

DOI: 10.3724/SP.J.1224.2014.00092

“智能交通：技术、管理与产业化”专刊

智能电动车辆最优充电路径规划方法

罗禹贡, 严弈遥, 朱 陶, 李 强

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 未来交通环境下, 大规模的智能电动车辆将与城市智能交通网和智能配电网相互作用并相互影响。本文将三者有机结合起来, 建立了“车-网-路”智能交互系统模型。该模型包括城市中压配电网模型、道路交通网模型和以快速充电方式充电的大规模智能纯电动汽车模型。在此基础上, 基于 Dijkstra 最短路径算法, 提出了具有实时电网和交通信息反馈的智能电动车辆最优充电路径规划方法。最后, 通过 MATLAB 和 MATPOWER 联合仿真系统对该规划方法进行了仿真评价。仿真评价结果表明, 本文提出的最优充电路径规划方法, 相比目前广泛采用的最近充电路径规划策略, 将能有效降低大规模智能电动车辆快速充电对道路交通网和中压配电网的不利影响。

关键词: 智能电动汽车; 智能交通网; 智能配电网; 充电路径规划

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2014)01-0092-07

引言

环境污染的日益严重、石化资源的日渐枯竭使得电动汽车的大规模应用成为必然趋势^[1-2], 然而大规模智能电动汽车的充电行为, 势必会对智能交通系统和智能电网系统等带来影响。大规模智能电动汽车与智能交通系统、城市智能电网系统的相互作用关系及影响机理, 以及对其的分析评价, 已逐步成为该领域的研究热点。

然而, 目前的研究工作大多只从电动汽车与电网系统、电动汽车与交通系统两个方面独立展开。其中, V2G (Vehicle to Grid) 描述了电动汽车与电网之间的一种互动关系, 许多学者研究了电动汽车接入电网后其充放电特性对电网的影响及相关应用。G. A. Putrus^[3]与高赐威^[4]等进行了电动汽车接入对现有配电网的影响分析。除了简单的影响分析外, 还有一些文献提出了电动汽车

与电网系统之间的整合, J. A. P. Lopes 等就提出了这种概念性的框架, 以期电动汽车的接入能给电网带来益处^[5]。E. Sortomme 等则是利用单向 V2G, 提出智能充电算法, 以实现成本最低化、对系统负载影响最小化及利润最大化^[6]; 韩海英以削峰填谷的形式减小电动汽车接入对电网的影响^[7]。很少文献单独探讨电动汽车接入对交通网的影响, 但是关于道路运行状况评价的研究却从未中断过。祝付玲^[8]和沈屹楠^[9]都进行了城市道路交通评价体系构建的研究, 以实现车辆在城市道路网中行驶时的交通评价。Yuichi Kobayashi 等探讨了基于地理位置和交通状况为电动汽车规划充电路径的方法^[10]。Sweda T. M 等探讨了以使用成本最低为最优化目标的电动汽车充电路径优化方法^[11]。Yang Shunneng 等讨论了利用电动汽车与充电站之间的交互信息、以总充电时间最少为目标

收稿日期: 2013-09-09; 修回日期: 2013-11-28

基金项目: 科技部国际科技合作计划资助课题“面向中美清洁能源合作的电动汽车前沿技术研究”(2010DFA72760)

作者简介: 罗禹贡 (1974-), 男, 副研究员, 研究方向为车辆动力学及控制。E-mail: lyg@tsinghua.edu.cn

严弈遥 (1990-), 女, 博士研究生, 主要从事电动车辆充电路径规划研究。E-mail: ina.yiyaoyan@gmail.com

的充电路径推荐策略^[12]。在电动汽车大量应用后, 能够将交通系统与电力系统结合起来进行分析的研究还非常少见, Qinglai Guo 等初步建立了同时利用交通信息和充电站负荷信息进行充电站推荐的构架, 但着重点是减少充电负荷对配电网的影响^[13]。

纵观目前的研究, 大多局限于电动汽车与交通网的交互及电动汽车与配电网的交互, 结合交通情况和配电网情况对大规模电动汽车进行充电路径规划的研究还十分少见。因此, 本文的研究目标是提出一种基于交通网和配电网信息的大规模智能电动汽车的最优充电路径规划策略, 使智能电动汽车充电行为对智能电网和智能交通网的负面影响降到最低。

1 “车-网-路”智能交互系统模型

首先, 将大规模智能电动汽车、智能配电网和智能道路交通网结合起来, 建立“车-网-路”智能交互系统模型。

1.1 智能道路交通网模型

所建智能道路交通网模型参照了北京三环以内道路的交通情况, 区域面积约 165 km², 包含道路 249 条, 平均道路长度 1.08 km。将实际城市道路抽象为有向网络, 节点代表道路交叉路口, 弧段代表道路。

以 $R_n = (N, D, L, V_m, C)$ 表征路网, 其中:

- 1) N 表示节点集合, 共 817 个节点;
- 2) D 用于描述各弧段长度及节点间的连接关系、单双通行特性:

$$D(p, q) = \begin{cases} a(p, q), & p \text{ 节点到 } q \text{ 节点的路段长度} \\ 0, & p = q \\ \text{Inf}, & \text{路段 } (p, q) \text{ 不连通} \end{cases} \quad (1)$$

- 3) L 表示道路等级, V_m 表示各道路的零流速度, C 表示通行能力。不同等级道路的通行能力和最高限速不同, 各道路等级对应的零流速度和通行能力如表 1 所示。

表 1 各等级道路零流速度和通行能力

道路等级	零流速度/(km·h ⁻¹)	通行能力/(veh·h ⁻¹)
1	80	1200
2	60	900
3	50	660
4	40	660
5	30	540

数据来源: 文献[14]。

1.2 智能配电网模型

根据所建智能交通网规模, 建立三个辐射状 10 kV 智能配电网。各智能配电网的拓扑结构基于 IEEE 33 标准配电网模型, 容量均为 60 MVA, 线路电阻和电抗均为 0.1 Ω/km, 节点 1 均与主变电站相连 (可视为电源点)。

以 $D_n = (N_d, B, G)$ 描述配电网, 其中:

- 1) N_d 描述节点, 包括节点类型 $Type$ 、有功功率 P 、无功功率 Q 、参考电压 V_{base} 、节点电导 G 和电纳 b , 即

$$N_d = \{Type, P, Q, V_{base}, G, b\} \quad (2)$$

- 2) B 描述支路, 包括起始节点 f_{Bus} 、终止节点 t_{Bus} 、电阻 R 、电抗 x 、电纳 b 和极限传输功率 $Rate$, 即

$$B = \{f_{Bus}, t_{Bus}, R, x, b, Rate\} \quad (3)$$

- 3) G 表示主变电站的节点位置 Bus 和容量 S , 即

$$G = \{Bus, S\} \quad (4)$$

每个充电站视为 10 kV 智能配电网的一个集中负荷。快速充电的效率可达到 99%^[15]。某个充电站在任何一个时间段的总充电负荷, 可以认为是该充电站中所有电动汽车充电功率之和^[16]:

$$P_{EVloadt} = \sum_{i=1}^I P_{i,t} \quad (5)$$

其中, $P_{EVloadt}$ 为该充电站在 t 时间段的总充电负荷, I 为该时间段在充电的智能电动汽车总量, $P_{i,t}$ 为第 i 辆智能电动汽车在 t 时间段的充电功率。模型共建立 9 个充电站, 分布于 3 个 10 kV 智能配电网内, 各充电站信息如表 2 所示。

表 2 充电站信息

编号	路网位置	车辆容量/ 辆	配电网节点 数目	节点	负荷阈值/ MW
1	3	45	33	23	1.5
2	24	100	25	14	4.5
3	35	100	25	18	4.5
4	165	60	33	19	1.5
5	183	45	33	4	1
6	465	45	33	30	1
7	532	90	27	7	1.5
8	727	90	27	14	2
9	766	90	27	18	2.5

1.3 大规模智能电动汽车模型

系统中共有 12 000 辆快速充电的智能电动汽车, 用 $IEV = (Loc, CS, BR_R, BR_0, BR_F, CP, EE, CL)$ 描述其状态, 其中:

1) Loc 为电动汽车的节点位置集合: 初始时刻, 智能电动汽车随机分布在智能交通网的任意一个节点上; 行进中, 智能电动汽车在每一时间段末的位置由其行驶路径和交通信息可以统计得到。

2) CS 为智能电动汽车所前往的充电站集合: 对于行驶过程中需要充电的车辆, CS 的值为充电站编号, 由充电路径规划的结果得到; 对于不需要充电的车辆, CS 的值为零。

3) BR_R 为续航里程集合。

4) BR_0 为智能电动汽车开始行驶的时间段的剩余里程集合, 在 130~160 km 间任意取值。

5) BR_F 为当前时间段的剩余里程集合: 在智能电动汽车开始行驶之后的每一个时间段, 由上一个时间段末的剩余里程减去当前时间段内行驶的距离得到。

6) CP 为充电功率集合: 假设所有智能电动汽车在充电站都能按照其快速充电功率充电; 由两种电池的充电功率曲线可知, 在剩余电量 30%~80% 时, 可近似认为功率恒定充电^[17], 因此系统中假设充电功率恒定, 某辆车的充电功率在 25~60 kW 任意取 5 的倍数。

7) EE 为每公里耗电量集合: 假设电动汽车的耗电量与行驶距离成线性关系, 即 EE 为常值,

取 $EE = 0.15(\text{kWh/km})$ 。

8) CL 为充电阈值集合: 剩余里程小于充电阈值时, 驾驶员为车辆充电, CL 在续航里程的 30%~70% 取任意值。

1.4 车-网-路子系统间联系与信息交互

智能电动汽车的行驶路径将其与智能交通网相联系, 由各车辆的行驶路径可以得到各路段车流量和通行速度, 而车速又取决于车辆所在路段的通行速度。智能电动汽车的充电功率将其与智能配电网相联系, 由其前往的充电站、剩余里程等信息可以统计各充电站负荷, 而智能配电网信息是为车辆推荐充电站时的主要考虑因素。充电站在路网中的位置将智能交通网与智能配电网相联系, 由交通信息可以得到充电站的负荷随时间的变化情况, 充电站的车辆数量又与其周围的交通情况密切相关。

2 最优充电路径的规划方法

在以上系统模型的基础上, 提出基于智能电网和智能交通网信息的大规模智能电动车辆最优充电路径的规划方法。该方法基于 Dijkstra 算法, 以智能电动汽车位置为起点、各充电站为终点, 在一次寻优过程中, 得到起点和终点之间有向路权值的最小值及对应的充电站。该方法的核心是在为每一辆智能电动车辆规划路径前, 利用实时的智能电网和智能交通网反馈信息对路段权值进行修改, 从而实现智能配电网和智能交通路网系统最优化。各路段权值的修改过程如图 1 所示。

2.1 交通权值

在每一个时间段初, 对交通权值进行修改。路网中任一可通行路段 $(p, q) \in A$ (A 为路段集合), 其交通权值为路段长度 $a(p, q)$ 除以该时间段中该路段的通行速度 $V_{road}\{p, q\}(j)$ (j 为时间), 即该路段的通行时间。通行速度 $V_{road}\{p, q\}(j)$ 由上一个时间段末该路段的车流量 $T_r\{p, q\}(j-1)$ 和经典车速-流量模型得到:

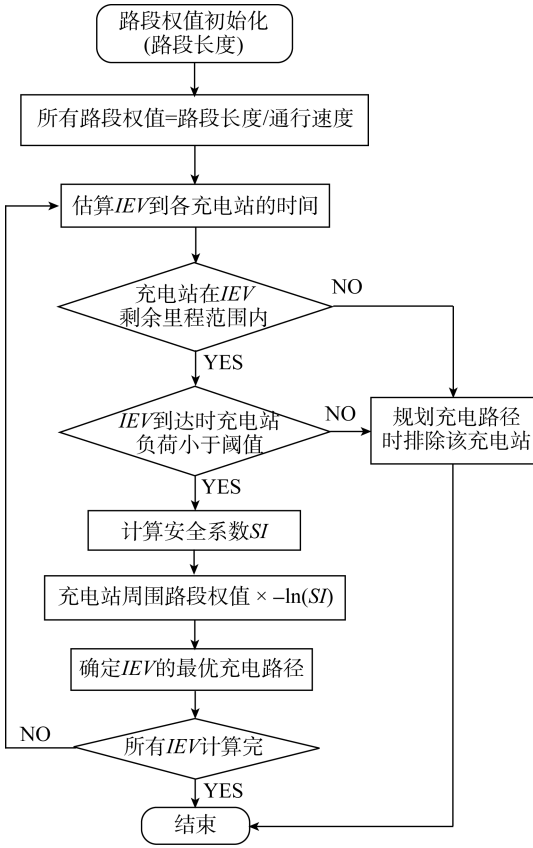


图1 路段权值修改流程图

注: IEV表示智能电动车辆。

$$V_{road}\{p, q\}(j) = \frac{V_m\{p, q\}}{1 + T_r\{p, q\}(j-1) / C\{p, q\}} \quad (6)$$

其中, 某路段的零流速度 $V_m\{p, q\}$ 和道路通行能力 $C\{p, q\}$ 为已知常量; 初始时刻 (可认为 $j=0$) 所有路段的车流量均为零, 所有路段的通行速度为其最高限速。因此, 路段 $(p, q) \in A$ 的交通权值就由其在上一个时间段末的车流量 $T_r\{p, q\}(j-1)$ 确定。各路段车流量由对车辆每个时间段所经过路段的统计结果得到。

2.2 电力权值

为每辆智能电动车辆规划最优充电路径前, 都进行电力权值的计算。由于智能配电网的各项指标都与节点潮流存在一定关系, 因此, 通过约束各充电站的充电负荷, 可以改善智能配电网的性能指标。设置电力权值就是为了控制各充电站的负荷, 从而达到降低大规模智能电动汽车充电

行为对智能电网影响的目的。

电力权值的计算过程如下:

首先, 基于各智能配电网的节点电压偏移率规律和实际供电需求, 设置合理充电站负荷阈值。然后, 估算智能电动车辆到达各充电站的时间 t_0 。对于某一辆车, 若其到达某充电站 r 时, 该充电站负荷小于阈值, 且该充电站在电动汽车的剩余里程范围内, 则计算该充电站的安全系数 SI_r , 如公式 (7) 所示。

$$SI_r = 1 - P_{cs}(r, t_0) / P_{lim}(r) \quad (7)$$

其中, $P_{cs}(r, t_0)$ 为 t_0 时充电站 r 的负荷估计值 (由车辆的充电功率及对其开始和结束充电时间的估计值得到), $P_{lim}(r)$ 为在充电站 r 的负荷阈值。此时, 充电站 r 周围一定范围内的道路的电力权值为 $-\ln(SI_r)$ 。如果充电站不在智能电动汽车的剩余里程范围内, 或者充电站负荷已经超过负荷阈值, 则此充电站附近道路的电力权值为无穷大, 即在规划充电路径时排除该充电站。

3 仿真分析

建立了基于 MATLAB 和 MATPOWER 的联合仿真系统, 对大规模智能电动车辆最优充电路径的规划方法进行了仿真分析, 与基于当前车辆已有信息的最近充电站规划方法进行了对比。仿真分析过程中, 对 12 000 辆智能电动车辆 6:00—12:00 的运行情况进行了统计。

3.1 智能交通网的结果分析

为了对比分析两种规划策略, 图 2 给出了某时刻各充电站的智能电动汽车数量。从图可知, 采用最近充电路径规划策略时, 充电站 5 的车辆数量远远超过其容量, 将造成该充电站充电等候时间过长和充电站系统资源利用不合理等问题。

除了充电站情况, 为了对比两种策略对智能交通网的影响, 首先选取路网拥堵率 R_c 评价道路交通网的整体运行情况。通常, R_c 定义为拥堵路段条数/道路总条数, 当路段通行速度小于零流速

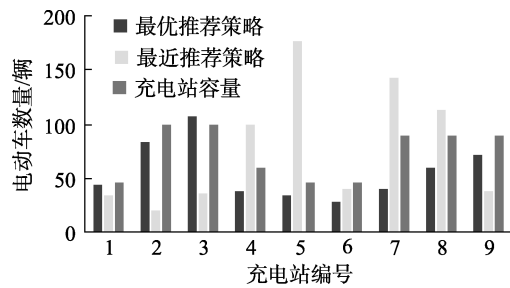


图2 各充电站的智能电动车辆数量对比

度的 0.5 倍时, 则认为该路段拥堵。两种规划策略下, 充电站 5 附近的路网拥堵率如图 3 所示。

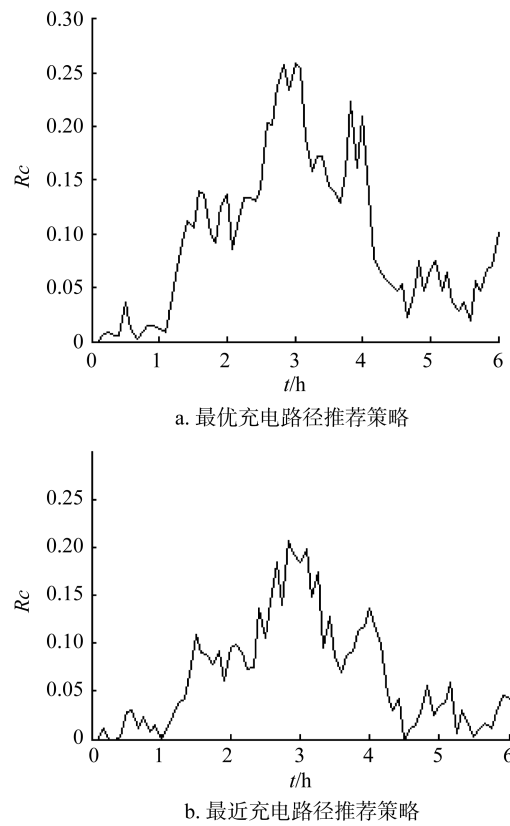


图3 充电站 5 附近路网的拥堵率对比

另外, 选取道路饱和度 γ 表征单条道路的交通运行状况, γ =路段车流量/通行能力。两种推荐策略下, 充电站 5 附近道路在各时间的道路饱和度的平均值如图 4 所示。

从以上结果可知, 结合智能交通网和智能配电网信息为智能电动车辆选择最优充电路径时, 能够有效控制各个时段前往各充电站充电的电动汽车数量, 避免一段时间内某充电站的电动汽车聚集所带来的周围道路的交通拥堵问题。

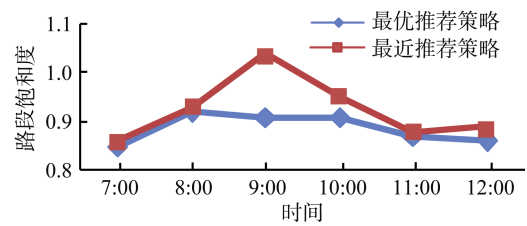


图4 充电站 5 附近路段的饱和度对比

3.2 智能配电网的结果分析

采用两种路径规划策略后智能配电网的性能对比分析如下。

3.2.1 安全性

采用两种路径规划策略后的三个智能配电网中各节点电压如图 5 所示。从图 5 可知, 采用最优规划策略时, 27 节点和 33 节点配电网的电压偏移率降低, 所有节点都达到 7% 以内的允许值, 而 25 节点配电网的该项指标几乎未受到影响, 有效提高了智能配电网的安全性。

3.2.2 经济性

采用两种路径规划策略后的各配电网的网损率如表 3 所示。从表 3 可知, 采用最优充电路径推荐策略时, 三个智能配电网的网损率都有所降低, 有利于保证电网经济运行。

配电网	表 3 各配电网的网损率对比	
	最优充电路径推荐策略	最近充电路径推荐策略
	网损率/%	网损率/%
25 节点	2.92	3.12
27 节点	3.62	4.03
33 节点	3.64	3.80

4 结论

本文建立了“车-网-路”智能交互系统模型, 提出了大规模智能电动车辆最优充电路径规划方法, 利用联合仿真系统对该规划方法进行了仿真验证, 并与最近充电路径规划策略进行了对比分析, 得到如下结论:

- 1) 提出的智能电动车辆最优充电路径规划方法, 由于有效利用了智能交通网的实时反馈信息, 相比目前已有的最近充电路径规划方法, 能

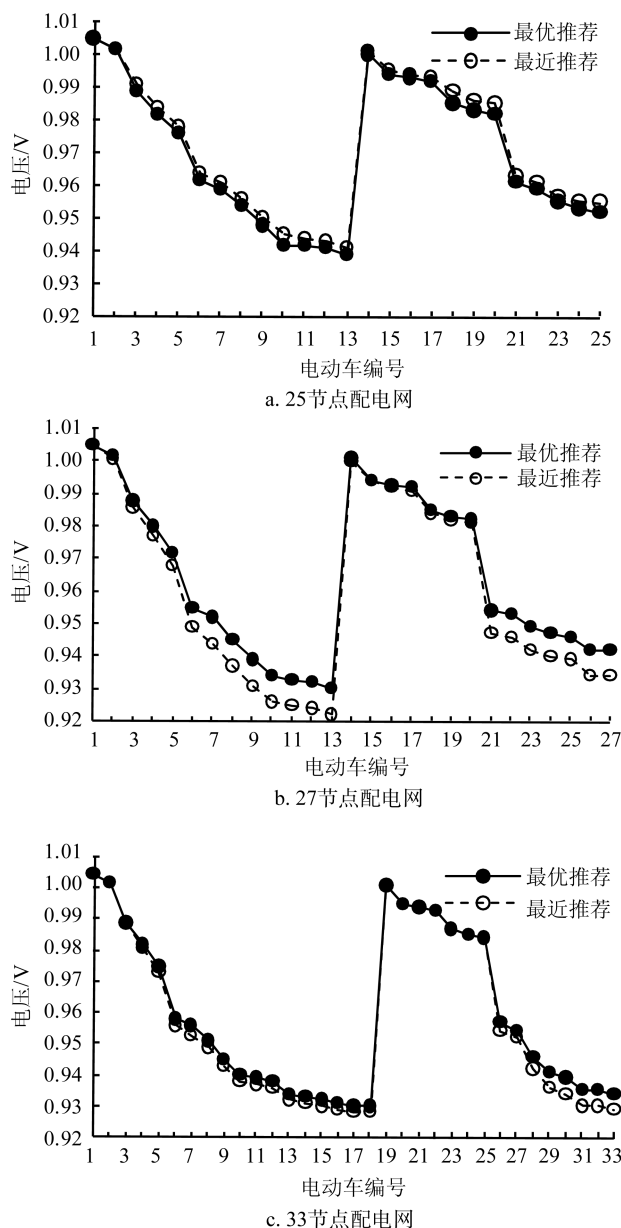


图5 各配电网节点电压对比

更加合理地分配不同时段前往充电站充电的智能电动汽车数量,同时有效降低个别充电站附近的道路拥堵率和道路饱和程度,改善局部交通拥堵情况。

2) 提出的智能电动车辆最优充电路径规划方法,通过充分利用智能配电网的反馈信息,能够有效控制各个时间段各充电站的充电负荷,优化各充电站负荷的时空分布。相比现有方法,能有效降低大规模智能电动汽车的快速充电行为对智能配电网的安全性和经济性的不利影响。

参考文献

- [1] Chu W, Li S, Jiang Q, et al. Speed Estimation for All-Wheel Drive Vehicles Based on Multi-information Fusion[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(11): 962-966.
- [2] Chu W, Luo Y, Han Y, et al. Rule-Based Traction System Failure Control of Distributed Electric Drive Vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 90-95.
- [3] Putrus G A, Suwanapongkarl P, Johnston D, et al. Impact of Electric Vehicles on Power Distribution Networks[C]. IEEE. Vehicle Power and Propulsion Conference: VPPC 2009, 2009: 827-831.
- [4] 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, 2: 127-131.
- [5] Lopes J A P, Soares F J, Almeida P M R. Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 168-183.
- [6] Sortomme E, El-Sharkawi M A. Optimal Charging Strategies for Unidirectional Vehicle-to-Grid[J]. Smart Grid, IEEE Transactions on, 2011, 2(1): 131-138.
- [7] 韩海英. V2G参与电网调峰和调频控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011: 6.
- [8] 祝付玲. 城市道路交通拥堵评价指标体系研究[D]. 南京: 东南大学, 2006: 6.
- [9] 沈屹楠. 城市道路交通评价方法及评价系统开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2008: 5.
- [10] Yuichi Kobayashi, Noboru Kiyama, Hirokazu Aoshima, et al. A Route Search Method for Electric Vehicles in Consideration of Range and Locations of Charging Stations[C]. Baden-Baden: 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium: IV, 2011: 6.
- [11] Sweda T M, Klabjan D. Finding Minimum-cost Paths for Electric Vehicles[C]. IEEE. 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, 2012: 1-4.
- [12] Yang S N, Cheng W S, Hsu Y C, et al. Charge Scheduling of Electric Vehicles in Highways[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011. doi: 10.1016/j.mcm.2011.11.054.
- [13] Guo Q L, Wang Y, Sun H B, et al. Research on Architecture of ITS Based Smart Charging Guide System[C]. Detroit, MI: General Meeting of the IEEE Power and Energy Society, 2011.
- [14] TRB Committee, America. Highway Capacity Manual[M]. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1986: 38.
- [15] Etezadi-Amoli M, Choma K, Stefani J. Rapid-charge

Electric-vehicle Stations[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2010, 25(3): 1883-1887.

上海交通大学, 2012: 53.

[16] 黄润. 电动汽车入网对电网负荷影响的研究[D]. 上海:

[17] 白高平. 电动汽车充(放)电站规模化建设与电网适应性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011: 26.

Recommendation Method of Optimal Charging Station for Intelligent Electric Vehicle

Luo Yugong, Yan Yiyao, Zhu Tao, Li Keqiang

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the future, the intelligent electric vehicle will interact with and influence on the intelligent transportation system and smart distribution grid. In this paper, the large-scale intelligent EVs, intelligent transportation system and the smart distribution grid are combined into one system. The integrated system of medium voltage city distribution grid model containing 3 types of networks, transportation model, and large-scale IEV model is set up. Under this system, an optimal charging route planning method with real-time feedback of transportation and distribution information based on the Dijkstra's algorithm is raised. On the basis of this method, simulations are carried out using MATLAB and MATPOWER. The simulation results illustrate that, compared to the nearest charging route planning method, the optimal one can decrease the impact of rapid IEV charging on both transportation and distribution.

Key words: large-scale intelligent electric vehicle; intelligent transportation system; intelligent distribution grid; charging route recommendation