证安全正常工作。

4.2.3 平滑调节充电模式

在平滑调节充电模式下, 可连续调节电动汽车充电功率。15min 采集一个数据, 在图 4 中第 12 辆到达住宅小区的电动汽车选取在 19:30 充电, 充电功率不断升高, 为躲开用电高峰期充电功率又降低为零, 23:00 再次接入充电, 0:30 达到最大充电功率 3.5kW, 2:30 充满电。

与自动开断充电模式相比, 平滑调节充电模式总负荷变化曲线更为光滑平缓, 如图 5 所示。

4.3 三种模式下的电压水平

由于电动汽车的接入, 改变了整个负荷的分布, 计算分析 1min 间隔的时间序列负荷潮流^[19], 确定电压变化。在无序充电过程中, 总负荷幅值最大, 电压下降也越大。在图 6 中, 无序充电模式在 21:00~23:00 时间段, 电压下降至 0.9(pu)左右, 而两种有序充电模式的电压水平基本保持在 0.95(pu)以上, 符合正常供电安全稳定要求。

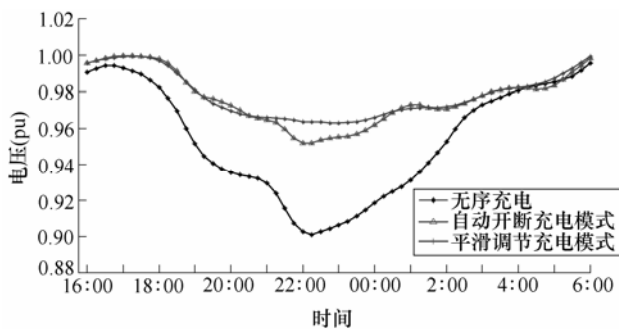


图 6 无序充电和有序充电电压分布水平

Fig.6 The level of voltage distribution for uncoordinated and coordinated charging

4.4 具有响应系数的有序充电模式

由于电动汽车用户受有序充电的引导程度未知, 有必要引入用户响应系数 h ^[3]。定义用户响应系数 h : 根据充电电价补偿, 选择进行有序充电模式的电动汽车用户数量占所有电动汽车用户数量的百分比。

图 7 为两种有序充电模式在用户响应系数 $\eta=50\%$ 的用户负荷、充电负荷和总负荷变化曲线, 图中总负荷最高幅值约 650kW, 超过用户负荷 100kW, 接近变压器负载率限值, 不可长时间运行。因此充电管理方应加以积极引导电动汽车用户, 使更高比例的用户参与有序充电策略中, 通过控制电动汽车充电功率变化, 不仅保证了住宅小区负荷曲线的平缓性, 也降低了用户的充电费用。

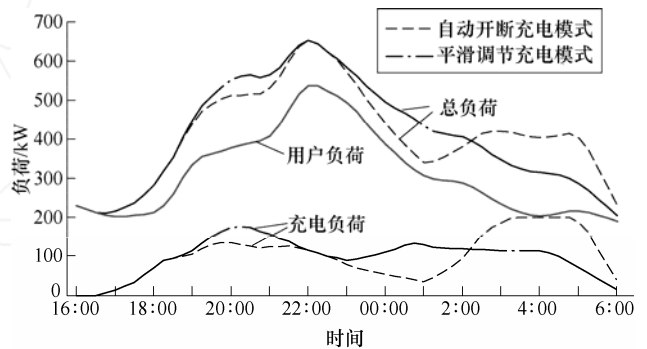


图 7 有序充电模式在 $\eta=50\%$ 的各负荷变化曲线

Fig.7 The load curve of the coordinated charging modes at $\eta=50\%$

4.5 结果分析

电网以分时电价的形式售电^[20], 充电站管理方制定统一充电电价, 电价参数变化见表 1。

表 1 电价参数变化设置

Tab.1 Parameter settings of energy prices		
研究时段	电网分时电价	统一充电电价
	/[元/(kW·h)]	/[元/(kW·h)]
16:00~17:00	0.687	1.2
17:00~21:00	0.869	
21:00~00:00	0.687	
00:00~06:00	0.365	

通过 Monte-Carlo 仿真计算, 所有电动汽车充满电所需要的电能 1442kW·h, 得到有序充电和无序充电仿真结果见表 2。

从表 2 可以看出, 有序充电模式可以提高小区充电站的盈利额, 但所建的住宅小区充电站不是以盈利为目的, 所得盈利扣除充电站基本费用后, 剩余部分假设称之为节省成本, 用于回馈补偿参与有

表2 有序与无序充电仿真结果

Tab.2 Results of coordinated and uncoordinated charging modes

充电模式	盈利额 元/d	负荷 波动性 ($\times 10^4$)	最大 总负荷 /kW	充电 结束 时刻	末荷电 状态 (%)
无序充电	334.787 0	9.041 3	780	3:00	100
自动开断充电模式	523.148 0	4.301 4	550	6:00	100
平滑调节充电模式	576.697 0	4.217 6	550	6:00	100
50%自动开断充电模式	421.649 2	4.994 7	650	6:00	100
50%平滑调节充电模式	465.144 0	6.03 16	650	6:00	100

序充电的用户,从而提高用户响应系数。本文提出一种补偿思路:用户对有序充电的响应系数为 h 时,节省成本为 a ,无序充电时,节省成本为 b ,显然因部分电动汽车参与有序充电而带来的效益为 $a-b$ 。此时,响应系数为 h 时的节省成本 a 可分为两部分: b 与 $a-b$,其分摊方法为, b 在所有电动汽车用户 H 分摊,分摊比例为每辆电动汽车充电量占总充电量的比; $a-b$ 只在进行有序充电的电动汽车用户 ηH 分摊,分摊比例为每辆参与有序充电电动汽车的充电量占总有序充电量之比。

通过该方式结算,使响应本文的两种有序充电模式充电费用更低,吸引更多的电动汽车用户能在住宅小区内参与有序充电模式策略中。

对于电力部门而言,有序充电模式有利于降低负荷曲线的波动性;对电动汽车用户而言,参与有序充电模式有利于获得充电时给予的额外补偿,节省充电费用。在电动汽车规模化后,采取有序充电模式建立小区充电站是一个互利共惠的策略。

5 结论

本文根据充电监控系统实时监测,结合住宅小区电动汽车的实际充电行为,充分考虑电动汽车的不同荷电状态、开始充电时刻以及不同客户充电需求,建立了住宅小区充电站有序充电优化模型。在保证配电网正常运行和变压器不过载的基础上,最大化满足用户充电需求。通过仿真分析,得到以下结论:

(1) 以深圳某住宅小区为例,与无序充电相比,所提出的两种有序充电模式能在原有配电网络正常运行,无需对电网基础设施升级和改造,节约了工程成本。

(2) 平滑调节充电模式盈利额更高,且对小区

负荷曲线更为平缓,而自动开断充电模式简单可靠,两者都对负荷起到了“移峰填谷”作用,如果大规模推广建设,会产生很好的经济效益。

(3) 电动汽车有序充电涉及到电网、充电站、车辆及用户等参与者,均有自身需求特点。下一步研究引入上级系统控制,综合考虑多种因素搭建省、市、站三层运营管理系统构架和信息交互平台,对电动汽车有序充电系统进行整体协调优化。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院.节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)[R/OL]. [2012-06-28]. http://www.gov.cn/jzwgk/2012-07/09/content_2179032.htm.
- [2] 葛文捷, 黄梅, 张维戈. 电动汽车充电站经济运行分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 15-21.
Ge Wenjie, Huang Mei, Zhang Weige. Economic operation analysis of the electric vehicle charging station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 15-21.
- [3] 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.
Sun Xiaoming, Wang Wei, Su Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of electric power systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [4] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 967-973.
Zhang Liang, Yan Zheng, Feng Donghan, et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for EV charging station[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 967-973.
- [5] 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): 11-17.
Zhan Kaiqiao, Song Yonghua, Hu Zechun, et al. Coordination of electric vehicle charging to minimize active power losses[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 11-17.
- [6] Rotering N, Ilic M. Optimal charge control of plug-in hybrid electric vehicles in deregulated electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1021-1029.

- [7] Cao Y, Tang S, Li C, et al. An optimized EV charging model considering TOU price and SOC curve[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 388-393.
- [8] Clement-Nyns K, Haesen E, Driesen J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [9] 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.
- [10] 杨冰, 王丽芳, 廖承林. 大规模电动汽车充电需求及影响因素[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 22-27.
Yang Bing, Wang Lifang, Liao Chenglin. Research on power-charging demand of large-scale electric vehicles and its impacting factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 22-27.
- [11] 陈征, 刘念, 路欣怡, 等. 考虑换电储备的电动汽车光伏换电站动态功率分配方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 306-315.
Chen Zheng, Liu Nian, Lu Xinyi, et al. Dynamic power distribution method of PV-based battery switch stations considering battery reservation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 306-315.
- [12] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-8.
Hu Zechun, Song Yonghua, Xu Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-8.
- [13] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
Luo Zhuowei, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [14] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 13-20.
Zhang Hongcai, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [15] 杨少兵, 吴命利, 姜久春, 等. 电动汽车充电站负荷建模方法[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1190-1195.
Yang Shaobing, Wu Mingli, Jiang Jiuchun, et al. An approach for load modeling of electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1190-1195.
- [16] 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. An improved particle swarm optimization-based load response strategy with participation of vehicle to grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 165-169.
- [17] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 电动汽车充电负荷空间分配优化算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 269-276.
Tian Wenqi, He Jinghan, Jiang Jiuchun, et al. Electric vehicle charging load spatial allocation optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 269-276.
- [18] 张明霞, 庄童. 小区电动汽车充电负荷实测分析[J]. 电力需求侧管理, 2012, 14(3): 44-46.
Zhang Mingxia, Zhuang Tong. Analysis of the measured charging load of electric vehicle in residential area[J]. Power Demand Side Management, 2012, 14(3): 44-46.
- [19] Peter R, Damian F, Andrew K. Optimal charging of electric vehicles in low-voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 268-279.
- [20] 北京市电网峰谷分时售电价表(夏季)[2011-02-11]. <http://www.bjpc.gov.cn/tztg/200911/P020091121010684247161.xls>.

作者简介

刘星平 男, 1966年生, 副教授, 研究方向为电动汽车、电气控制等。

李世军 男, 1982年生, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电动汽车、高压直流输电及交-直流电能变换等。