

基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略

党杰¹, 汤奕², 宁佳², 伏祥运³

(1. 国家电网华中电力调控分中心, 湖北 武汉 430077; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 国网江苏省电力公司连云港供电公司, 江苏 连云港 222004)

摘要: 如何将大规模电动汽车有序充电控制需求在充分考虑充电个体需求和用户意愿的基础上进行合理分配是一个亟待解决的问题。首先提出电动汽车有序充电策略。其次, 以电动汽车用户的意愿为前提, 将每辆电动汽车电池充电次数最少作为目标, 利用电动汽车的历史出行里程和电池实时状态确定电动汽车充电的加权系数, 将电动汽车整体充电安排分解至每一辆电动汽车。最后, 对所提方法进行了仿真验证。结果表明: 考虑不同电动汽车使用特点和充电状态, 约束每辆电动汽车的充电次数, 可以在满足充电负荷要求的基础上安排电动汽车充电次序, 同时减少每辆电动汽车充电次数, 其分配原则具有合理性。

关键词: 电动汽车; 有序充电; 电池状态; 负荷分配; 充电次数

A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule

DANG Jie¹, TANG Yi², NING Jia², FU Xiangyun³

(1. Central China Power Dispatching and Communication Center, Wuhan 430077, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Lianyungang Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Lianyungang 222004, China)

Abstract: It is a serious problem that how to distribute large-scale electric vehicles coordinated charging load with the consideration of every single electric vehicle's charging demands and user intention. Firstly, a coordinated charging strategy for electric vehicles is proposed. Secondly, based on meeting the intention of every electric vehicle user, aiming at minimizing charging times of electric vehicles, charging arrangements for electric vehicles are decomposed to every electric vehicle with the historical driving distances and battery real-time states made as the weighted coefficient. Finally, practical data are applied to the simulation. The results show that with the consideration of application characteristic, charging state and charging times of every electric vehicle, the charging strategy of every electric vehicle is arranged based on the satisfaction of the charging load required. At the same time, the charging times are reduced. The distribution principle proposed is reasonable.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. XT71-12-010).

Key words: electric vehicles; coordinated charging; battery state; load distribution; charging times

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0008-08

0 引言

能源危机的产生和电动汽车各项技术的发展促进了电动汽车的大规模推广, 如今, 各国均加大力度对电动汽车进行政策支持, 可以预计, 未来将有大量电动汽车接入电网^[1-2]。大规模电动汽车接入电网以后引发的经济效益问题和其对电力系统规划运行所产生的影响不容忽视^[3-9]。

如果对电动汽车用户充电行为不加以引导与控制, 电动汽车无序充电会对电网原有负荷造成“峰上加峰”的结果, 影响电网安全稳定运行^[10-12], 并且对经济效益也产生不利影响^[13-14]。因此有必要掌握电动汽车使用规律, 实现电动汽车群集中充电负荷的有序控制。目前, 国内外对电动汽车有序充电研究主要集中在汽车集中充电控制^[15-16], 以平滑配网负荷^[17-19]、改善电能质量^[20-21]、提高配网运行可靠性^[22-25]以及降低用户充电费用^[26]等, 并且取得了较多理论研究成果。

基金项目: 国家电网公司科技项目(XT71-12-010)

然而, 大规模电动汽车的有序充电是通过每一个电动汽车个体的充电行为聚合后形成的群体策略, 在制定电动汽车整体充电策略时, 需要进一步研究如何将该群体策略向下延伸分配至每个个体, 并充分考虑个体的自身条件和意愿, 体现充电策略的公平性和合理性。就目前而言, 如何将区域电网层面的充电策略结果分解至每辆电动汽车上的研究涉及较少^[15]。有文献在提出的电动汽车有序充电模型中, 考虑了每位用户的充电需求或者电池充放电次数约束^[27-28], 然而需要进一步考虑每辆电动汽车的充电策略; 文献[29]提出了一系列原则以实现电动汽车充电负荷的自动分配, 该策略却造成了电动汽车频繁充放电, 影响电池寿命; 有文献提出了电动汽车充放电双层优化模型^[30-31]: 上层模型提出电动汽车集中充放电优化控制策略, 下层模型结合用户意愿和电池储能特性, 制定各电动汽车的充放电方案; 但未考虑电动汽车出行规律影响及电池充放电次数约束等。

本文在提出大规模电动汽车有序充电策略的基础上, 提出了将该群体策略分配至每一辆电动汽车的负荷分配策略, 该策略中综合考虑每辆电动汽车的出行规律、电池状态、用户意愿等因素, 体现出该策略的公平性和合理性。主要内容安排如下: 第1节提出了电动汽车充电调度框架; 第2节介绍了大规模电动汽车有序充电模型与个体电动汽车充电分配模型以及相应的求解方法; 最后进行了算例分析。

1 电动汽车充电调度框架

电力公司首先根据负荷特征以及电动汽车使用情况, 以降低整体电动汽车用户充电费用、减小负荷峰谷差的同时平抑负荷波动为目的, 制定电动汽车总体有序充电计划, 得到一天各个时段电动汽车充电的负荷安排; 进而综合考虑每个用户意愿以及电动汽车自身行驶特征, 将充电负荷公平合理地安排至每辆电动汽车。

对于总体充电策略而言, 将一天时间分为 96 个时间段, 即时间间隔为 15 min, 根据历史常规数据, 预测当日 96 点常规负荷数据和电动汽车接入电网的情况, 并对其进行在线实时优化。

基于总体充电策略结果, 将充电总量分配到每辆电动汽车时, 需要尊重每一位用户的意愿, 由电动汽车用户自行选择是否愿意接受调度。同时, 综合考虑每个时段的理想充电功率与实际可调度的电动汽车数量之间的关系, 具体控制要求为:

- 1) 电动汽车下一时段实际最大充电功率不能满足系统调度指令时, 系统则要求下一阶段所有电动汽车接入电网充电, 尽可能接近系统调度指令。
- 2) 下一时段预测电动汽车最大充电功率能够满足并且超过系统调度指令时, 采用本文提出的有序充电分配模型及优化算法合理分配调度需求。

2 充电模型与求解方法

愿意接受电动汽车充电调度的用户则必须遵守电动汽车充电调度协议。

- 1) 凡是参与协议的电动汽车用户, 需要向系统输入该辆电动汽车的预期停留时间 $T_{n,E}$ 和电动汽车离开充电站时用户期望达到的电动汽车荷电状态 $B_{n,E}$;
- 2) 保证所有参与调度的电动汽车在预期停留时间内达到期望的电池荷电状态;
- 3) 如果用户第二天行程与平时出行里程有较大变化, 需注明;
- 4) 在协议时间内, 电动汽车充电行为由相关部门进行调度规划。

2.1 电动汽车有序充电模型

如图 1 所示, 本文提出的电动汽车充电调度框架包括两层, 上层提出总体充电策略, 确定各个时段的充电策略。

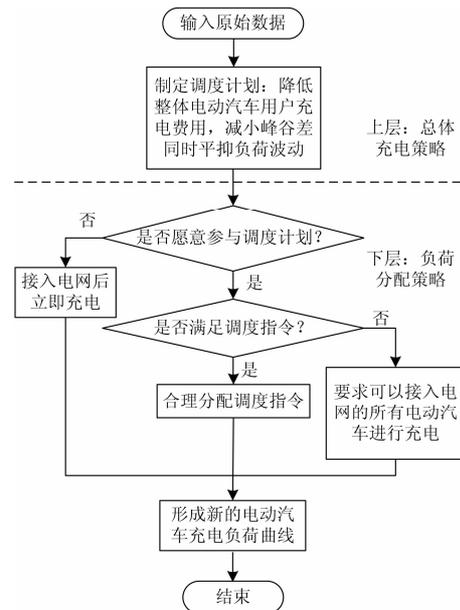


图 1 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电分配策略
Fig. 1 A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule

该充电优化模型以电动汽车充电费用最小为目标, 目标函数为

$$\min f = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{n_t} x_{n,t} P p_t \Delta t \quad (1)$$

式中： $x_{n,t}$ 为第 n 辆电动汽车在以当前时刻起第 t 个时间段的充电决策， $x_{n,t}=1$ 为电动汽车正在充电， $x_{n,t}=0$ 为电动汽车未充电； n_t 为第 t 个时间段待充电的电动汽车总数； P 为电动汽车充电功率； p_t 为第 t 个时间段的电价，本文采用分时电价； Δt 为时间间隔，本文为 15 min； T 为当前时间段内电动汽车的预期停留时间的最大值。

模型中的约束条件如式(2)所示。

(1) 充电需求约束

$$B_{n,E} \leq \sum_{j=t}^{T+t-1} x_{n,j} b_n + B_{n,S} \leq 0.95 \quad (2)$$

式中： $B_{n,S}$ 为第 n 辆电动汽车当前时段的 SOC 数值，在 T 个时间段内，被充电的电动汽车的电池荷电状态应当至少达到充电开始时所需求的最终荷电状态 $B_{n,E}$ ，假设电动汽车所需求的最终荷电状态均为 0.95，同时在充满的情况下应该停止充电，为保证电池寿命，在荷电状态为 0.95 时认为充满； b_n 为充电一个时段可增加的电池 SOC 数值。

(2) 充电时间约束

$$t_{n,E} \leq T_{n,E} \quad (3)$$

被充电的电动汽车需要在用户的设定的预期停留时间内充电完成。 $t_{n,E}$ 为第 n 辆电动汽车充电结束时间； $T_{n,E}$ 为该电动汽车用户设定的预期充电结束时间。

(3) 峰谷差约束

电动汽车接入电网充电，若只注重充电费用的经济效益，可能会加大系统日负荷峰谷差，对系统调度造成不良影响。因此，本文将峰谷差大小作为约束条件之一。

$$|P_{\max} - P_{\min}| < \Delta P \quad (4)$$

其中， P_{\max} 和 P_{\min} 分别为从当日凌晨开始至当前优化时间段结束这段时间内系统负荷的最大值和最小值。结合过去七天内该时段的峰谷差值， ΔP 初值定为这七天中该时段峰谷差最小值，但该值有可能由于偏小造成优化策略无解，如果无解，则 ΔP 递加 1%，直至有解。

(4) 日负荷方差约束

峰谷差和负荷波动较大均会加大电网调度的压力。因此限制峰谷差大小的同时，还要限制电动汽车接入电网后的负荷波动。按式(5)表达。

$$\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (P_j - \bar{P}_a)^2 \leq M \quad (5)$$

$$\bar{P}_a = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_j \quad (6)$$

式(5)的左侧为当日凌晨开始至当前优化时间段结束内负荷方差大小； J 为该时段数值， P_j 为电动汽车充电后第 j 个时间段负荷值； M 初值定为过去七天内该时段的负荷方差的最小值，但该值有可能由于偏小造成优化策略无解，如果无解，则 M 递加 0.1%，直至有解。

2.2 电动汽车充电负荷分配策略

为保证电动汽车电池寿命，应尽量减少电动汽车充电次数，以电动汽车充电次数最小为目标函数，则第 j 时段的目标函数表达式如式(7)所示。

$$\min \Delta p = \sum_{n=1}^{n_j} |x_{n,j} - x_{n,j-1}| \quad (7)$$

其中： n_j 为本时段可以调度的电动汽车总数目； $x_{n,j}$ 为本时段第 n 辆电动汽车的充电决策， $x_{n,j}=1$ ，表示该车辆在充电， $x_{n,j}=0$ 表示该车辆未充电； $x_{n,j-1}$ 为上时段第 n 辆电动汽车的充电决策。

约束条件

$$\sum_{n=1}^{n_j} P_{n,j} x_{n,j} = P_{\text{ref}j} \quad (8)$$

其中： $P_{n,j}$ 为本时段第 n 辆车的充电功率； $P_{\text{ref}j}$ 为本时段可调度的充电功率。

2.3 加权系数设置

(1) 每辆电动汽车用户历史出行规律。电动汽车用户的历史出行数据主要包括开始充电时刻和日行里程两个方面。电动私家车主要用于车主上、下班以及休闲娱乐，在此可将电动私家车的开始充电时刻分为两种情况：夜晚在住所泊位充电及白天在工作地点泊位充电^[32]。

据 2009 年美国交通部对全美家用车辆的调查结果，假设开始充电时刻为最后一次出行返回时刻，电动汽车在家充电开始时刻近似满足如下正态分布^[33]。

$$f_{is}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], (\mu_s - 12) < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], 0 < x \leq (\mu_s - 12) \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\sigma_s=3.4$ ， $\mu_s=19$ 。

对于电动汽车白天在工作地点的开始充电时刻，同样假设其满足正态分布^[27]，概率密度函数为

$$f_{2s}(x) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (10)$$

式中: $\sigma_s = 0.5$, $\mu_s = 9$ 。

日行驶里程满足对数正态分布,

$$f_{1l}(x) = \frac{1}{x\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right] \quad (11)$$

式中: $\sigma_l = 0.88$, $\mu_l = 3.2$ 。

根据日行驶里程, 可计算得到启示 SOC 值为

$$SOC_{初} = \left(1 - \frac{l}{l_{max}}\right) \times 100\% \quad (12)$$

为保证每辆电动汽车充电结束时电池的 SOC 量可以满足第二天的出行里程, 根据每辆电动汽车用户的历史出行规律, 历史出行里程较长的电动汽车优先充电。如果用户设置了第二天的行驶里程, 则参考用户设置, 用户设置的里程越长, 则充电优先级越高。

(2) 电池的实时状态。在充电过程中, 每进入一个新的时段, 系统自动读取每一辆电动汽车当前时段的 SOC 数值, SOC 数值越小, 则该辆电动汽车充电的优先级越高。

加权系数的表达式为

$$\omega_n = \frac{L_{n,c}}{L_{n,h}} \quad (13)$$

式中: $L_{n,c}$ 表示鉴于该时段的电池状态, 第 n 辆电动汽车可以行使的里程; $L_{n,h}$ 表示第 n 辆电动汽车历史出行里程, 本文中, 选择该辆电动汽车前 7 天出行里程平均值。如果用户第二天出行里程与之前发生较大变化, 可自行设置第二天行驶里程, 此时式(13)变化为

$$\omega_n = \frac{L_{n,c}}{L_{n,t}} \quad (14)$$

式中: $L_{n,t}$ 为用户设置的第二天行驶里程; ω_n 数值越小, 表示第 n 辆电动汽车的充电优先级越高。优化目标函数更改为如式(15)。

$$\min \Delta p = \begin{cases} \sum_{n=1}^{n_m} \omega_n |x_{n,j} - x_{n,j-1}|, \omega_n = \inf, n \in \Omega_1 \\ \sum_{n=n_m+1}^{n_j} \omega_n |x_{n,j} - x_{n,j-1}|, n \in \Omega_2 \end{cases} \quad (15)$$

为满足每辆电动汽车都可以在用户期望的时间内将电池充至用户期望的容量, 为每一辆车设置一个必须充电时间, 如果该时段为用户必须充电时间, 则用户必须充电, 并且, 充电优先级最高, 设这类用户属于集合 Ω_1 , 而其余用户属于集合 Ω_2 。

2.4 算法流程

提出大规模电动汽车有序充电策略的基础上, 进一步将该群体策略分配至每个个体, 本文提出的负荷分配策略如图 2 所示。

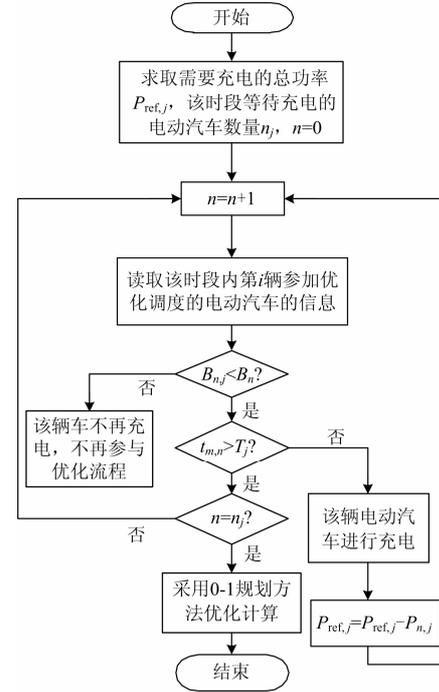


图 2 合理分配充电负荷优化流程

Fig. 2 Flow chart of optimization algorithm for distribution of charging load

3 算例分析

3.1 条件假设

为验证本文算法的有效性和正确性, 以一个居民小区为例。

(1) 该小区拥有 780 住户, 每户居民都拥有一辆汽车, 其中电动汽车共有 100 辆, 电动汽车渗透率为 12.8%;

(2) 用电高峰时期, 平均每户居民用电 4 kW, 即居民总负荷最高峰为 3 120 kW;

(3) 采用常规充电模式对电动汽车进行充电, 并且充电过程中充电功率保持不变, 充电功率为 7 kW, 每辆电动汽车每天充电一次;

(4) 本文采用分时电价, 充电分时电价参数设置如表 1 所示^[34];

(5) 10%电动汽车用户不愿意接受电动汽车充电调度, 在愿意接受电动汽车调度的用户中, 约 5%的用户设置了第二天出行里程;

(6) 设该区域电力系统层面的充电安排已知, 电动汽车有序充电负荷如图 3 所示。

表 1 充电电价参数

Table 1 Parameter of charging tariff in the charging station

时段	电网分时电价/ (元/kWh)
00:00~08:00	0.4
08:00~12:00	2.0
12:00~14:30	1.2
14:30~21:00	2.0
21:00~24:00	1.2

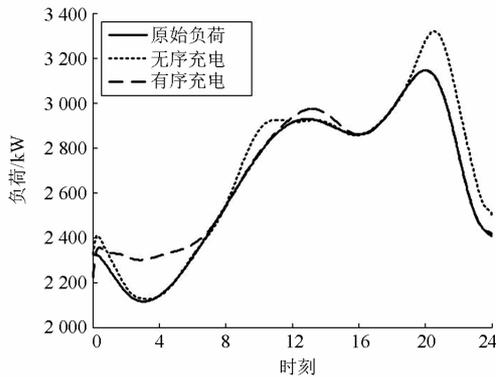


图 3 无序充电、有序充电时电网总负荷及常规负荷曲线
Fig. 3 Curves of grid load for uncoordinated and coordinated charging modes and normal load

3.2 算例结果

由表 2 可知, 采用本文提出的充电策略后, 用户的充电费用大大地降低了, 减少了 69.52%, 同时能够对负荷曲线实现削峰填谷, 减少曲线的波动性。

表 2 用户充电费用、系统负荷峰谷差和方差对比

Table 2 Customer charging fee, peak-valley difference and variance of grid load under two charging modes

充电方式	无序充电	有序充电
用户费用/元	1 726.9	526.4
负荷峰谷差/kW	1.154×10^3	0.826×10^3
负荷方差/ kW^2	1.259×10^5	0.836×10^5

图 4 所示为所有参加调度的电动汽车在是否考虑充电次数情况下的充电次数, 可以看出: 在不考虑充电次数为目标函数的情况下, 电动汽车的充电次数较多, 最多可达到 5 次, 设置了减少充电次数的目标函数后, 大部分电动汽车充电次数有所减少, 最多不超过 2 次, 表 3 所示为所有电动汽车充电次数总和, 考虑充电次数约束后, 充电次数总和减少达到 49.34%。

图 5 为无序和有序充电模式下不同时段愿意接受调度的电动汽车数量对比, 可以看出, 无序充电模式下的电动汽车充电集中在晚间负荷高峰时段和

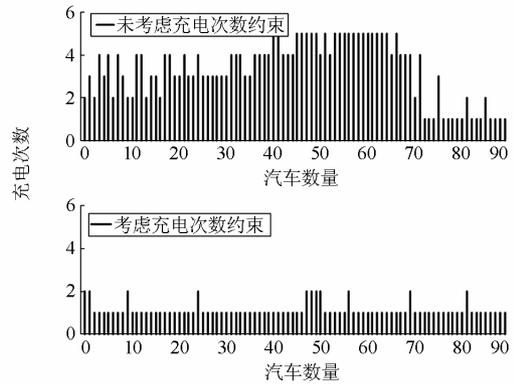


图 4 是否考虑充电次数情况下电动汽车充电次数
Fig. 4 Charging times for electric vehicles under the consideration of charging times or not

表 3 电动汽车充电次数总和对比

Table 3 Comparison of charging times for electric vehicles

是否考虑充电次数约束	充电次数总和
是	116
否	229

白天负荷高峰时段, 同时也是电价较高时段, 经过优化, 电动汽车充电集中于夜间负荷低谷和白天负荷平时段。

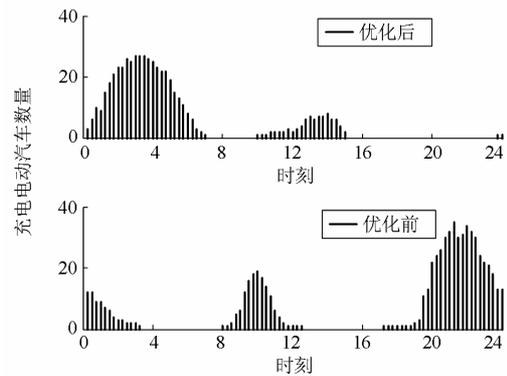


图 5 两种充电模式下不同时段充电汽车数量
Fig. 5 Number of charging electric vehicles between the two different charging modes

图 6 所示为四辆电动汽车在有序充电和无序充电两种情形下充电过程对比, 为了在图中可以清晰表示结果, y 轴不表示数值大小, 仅表示充电与否, 即充电, 则数值大于 0, 不充电则数值为 0。四辆电动汽车接入时间接近, 加权系数大小如表 4 所示, 由图 6 可以看出, 经过电动汽车有序充电调度, 电动汽车充电时段由负荷高峰时段转移至负荷低谷时段, 并且, 加权系数小的电动汽车充电时间较早, 符

合本文提出的加权系数越小充电优先级越高的理论。

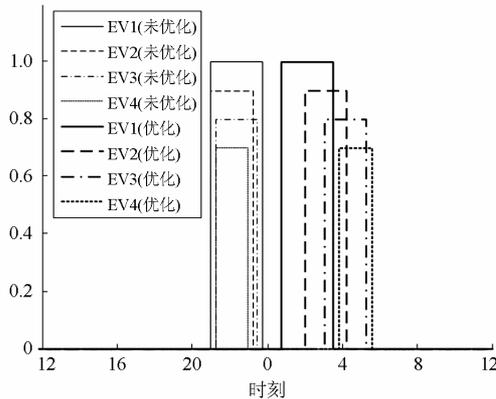


图 6 两种充电模式下电动汽车充电过程

Fig. 6 Comparison of charging process for electric vehicles between the two different charging modes

表 4 两种充电模式下电动汽车充电数据

Table 4 Charging data of electric vehicles between the two different charging modes

车辆编号	初始加权系数大小	接入系统时间
1	1.36	21:00
2	1.40	21:00
3	1.43	21:15
4	1.45	21:15

通过以上仿真分析可以看出, 本文提出的电动汽车充电调度策略在完成充电要求的同时, 可以减少电动汽车充电启停次数, 并结合用户意愿和电动汽车出行特征, 对每辆电动汽车进行充电调度, 具有公平合理性。

4 结语

本文以服从电动汽车用户意愿为前提, 充分考虑每一辆电动汽车的出行规律, 提出了电动汽车充电负荷分配策略: 以每辆电动汽车充电次数最少为目标, 综合考虑不同电动汽车的历史行车规律和电池实时状态以确定充电加权系数, 将电动汽车充电群体策略分解到电动汽车个体, 仿真结果可以表明:

(1) 经过有序充电, 电动汽车充电集中时段由负荷高峰时段转移至夜间负荷低谷时段和白天负荷平时段, 削减了峰谷差;

(2) 在尊重电动汽车用户的前提下, 每个时段充电负荷分配策略都与电动汽车自身特征紧密联系, 安排电动汽车充电次序的同时, 减少每辆电动汽车的充电次数, 策略具有公平合理性。

参考文献

[1] 戴诗容, 雷霞, 程道卫, 等. 分散式电动汽车入网策略

研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 57-63.

DAI Shirong, LEI Xia, CHENG Daowei, et al. Study on V2G strategy of distributed electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 57-63.

[2] 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.

[3] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.

MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.

[4] YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A hierarchical decomposition approach for coordinated dispatch of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2768-2778.

[5] GAN L W, TOPCU U, LOW S H. Optimal Decentralized protocol for electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 940-951.

[6] 赵俊华, 文福拴, 杨爱民, 等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 2-10.

ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 2-10.

[7] 张静, 汤奕, 陈成, 等. 考虑分时电价和系统峰谷差动态约束的电动汽车有序充电策略[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(5): 79-84.

ZHANG Jing, TANG Yi, CHEN Cheng, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles considering time-of-use price and peak-valley difference dynamic constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(5): 79-84.

[8] 董开松, 丁岩, 谢永涛, 等. 基于需求侧响应的微电网市场优化模型[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 122-126.

DONG Kaisong, DING Yan, XIE Yongtao, et al. Market

- Optimization model for microgrid with demand response[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 122-126.
- [9] 戴欣, 袁越, 王敏, 等. 配网中电动汽车调度策略及其经济效益评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 42-47.
- DAI Xin, YUAN Yue, WANG Min, et al. Scheduling strategy and economic benefits evaluation of electric vehicles in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 42-47.
- [10] 李惠玲, 白晓民. 电动汽车充电对配电网的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 38-43.
- LI Huiling, BAI Xiaomin. Impacts of electric vehicles charging on distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 38-43.
- [11] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
- GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [12] QI Wei, XU Zhiwei, SHEN Zuojun, et al. Hierarchical coordinated control of plug-in electric vehicles charging in multifamily dwellings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1465-1474.
- [13] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 大规模电动汽车充放电优化控制及容量效益分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 19-25.
- LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging and discharging of large-scale plug-in electric vehicle with cost and capacity benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 19-25.
- [14] 黄润. 电动汽车入网对电网负荷影响的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- HUANG Run. Impacts of electric vehicles charging on the load of power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [15] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
- WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [16] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 电动汽车换电站有序充电调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 114-119.
- TIAN Wenqi, HE Jinghan, JIANG Jiuchun, et al. Research on dispatching strategy for coordinated charging of electric vehicle battery swapping station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 114-119.
- [17] 葛少云, 黄镠, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 1-5.
- GE Shaoyun, HUANG Liu, LIU Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5.
- [18] TAN Zhao, YANG Peng, NEHORAI A. An optimal and distributed demand response strategy with electric vehicles in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 861-869.
- [19] TIMPNER J, WOLF L. Design and evaluation of charging station scheduling strategies for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2014, 15(2): 579-588.
- [20] 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 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): 11-18.
- [21] RICHARDSON P, FLYNN D, KEANE A. Optimal charging of electric vehicles in low voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 27(1): 268-279.
- [22] SCHNEIDER K, GERKENSMEYER C, KINTNER-MEYER M, et al. Impact assessment of plug-in hybrid vehicles on pacific northwest distribution systems[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1-6.
- [23] 郑颖, 孙近文, 张冲, 等. 考虑电动汽车接入的配电系统静态电压稳定裕度研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 20-26.
- ZHENG Ying, SUN Jinwen, ZHANG Chong, et al. Study of voltage stability margin for the distribution network with electric vehicle integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 20-26.
- [24] 孙近文, 万云飞, 郑培文, 等. 基于需求侧管理的电动汽车有序充电策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 64-69.

- SUN Jinwen, WAN Yunfei, ZHENG Peiwen, et al. Coordinated charging and discharging strategy for electric vehicles based on demand side management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 64-69.
- [25] 陈磊, 黄琦, 张昌华, 等. 考虑故障影响的电动汽车充电系统控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 117-122.
- CHEN Lei, HUANG Qi, ZHANG Changhua, et al. Study on control strategy of EV charging system considering fault influence[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 117-122.
- [26] 邹文, 吴福保, 刘志宏. 实时电价下插电式混合动力汽车智能集中充电策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 62-67.
- ZOU Wen, WU Fubao, LIU Zhihong. Centralized charging strategies of plug-in hybrid electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 62-67.
- [27] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 38-43.
- XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.
- [28] 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.
- [29] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed v2g (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 559-564.
- [30] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 30-36.
- YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-36.
- [31] YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A hierarchical decomposition approach for coordinated dispatch of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 28(3): 2768-2778.
- [32] 蒋毅舟. 规模化电动汽车用电需求的空间分布预测[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- JIANG Yizhou. The spatial distribution forecast of charging demand for large-scale electric vehicles[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [33] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
- TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [34] 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.

收稿日期: 2014-11-10; 修回日期: 2015-04-23

作者简介:

党杰(1981-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网运行分析和计算。E-mail: dangchunqiu@163.com

汤奕(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, 需求响应技术; E-mail: tangyi@seu.edu.cn

宁佳(1992-), 女, 博士生, 研究方向为智能电网, 需求响应技术; E-mail: nj_0318@163.com

(编辑 葛艳娜)