

基于混合整数规划的电动公交车 快速充电站有序充电策略

李斌¹, 刘畅¹, 陈慧妙², 胡进永¹, 徐智威², 夏露¹, 胡泽春²

(1. 北京市电动汽车充换电工程技术研究中心, 北京市海淀区 100192;

2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市海淀区 100084)

Coordinated Charging of Plug-in Electric Buses in Fast Charging Stations Based on Mixed-Integer Programming

LI Bin¹, LIU Chang¹, CHEN Huimiao², HU Jinyong¹, XU Zhiwei², XIA Lu¹, HU Zechun²

(1. China Electric Power Research Institute Beijing Engineering Technology Research Center of

Electric Vehicle Charging/Battery Swap, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Under constraints of electric bus charging need and distribution transformer capacity, in this paper an electric bus coordinated charging model of fast charging stations is proposed to minimize charging costs of fast charging station. Charging need of electric buses can be generated according to conventional bus schedules and related data. In order to verify effectiveness of the proposed strategy, distribution transformer load profiles and fast charging station charging costs are simulated under uncoordinated and coordinated charging scenarios respectively. Simulation results indicate that by responding time-of-use electricity prices, charging costs of fast charging station can be greatly reduced. Calculation speed of the proposed coordinated fast charging strategy is high and charging process is continuous, thus reducing negative effects of coordinated charging strategy on longevity of charging equipment and batteries. Therefore, the proposed fast charging strategy is suitable for electric bus fast charging stations.

KEY WORDS: electric bus; fast charging station; continuous charging; coordinated charging; charging costs; mixed integer linear programming (MILP)

摘要: 以电动公交车快速充电站充电成本最小化为目标, 以满足电动公交车充电需求和配电变压器不过载为约束条件, 建立了快速充电站内电动公交车有序充电的数学模型。由常规的公交车时刻表和相关数据可模拟电动公交车的充电需求。为验证所提方法的有效性, 对电动公交车快速充电站在有序充电和无序充电两种情形下的配电变压器负荷、充电站充电成本进行了仿真计算和分析。研究结果表明, 相较无序充电方法, 快速充电站通过自主响应电网分时电价, 有序充电控制方法可显著降低充电站充电成本。所制定的充电计划具备较高的计算效率, 并且充电过程连续, 能最大限度降低有序充电启停充电机对充电机和电池的负面影响, 适用在实

际电动公交车快速充电站中应用。

关键词: 电动公交车; 快速充电站; 连续充电; 有序充电; 充电成本; 混合整数线性规划

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.09.007

0 引言

近几十年来, 化石能源的短缺导致全球能源危机日益凸显, 环境问题也不断加重^[1-2]。作为一种新兴的交通工具, 电动汽车相较于传统汽车能够有效地减少碳排放, 缓解环境压力和能源危机^[3-4]。现阶段电动汽车已经成为相关领域未来的重要发展方向^[5-6]。全球范围内众多国家制定了关于电动汽车的发展战略, 采用政策引导并建立新的市场^[7]。

电动汽车逐渐普及的趋势预示着电网未来需要对大规模的电动汽车提供充电服务, 这将给电网运行的各个环节带来一定的影响^[8-9]。具体来说, 电动汽车充电需求的增加将使得电网的整体负荷上升, 若充电负荷集中在电网用电高峰时段, 会导致电网负荷的峰谷差被拉大^[10], 可能使配电网局部线路负荷过载、电压过低^[11-12]、线路网损变大^[13-14]、配电变压器容量越限^[15-16]等多种问题。此外, 电动汽车充电负荷在时间和空间上的不确定性也将使电网的运行面临新的挑战。因此, 研究电动汽车的有序充电策略对于提高电力系统运行的安全性及经济性具有重要意义^[17]。而电动公交车作为一种便于集中管理的公共交通工具, 可优先作为有序充电的控制对象。

目前已有相关文献研究电动汽车充电站的充

电控制方式和运营模式。文献[18]在计算出电动汽车的有序充电策略后,进一步在可供选择的最优策略中选择得到具有最优负荷曲线的充电策略;文献[19]在文献[18]的基础上以社会福利方法计算电动汽车协调充放电策略的收益与成本。文献[20]在考虑用户需求和负荷水平的基础上,以削峰填谷为目标,采用启发式算法动态求解分时电价时段,由用户自动响应实现有序充电。文献[21]以京津唐地区为案例寻求最佳的电动汽车充放电策略并进行了评估。文献[22]与文献[23]通过三层构架与调配策略探讨了解决大规模电动汽车充电集中调控困难而分散调控难以协调问题的方案。文献[24]提出了一种不影响电池寿命的有序充电控制方法,减少了电动汽车的充电费用,在此基础上又讨论了当电动汽车同时提供辅助服务情景下的有序充、放电策略。文献[25]以2010年上海世博会的电动公交车充电站项目为例,研究了电动公交车充电站的运营规划。文献[26]以北京奥运会电动公交车为例进行了负荷建模,描述了充电站负荷的变化规律。

电动汽车的大规模充电对于电动汽车有序充电控制的计算能力要求较高,而且要求实时信息及时准确的传递。这要求充电站在短时间内考虑各方面约束,处理较多数据,得出最优的有序充电协调控制策略,而对于电动公交车的快速充电,其有相对固定的全天时刻表,每次充电还需考虑到之后的停靠情况,而且快速充电功率大、充电时间短,这相对于常规充电加大了对数据处理的要求。此外,目前关于电动汽车有序充电的研究多是对随机的或是单次停靠的电动汽车常规有序充电的控制方式。本文旨在研究电动公交车的快速充电站的有序充电协调控制方式,其要求根据由充电站内电动公交车的电池使用数据与当前时刻表预测的电量需求信息,电池信息以及电力系统的负载信息,以充电站充电成本最小化为目标,以配电变压器不过载,连续充电,公交车正常运营为约束条件,控制各台快速充电机的通断,进行快速充电站内电动公交车的有序充电控制。

1 电动公交车快速充电站的有序充电问题描述

电动公交车快速充电站的有序充电策略考虑同一个配电变压器下既有电动公交车的充电负荷,又接有常规负荷的情形。充电站可以根据历史数据预测全天各个时刻常规负荷所占比例进而确定电动汽车最大允许充电负荷的时间曲线。若电动

公交车快速充电站有专供的配电变压器,则常规负荷可不计。

对于电动公交车快速充电站,由于其停靠时间大于其实际所需的充电时间并且夜间停靠时间长,故充电负荷具有一定灵活性。在保证车辆正常运行的前提下,可尽量降低充电费用,即充分利用低电价时段进行充电,降低整个公交车系统的运营成本。

设快速充电站有 N 台充电机,总共为 M 辆电动公交车提供充电服务,为便于模型建立与策略控制,分别用 $1, 2, \dots, N$ 与 $1, 2, \dots, M$ 对充电机和电动公交车进行编号。

设充电站内所有充电机的额定功率为 P ,配电变压器的额定容量为 S_T ,充电效率为 λ 。假设电动公交车的电池容量为 $B_m (m=1, 2, \dots, M)$,且当电动公交车接入充电机后,充电站的监控装置可以通过电动公交车上的相关设备获取电池当前的荷电状态 $Y_A(SOC)$,充电过程为恒功率充电^[27]。为实现有序充电,还需知道每条线路电动公交车的每一班车的到达时间 t_s 和离开时间 t_l ,以及每辆电动公交车从某一次离站到下一次回站平均消耗的电量占 B_m 的比值 $E_m (m=1, 2, \dots, M)$ 。为了保障电池的安全使用,设定电池的荷电状态的最低值为 F 。

本文采用时间离散的控制模式,将24h分为 J 个时段。由快速充电站内配变所接常规负荷的历史数据,可对此后时段各个时间点的常规负荷曲线进行预测。用 A_j 表示从某计算时刻开始至未来24h中第 $j (j=1, 2, \dots, J)$ 个时间段内允许充电站对电动公交车充电负荷占配变总容量的比值, $A_j \in [0, 1]$ 。若电动公交车快速充电站有专供配电变压器,近似认为 $A_j = 1$ 。设充电站在未来24h内从电网购电价格为 $c_j (j=1, 2, \dots, J)$ 。

设每一辆电动公交车在接下来的 J 个时间段内完整的进站停靠次数(完整指的是进站离站均在 J 个时间段里)为 $a_m (m=1, 2, \dots, M)$ 。对于第 m 辆电动公交车每一次停靠的进站时间和出站时间对应的时段分别为 s_{mi} 和 l_{mi} ,其中 $1 \leq i \leq a_m$,这里 $1 \leq s_{mi}, l_{mi} \leq J$ 。

由有序充电控制时间间隔数量 J 和电动公交车辆数 M ,构造电动公交车的充电状态矩阵 $D_{M \times J}$,矩阵元素 d_{mj} 为0、1变量,表示第 $m (m=1, 2, \dots, M)$ 辆电动公交车在 j 时段是否处于充电状态。若处于充电状态, $d_{mj}=1$;否则, $d_{mj}=0$ 。再构造充电机开断控制策略矩阵 $C_{N \times J}$ 用于直接控制充电机,其元素为1表示充电机处于充电状态,元

素为0表示充电机处于停运状态。该矩阵可根据充电时的电动公交车编号与充电机的编号对应关系由 $D_{M \times J}$ 转换得到。

在以上问题描述和参量设定的基础上,以电动公交车快速充电成本的最小化为目标,以电动公交车充电需求与快速充电站内配电变压器不越限为约束条件,进行有序充电策略的计算与调控。

2 有序充电策略的数学模型与实施

2.1 控制策略概述

在电动公交车快速充电站协调充电控制初始化阶段,输入充电站和公交车的基本信息,主要包括 N 、 M 、 P 、 S_T 、公交车当前 SOC、 F 、 $E_m (m=1,2,\dots,M)$ 以及 $B_m (m=1,2,\dots,M)$ 。

在每次计算开始先获取由此刻开始接下来 J 个时间段(即 24 h)的 $A_j (j=1,2,\dots,J)$ 与 $c_j (j=1,2,\dots,J)$ 。

当快速充电站有新的电动公交车进站停靠时,通过读取车载电池管理系统上的数据,收集电动公交车编号(用以对应该公交车的 F 、 E_m 以及 B_m)与 $Y_A(SOC)$ 。然后完成电动公交车电池信息、公交车编号输入与该公交车时刻表的更新,为下一步的优化控制做好准备。

初始化之后,进行电动公交车快速充电站的充电过程优化,得到最优协调充电策略。

每隔固定的时间,充电站的充电控制系统都将检测过去的 $\Delta t (\Delta t = 24 \text{ h} / J)$ 内是否有公交车进站。若有,则根据此刻的实时信息(包括公交车的时刻,实时电价,公交车的荷电状态等),通过电动公交车有序充电策略计算程序,实时计算新的充电计划,确定各个快速充电机在接下来 J 个时间间隔的充电状态,并实行滚动优化。一般情况下,更新的方案只会原有方案上进行微调。

2.2 数学优化模型

以充电站的充电成本最小化为目标,优化模型的目标函数如下:

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M d_{mj} P \Delta t c_j \quad (1)$$

式中 Δt 为一个时间段的时长,本文取 5 min。

配电变压器容量的约束条件如下:

$$\sum_{m=1}^M d_{mj} P \leq A_j S_T \lambda \quad j=1,2,\dots,J \quad (2)$$

处于充电状态的充电机数量约束如下:

$$\sum_{m=1}^M d_{mj} \leq N, \quad j=1,2,\dots,J \quad (3)$$

电动公交车不在站期间无法充电,约束如下:

$$\begin{cases} d_{mj} = 0, & m=1,2,\dots,M \\ j \in \{1,2,\dots,s_{m1}-1\} \cup \{l_{m1},\dots, \\ s_{m2}-1\} \dots \{l_{ma_m},\dots,288\} \end{cases} \quad (4)$$

考虑快速充电的连续性,即开始充电后一直持续到预定的充电容量或充电时间才停止。

令

$$\begin{cases} u_j \geq d_j - d_{j-1}, u_j \in \{0,1\} \\ v_j \geq d_j - d_{j+1}, v_j \in \{0,1\} \\ j \in \{s_{mi}, \dots, l_{mi}-1\}, i=1,2,\dots, \\ a_m, m=1,2,\dots,M \end{cases} \quad (5)$$

则相应的约束条件如下:

$$\begin{cases} \sum_{j=s_{mi}}^{l_{mi}} u_j = \sum_{j=s_{mi}}^{l_{mi}} v_j \leq 1 \\ i=1,2,\dots,a_m, m=1,2,\dots,M \end{cases} \quad (6)$$

在每次停靠的时间段内,每辆公交车离开时的电池荷电状态(SOC)应不低于该公交车此次离站到下一次回站消耗的平均电量占电池总电量的比值 $E_m (m=1,2,\dots,M)$ 加荷电状态下限 F 。故充电需求约束如下:

$$\begin{cases} (E_m - Y_{m,i,A} + F) B_m \leq \sum_{j=s_{mi}}^{l_{mi}} d_{mj} P \Delta t \leq (1 - Y_{m,i,A}) B_m \\ i=1,2,\dots,a_m, m=1,2,\dots,M \end{cases} \quad (7)$$

式中 $Y_{m,i,A}$ 表示第 m 辆公交车第 i 次回到充电站时的电池荷电状态。

实际情况下,除刚进站的电动公交车外,其他 $Y_{m,i,A}$ 值在当前时间点无法获取。本文采用 E_m 将不等式组(7)改写为累加形式的只含有 $Y_{m,1,A}$ 的不等式组:

$$\begin{cases} (i E_m - Y_{m,1,A} + F) B_m \leq \sum_{j=s_{m1}}^{l_{m1}} d_{mj} P \Delta t + \dots + \sum_{j=s_{mi}}^{l_{mi}} d_{mj} P \Delta t \\ \leq [(i-1) E_m + 1 - Y_{m,1,A}] B_m \\ i=1,2,\dots,a_m \\ m=1,2,\dots,M \end{cases} \quad (8)$$

式(8)表示对第 $m (m=1,2,\dots,M)$ 辆电动公交车,使其前 $i (i=1,2,\dots,a_m)$ 次充电电量之和分别所需满足的要求。

不等式组(8)要求公交车的电池电量占电池容量的比值不低于 F , 即 $E_m + F - 1 \leq 0$, 且 $Y_{m,i,A}$ 都应满足 $Y_{m,i,A} \geq F$ 。

此外,总充电量应与总用电量维持平衡,于是有约束:

$$\begin{cases} \sum_{j=s_{m1}}^{l_{m1}} d_{mj}P\Delta t+\cdots+\sum_{j=s_{mam}}^{l_{mam}} d_{mj}P\Delta t=a_mE_m \\ m=1,2,\cdots,M \end{cases} \quad (9)$$

本文采用混合整数线性规划算法并调用CPLEX^[28]优化工具包对该数学模型进行求解,得到最优充电站电动公交车的充电状态矩阵 $D_{M\times J}$ 后。再根据 $D_{M\times J}$ 与公交车编号与充电机编号的对应关系,将 $D_{M\times J}$ 转换为最优充电机开断控制策略矩阵 $C_{N\times J}$ 。

2.3 异常情况的处理

在一般情况下,由于进入快速充电站的电动公交车都是事先固定的,所以在停靠时间规划合理的前提下,所有车辆的充电需求均可满足。但是考虑到交通拥堵、恶劣天气等情况,导致充电需求的变化,可能出现充电需求不能在规定时间内得到满足的异常情况。

若发现异常情况(上述模型无解),有序充电控制系统给出提示,由公交车方选择是否同意延后该公交车的本次离站时间 l_{mi} 。如果同意,逐次将 l_{mi} 延后5 min并重新求解充电方案,直到有解为止。公交车方也可以选择降低车辆的 F 值来达到在规定的 l_{mi} 下充电方案有解。

2.4 控制流程

所提电动公交车充电策略的优化控制流程参见图1。

3 算例分析

3.1 参数设定

算例对象为一个电动公交车快速充电站,其配电变压器下同时接有电动公交车充电负荷和常规负荷。电动公交车的相关数据参照比亚迪的K9电动客车,其电池总电量为324 kW·h,设 $F=0.2$ 。该电动客车在满电量情况下行驶距离不少于250 km,最高车速为80 km/h^[29],可以计算平均耗电为1.3 kW·h/km。本算例考虑两路环形运行的电动公交线路共用一个电动公交快速充电站的情况。由于是大功率充电,取 $J=288$ (即时间间隔为5 min)。电动公交车的具体参数与时刻表参见附录A。配变容量为1700 kVA。

电动公交车快速充电站有8个充电机,额定充电功率取120 kW,充电效率为0.9。常规负荷占配电变压器的容量比例(即 $1-A_j$)如图2所示,其峰值为配电变压器容量的50%。充电站从电网购电价格按国内工业用电分时电价计^[30],具体价格如表1所示。

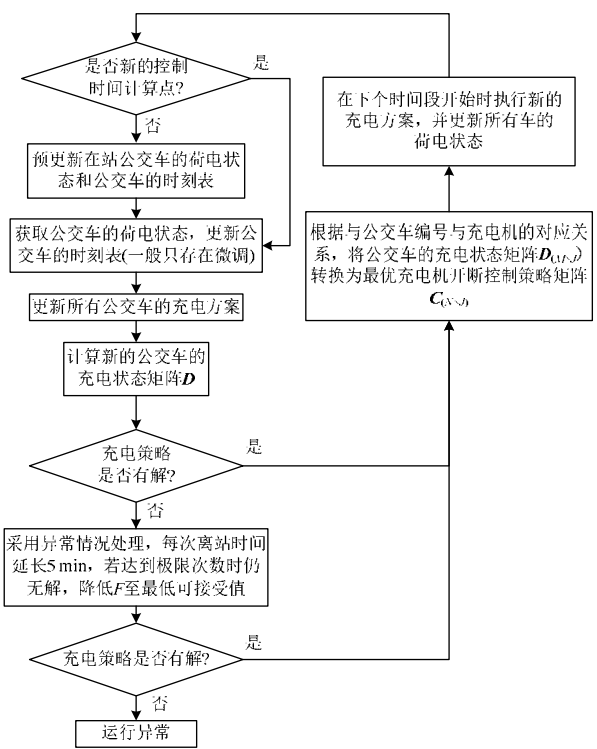


图1 电动公交车快速充电站有序充电策略流程
Fig. 1 Flow chart of coordinated charging strategy in electric bus fast charging stations

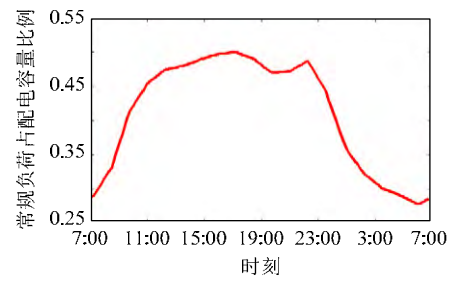


图2 居民负荷占配电变压的容量比例 r_s 曲线
Fig. 2 Residents load ratio of distribution transformer capacity r_s curve

表1 电价参数
Tab. 1 Parameters of electricity prices

时间段	电价/(元·(kW·h) ⁻¹)
00:00—8:00	0.365
8:00—12:00 , 17:00—21:00	0.869
12:00—17:00 , 21:00—0:00	0.687

3.2 无序充电

算例还对电动公交车的无序充电情形进行了计算仿真,其将结果与有序充电情形对比可直观地看出所提有序充电的效果。

在无序充电情形下,考虑满足所有电动公交车电量需求这一前提,只要充电站有未处于充电状态的充电机,即可为快速充电站站内的电动公交车提供充电服务,直到电动公交车充满或离开为止。

3.3 基于混合整数线性规划的有序充电

以早晨 7:00 为起始时刻,根据附录 A 中的表 A1、表 A2 以及表 1 与图 2 的数据,构造了针对未来 24 h 内的基于混合整数线性规划的有序充电问题并求解。

为具体分析电动公交车有序充电策略对快速充电站运营的优化效果,我们统计分析了相关数据进行,主要参数如表 2 所示。

表 2 统计参数与说明	
Tab. 2 Statistical parameters and descriptions	
统计参数	统计说明
充电站充电成本	充电站未来 24 h 内为电动公交车提供充电服务的购电费用
充电机的充电状态情况	仿真中每一时段处于充电状态的充电机数量
平均计算时间	每次更新充电方案计算用时均值
负荷最大、最小值占配变容量的比值	仿真中最大、最小负荷占配变容量的比值(百分数)
有序充电与无序充电的负荷曲线	由仿真结果绘制有序充电负荷曲线和无序充电负荷曲线

3.4 仿真结果

仿真计算在 CPU 为 Intel Core i5,内存 4 GB 的笔记本电脑上完成。首先根据输入信息得到从早晨 7:00 至未来 24 h 内的充电需求,再计算得到有序、无序充电两种情形下的仿真结果,如表 3 所示。电动公交车快速充电站在有序、无序充电情形下的负荷曲线如图 3 所示。图 4—5 分别给出了有序充电和无序充电两种情形下,处于充电状态的充电机数量情况。

3.5 结果分析

1) 电动公交车快速充电站在序充电情形下的充电成本为无序充电情形下的 61.08%,故有序充电策略可使充电成本显著下降。

表 3 两种充电情形下的仿真结果		
Tab. 3 Simulation results of two charging modes		
参数	无序充电	有序充电
从 7:00 到次日该时刻的充电成本/元	8 885.34	5 427.27
平均计算时间/s	3.42	9.73
最大负荷占配变容量的百分比/%	111.69	99.24
最小负荷占配变容量的百分比/%	27.81	28.57
最大负荷是否越界	是	否

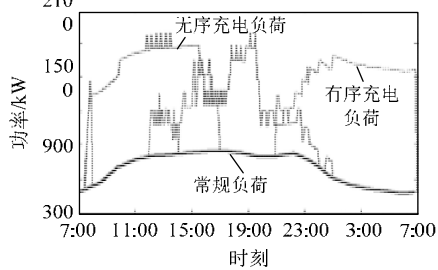


图 3 两种充电情形下的负荷曲线
Fig. 3 Load curves under the two charging modes

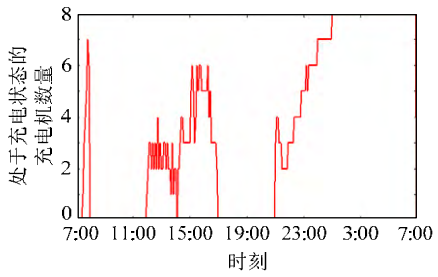


图 4 有序充电情形下各时段处于充电状态的充电机数量
Fig. 4 Number of chargers in charging under coordinated charging mode

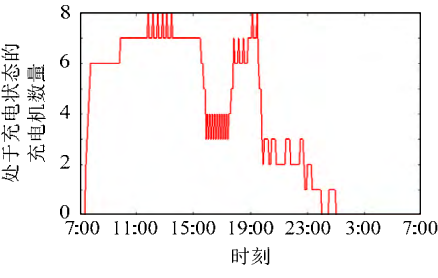


图 5 无序充电情形下各时段处于充电状态的充电机数量
Fig. 5 Number of chargers in charging under uncoordinated charging mode

2) 在有序充电模式下,把 24 h 等分为 288 等份的精确策略计算方式,计算速度较快,适合对电动公交车快速充电站进行实时的有序充电控制。

3) 无序充电模式较有序充电模式最明显的区别是把充电负荷集中在了晚高峰时段而不是夜间电价谷时段,同时无序充电模式下白天电价峰时段的充电负荷也大于有序充电,严重加剧了峰谷差。而有序充电把最高负荷控制在了配电变压器容量以内,将充电负荷集中到了夜间电价谷时段,导致在夜间电网局部出现了一个用电高峰。

4) 通过比较有序充电和无序充电 2 种情形下充电机充电状态曲线,发现有序充电模式下 8 台充电机在夜间电价谷时段都得到了使用,既实现了最大限度降低充电成本的目标,也达到了电池连续充电的要求,把对资源的充分利用转换成了经济效益。而在无序充电模式下,充电机的工作时段与电动公交车时刻表相对应。

5) 本算例是以早 7:00 为起始时刻,并设定电动公交车的初始电量为 100%,单次优化策略考虑未来 24 h 的充电方案。实际应用时可采取滚动优化的方法进行调整。

4 结论

本文根据电动公交车的运行特性,以满足充电需求和配电设备不过载为约束,以快速充电站的充电成本最小为目标,建立了电动公交车快速充电站有序充电的数学模型,通过控制各台快速充电机的

充电时段,从而实现对电动公交车快速充电的协调控制。由具体算例的仿真结果,分析得出下列结论:

1) 所提出的电动公交车有序充电策略,在满足电动公交车正常运营以及配电变压器不越限的条件下,可有效降低电动公交车快速充电站的充电成本。

2) 所提出的电动公交车有序充电策略计算效率较高,可保证有序充电优化策略的实施,适合电动公交车快速充电站的有序充电实时控制计算。

3) 所提出的有序充电策略适合应用于有多个充电机和充电监控系统的电动公交车快速充电站,其计算的时间间隔可视现实情况设定。

4) 更深入的研究方向为考虑多种因素的电动公交车有序充电策略,以有效降低电动汽车充电波动对电网的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 李秋硕,肖湘宁,郭静,等.电动汽车有序充电方法研究[J].电网技术,2012,36(12):32-38.
Li Qiushuo, Xiao Xiangning, Guo Jing, et al. Research on scheme for ordered charging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 32-38(in Chinese).
- [3] 宋永华,阳岳希,胡泽春.电动汽车电池的现状及发展趋势[J].电网技术,2011,35(4):1-7.
Song Yonghua, Yang Yuexi, Hu Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-7(in Chinese).
- [4] 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):1-10.
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): 1-10(in Chinese).
- [5] 魏大钧,张承慧,孙波,等.基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J].电网技术,2014,38(11):2972-2977.
Wei Dajun, Zhang Chenghui, Sun Bo, et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 2972-2977(in Chinese).
- [6] 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 Wenliang, Wu Bin, Li Wufeng, 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(in Chinese).
- [7] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等.换电模式下电动汽车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.
Luo Zhuowei, Hu Zechun, Song Yonghua, 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(in Chinese).
- [8] Fernandez L P, Roman T G S, Cossent R. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 26(1): 206-213.
- [9] Hartmann N, Ozdemir E D. Impact of different utilization scenarios of electric vehicles on the German grid in 2030[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 26(1): 206-213.
- [10] 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(in Chinese).
- [11] Singh M, Kar I, Kumar P. Influence of EV on grid power quality and optimizing the charging schedule to mitigate voltage imbalance and reduce power loss[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. Ohrid: IEEE, 2010: 196-203.
- [12] Putrus G A, Suwanapongkarl P, Johnston D, et al. Impact of electric vehicles on power distribution networks[C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Michigan: IEEE, 2009: 827-831.
- [13] Fernandez L P, Roman T G S, Cossent R. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 206-213.
- [14] Acha S, Green T C, Shah N. Effects of optimised plug-in hybrid vehicle charging strategies on electric distribution network losses[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Los Angeles: IEEE, 2010: 1-6.
- [15] Dow L, Marshall M, Le Xu, et al. A novel approach for evaluating the impact of electric vehicles on the power distribution system[C]//IEEE Power And Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN: IEEE, 2010: 1-6.
- [16] Staats P T, Grady W M, Arapostathis A, et al. A procedure for derating a substation transformer in the presence of widespread electric vehicle battery charging[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4): 1562-1568.
- [17] Richardson P, Flynn D, Keane A. Optimal charging of electric vehicles in low-voltage distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(1): 268-279.
- [18] Xu Z, Hu Z, Song Y, et al. Coordinated charging strategy for PEVs charging stations[C]//Proc Power Energy Soc General Meeting. San Diego, CA, USA, 2012.
- [19] Luo Z, Hu Z, Song Y, et al. Optimal coordination of plug-in electric vehicles in power grids with cost-benefit analysis—Part I: enabling techniques[J]. IEEE Transactions Power Systems, 2013, 28(4): 3546-3555.
- [20] 徐智威,胡泽春,宋永华,等.基于动态分时电价的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, 2012, 34(22): 3638-3646(in Chinese).
- [21] Luo Z, Hu Z, Song Y, et al. Optimal coordination of plug-in electric vehicles in power grids with cost and benefit analysis-part II: A case study in China[J]. IEEE Transactions Power Systems, 2013, 28(4): 3556-3565.

- [22] Qi W, Xu Z, Shen Z M, 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.
- [23] Xu Z, Hu Z, Song Y, et al. Coordination of PEVs charging across multiple aggregators [J]. Applied Energy, 2014(136): 582-589.
- [24] 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.
- [25] 韩笑. 纯电动公交车充电站运营规划及仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [26] 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(in Chinese).
- [27] Han Sekyung, Han Soohye, Sezaki K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 65-72.
- [28] IBM Corporation. IBM ILOG CPLEX optimizer 2010[EB/OL].

[2011-02-11]. <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer>.

[29] 比亚迪 K9_百度百科[EB/OL]. [2014-11-02]. [Http://baike.baidu.com/view/4719552.htm?fr=aladdin](http://baike.baidu.com/view/4719552.htm?fr=aladdin).

[30] 北京市电网峰谷分时销售电价表[EB/OL]. [2011-02-11]. [Http://www.bjpc.gov.cn/tztg/200911/P020021121010684247161.xls](http://www.bjpc.gov.cn/tztg/200911/P020021121010684247161.xls).



李斌

收稿日期: 2015-10-12.

作者简介:

李斌(1973), 男, 高级工程师, 从事智能用电及电动汽车充换电设施技术研究工作;

刘畅(1978), 男, 工程师, 从事智能用电及电动汽车充换电设施技术研究工作;

陈慧妙(1993), 男, 硕士研究生, 从事电动汽车接入电网方面的研究, E-mail: chenhuimiao_thu@foxmail.com.

(责任编辑 王晔)

“能源与电力供给侧改革关键技术”专题征稿启事

中央财经领导小组第十一次会议上习近平总书记强调,在适度扩大总需求的同时,着力加强供给侧结构性改革,提高供给体系质量和效率。能源与电力是国民经济发展的源动力,关系重大。近年来,随着经济社会发展进入新常态,能源与电力需求增长空间有限,加上我国节能减排目标压力依旧较大,能源领域的供给侧改革势在必行。能源与电力领域的供给侧改革,其关键要素之一是能源资源的有效匹配。通过能源革命、电力体制改革等重大能源战略转型,以及能源互联网等关键技术革新,促进综合能源供应与消费系统的转型升级,从而实现能源供需的匹配和信息交互响应。因此,能源与电力供给侧改革是从战略层到技术层的纵向“链式革命”,涉及能源与电力供给侧改革的体系框架设计、多能互补利用、综合信息采集和仿真以及能源供需双侧交互响应与控制等众多前沿技术,也是目前国内外学者研究的热点。

为展示国内外该领域的最新进展和发展趋势,共享最新学术和技术成果,《电网技术》编辑部特邀华北电力大学能源互联网研究中心主任曾鸣教授作为特约主编,主持“能源与电力供给侧改革关键技术”专题。希望与作者、读者一起探讨能源领域内供给侧结构性改革具有共性的科学问题和关键技术,促进相关学科之间的交叉融合。专题拟于2016年10月开始陆续出版。

一、专题征稿范围(包括但不限于)

- 1) 能源与电力供给侧改革的体系框架;
- 2) 能源供给侧的多能互补利用技术;
- 3) 能源供给侧的综合信息采集和仿真技术;
- 4) 分布式发电和微电网的微供能系统;
- 5) 供给侧改革背景下的新能源汽车及储能技术;
- 6) 能源供给侧的能源大数据利用技术;
- 7) 能源系统的供需互动协调控制技术;
- 8) 能源供给侧的“互联网+”平台技术。

二、投稿要求

1) 引言中研究目的清晰明确,详细介绍国内外研究背景,对现有其他研究者的工作进行客观的评述;阐述自己的观点,并对自己的研究思路做一总体介绍,引言字数不少于1000字。

2) 研究设计和方法叙述清楚,数据合理并被正确地分析和解释;比较所提出的方法和现有方法的优缺点。

3) 重点突出,论述严谨,文字简练,避免长篇公式推导(必要的推导可列入附录),字数以不超过6000字(包括图表)为宜。

4) 来稿请用Word排版,格式尽量与《电网技术》一致。

5) 对英文稿件的要求与对中文稿件的要求相同,请同时提供作者中文信息。

三、投稿方式

请登录<http://www.dwjs.com.cn> 注册作者用户名和密码投稿,请注意在投稿栏目中选择“能源与电力供给侧改革关键技术”。真诚欢迎国内外相关领域的专家学者踊跃投稿!

联系人: 曾鸣, 徐梅

联系电话: 13426197078, 010-82812523

邮箱: zengmingbj@vip.sina.com, xumei@epri.sgcc.com.cn

附录 A 算例相关数据与参数

表 A1 为根据电动汽车技术和实际运行情况，设定电动公交车的 2 条线路车辆和运行参数。表 A2 为电动公交车线路 1 和线路 2 的发车时间表。

表 A1 电动公交车相关参数
Tab. A1 Relevant parameters of electric buses

线路	电池组 容量/ kW·h	行驶 线路的 里程/km	每公里的 平均 耗电量/ kW·h	车辆的 数量/ 辆	公交车行驶 平均时速/ (km/h)
1	324	40	1.3	24	40
2	324	30	1.3	6	30

表 A2 电动公交车发车
Tab. A2 Electric bus departure time-table

时间	线路 1		线路 2	
	发车 数量/辆	发车 间隔/min	发车 数量/辆	发车 间隔/min
06 : 00—07 : 00	12	5	3	20
07 : 00—08 : 00	12	5	3	20
08 : 00—09 : 00	12	5	3	20
09 : 00—10 : 00	12	5	3	20
10 : 00—11 : 00	12	5	3	20
11 : 00—12 : 00	12	5	3	20
12 : 00—13 : 00	12	5	3	20
13 : 00—14 : 00	12	5	3	20
14 : 00—15 : 00	6	10	3	20
15 : 00—16 : 00	6	10	3	20
16 : 00—17 : 00	12	5	3	20
17 : 00—18 : 00	12	5	3	20
18 : 00—19 : 00	4	15	2	30
19 : 00—20 : 00	4	15	1	60
20 : 00—21 : 00	4	15	1	60
21 : 00—22 : 00	2	30	1	60
22 : 00—23 : 00	1	60	1	60
23 : 00—00 : 00	1	60		