

电动汽车充电对电力系统的影响及其对策

郭建龙¹, 文福拴²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 归纳电动汽车有序充电研究的要点和现状, 包括充电负荷描述、充电影响仿真、有序充电的策略方法。基于建模机理, 把负荷描述归纳为基于充电行为机理、概率模型以及智能算法 3 类, 对影响充电负荷的各个因素及其相互关系进行分析, 指出基于概率统计的随机方法是分析大量电动汽车随机充电行为的主要建模方法, 充电影响因素的精确模拟是模型进一步改善的方向; 从对系统可靠性影响、对电能质量影响和对系统运行经济性影响 3 个维度概述大量电动汽车充电接入对系统的影响, 分析充电影响的模拟结果及调控方法, 指出在充电影响仿真中需更多地计及充电的随机分散特性, 充电影响的暂态过程也值得关注; 针对有序充电的策略方法, 归纳为基于最优经济运行的充电模型、最优市场机制和商业运营模式、时空有序性 3 类方法, 3 类方法本质上归结为随机系统的最优化问题。展望指出配电系统的规划与电动汽车充电站有序充电之间的关系研究及换电模式下充电电价的定价理论需进一步深入研究, 为实现时间、空间 2 个维度上的有序充电提供理论依据。

关键词: 电力系统; 电动汽车; 充电负荷; 充电影响; 有序充电; 模型

中图分类号: TM 73; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.001

0 引言

电动汽车(EVs)以电作为动力驱动汽车, 是一种零排放或低排放的绿色交通工具。电动汽车的推广和使用无疑给能源危机、环境污染、气候变暖等问题提供了一个解决途径, 不仅可以实现低碳环保, 而且可以消纳不同形式的可再生能源。特别是插入式混合动力电动汽车(PHEVs)的出现, 可以充分利用现有的配电系统实现车和电网的互联, 作为充电负荷, 可以有效平衡峰谷差, 提高电网利用率; 作为分布式储能装置, 通过向电网回馈电能以提供旋转备用, 参与频率调节。

大量电动汽车接入电网充电时, 在没有调节控制情况下(本文定义为自然充电状态), 电动汽车充电具有时间和空间上的不确定性^[1]。基于大量实测数据的研究^[2-3]表明, 在自然充电状态下, 电动汽车的日充电负荷曲线与配网日负荷曲线具有一致性。随着电动汽车渗透率增加, 配网负荷曲线可能出现峰峰叠加, 峰谷差将进一步扩大, 线路变压器过负荷风险加大, 充电谐波的注入也使得供配电设备的运行风险进一步增加, 直接影响系统运行的可靠性。同时过负荷导致配网电压损失和功率损失增加, 对发电设备的容量需求将进一步增大, 增加系统投入, 影响系统运行的经济性。此时大量电动汽车有序充

电显得更为迫切和现实。

有序充电可理解为大量电动汽车接入充电时采用合适的充电控制策略使得某些指标趋于最优, 它的效应是与大量电动汽车自然充电状态下的负面影响相对立的。有序充电目的就是消除汽车充电的负面影响, 发挥汽车充电积极作用, 是一种大规模充电负荷作用下各利益相关主体优化调度控制的策略。

本文将从充电负荷建模及负荷特性分析、充电负荷集聚对电力系统的影响、有序充电策略方法 3 个方面对电动汽车有序充电展开综述, 特别是针对有序充电实现的策略方法, 从最优经济运行、最优市场机制和商业运营模式、基于时空维度的有序充电 3 个方面对实现的方法及其特点进行分析, 基于此对一些有待研究的关键问题进行展望。

1 电动汽车充电负荷描述

电动汽车充电负荷描述的方法可归纳为基于充电行为机理、基于概率模型和基于启发式智能算法 3 类。

基于充电行为机理的确定性建模方法^[2-4]建立在典型场景的试验数据基础上, 结论缺乏通用性。而且电动汽车充电负荷缺乏典型的历史数据和经验总结, 基于时间序列的传统预测方法很难有效应用。现代启发式算法中, 灰色预测理论针对的是信息不完全系统而非随机系统, 模糊论针对的是认知不确定系统而非随机系统, 神经网络模型需依赖典型的学习训练样本, 其他基于智能算法的现代启发式预测方法^[5-7]也很难有效应用。基于概率统计的随

收稿日期: 2014-10-13; 修回日期: 2015-04-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228202); 国家自然科学基金资助项目(51107114, 51177145)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228202) and the National Natural Science Foundation of China(51107114, 51177145)

机方法适用于分析大量电动汽车的随机充电行为,也是目前主要的充电负荷建模方法^[8]。该方法通过经验假设确定充电负荷影响因素的概率分布,然后进行多次概率抽样由概率模型预测负荷,不同方法间的差异及预测精度体现在对电动汽车充电负荷影响因素的模拟和处理上。

1.1 充电负荷影响因素

采用概率统计的方法描述电动汽车充电负荷,比较典型的就蒙特卡洛概率抽样。抽样对象主要是影响电动汽车充电负荷的因素^[9-10],包括电池荷电状态、起始充电时刻等,同时要考虑电动汽车的渗透率、车主的驾驶习惯、出行规律、充电电价、电池充电特性等因素。电动汽车初始荷电状态由相邻 2 次充电间汽车的平均行驶里程来决定,同时要考虑相邻 2 次充电间车主的驾驶习惯的影响以及工作日和节假日的区别。起始充电时刻就是基于车辆出行统计规律^[11-12]的自然充电时刻,可根据车辆忙闲时段的分布得出可能的充电时间段,结合车主的驾驶习惯确定起始充电时间分布规律。考虑充电运营方充电电价等政策导向作用,起始充电时间的自然分布规律发生变化。由电池的充电特性可知,电动汽车在某时刻的某一充电功率需求的发生概率是由该车的起始充电时间的概率和初始荷电状态的概率共同决定的。基于以上分析,本文得出电动汽车充电负荷影响因素间的关系示意图如图 1 所示。

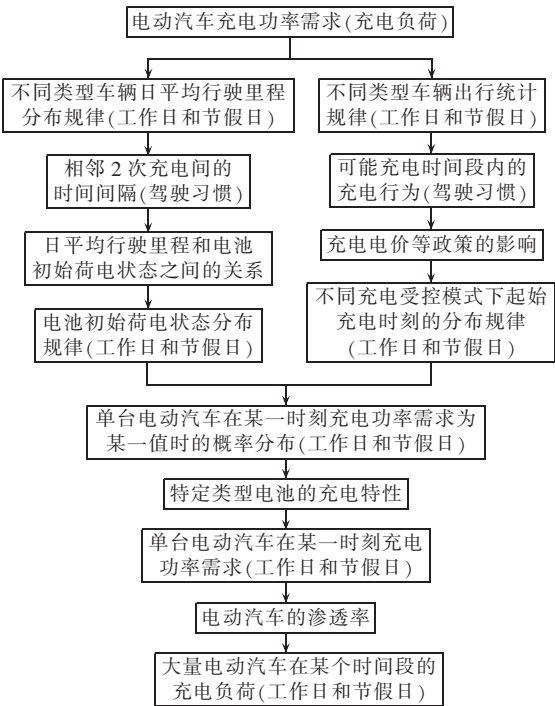


图 1 电动汽车充电负荷影响因素关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of relations among influencing factors of electric vehicle charging loads

考虑到电动汽车初始荷电状态和起始充电时间

的不确定性,所以某一时刻的充电功率需求也是不确定的。而且考虑到车主驾驶习惯、不同类型车辆的出行规律、充电便利性和充电成本等因素的差异性,充电负荷在配电网中的空间分布也具有不确定性。综合来看,由于充电影响因素具有随机性和多样性,采用概率模型来描述电动汽车充电负荷是较好的选择,但基于确定性的概率假设分布来处理有关因素有待改进和完善。

1.2 充电负荷概率模型

a. 概率平均模型。

文献^[9]计及电价政策和车辆出行统计规律对 4 种不同充电模式下电动汽车的充电负荷进行概率建模,模型考虑了起始充电时间、电池初始荷电状态等主要充电影响因素的概率分布,并基于概率平均的思想计算出各离散时间点的充电负荷,是典型的关于电动汽车充电负荷概率建模的例证,并针对一个 11 kV、38 节点的英国典型配网系统进行了充电影响仿真,但建模仿真仅就英国国内私家车和商务车展开,把起始充电时间假定为某一时间段的确定性分布,条件太强且缺乏实际依据。

b. 蒙特卡洛抽样概率模型。

文献^[13]将蒙特卡洛模拟方法引入电动汽车充电负荷计算研究之中,使用蒙特卡洛方法抽取起始荷电状态、起始充电时间,分析了不同类型电动汽车在不同场合对应的充电方式及充电时段,并对我国未来 20 a 的电动汽车充电负荷总量进行了预测。但文中假设除私家车外,其余类型车辆起始充电时间在给定充电时段内均匀分布是不尽合理的。

c. 基于出行统计数据概率模型。

文献^[14]依据美国交通部对全美家用车辆的调查结果,考虑了起始充电时刻和日行驶里程的概率分布,但未考虑电池初始荷电状态与充电功率的对应关系,仅把充电功率假设为满足 2~3 kW 范围内的均匀分布,且未考虑充电电价、不同类型车辆对分布规律的影响。3 种典型概率模型的对比见表 1。

表 1 3 种典型概率模型的对比

Table 1 Comparison among three typical probability models

典型模型	特点	共同之处
概率平均模型	·深入模拟充电影响因素的概率分布规律; ·引入概率平均的思想; ·起始充电时间分布规律假设为均匀分布。	·考虑了起始充电时间、初始荷电状态等主要充电影响因素的概率分布;
蒙特卡洛抽样概率模型	·充电影响因素的确定性假设分布; ·采用蒙特卡洛概率抽样; ·起始充电时间分布规律假设为均匀分布。	·计及不同类型车辆不同充电模式下充电需求的差异性;
基于出行统计数据的概率模型	·基于大量的出行统计数据; ·充电功率取值缺乏依据。	·具体的应用场景。

本文认为,起始充电时间应考虑政策导向、驾驶行为和不同类型车辆出行统计规律等因素的影响。初始荷电状态由电池的续驶里程、相邻 2 次充电间车辆平均行驶里程、充电习惯等因素决定。充电功率取值遵循电池的充电特性,依据研究目的不同而做适当取舍。研究电动汽车充电负荷模型,应在坚持概率模型的基础上,将充电时间和状态进行离散,设定描述的具体场景,依据出行规律数据,提高负荷描述的针对性,进一步探索描述少样本随机性负荷的建模问题。

2 电动汽车充电影响仿真

文献[15]以美国为例,预计 2015—2017 年期间美国 PHEVs 保有量将达到 100 万辆,这些负荷大部分集中在负荷中心区的大城市,在极端情况下它们总的充电功率需求将达到数十至上百 MW,充电对系统的影响是不可忽略的。本文基于充电对系统可靠性、电能质量、系统运行经济性的影响 3 个方面对电动汽车充电影响进行分析。

2.1 对系统可靠性影响

文献[16-19]评估了现有发电容量是否能够满足日益增长的电动汽车充电负荷需求,预测到 2030 年,由于电动汽车的渗透率增加,几乎大部分区域都需要增加发电容量。文献[9]研究了电动汽车充电对峰荷的影响,以英国配网为例说明,电动汽车的渗透率增加 10%,对应增加 17.9% 的日峰负荷,电动汽车的渗透率增加 20%,日峰负荷增加 35.8%。文献[20]评估了电动汽车充电功率需求对系统设备容量的风险影响,具体结果如图 2 所示。图中 Xfmr 表示馈线变压器,Laterals 表示配电系统的馈线,Primary 表示母线。

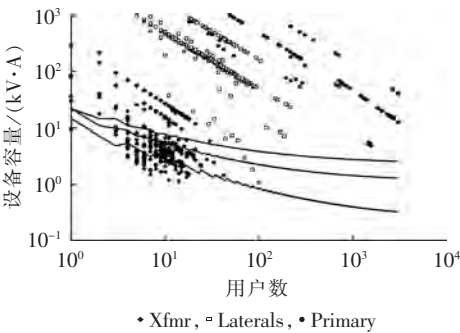


图 2 电动汽车充电负荷对设备容量的风险评估^[20]
Fig.2 Risk assessment of equipment capacity due to electric vehicle charging loads^[20]

研究表明,在馈线上存在过载风险的设备总是接近负荷端的设备,越是接近负荷端,充电影响越大。一些运行中的设备接近额定容量,即使在电动汽车充电负荷低渗透率情况下也可能出现部分设备

过载的高概率风险。

2.2 对电能质量影响

文献[21-23]研究了电动汽车充电对配电变压器的影响。指出电动汽车充电负荷渗透率不应超过 10%,否则就需采用调控措施引导汽车充电,实时电价下的灵活充电是减小电动汽车充电对配电变压器谐波影响的有效方法。直接充电对配电变压器寿命有较大损害,特别是在高温和负荷率高的情况下,配电变压器总的电流谐波率应控制在 25%~30% 之间。文献[24-25]将研究聚焦于电动汽车充电站接入电力系统后对公共电网产生谐波的特点和计算方法,计算结果如图 3 所示。

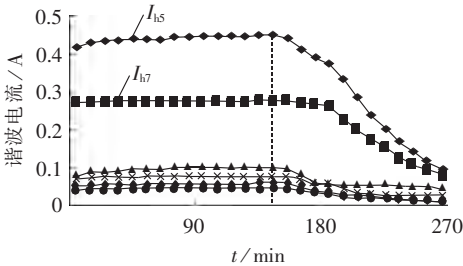


图 3 2 台充电机同时工作时的各次谐波特性^[24]
Fig.3 Harmonic characteristics when two chargers are working^[24]

研究结果说明电动汽车充电机是电网的非线性负荷,会产生注入电网的谐波电流,主要为 $6k \pm 1$ (k 为大于 0 的正整数) 次谐波电流,其中 5 次和 7 次谐波电流 I_{h5} 、 I_{h7} 含有率较大,对电网造成了污染,设备可靠性和寿命降低。但文献[24]研究结论存在于早期的充电机接入情况下,目前的充电机整流侧采用 PWM 技术,注入电网的电流总畸变率可以小于 5%,相应各次谐波电流也小,如果能够达到理想的高频隔离,就会获得优良的动态性能。

2.3 对系统运行经济性影响

文献[26]根据私家车出行统计规律,把电动汽车可能的充电时段划分为 21:00 至次日 06:00、18:00—21:00、10:00—16:00 这 3 段,采用向前向后迭代的算法计算各个时间段给定配电拓扑的潮流,最终得出不受控充电模式下配网功率损耗和最大的电压偏移,具体计算结果见表 2、3。

表 2 不受控充电模式下配网功率损失^[26]

Table 2 Power losses of distribution network in uncoordinated charging mode^[26]

充电时段	季节	不同渗透率下功率损失/%			
		0	10%	20%	30%
21:00 至次日 06:00	夏季	1.1	1.4	1.9	2.2
	冬季	1.4	1.6	2.1	2.4
18:00—21:00	夏季	1.5	2.4	3.8	5.0
	冬季	2.4	3.4	4.8	6.0
10:00—16:00	夏季	1.3	1.8	2.6	3.2
	冬季	1.7	2.2	3.0	3.6

注:表中 0、10%、20%、30% 表示电动汽车渗透率,后同。

表 3 不受控充电模式下配网最大电压偏移^[26]
Table 3 Maximum voltage deviation of distribution
network in uncoordinated charging mode^[26]

充电时段	季节	不同渗透率下最大电压偏移/%			
		0	10%	20%	30%
21:00 至次日 06:00	夏季	3.1	3.5	4.4	5.0
	冬季	4.2	4.4	4.9	5.5
18:00—21:00	夏季	3.0	4.4	6.5	8.1
	冬季	4.8	6.3	8.5	10.3
10:00—16:00	夏季	3.0	4.1	5.6	6.9
	冬季	3.7	4.9	6.4	7.7

表 2、3 中算例针对的是 4 kW 充电机在不受控的充电模式下,不同电动汽车渗透率对应的功率损失百分数和最大电压偏移百分数。计算结果表明,电动汽车接入充电时,配电系统的网损和电压偏移都增大,而且随着电动汽车渗透率的增加,网损和电压偏移进一步增加,在配网负荷高峰时段,这种影响表现更显著。

综上所述,随着电动汽车渗透率增加,充电影响也成比例增加。现有充电影响研究主要集中在可靠性指标、电能质量指标和运行经济性指标方面,基本上是基于具体的应用场景,假定电动汽车都是在负荷低谷时段充电,虽然短期内系统现有发电容量可以满足电动汽车充电功率需求,但车主更倾向于充电的便利性,因此关于充电对系统可靠性的影响应聚焦在实际充电时段内对系统发电容量的影响研究,需更多地考虑和描述充电过程的随机特性。此外也有少数文献开展了大量电动汽车充电对电力市场影响的研究^[27-33],分析了电动汽车参与 V2G 辅助服务、电动汽车代理商参与市场竞价、电动汽车的分散性特点等对市场运营机制的影响等,但此类研究较少,有待进一步深入。关于电动汽车充电影响过程的暂态特性介绍很少,基本处于空白,这也是值得关注的方向。

3 电动汽车有序充电策略方法

为了抑制或消除电动汽车充电的负面影响^[34-39],有序充电的策略方法应运而生,且已成为目前研究的热点。本文对当前国内外研究现状进行了归纳总结,并从基于最优经济运行的有序充电、基于最优市场机制和商业模式的有序充电以及基于时空维度的有序充电 3 个方面加以分析。

3.1 基于最优经济运行的有序充电

大量电动汽车充电对电网的影响主要集中在与之直接相连的配电系统,因此大部分最优充电策略都是围绕避免过负荷、减少功率损失、降低充电成本^[40]等展开。

a. 以功率损失最小为目标。

比较典型的一部分文献^[26,41]以最小功率损失作

为优化目标实现有序充电,具体描述为式(1)、(2)。它们从电网侧功率损失和电压偏移的角度研究了大量 PHEVs 充电对居民配电网的影响。假设汽车全部在家里充电且在夜间充电,假设电池开始充电时初始荷电状态为零,每次充电都充满为止,给出了一个最优充电策略,以序列二进制规划求解。结果证明对电动汽车的充电行为进行协调优化,可以降低系统的峰荷需求,并在很大程度上减小功率损失,提高功率因数。文献[42]则指出,以功率因数或负荷波动最小为目标函数时,较功率损失最小作为目标函数在计算时间和计算复杂度上有一定的优势,这对于实时调度是非常重要的。

$$\min \sum_{t=1}^{t_{\max}} \sum_{l=1}^{n_l} R_l I_{l,t}^2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & S_{\min,n,t} \leq S_{n,t} \leq S_{\max,n,t} \quad \forall t, \forall n \in V_n \\ & \sum_{t=1}^{t_{\max}} (P_{n,t} \Delta t C_n) = B_{\text{ackl}} \quad \forall n \in V_n \end{aligned} \quad (2)$$

其中, R_l 表示线路 l 的电阻; $I_{l,t}$ 表示 t 时刻线路 l 的电流; $t_{\max}$ 表示充电截止时刻; n_l 表示线路总数; V_n 表示网络节点空间; $S_{\min,n,t}$ 表示在 t 时刻节点 n 的最小允许功率; $S_{\max,n,t}$ 表示在 t 时刻节点 n 的最大允许功率; $S_{n,t}$ 表示在 t 时刻节点 n 的功率; $P_{n,t}$ 表示在 t 时刻节点 n 的充电功率; Δt 表示充电功率的时间分段; $C_n \in \{0, 1\}$, $C_n=1$ 表示节点 n 有电动汽车接入, $C_n=0$ 表示节点 n 没有电动汽车接入; B_{ackl} 表示节点 n 电动汽车电池容量之和。

b. 以充电成本最小为目标。

另一部分文献则以最小充电成本或总的最小发电成本为目标实现有序充电。文献[43-44]考虑了充电电价的影响,以充电成本最小为目标函数提出了最优充电策略,具体可以表示为式(3)—(5)。后者还考虑了电池充电功率和荷电状态之间的关系,采用启发式算法求解,在多个不同的时间间隔内比较最优充电策略和典型充电之间的充电成本和功率需求。研究表明,最优充电策略在减小充电成本和平抑负荷曲线方面有很大的优势。文献[45-47]在计及电动汽车充电负荷情况下,以总的发电成本最小提出优化模型,实现大量电动汽车的有序充电,常用约束条件包括发电容量约束、支路潮流约束、节点注入功率等式约束和电动汽车充电负荷约束。

$$\min C = \int_{t_0}^{t_0+T} M(t)P(t)dt \quad (3)$$

$$\int_{t_0}^{t_0+T} P(t)dt = (1 - \text{SOC})B_{\max} \quad (4)$$

$$0 \leq P(t) \leq P_{\text{battery}}(t) \text{ 且 } P_{\text{battery}}(t) = f(\text{SOC}) \quad (5)$$

其中, C 表示充电成本; t_0 表示开始充电时间; T 表示充电持续时间; t_0+T 表示充电的结束时间; $M(t)$ 表示 t 时刻的单位电价; $p(t)$ 表示 t 时刻的充电功率; $B_{\max}$

表示电池满电量时的电能量;SOC表示电池的初始荷电状态; $P_{\text{battery}}(t)$ 表示电动汽车电池在 t 时刻的最大允许充电功率,与电池的充电特性有关,还受到车主充电行为、充电机最大充电功率的影响; $f(\text{SOC})$ 表示电池的初始荷电状态与充电功率间的函数关系。

3.2 基于最优市场机制和商业运营模式的有序充电

3.2.1 最优市场机制

用来平衡和协调车主与系统需求矛盾的方法有3种:一是通过增加额外的能量来解决,这是一种粗放的办法;二是统一进行计划调度,服从既定的安排,显然这种办法效果是有限的,不能完全发挥汽车的潜能;三是采用智能控制办法,目前还处于理论探索阶段。

a. 基于需求侧响应理论的集中充电机制。计及供电侧填谷效果与用户成本,以实时电价为背景,文献[48]提出了基于需求侧响应思想的PHEVs集中充电机制,通过基于动态估计插值的算法算例仿真表明,文中提出的PHEVs集中充电策略可以有效地降低峰谷差,节约用户充电成本。

b. 统一调控引导机制。文献[49]在电动汽车充电行为中引入排队论,提出通过广播信息来引导汽车充电,考虑随机干扰的情况下采用M/M/ ∞ 模型模拟了此情况下汽车充电的动态行为,给出了通过合理选择播放信号实现在电网峰荷时间段充电汽车的平均数量最小。

c. 代理商机制。文献[50-51]阐述了代理商的必要性,对于无代理和存在代理的2种控制架构,文献[52]在电力辅助服务市场环境下从可行性、可靠性和经济效益这3个方面进行比较。结果表明,虽然电动汽车用户从代理控制架构中获利较少,但存在代理商的控制架构具有更好的可行性和可靠性;短期内,考虑电动汽车参与电力辅助服务的可行性,代理商的控制架构是更加现实的方式。

3.2.2 最优商业运营模式

a. 代理商模式。文献[53-54]从商业运营角度提出代理商模式。应用到大量电动汽车的充电行为中,从服务可行性和系统约束性考虑,大量的充电个体与电力系统之间必须通过中间代理的角色完成交易,即充电运营的代理商模式。若配电公司充当代理商角色,提供充电服务的同时系统的运行可靠性也能够得到保证,电动汽车厂商也可以充当充电服务的代理商,为车辆提供全生命周期的服务,同时独立的第三方机构也可能成为代理商。在不同代理商运营模式下,如何促成各方利益体的平衡是一个关键问题,这就需要对代理商模式下的充电市场机制和运营模式作深入研究和设计,但目前这方面的研究还较少见诸文献。

b. 充电服务模式。文献[55]分析了电动汽车充电站整车充电、更换电池2种运营模式,从其自身的竞争力、盈利方式及对电网运行的影响等3个方面对这2种运营模式进行了比较分析,最后得出以更换电池为主、整车充电为辅的运营模式将成为我国电动汽车充电站未来发展的主流模式。事实上,国家电网公司和南方电网公司早在国家《节能与新能源汽车产业发展规划》正式出台前,也提出了以换电池为主的充电设施发展思路。尽管这一思路与现在的“以充电为主的模式”相悖,但在换电模式下,车主只需租赁电池并缴纳相应的费用,电池的回收、更换、充电和维护由另一方完成,该模式便于电网侧对电池充电行为进行集中统一管理,最大限度发挥汽车充电负荷的削峰填谷作用,减小谐波污染,同时电动汽车的运营也更为便捷、高效和专业化。换电模式具体又表现为换电和充电在同一地点的充换电模式,以及换电和充电分立的集中充电统一配送模式。相比较整车充电模式下的有序充电调控,换电模式下的有序充电研究还比较少,文献[56-61]针对换电模式下的有序充电策略方法从不同的角度做了一些尝试,部分文献提出了基于分时电价的以总充电费用最小及日负荷曲线波动最小为目标的二阶段优化模型,或者以换电站充电功率为控制对象的有序充电调度策略,分别以负荷率最大、峰谷差最小、负荷波动最小为优化目标建立了优化模型,这些方法能在一定程度上降低电网峰谷差,减小负荷波动,起到移峰填谷的作用。部分文献则以换电站运营收益最大化为目标函数,建立换电站最优充放电策略的线性优化模型,或者是以充电站内全天充电费用最低为目标的换电站经济运行模型,实现最优经济运行的目标。换电模式下除了充电管理优化策略外,包含电池配送优化的服务网络规划设计及换电模式的配套标准体系建设都值得进一步研究。

c. 增值服务模式。文献[62]指出通过提供派生产品和辅助增值服务的方式,给出了电动汽车充电站运营的一种商业模式。派生产品主要是指满足充电约束下的不同充电方案,增值服务如电池检测、合同管理等。当然类似的增值服务也可以来自电动汽车群体,参与系统的调控,但需要结合上述代理商模式加以实现。文献[63]采用电动汽车交通和电力系统运行相结合的仿真模拟方法对电动汽车交通和电力系统运行之间的交互影响做了比较全面的研究,以评估不同充电策略下电动汽车运营模式及其对发电和碳排放的影响。

3.3 基于时空维度有序性的充电研究

3.3.1 基于时间维度的有序充电

基于时间维度的有序充电就是要采用合适的方

法抑制峰谷差,进一步引导均衡充电,提高负荷率。

文献[64]通过充放电时间的控制来平抑电动汽车充电负荷所带来的新的负荷高峰,提出分时电价,引导大家夜间充电,在夜间集中充电时间段又可能会出现新的负荷高峰,采用分区域交错充电的办法来避免夜间充电高峰。文献[65]提出通过遗传算法选取电动汽车最佳起始充电时间,使得电动汽车的充电负荷曲线接近理想曲线。文献[66]提出一种时间有序性的充电策略,指出在电网负荷低谷时,可用供电容量为 30%~70%,如果在时间上引导电动汽车充电,就可以避免负荷新的高峰,减小峰谷差,提高电网利用率。从另一个角度看,当大量电动汽车接入充电时,解决发电容量不足的办法就是调节充电时间,实现时间有序性充电,平抑峰谷差,电网功率损失和电压偏移的负面影响也将降低。文中提出了局部和全局 2 种优化充电策略。前者是依据每辆车充电信息实时控制充电行为,后者是针对某一区域一定数量汽车且在一定的假设条件下通过充电时间分割来实现每个时间段的控制。文献[67]提出采用经济激励措施来调节电动汽车充电时间,比如电价策略,使得车主在 23:00 至次日 07:00 之间充电,避开负荷高峰并填谷,但并没有详细介绍具体的模型和算法,只是给出了结论性的介绍。

3.3.2 基于空间维度的有序充电

考虑空间有序性,就是在满足配网运行约束的前提下合理进行充电站的选址和定容,避免出现网络阻塞。

a. 充电设施服务优化。文献[68]将电动汽车充电设施规划划分为示范阶段、公益阶段和商业运营阶段,并分析每个阶段的特点;提出了充电方式的选择优化模型,并基于此对各充电方式进行充电需求预测。文献[69]在分析电动汽车充电行为的基础上,基于排队论建立了充电设施服务系统排队模型。以充电设施服务系统总费用(包括充电服务费用和充电排队等待成本)最小为目标函数建立了充电设施费用最优模型。研究表明,通过合理配置充电设施,可以提高充电设备综合利用效率,实现有序均衡充电。

b. 充电站最优选址、定容。文献[70]建立了以充电成本和充电投资最小为目标的多目标优化模型,该模型主要考虑充电站的最优布局和规模,是对探索充电站优化布局的有益尝试,为充电空间有序性研究提供了借鉴。文献[71]指出当前缺乏电动汽车充电站布局规划的成熟理论,考虑充电站特点、充电行为特点、充电需求的分布以及电网规划、城市规划等因素,提出了一种充电站优化布局的多目标优化算法。文献[72]给出了一种充电站布局优化的两

阶段方法,首先把道路信息量化为一些数据点,然后应用聚类分析方法确定覆盖城市主要道路的一些充电站站址。文献[73]依据网格划分的思想提出了一种充电站选址和定容的方法,使得车主在到达充电地点期间的成本最小。选址模型主要依据充电总成本最小,包括到达充电站中间的功率损失成本和行驶过程中的间接成本。定容模型主要由充电站的交通流量换算出总的充电功率需求所决定。

3.4 电动汽车有序充电小结

基于最优经济运行的有序充电主要针对充电模式下功率损耗和电压偏移最小化展开,部分文献也以负荷波动或充电成本最小为优化目标。研究结果表明,这些优化策略除了减小功率损失外,同时可降低峰荷需求,提高负荷率,在一定程度上减小了充电对系统可靠性、经济运行的负面影响。基于最优市场机制和商业运营模式,则从降低系统峰谷差、节约车主充电成本、避免配网过载阻塞、引导有序均衡充电等方面给出了对应的调控机制和运营策略,对于车辆集中统一充电调控也给出了一些建设性的意见,一定程度上也便于对充电谐波污染进行集中治理优化,提高电能质量。基于时空维度的有序充电,则突出了系统侧对充电负面影响的应对策略,从时间、空间 2 个维度进行调控,提出了控制充电时间、电价政策引导、充电站最优选址定容等一系列措施,同样可以减小峰谷差,降低功率损耗和电压偏移,最小化充电成本,实现充电站间的有序均衡充电等,对于系统可靠性、运行经济性和电能质量都有所帮助,也是电力系统应对大量电动汽车充电接入的必要措施。

4 结论与展望

对大量电动汽车充电进行调控,可以实现不同角度的有序最优充电。实现有序充电的角度不同,策略方法亦不同。从车主或充电站运营商角度出发,实现最优的充电策略,就是充电成本最低或收益最大。从政府或公用事业部门出发,考虑的是最优市场机制和商业运营模式,以促进电动汽车推广和应用。从电网的角度出发,通过充电站最优选址、定容、布局以及电价策略的制定实现电动汽车充电的时空有序性。

实现电动汽车的有序充电,本质是一个关于充电的最优化问题。传统优化模型针对的主要是确定性系统,但电动汽车充电行为具有随机性,描述有序充电的优化模型及其算法更要适用于随机系统。基于目前的研究现状,未来有序充电研究的重点和可能突破包括但不限于以下方面:

a. 计及多种现实约束和实际场景,对电动汽车的充电负荷影响因素的概率分布规律进行准确模拟,掌握不确定性的充电负荷特性;

b. 开展电动汽车充电影响的暂态过程仿真模拟,掌握充电影响的机理;

c. 作为电力公司应对大量电动汽车充电接入在决策支持和规划控制上的理论依据,主配网规划与电动汽车充电站有序充电之间的关系研究至为重要;

d. 基于博弈论的充电电价定价机理和基于排队论的充电站选址定容策略,都是实现时间、空间维度有序充电的重要方向;

e. 不同代理商模式下,电动汽车充电市场机制和运营模式的研究和设计,特别是换电模式下的电动汽车充电电价的定价理论需要进一步深入研究。

本文关注的重点虽然是大量电动汽车接入电网的充电研究,但有关电动汽车参与 V2G 模式以及电动汽车与电网双向互动等问题也必将是另一个重要的研究与应用方向。

参考文献:

- [1] SANTOS A, MCGUCKIN N, NAKAMOTO H Y, et al. Summary of travel trends: 2009 national household travel survey [R]. Washington, USA: U.S. Department of Transportation & Federal Highway Administration, 2011.
- [2] LI Gan, ZHANG Xiaoping. Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 492-499.
- [3] ASHTARI A, BIBEAU E, SHAHIDINEJAD S, et al. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 341-350.
- [4] 杨少兵, 吴命利, 姜永春, 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.
- [5] SUNGWOON B, KWASINSKI A. Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 394-403.
- [6] JONG-RYUL W, YONG-BEUM Y, KYUNG-JIN L. Prediction of electricity demand due to PHEVs distribution in Korea by using diffusion model [C] // IEEE Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. Seoul, Korea: IEEE, 2009: 1-4.
- [7] 刘鹏, 刘瑞叶, 白雪峰, 等. 基于扩散理论的电动汽车充电负荷模型 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 30-34.
LIU Peng, LIU Ruiye, BAI Xuefeng, et al. Charging load model based on diffusion theory for electric vehicles [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 30-34.
- [8] 周念成, 熊希聪, 王强钢. 多种类型电动汽车接入配电网的充电负荷概率模拟 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 1-7.
ZHOU Niancheng, XIONG Xicong, WANG Qianggang. Simulation of charging load probability for connection of different electric vehicles to distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 1-7.
- [9] QIAN Kejun, ZHOU Chengke, ALLAN M, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 802-810.
- [10] GUO Qinglai, WANG Yao, SUN Hongbin, et al. Factor analysis of the aggregated electric vehicle load based on data mining [J]. Energies, 2012, 5(6): 2053-2070.
- [11] Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. National household travel survey [EB/OL]. [2010-07-10]. http://nhts.ornl.gov/tables09/FatCat_Aspix.
- [12] Transport NSW. Summary report of 2008 household travel survey [R]. Sydney, Australia: The Transport Data Centre of Transport NSW, 2010.
- [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] 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.
- [15] UNGAR E, FELL K. Plug in, turn on, and load up [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(3): 30-35.
- [16] HADLEY S W, TSVETKOVA A. Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation [R]. Oak Ridge, USA: U.S. Department of Energy, 2008.
- [17] MEYERS M K, SCHNEIDER K, PRATT R. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids part 1: technical analysis [R]. Washington, USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2007.
- [18] SCOTT M J, MEYERS M K, ELLIOTT D B, et al. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids part 2: economic assessment [R]. Washington, USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2007.
- [19] LINDLY J, HASKEW T. Impact of electric vehicles on electric power generation and global environmental change [J]. Advances in Environmental Research, 2002, 6(3): 291-302.
- [20] TAYLOR J, MAITRA A, ALEXANDER M, et al. Evaluations of plug-in electric vehicle distribution system impacts [C] // IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [21] ARGAGE S, ARAVINATHAN V, JEWELL W. Probabilistic modeling of EV charging and its impact on distribution transformer loss of life [C] // 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC). Greenville, SC, USA: IEEE, 2012: 1-8.
- [22] KAZERONI M, KAR N C. Impact analysis of EV battery charging on the power system distribution transformers [C] // 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC). Greenville, SC, USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [23] GOMEZ J C, MORCOS M M. Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 975-981.
- [24] 黄梅, 黄少芳. 电动汽车充电站谐波的工程计算方法 [J]. 电网技术, 2008, 32(20): 20-23.
HUANG Mei, HUANG Shaofang. A harmonic engineering calculation method for electric vehicle charging station [J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 20-23.
- [25] 赵伟, 姜飞, 涂春鸣, 等. 电动汽车充电站入网谐波分析 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 61-66.

- ZHAO Wei,JIANG Fei,TU Chunming,et al. Harmonic currents of grid-connected EV charging station[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):61-66.
- [26] CLEMENT-NYNS K,HAESSEN 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.
- [27] CARNUS C,FARIAS T,ESTEVEZ J. Potential impacts assessment of plug-in electric vehicles on the Portuguese energy market [J]. Energy Policy,2011,39(10):5883-5897.
- [28] JUSTINE J,FIONA O,TIM N. Electric vehicles in Australia's national electricity market:energy market and policy implications [J]. The Electricity Journal,2012,25(2):63-87.
- [29] WANG Lizhi. Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on locational marginal prices[C]//IEEE Energy 2030 Conference. Atlanta,GA,USA:IEEE,2008:1-7.
- [30] GRAHN P,SODER L. The customer perspective of the electric vehicles role on the electricity market[C]//The 8th International Conference on the European Energy Market (EEM). Zagreb,Yugoslavia:IEEE,2011:141-148.
- [31] PAPADASKALOPOULOS D,STRBAC G. Participation of electric vehicles in electricity markets through a decentralized mechanism [C]//2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). Manchester,UK:IEEE,2011:1-8.
- [32] 施泉生,平宗飞,陈敏骏. 计及电动汽车入网的电价联动模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):34-40.
- SHI Quansheng,PING Zongfei,CHEN Minjun. Electricity price linkage model considering V2G[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):34-40.
- [33] 王晔,谢鸣,张少华. 考虑电动汽车的电力市场均衡分析[J]. 电网技术,2014,38(11):2993-2998.
- WANG Xian,XIE Ming,ZHANG Shaohua. Analysis on equilibrium of electricity market under grid-integration of electric vehicles [J]. Power System Technology,2014,38(11):2993-2998.
- [34] 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]//The 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). Ohrid,Macedonia:IEEE,2010:196-203.
- [35] PUTRUS G A,SUWANAPINGKARL P,JOHNSTON D,et al. Impact of electric vehicles on power distribution networks[C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Dearborn,MI,USA:IEEE,2009:827-831.
- [36] ACHA S,GREEN T C,SHAH N. Effects of optimized plug-in hybrid vehicle charging strategies on electric distribution network losses[C]//IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans,LA,USA:IEEE,2010:1-6.
- [37] DOW L,MARSHALL M,XU Le,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,USA:IEEE,2010:1-6.
- [38] 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.
- [39] DENHOLM P,SHORT W. An evaluation of utility system impacts and benefits of optimally dispatched plug-in hybrid electric vehicles[R]. [S.L.]:National Renewable Energy Laboratory,2006.
- [40] 王建,吴奎华,刘志珍,等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):47-52.
- WANG Jian,WU Kuihua,LIU Zhizhen,et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):47-52.
- [41] CLEMENT K,HAESSEN E,DRIESEN J. Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grid[C]//IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle,WA,USA:IEEE,2009:1-7.
- [42] SORTOMME E,HINDI M M,MACPHERSON S D J,et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicle to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2011,2(1):198-205.
- [43] 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.
- [44] CAO Yijia,TANG Shengwei,LI Canbing,et al. An optimized EV charging model considering TOU price and SOC curve [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2011,2(4):1-6.
- [45] SOJOUDI S,LOW S H. Optimal charging of plug-in hybrid electric vehicles in smart grids[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,CA,USA:IEEE,2011:1-6.
- [46] DEILAMI S,MASOUM A S,PAUL S M,et al. Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2011,2(3):456-467.
- [47] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):22-29.
- ZHAO Junhua,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(20):22-29.
- [48] 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 under electricity markets based on spot pricing[J]. Automation of Electric Power systems,2011,35(14):62-67.
- [49] BAEK S J,KIM D,SEONG-JUN O,et al. A queuing model with random interruptions for electric vehicle charging systems [C]//2011 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). Las Vegas,NV,USA:IEEE,2011:679-680.
- [50] HAN S,HEE S,SEZAKI K. Design of an optimal aggregator for vehicle-to-grid regulation service[C]//IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Gaithersburg,MD,USA:IEEE,2010:1-8.
- [51] SANDELS C,FRANKE U,INGVAR N,et al. Vehicle to grid-Monte Carlo simulations for optimal aggregator strategies [C]//2010 International Conference on Power System Technology. Hangzhou,China:IEEE,2010:1-8.
- [52] QUINN C,ZIMMERLE D,BRADLEY T H. The effect of communication architecture on the availability,reliability,and

- economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(5):1500-1509.
- [53] KEMPTON W, TOMI J. Vehicle to grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1):280-294.
- [54] KEMPTON W, TOMIC J, LETENDRE S, et al. Vehicle-to-grid power: battery, hybrid, and fuel cell vehicles as resources for distributed electric power in California[R]. Sacramento, USA: California Air Resources Board, 2001.
- [55] 周逢权, 连湛伟, 王晓雷, 等. 电动汽车充电站运营模式探析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21):63-66.
- ZHOU Fengquan, LIAN Zhanwei, WANG Xiaolei, et al. Discussion on operation mode to the electric vehicle charging station[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21):63-66.
- [56] 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.
- 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.
- [57] 田文琦, 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.
- [58] 孙伟卿, 王承民, 曾平良, 等. 基于线性优化的电动汽车换电站最优充放电策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1):21-27.
- SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. An optimal charging/discharging strategy for electric vehicle battery swapping stations based on linear optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1):21-27.
- [59] 张帝, 姜久春, 张维戈, 等. 基于遗传算法的电动汽车换电站经济运行[J]. 电网技术, 2013, 37(8):2101-2107.
- ZHANG Di, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Economic operation of electric vehicle battery swapping station based on genetic algorithms[J]. Power System Technology, 2013, 37(8):2101-2107.
- [60] 刘玉娇, 蒋传文, 王旭, 等. 采用随机约束和多目标算法的电动汽车换电站能量管理[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8):59-63.
- LIU Yujiao, JIANG Chuanwen, WANG Xu, et al. Energy management with stochastic constraint and multi-objective optimization algorithm for electric vehicle battery swap station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8):59-63.
- [61] 曾正, 赵荣祥, 杨欢, 等. 电动汽车高渗透率的应对策略及换电站的最优规划[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9):7-12.
- ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan, et al. Responsive schemes to high penetration of electric vehicles and optimal planning of battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9):7-12.
- [62] XU Chen, SHENG Yongmei, LI Yuewu. A preliminary study on the business model for electric vehicle charging stations[C]//2010 China International Conference on Electricity Distribution. Nanjing, China; IEEE, 2010:1-5.
- [63] HUBNER M, ZHAO L, MIRBACH T, et al. Impact of large-scale electric vehicle application on the power supply[C]//IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). Montreal, QC, USA; IEEE, 2009:1-6.
- [64] KOYANAGI F, URIU Y. A strategy of load leveling by charging and discharging time control of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3):1179-1184.
- [65] SUGII Y, TSUJINO K, NAGANO T. A genetic-algorithm based scheduling method of charging of electric vehicles[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Tokyo, Japan; IEEE, 1999:435-440.
- [66] METS K, VERSCHUEREN T, HAERICK W, et al. Optimizing smart energy control strategies for plug-in hybrid electric vehicle charging[C]//2010 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium Workshops. Osaka, Japan; IEEE, 2010:293-299.
- [67] MALLETTE M, VENKATARAMANAN G. Financial incentives to encourage demand response participation by plug-in hybrid electric vehicle owners[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, GA, USA; IEEE, 2010:4278-4284.
- [68] 吴春阳, 黎灿兵, 杜力, 等. 电动汽车充电设施规划方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24):36-45.
- WU Chunyang, LI Canbing, DU Li, et al. A method for electric vehicle charging infrastructure planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24):36-45.
- [69] 李如琦, 苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14):58-61.
- LI Ruqi, SU Haoyi. Optimal allocation of charging facilities for electric vehicles based on queuing theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14):58-61.
- [70] 任玉珑, 史乐峰, 张谦, 等. 电动汽车充电站最优分布和规模研究[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14):53-57.
- REN Yulong, SHI Lefeng, ZHANG Qian, et al. optimal distribution and scale of charging stations for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14):53-57.
- [71] WANG Hengsong, HUANG Qi, ZHANG Changhua, et al. A novel approach for the layout of electric vehicle charging station[C]//International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis. Chengdu, China; IEEE, 2010:64-70.
- [72] IP A, FONG S, LIU E. Optimization for allocating BEV recharging stations in urban areas by using hierarchical clustering[C]//The 6th International Conference on Advanced Information Management and Service. Seoul, Korea; IEEE, 2010:460-465.
- [73] GE Shaoyun, FENG Liang, LIU Hong. The planning of electric vehicle charging station based on grid partition method[C]//International Conference on Electrical and Control Engineering. Yichang, China; IEEE, 2011:2726-2730.

作者简介:



郭建龙

郭建龙(1982—),男,山西兴县人,博士研究生,主要研究方向为电动汽车充电负荷建模、电动汽车有序充电及其对系统的影响、电力系统最优化分析计算(E-mail: guojl5103@163.com);

文福拴(1965—),男,河南安阳人,特聘教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场、智能电网与电动汽车(E-mail: fushuan.wen@gmail.com)。

(下转第30页 continued on page 30)

High-efficient battery charging system based on current-source PWM rectifiers

GUO Qiang¹, LIU Heping¹, PENG Donglin², ZHANG Yi¹, LIU Qing¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment of Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: CSR (Current-Source Rectifier) is adopted as the system topology of large-power charging system to improve its battery voltage adaption and charging efficiency. The indirect current control strategy is employed to carry out the delayed correction of grid-side voltage signal for the unit power factor control at grid-side. Based on the traditional CC-CV (Constant Current-Constant Voltage) charging mode, a CC-CV switchover algorithm based on the fuzzy-reasoning control strategy is proposed according to the electrochemical characteristics of the battery. The frequency-domination method is applied to analyze the transfer function of control loop in the CV charging mode and the impact of digital time delay on charging system is considered. In order to improve the overall performance of charging system, the MATLAB/SISO design tool is applied to optimize the zero-point position of loop controller and the loop gain for inner current loop and outer voltage loop. The correctness and feasibility of the proposed strategy are verified by the simulative and experimental results.

Key words: electric vehicles; current-source rectifier; electric batteries; charging; fuzzy control; controller design; indirect current control; transfer functions

(上接第 9 页 continued from page 9)

Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures

GUO Jianlong¹, WEN Fushuan²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The key points and status quo of the researches on coordinated electric vehicle charging are summarized, including charging load description, charging impact simulation and coordinated charging strategy. The charging load description is classified into three types: charging behaviour, probability model and intelligent algorithm. The influencing factors of charging load and the relationships among them are investigated, and it is suggested that, the stochastic method based on probability model is the main modelling approach to analyze the random charging behaviour of massive electric vehicles while the accurate simulation of influencing factor is the direction of model improvement. The impacts of heavy electric vehicle charging load on power system are summarized in three aspects: system reliability, power quality and operating economy. The simulative results of charging impact and the relevant control methods are analyzed, and it is pointed out that, the randomness and distribution of electric vehicle charging should be more considered and more attention should be paid to its transient process. The coordinated charging strategies are classified into three types: optimal charging model, optimal market mechanism and business pattern, and spatial-temporal sequence, all of which are essentially related to the optimization of stochastic system. It is further pointed out that, the relationship between distribution system planning and coordinated electric vehicle charging as well as the pricing theory of battery-swapping should be more deeply studied to provide theoretical basis for the coordinated electric vehicle charging in both time and space dimensions.

Key words: electric power systems; electric vehicles; charging load; charging impact; coordinated charging; models