

基于自适应遗传算法的规模化电动汽车 智能充电策略研究

张聪¹, 许晓慧², 孙海顺¹, 周鑫¹

(1. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;
2. 中国电力科学研究院, 北京 100000)

摘要: 电动汽车充电负荷在时空上具有不确定性, 大规模电动汽车无序充电会导致配电网峰值负荷超过设备允许极限, 给电网运行带来严重影响。以平滑配电网日负荷曲线为优化目标, 建立了考虑各电动汽车用户充电需求约束的规模化电动汽车智能充电控制策略求解模型, 并采用自适应遗传算法求解。以 IEEE33 节点配电网系统为例, 基于蒙特卡洛随机模拟规模化电动汽车并网场景, 对比研究了无序充电和智能充电两种控制模式下电动汽车负荷对配电网的影响, 验证了利用所提方法对实现平滑负荷的有效性。

关键词: 蒙特卡洛模拟; 自适应遗传算法; 智能充电; 电动汽车; 配电系统

Smart charging strategy of large-scale electric vehicles based on adaptive genetic algorithm

ZHANG Cong¹, XU Xiao-hui², SUN Hai-shun¹, ZHOU Xin¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100000, China)

Abstract: Electric vehicles connected to the grid exhibits strong uncertainty in time and space. Dumb charging of large-scale electric vehicles might have adverse impacts on distribution system by causing much high peak load exceeding the supply limits of devices. This paper proposes a model for smart charging control of electric vehicles, which takes smoothing the daily load profile as the objective function and fully accounts the EV owner's requirement. An adaptive genetic algorithm is applied for solving the model. Using the IEEE 33-bus case as the test systems, scenarios of EVs integration are simulated by Monte Carlo stochastic methods. Smart charging strategy is obtained using the proposed model and method. By comparing with the load profile under dumb charging, the validity of the proposed model is proved.

Key words: Monte Carlo simulation; adaptive genetic algorithm; smart charging; electric vehicles; distribution networks

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0019-06

0 引言

全球气候和环境问题促使世界各国将大规模开发利用可再生能源作为能源安全战略。电动汽车的发展对于促进可再生能源有效利用和减少化石燃料消耗具有双重重要的意义, 因而得到了广泛的关注^[1]。

大规模电动汽车如果随机无序地接入电网充电, 将对整个电力系统的调度、规划、控制及保护等各方面产生不可忽视的影响。在时间尺度上, 随

机充电将可能导致电网的峰值负荷出现“峰上加峰”的现象, 超过现有配电网的供电能力和承受能力, 从而引起电压越限、支路过载等一系列问题。在空间尺度上, 无序分散接入可能会导致配电网的三相不平衡, 损害网络的电能质量及增大电能损耗等不利影响^[2-4]。为此, 开展以减小规模化电动汽车接入对配电网影响为目标的充电控制策略研究, 已成为人们关注的热点问题。

文献[5-6]提出通过分时电价政策的引导, 实现电动汽车充电功率向日负荷波谷转移的办法, 但当大规模电动汽车集中并网或者谷电价时段设计的不合理可能导致在负荷低谷期形成新的负荷尖峰, 产生出新的问题。文献[7]以总充电费用最小和总负荷

基金项目: 国家电网公司基础性前瞻性科技项目资助 (NY71-13-014)

曲线波动最小的双重控制目标,研究了换电模式下电动汽车充电的控制策略,但文中基于大量假设,缺乏一定的实用性。文献[8]提出最小负荷方差、最大负荷因数和最小网损三种不同的目标函数,并对比了三种模型的优化结果和计算时长,但其考察的是负荷节点的总负荷功率,并未涉及针对每辆电动汽车制定合适的充电计划。文献[9]建立了一个以配电网网损最小为目标的电动汽车充电优化模型,并考虑了用户的充电需求以及电压幅值等约束。文献[10]研究了以电动汽车充电负荷均匀分配和充电时间、路程最少为目标的多目标优化问题,并比较了粒子群算法及遗传算法的计算特性。

本文以电动私家车常规充电模式为研究对象,结合规模化电动汽车时空特性及充电特性,考虑用户的充电需求以及电网安全稳定运行约束等条件,以电网总负荷曲线标准差最小为控制目标,建立了规模化电动汽车的智能充电策略求解数学模型,并提出自适应遗传算法对充电计划进行了优化计算。基于所提的模型和方法,以 IEEE33 节点配电系统为例,对比研究了智能充电与无序充电两种充电模式对配电网的影响。

1 规模化电动汽车充电负荷的影响因素

影响规模化电动汽车充电负荷的因素很多,主要可概括为电动汽车规模、电池特性、充电模式、用户行为、充电策略等方面^[12]。

电动汽车的电池容量决定了汽车行驶的最大里程及充电频率,电池容量越大,汽车行驶里程越远,充电频率也就相应越低。可是不同的车型,电池容量各不相同,一般而言,对电动公交车的电池容量要求要比对电动私家车大很多。

目前充电模式有常规充电、快速充电、更换电池三种模式。常规充电是以比较低的充电电流在较长的时间内对蓄电池进行慢速充电,一般充电时间为 8~10 h,该模式主要针对大量低电压(220 V)分布式充电点(主要集中于居民楼和办公区停车场),其优点是充电设施成本低、体积小,可实现车载。快速充电模式是指在短时间内使蓄电池达到或接近充满状态的一种充电方法,其典型的充电时间是 10~30 min。该模式可以快速解决续航里程不足时的电能补给问题,但对电网要求较高,只适合大型充电站使用。更换电池是通过直接更换电动汽车的电池组来达到充电的目的,整个电池更换过程可以在 10 min 内完成。对更换下来的电池,一般采用常规充电方式进行集中充电。该模式不需要现场充电,因此可安排在负荷低谷时段进行,有利于缩减电网

峰谷差,同样有效地解决了一般蓄电池续航里程短等难题,且有利于电池的维护和回收。但该模式需要建设大型集中充电站,要建设专用电网,且要求电池的外形、参数等统一。

影响电动汽车电力需求的用户行为主要包括电动汽车的起始充电时间、起始电量、期望电量等内容。用户的起始充电时间越集中,规模化电动汽车的电力需求则越突出,对电网的冲击也就越大。起始电量反应了用户的耗电量,而在一定充电功率下,期望电量则决定了充电的持续时间。本文参照文献[13]基于马尔科夫链研究电动汽车出行规律的方法,以此确定电动汽车充电时间和结束时间。

同理,不同的充电策略,电动汽车的电力需求也不同,目前充电策略主要分为无序充电、分时电价政策、智能充电三种^[14]。无序充电一般是在最后一次出行回来之后或者当电池电量低于一定阈值时开始充电,可想而知,大规模的无序充电将会给电网带来诸多的不利影响。分时电价政策是一种普通的市场调节机制,是指在负荷低谷期通过降低电价从而引导用户在低谷期充电,起到一定的填谷作用。智能充电则是指通过合理安排电动汽车的充电计划,实现电网的最优运行。

2 电动汽车智能充电优化数学模型

2.1 目标函数

本文研究一天当中电动汽车的充电计划安排,将一天分为 T 个时间段。以第 i 辆电动汽车在时刻 t 是否充电为自变量,以总负荷标准差最小为控制目标,即

$$\min \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N (x_i^t \times P_{EVi}) \times \eta + P_{loadt} - P_{avg} \right]^2} \quad (1)$$

式中: N 为电动汽车总数; T 为总的计算时长; x_i^t 为“1/0”的自变量表示电动汽车 i 在 t 时刻充电与否; P_{EVi} 表示电动汽车 i 的额定充电功率,单位 kW; η 表示充电效率; P_{loadt} 为在 t 时刻网络中的常规负荷总量大小,单位 kW; P_{avg} 表示日负荷曲线的平均值, P_{avg} 的具体计算公式如下:

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N (x_i^t \times P_{EVi}) \times \eta + P_{loadt} \right] \quad (2)$$

2.1 约束条件

(1) 用户充电需求约束

为了在离开时达到用户的需求,需要满足约束条件:

$$SOC_i^i \leq 100 \quad (3)$$

$$0 \leq SOC_{td}^i - SOC_{t_0}^i \leq \frac{\sum_{t=t_0}^{td-1} (x_t^i \times \Delta T \times P_{EVi}) \times \eta}{C^i} \times 100 \quad (4)$$

式中: $SOC_{t_0}^i$ 表示第 i 辆电动汽车的起始电量; ΔT 表示计算时间步长; C^i 表示第 i 辆电动汽车的电池额定容量。该公式是对充电时间进行约束, 表示在用户离开时, 电动汽车的电量至少达到用户期望值。

式(5)给出了各个时刻电量的递推公式:

$$SOC_{t+1}^i = SOC_t^i + \frac{(x_t^i \times \Delta T \times P_{EVi}) \times \eta}{C^i} \times 100 \quad (5)$$

式中, SOC_{t+1}^i 表示时刻 $t+1$ 的电动汽车的电量。显然, 如果 $x_t^i = 0$, 则 $SOC_{t+1}^i = SOC_t^i$, 表示如果当前时刻电动汽车不充电, 汽车电量在下一时刻不发生变化。

(2) 不可控时间约束

$$x_t^i = 0; \quad t_d^i \leq t < t_0^i \quad (6)$$

式中: t_0^i 为电动汽车并网时刻, 本文假定用户最后一次出行结束时刻就并入电网; t_d^i 为电动汽车离开时刻。该式表示只有电动汽车处于并网状态下才可能充电。

(3) 节点电压约束

$$U_j^{\min} \leq U_j^t \leq U_j^{\max} \quad (7)$$

式中: U_j^{\max} 和 U_j^{\min} 分别表示节点 j 的电压上下限约束。

3 自适应遗传算法

遗传算法 (GA) 是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的随机化搜索方法, 通过选择、交叉、变异等一系列运算, 以进化过程中所得到的具有最大适应度个体作为最优解输出。然而简单遗传算法采用固定的交叉概率和变异概率, 忽略了群体进化过程中的自适应特性, 这将会影响全局搜索能力, 过早收敛陷入局部最优。自适应遗传算法 (AGA) 采用动态生成的办法确定自适应交叉和变异概率, 以此保持个体遗传的多样性, 防止遗传算法过早收敛到局部最优。通过 AGA 与 GA 在处理一些优化问题的对比发现, AGA 可快速地收敛至全局最优, 因此, 文本采取自适应遗传算法来研究电动汽车智能充电策略。

自适应交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 可以通过下式得到:

$$P_c = \begin{cases} P_{c_max} - \left(\frac{P_{c_max} - P_{c_min}}{M} \right) \times Gen & fit^l > fit_{avg} \\ P_{c_max} & fit^l \leq fit_{avg} \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{c_max} 为最大交叉概率; P_{c_min} 为最小交叉概率; Gen 为当前迭代次数; M 为最大的迭代次数; fit^l 表示一次交叉运算中较大的适应度; fit_{avg} 表示当前迭代中全部个体的适应度平均值。

$$P_m = \begin{cases} P_{m_min} + \left(\frac{P_{m_max} - P_{m_min}}{M} \right) \times Gen & fit > fit_{avg} \\ P_{m_min} & fit \leq fit_{avg} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{m_max} 为最大变异概率; P_{m_min} 为最小变异概率; Gen 为当前迭代次数; M 为最大的迭代次数; fit 表示当前变异运算中个体的适应度。图 1 为自适应遗传算法的运算流程图。

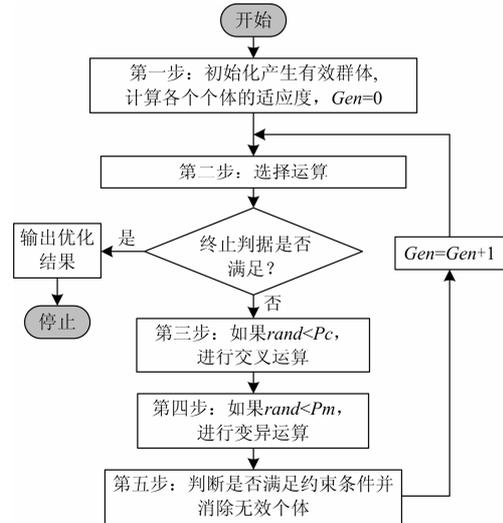


图 1 自适应遗传算法的运算流程图

Fig. 1 Operation flow chart of the adaptive genetic algorithm

运算开始前, 需要对自适应遗传算法的环境变量进行设置, 如最大迭代次数 M 、种群规模 N 、交叉和变异的参数 P_{c_max} 、 P_{c_min} 、 P_{m_max} 、 P_{m_min} , 具体运算步骤如下所示:

第一步: 初始化, 产生有效群体, 并且计算各个个体的适应度;

第二步: 选择运算, N 个具有较好适应度的个体被选择并保留下来。如果最优适应度满足设定的目标, 或者达到最大迭代次数, 则输出最优结果并停止运算, 否则进入下一步;

第三步：交叉运算，当随机变量小于自适应交叉概率则执行双亲双单点交叉，从而由 N 个父代个体产生 $2N$ 个子代个体，父代和子代合并形成一个新的种群；

第四步：变异运算，对于新种群，当随机变量小于自适应变异概率则进行变异。

第五步：对 $3N$ 个体进行约束条件判断，消除无效个体，并且保留适应度较优的 N 个体，重新返回到第二步，迭代次数增加一次。

对于研究规模化电动汽车智能充电的问题，本文采用二进制编码的自适应遗传算法，用自变量 x_t^i 表示第 i 辆电动汽车在 t 时刻的充电状态， $x_t^i = 1$ 表示充电； $x_t^i = 0$ 表示不充电。

4 算例分析

以 IEEE33 节点的居民配电网为例，如图 2 所示，研究规模化电动汽车在无序充电和智能充电两种充电策略下充电负荷对配电网的影响，算例系统常规日负荷曲线如图 3 所示^[15]。

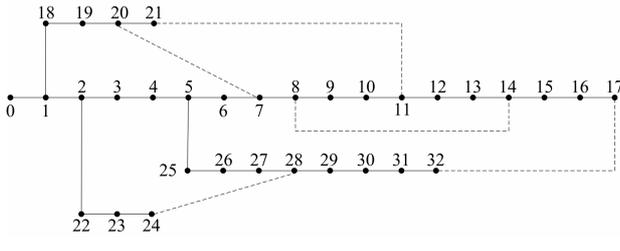


图 2 IEEE33 节点配电系统

Fig. 2 IEEE 33-nodes distribution system

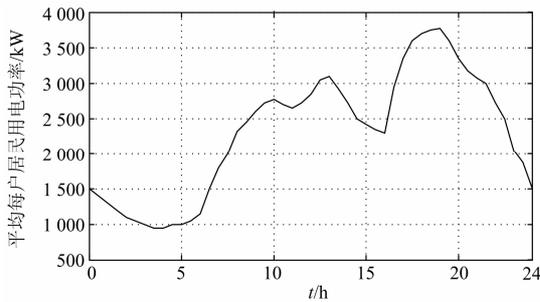


图 3 常规日负荷曲线

Fig. 3 Daily load profile of the test system

假设该区域拥有电动汽车 600 辆，用户选择在最后一次出行回来并入电网，因此每辆电动汽车起始充电时间 t_0 、离开时间 t_d 可由马尔科夫链模拟得到^[13]。

考虑实际情况，将所有的电动汽车负荷在地理空间上按照每个节点的常规负荷占总负荷的比例分

配至不同的节点进行充电^[14]，即如下公式所示：

$$N_j = \frac{P_{loadj}}{\sum_{j=1}^M P_{loadj}} \times N \quad (10)$$

式中： N_j 是节点 j 所分配到的电动汽车个数； N 是电动汽车总数； P_{loadj} 为节点 j 连接的常规负荷大小； $\sum_{j=1}^M P_{loadj}$ 为配电网中常规负荷的总量； M 为网络中节点个数。

为了简化分析，统一假定每一辆电动汽车的额定电池容量 $C^i = 60 \text{ kWh}$ ；采取常规充电模式，额定充电功率 $P_{EVi} = 4 \text{ kW}$ ；充电效率 $\eta = 95\%$ ；起始电量 SOC_{i0}^i 服从截断高斯分布，其均值为 40，方差为 20，最小 SOC_{i0}^i 为 20，最大 SOC_{i0}^i 为 50；用户期望的充电电量为服从 (80, 100) 之间的均匀分布。

本文设置自适应遗传算法的具体参数设置为：遗传迭代次数 80 次，种群内个体总量 200 个，最大交叉概率 $P_{c_max} = 0.9$ ，最小交叉概率 $P_{c_min} = 0.4$ ，最大变异概率 $P_{m_max} = 0.1$ ，最小变异概率 $P_{m_min} = 0.01$ ，具体的运算流程如图 4 所示。

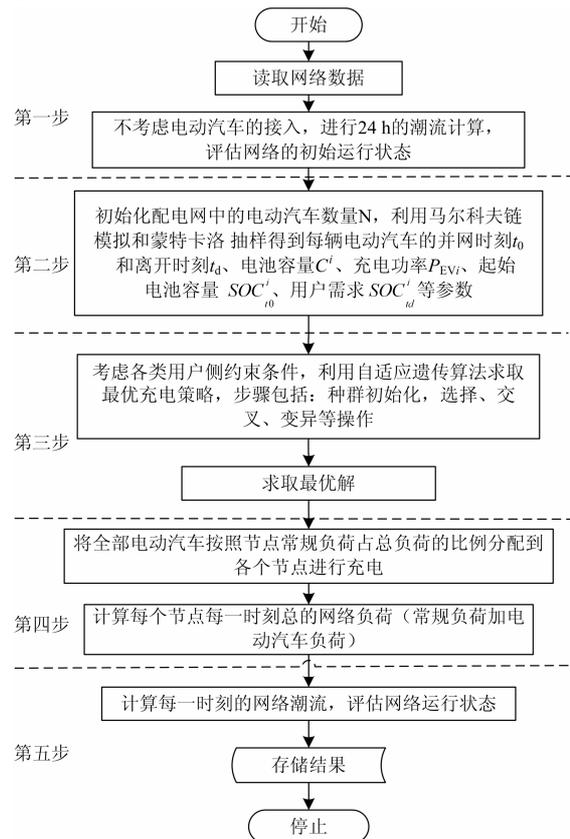


图 4 智能算法流程图

Fig. 4 Flow chart intelligent algorithm

将本文所提的智能优化充电策略与无序充电进行比较, 结果如图 5 所示。

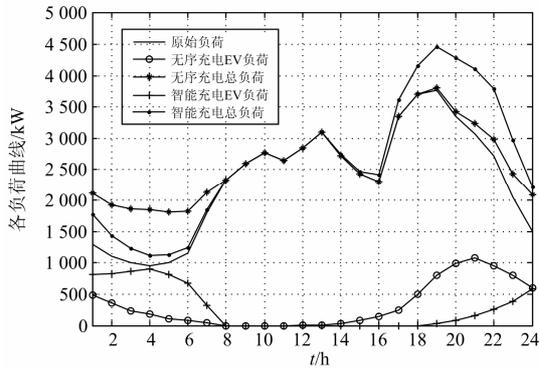


图 5 两种充电策略下电动汽车充电负荷曲线

Fig. 5 Load curves under two control strategies

表 1 中峰谷差率为负荷峰谷差与负荷峰值的比值。从图 5 和表 1 中可以看出, 在无序充电策略下, 用户在最后一次出行回来之后接入电网, 即刻开始充电, 因此在傍晚电动汽车负荷与原始负荷重叠出现“峰峰”现象, 增大了系统峰谷差, 电力资源的利用率下降, 并将会对电网产生不利影响。而智能充电策略下, 大部分电动汽车的充电负荷被转移至原始负荷低谷期, 相比无序充电起到削峰填谷的作用, 减小峰谷差, 使总负荷曲线变得更加平坦, 有利于减少机组启停次数, 改善系统运行的安全性与经济性。

表 1 系统负荷水平指标比较

Table 1 Comparisons of system load level indexes

充电策略	负荷值/kW		峰谷差率/%	总负荷标准差
	峰荷	谷荷		
原始负荷	3775	958	74.6	627.3
无序充电	4467	1122	74.8	983.5
智能充电	3811	1816	52.3	339

该模型中节点 17 的电压偏移最大, 能够反映出电动汽车接入对节点电压的影响, 具有代表性, 因此取该点为研究对象, 研究该节点电压的偏移情况。图 6 所示为节点 17 各个时刻的电压偏移。从图中可以看出, 智能充电能够有效减小电压偏移。

从表 2 可以看出, 智能充电的网络损耗相比无序充电减小, 这是因为当一天中负荷总量一定时,

表 2 系统网络损耗比较

Table 2 Comparisons of system losses

充电策略	网络损耗/%
智能充电	3.27
无序充电	3.47

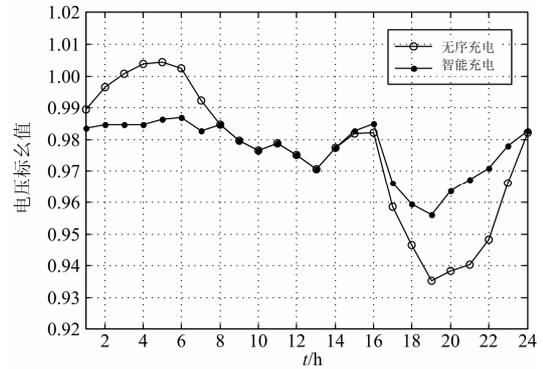


图 6 节点 17 的电压偏移比较

Fig. 6 Comparisons of voltage deviation of bus 17

日负荷曲线越平坦, 损耗就越小; 反之, 峰谷差越大, 损耗就越大。

图 7 为该优化算法的收敛效果曲线, 当迭代大约 60 次的时候, 得到了最优解, 证明了该优化算法具有较好的收敛性。

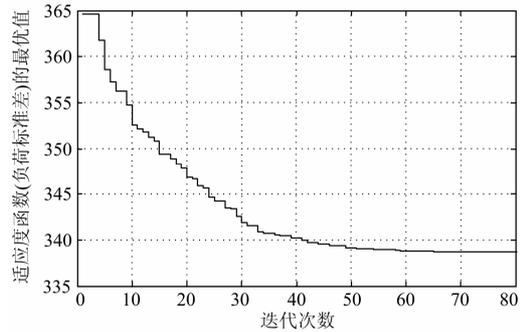


图 7 该优化算法的收敛效果曲线

Fig. 7 Convergence of the optimization algorithm

5 小结

本文提出了一种规模化电动汽车智能充电控制策略的求解模型和求解方法, 该模型的关键是考虑用户充电需求及电网侧约束等条件, 以总负荷标准差最小为优化目标, 通过算例研究了以各电动汽车充电计划为控制变量的智能充电控制策略, 并对无序充电方式电动汽车对负荷的影响, 验证了本文模型与方法的有效性。基于本文模型和方法, 还可以考虑其他类型的目标函数, 比如可再生能源发电的最大消纳, 等。此外, 基于蒙特卡洛多场景随机模拟和配电网潮流计算, 该模型还可用于评估给定规模电动汽车接入对配电网的影响, 以及配电网最大电动汽车渗透水平。

参考文献

[1] 张文亮, 武斌, 李武峰, 等. 我国纯电动汽车的发展方

- 向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 1-5.
- ZHANG Wen-liang, WU Bin, LI Wu-feng, et al. Discussion on development trend of battery electric vehicles in China and its energy supply mode[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 1-5.
- [2] 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 Ling-ling, 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.
- [3] 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 Ci-wei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [4] KRISTIEN C N, EDWIN H, JOHAN D. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [5] 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 Xiao-ming, 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.
- [6] 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 Shao-yun, 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.
- [7] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 换电模式下电动汽车电池充电负荷建模与有序充电研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 1-10, 212.
- LUO Zhuo-wei, HU Ze-chun, SONG Yong-hua, et al. Study on charging load modeling and coordinated charging of electric vehicles under battery swapping modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 1-10, 212.
- [8] ERIC S, MOHAMMAD M H, JAMES MAC PHERSON S D, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [9] 王秀云, 任志强, 楚冬青. 用于降低网损的配电网网络优化重构方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 21-24.
- WANG Xiu-yun, REN Zhi-qiang, CHU Dong-qing. Study of algorithm on distribution network optimum reconfiguration for reducing line loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 21-24.
- [10] 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 Wen-qi, HE Jing-han, JIANG Jiu-chun, et al. Electric vehicle charging load spatial allocation optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 269-276.
- [11] 张学清, 梁军, 张利, 等. 计及风光电源的一种地区电网电动汽车充电调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 28-35.
- ZHANG Xue-qing, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Approach for plug-in electric vehicles charging scheduling considering wind and photovoltaic power in Chinese regional power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 28-35.
- [12] 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 Li-fang, LIAO Cheng-lin. 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.
- [13] SOARES F J. A stochastic model to simulate electric vehicles motion and quantify the energy required from the grid[C] // Power Systems Computation Conference.
- [14] GARCIA-VALLE R, LOPES J A P. Electric vehicle integration into modern power networks[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [15] KRISTIEN C, EDWIN H, JOHAN D. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.

收稿日期: 2014-04-29; 修回日期: 2014-07-08

作者简介:

张 聪 (1987-), 男, 硕士研究生, 从事电动汽车与电网交互机理研究; E-mail: 821469812@qq.com

许晓慧 (1981-), 男, 高级工程师, 从事智能电网研究工作;

孙海顺 (1971-), 男, 副教授, 从事电力系统分析与数字仿真研究工作。