

电动汽车充电负荷与调度控制策略综述

王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 杜超

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Survey of Electric Vehicle Charging Load and Dispatch Control Strategies

WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, DU Chao

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University),

Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: With the popularization and application of electric vehicles, charging load has a great influence on the power system operation. Charging Control is becoming an important power system operation strategy as well as generation dispatch. A volume of research has been devoted to charging control (including vehicle-to-grid, so-called V2G) which can not only alleviate the adverse effects of charging load but also support the grid operation such as leveling the load and promoting the integration of renewable generation. We reviewed the recent investigations on charging load and charging control including the analysis and simulation models of charging load, the revenue of charging control and dispatch control strategies in this paper. In addition, we pointed out some open questions and potential research directions in this paper.

KEY WORDS: electric vehicles; load dispatch; charging load; charging control; vehicle-to-grid (V2G)

摘要: 电动汽车的普及已成为一种趋势, 将会对电力系统运行产生深刻影响。电动汽车充电控制将成为系统运行控制的重要手段, 不仅能够限制充电负荷的不利影响, 而且能够实现负荷削峰填谷, 促进可再生能源吸纳, 发挥负荷调度的作用。该文介绍了近年来充电负荷、充电控制领域内的研究成果, 涉及充电负荷仿真分析模型、充电控制效益、充电控制策略研究等方面; 同时指出了尚未解决的问题和可能的研究方向。

关键词: 电动汽车; 充电负荷; 负荷调度; 充电控制; V2G

0 引言

发电与负荷的实时平衡是维持电力安全、稳定

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2011AA05A103); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100201110022)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2011AA05A103); Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (2011AA05A103).

运行的基本要求。可再生能源发电出力的随机性、波动性将成为未来电力系统运行面临的巨大挑战, 传统的、以发电跟踪负荷波动实现系统平衡、以发电控制调整系统运行状态的运行策略和控制手段将难以为继。负荷调度——利用负荷追踪可再生能源出力变化, 控制负荷调整系统运行状态, 作为发电调度的补充, 将在未来的电力系统运行中发挥重要作用。可控负荷的广泛存在, 特别是近年来电动汽车的加速推广为负荷调度的实施创造了有利条件。

电动汽车在节能减排、遏制气候变暖以及保障石油供应安全等方面有着传统汽车无法比拟的优势, 受到了各国政府、汽车生产商以及能源企业的广泛关注。日益提升的电池设备、充电技术以及充电设施也促进电动汽车不断普及。研究表明, 在中等发展速度下, 至 2020、2030 和 2050 年, 电动汽车占美国汽车总量的比例将分别达到 35%, 51%和 62%^[1]。我国也制定了适合国情的发展规划, 推进电动汽车产业化进程, 提高车网(电网)融合程度^[2]。

根据使用能源和驱动系统的不同, 电动汽车可以分为纯电动汽车(pure electric vehicles, PEV)、插电式混合动力电动汽车(plug-in hybrid electric vehicles, PHEV)及燃料电池电动汽车。其中, 纯电动汽车完全靠电能驱动; 插电式电动汽车采用汽油和电能驱动; 燃料电池电动汽车则以清洁燃料发出电能驱动。纯电动汽车受电池容量限制, 尚未大规模普及, 但代表着未来发展方向; 插电式电动汽车采用两种能源, 在提高能效的同时, 使用方便、灵活, 已具有相对成熟的技术, 逐渐进入产业化的阶段^[2]。本文所提到的电动汽车特指前两种, 它们需要从电网汲取电能, 具有充电行为。

电动汽车大规模使用, 充电负荷接入电网, 将对电力系统的规划、运行以及电力市场的运营产生深刻影响^[3-4]。由于受诸多因素影响, 充电负荷具有复杂特性^[5-7]。就单一车辆而言, 它主要由用户出行需求决定, 同时受到用户使用习惯、设备特性等因素的影响^[8-11]。就区域电力系统而言, 它还受到电动汽车数量规模、充电设施完善程度的影响^[12-14]。由于用户需求和用户行为的不确定性与相互差异, 充电负荷具有一定的随机性、分散性^[15]。充电负荷引起的负荷增加, 将对电力系统的发、输、配电容量提出更高的要求^[16-19]; 充电负荷在影响配电网损耗^[20-21]和电压水平的同时^[20-22], 也会对配电网三相负载平衡^[23]、配电变压器寿命产生影响^[24], 还会引发配电网负荷局部过载^[25]等问题; 由于充电谐波的存在还会影响配电网电能质量^[26]。在电力市场运营方面^[27-31], 电动汽车、电动汽车 aggregator 将成为新的市场参与方, 参与市场竞价和辅助服务的提供^[29-30]; 电动汽车的庞大数目和分散特性, 使得市场运营机制由集中式向分散式转变^[31]。分散机制的复杂电力市场稳定运行也成为一個值得关注的问题。

电池的储能能力使得用户在充电时间选择上具有一定的灵活性, 充电负荷具有一定的可控性。初期研究表明, 恰当的充电控制不仅能够抑制、消除电动汽车对电网的不利影响, 而且能够支撑电网运行^[32-43], 负荷调度的效益初步显现。特别是 V2G (vehicle-to-grid) 技术的提出使得可在平均高达 96% 的空闲时间内利用电动汽车储能资源, 调整充放电过程, 促进可再生能源电力吸纳, 为电网提供辅助服务^[32-33]。

电动汽车普及、使用将对电力系统产生深刻影响, 涉及诸多问题, 如市场化运营^[44]、充电设施设备建设开发^[45]等, 本文将以充电负荷相关研究的介绍为基础, 阐述充电控制的效益, 着重介绍充电控制策略方面的最新研究成果, 并指出存在的问题和可能的研究方向。

1 充电负荷

1.1 影响充电负荷的因素

电动汽车对电力系统的影响主要通过充电负荷实现, 充电负荷集中反映了电动汽车对电力系统的影响; 同时, 这种影响的结果很大程度上取决于充电负荷的特征。

充电负荷性质复杂, 主要取决于以下因素。

1) 出行需求: 主要指用户的行驶里程、出行时间、出行频率与出行目的等。它们决定了用户的充电时间、需求电能以及获得充电服务的情况。

2) 使用习惯: 反映了用户的充电偏好, 使用习惯的差异会使充电负荷呈现出一定的分散性。

3) 电池特性: 包括电池容量、充放电速率和充放电曲线等, 决定了实际的充放电功率及充电负荷曲线。

4) 充电设施: 决定了电动汽车是否能向电网馈送电能和充放电功率的大小。随着 V2G 技术的提出和推广, 能量双向流动的充电设施将成为主流。同时, 充电设施的完善程度将会对电动汽车的普及速度产生一定影响; 充电设施的分布特性将会对系统充电负荷的空间分布产生影响。

5) 电动汽车数量: 决定了充电负荷的整体规模。它反映了电动汽车普及速度, 与电动汽车价格、使用费用、电动汽车性能以及充电的方便性等因素密切相关。

6) 充电控制方式: 可以分为直接、间接两类。直接控制是指对充电时间加以限定, 如研究中常见的夜间充电 (night charge) 和谷时充电 (off-peak charge); 间接控制是指通过制定峰谷电价、实时电价或辅助服务价格等途径对用户充电行为加以引导, 往往涉及充电过程在特定目标函数下的优化。

与以上定性论述不同, 文献[12]将影响因素归结为内部因素、外部因素两类, 基于充电负荷的模拟, 采用数据挖掘的方法利用线性回归、支持向量机回归技术 (SVR) 对内部、外部因素的影响进行了分析。但这种研究工作的开展依赖于充电模拟的精度, 充电模拟的准确性对分析结果有较大影响。

1.2 充电负荷模型

1.2.1 基于出行需求的方法

现有的充电负荷确定方法可以分为基于出行需求的确定分析法^[17-18]、Monte Carlo 模拟法^[5-11]和充电站充电负荷^[13-14]的概率分析法。

基于出行需求的计算方法由来已久, 早期的分析法往往假定电动汽车出行时间服从特定的简单分布, 进而计算各个时段需要充电的电动汽车数量, 结合车辆出行距离的平均值, 得到各个时段确定的充电负荷。早期的 Monte Carlo 模拟法则是基于假设的出行时间概率分布和平均出行距离, 通过 Monte Carlo 模拟法确定满足一定误差水平的各个

时段充电负荷的期望值^[44,48]。

当前的基于出行需求的计算方法认为电动车辆对传统车辆的替代使用不会影响用户出行特征，因而利用用户出行特征统计数据进行研究。限于数据的可获取性，研究数据多取用美国 NHTS 统计结果^[15]。确定分析法往往直接从统计数据中提取用户的出行特征参数^[11-12]，而 Monte Carlo 模拟法则通过参数拟合获得反映用户出行特征参数的概率分布，基于此概率分布进行 Monte Carlo 模拟，进行概率性分析^[8-11]。

文献[8]根据充电模式、电价政策以及充电地点不同，假定了起始充电时间的概率密度函数，通过参数拟合获得行驶里程的概率密度函数，结合电池特性，通过卷积计算获得单一车辆时序的充电功率期望，并根据中心极限定理对电动汽车群的充电功率分布进行研究。与文献[8]类似，文献[9-10]也从相关出行特征的概率分布出发，分析时序充电功率的分布情况，并采用 Monte Carlo 模拟方法求取时序的充电负荷期望。文献[11]采用更为详细的统计数据，以条件概率的形式考虑了出行时刻和行驶距离间的相关性，得到更为精确的模拟结果。

基于出行需求的计算方法从影响充电负荷因素入手，通过模拟获得系统充电负荷，能够方便研究各种因素对充电负荷的影响。这种方法可以方便地获得具有时序特征的全系统充电负荷，但难以揭示充电负荷的空间分布特征。

1.2.2 充电站充电负荷概率分析法

此类方法从充电站角度出发，基于抵达充电站的电动汽车数量和充电需求在本质上是一种随机过程这一事实，对充电负荷进行概率性分析。复合泊松过程、排队论在加油、售票等服务业中的广泛应用为此种方法提供了坚实的基础与广泛的参考。文献[13]根据充电站的充电桩数量、电动汽车的平均充电时间与到达时间间隔的均值等参数，利用排队论模型导出了某一时刻抵达充电站充电的电动汽车数量 n 的概率分布；同时根据行驶里程的分布状况，分析第 i 辆电动汽车的充电需求，二者结合得到充电站时序充电功率的分布情况。文献[14]考虑了充电站周边道路的拓扑结构和行车速度，利用动态交通流模型给出了排队论模型中相关参数的取值，使分析结果更为详尽、准确。

这种方法能够计及充电负荷的空间分布特性，在充电站的规划、建设与运行中可以发挥巨大作

用，但在计算系统总体充电负荷方面具有一定困难，有待进一步研究。

2 充电调度控制的效益

通过恰当的充电控制特别是 V2G 控制，不仅能够有效控制充电负荷对系统的负面影响，而且能够丰富系统运行、控制手段，产生巨大效益。所谓 V2G 是指电动汽车不仅能够从电网汲取电能，而且能够向电网输送电能。由于单一电动车辆充电负荷小、电池容量有限，因而研究人员提出了电动汽车 aggregator 的概念。aggregator 是指一定数量的电动汽车的聚集体，具有一定规模的可调度负荷和储能容量，将成为电动汽车充电控制、参与电力市场的重要形式，文献[44]对其概念和角色进行了详细阐述。下面将对充电调度控制的效益进行分类介绍。

1) 削峰填谷，提高负荷率和设备使用率，减少、减缓电力系统规划建设投资。电动汽车选择负荷低谷时段充电或在低谷时段充电、在高峰时段放电，能实现负荷曲线的削峰填谷，提高负荷率和设备使用率，充分挖掘现有电力系统供电特别是支撑电动汽车运行能力，在保证供电可靠性的同时，延缓系统扩建计划。文献[17]中引入填谷的充电控制使系统可容纳的电动汽车数量由汽车总数的 20% 提升至 50%。文献[34]探讨了现有体系结构下电动汽车并网问题，并初步分析了 V2G 控制下的系统规划问题。

2) 跟踪可再生能源出力，维持电力系统运行平衡。传统电力系统运行中，调度、控制发电机出力满足预测负荷，维持系统平衡。可再生能源大规模并网使发电侧出力具有一定的随机性，对系统平衡提出巨大挑战。进行积极的充电(V2G)控制，可以实现充电负荷对可再生能源出力变化的跟踪，促进可再生能源吸纳^[33]。文献[35]以丹麦电力系统为例，分析了充电控制对于促进风电吸纳、减少温室气体排放的作用。文献[36]考虑了风电与用户充电的随机性，利用 V2G 平抑风电出力波动，并分析了电动汽车普及率、风电场规模对于功率追踪的影响。

3) 为系统提供辅助服务。一般通过控制、调节发电机出力状态和出力水平，提供调频、调峰及备用等辅助服务；通过充电负荷控制也可以达到类似效果。文献[32]以 2003 年的加州电力市场为背景，基于电池容量计算分析了 V2G 技术在调频、

旋转备用和调峰三种辅助服务市场中可能的应用,并对一台 RAV4 电动汽车整年可获得的收益进行了分析。文献[37]也以加州电力市场为研究背景,通过实际实验说明了利用电动汽车提供调频服务的可行性与实用性,研究结果表明在大多数情形下用户收益多于充放电损耗。文献[38]计算了 V2G 在德国、瑞典电力市场中提供调频服务的收益,并就其参与市场竞争进行了态势分析。同时,与发电机控制相比,负荷控制具有更快的响应速度、更为灵活的响应特性,可以为电力系统提供新型辅助服务。文献[39]指出电动汽车电池的快速响应能力大大减轻了常规机组在多风电的丹麦电力系统中的调节负担。文献[40]针对电动汽车提出了削峰、调频同时进行的新型辅助服务,以充分发挥其效益。

4) 充电控制能够丰富电网运行的调节、控制手段。通过控制各节点电动汽车的充电行为,可以改变电力系统潮流分布情况,从而降低系统网损、改善系统电压质量。例如,网络损耗可以通过电容器投切、变压器分接头调整等多种手段控制,也可以通过充电控制在时序上对其进行优化。这种控制在配电网中的应用在研究中得到了证实^[49-51]。同时,电动汽车 V2G 技术在柔性交流输电(FACTS)系统中也能发挥调节、控制作用,并替代某些电力电子设备实现相应的功能^[41-42]。文献[41]利用 V2G 技术设计实现了统一潮流质量控制器(unified flow quality conditioner, UPQC),代替了传统的无功补偿装置和滤波装置;而文献[42]则利用电动汽车充电站的充电控制提供 STACOM-APF 的功能。这种控制通常不涉及目标函数,需要通过实时计算得到充、放电功率。电动汽车的充放电行为会对电力系统暂态稳定性有一定程度的影响,文献[43]对此进行了仿真分析,并提出利用广域控制系统加以限制,但尚未涉及利用对充放电的积极控制协助维护系统暂态稳定。

综上所述,充电控制不仅能够维持系统有功平衡、为系统提供辅助服务,而且能够降低系统建设、运行成本,还能丰富系统运行中的调节、控制手段,支撑电网运行,在可再生能源吸纳方面发挥重要作用。

3 充电调度控制策略

3.1 概述

充电调度控制策略是充电控制效益实现的基

础和先决条件;依照特定的策略实施充电控制,可以在限制充电负荷对电力系统负面影响的同时,发挥充电控制特定的效益。下面,将对充电控制策略研究的相关情况进行介绍。

按研究层面划分,充电控制策略研究可以分为:1)单一电动车辆充电控制;2)电动汽车群充电控制,通常是 aggregator 和配电网层面的研究;3)区域电力系统电动车辆充电控制。按功率流向划分,可以分为:1)单纯的充电控制,只考虑电动汽车充电行为,不考虑电动汽车向电网馈送电能的情况;2)V2G 控制,充电汽车与电网相连时,电能可在电池与电网之间双向流动,涉及电动汽车向电网馈送电能的情形。

3.2 单一车辆充电控制

单一车辆的充电控制是分析用户费用、收益以及对市场信号响应的重要工具,通常是在实时电价、辅助服务价格以及燃料价格(针对 PHEV)下,满足电动汽车使用需求的同时,对用户充电过程进行优化,使电动车辆所需能源费用最小:

$$\min C_{\text{elec}}(P, p_{\text{ch}}) + C_{\text{fuel}} - R_{\text{AS}}(\text{soc}, p_{\text{ch}}) \quad (1)$$

式中 C_{elec} 、 C_{fuel} 和 R_{AS} 分别电动汽车充电、耗油的费用以及提供辅助服务的收益。其中,充电费用与电价 $P(t)$ 和充电功率 $p_{\text{ch}}(t)$ 有关,辅助服务收益是电池储能状态 $\text{soc}(t)$ 和充电功率 $p_{\text{ch}}(t)$ 的函数,耗油费用则是针对 PHEV 而言,与电动汽车整个行程中的能量有关。需考虑以下约束条件:

1) 电动汽车使用约束:

$$\text{soc}(t_d) \geq \text{soc}_0 \quad (2)$$

即在用户出行时刻 t_d , 电池储能应达到一定的水平。

2) 能量平衡约束:

$$E_{\text{plug-in}}(\text{soc}, p_{\text{ch}}) = 0 \quad (3)$$

$$E_{\text{plug-out}}(\text{soc}, p_e, p_{\text{fuel}}, p_{\text{cons}}) = 0 \quad (4)$$

式(3)、(4)分别给出了电动汽车在并网充电和行驶过程中的能量平衡过程。并网时,能量平衡主要体现在 $\text{soc}(t)$ 变化和 $p_{\text{ch}}(t)$ 上;脱网、行进时,能量平衡则与 $\text{soc}(t)$ 变化、汽车行驶中电动机功率 $p_e(t)$ 、内燃机功率 $p_{\text{fuel}}(t)$ (针对 PHEV) 以及行驶中的能量需求 $p_{\text{cons}}(t)$ 有关。

3) 电动汽车的技术约束:

$$p_{\text{ch}}(t) \leq p_{\text{max}} \quad (5)$$

$$\text{soc}_{\min} \leq \text{soc}(t) \leq \text{soc}_{\max} \quad (6)$$

式(5)反映了电动汽车充电功率的约束；式(6)则反映电池容量及使用约束，通常取 $\text{soc}_{\max} = 1$ ，而考虑到电池过度放电对其寿命的不利影响， $\text{soc}_{\min}$ 常取为 0.2。

其中，式(1)的具体形式取决于电力市场中的电价以及电动汽车提供辅助服务的类型和价格；而式(3)、(4)的具体形式与对电池充电过程、汽车行驶过程的建模有关。不同的研究中对电动汽车使用费用计量方法的差异、对充电过程和行驶过程简化与建模的区别，形成了具体形式各异的模型，例如，文献[46]对 PHEV 的行驶过程和能源使用情况建立详细的模型，并进行了能源费用的优化；文献[47]计及用户为系统提供调频服务获得收益，采用动态优化方法对用户的充电过程进行了优化，并考虑电动汽车的购买费用，计算得到电动汽车的年使用费用将比普通汽车节省 3 773 \$(结果依赖于市场中的实时电价)。文献[48]考虑了用户出行的随机性，利用随机优化的方法给出了能量管理方案，并分析了不同“燃料价格-电价”对最优方案的影响。

3.3 电动汽车群(agggregator)充电控制

相比单一车辆而言，电动汽车群充电控制涉及一个电动车队、一个停车场的充电控制问题，优化方法和控制目标较为丰富，为 aggregator 参与电力市场竞争、支撑配电网运行提供了参考。文献[49]通过多辆电动汽车的联合充电控制，以降低配电网的网络损耗。文献[50]提出了基于灵敏度的实时负荷管理算法，对电动汽车群的充电过程进行优化，在降低损耗的同时，兼顾了配电网电压水平。文献[52]采用粒子群算法以充电费用最少为目标对充电站的 V2G 运行进行了优化，并对充电装置短路故障进行了仿真分析；文献[53]建立局部优化模型，对预测的充电负荷进行优化，一定程度上考虑充电负荷的随机性，同时在费用计算方面简单考虑了频繁充放电对电池寿命的影响。文献[54-57]在用户使用费用中考虑了电动汽车为系统提供调频和备用服务的收益，对 aggregator 的 V2G 进行了优化，其中文献[55]考虑了用户的不确定出行行为，文献[57]则利用一致性滤波给出了有限通讯条件下利用充电控制提供调频服务的完整方案。考虑到控制目标的多样性，此处不再给出目标函数的一般形式。

电动汽车群充电控制研究中，直接对汽车群的集中负荷进行控制，忽视了单一车辆充电需求的具体满足，而考虑了与电网运行相关的电压、网损，

因而其约束条件与单一车辆的充电控制问题有着较大的区别，通常涉及以下几个方面：

1) 潮流平衡约束：

$$g_{i,t}[V_i(t), P_i(t), Q_i(t), p_{\text{chi}}(t)] = 0 \quad (7)$$

式中 $V_i(t)$ 、 $P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$ 、 $p_{\text{chi}}(t)$ 分别表示 t 时刻节点 i 处的电压、不计充电负荷的有功注入、不计充电负荷的无功注入以及电动汽车充电功率。由于计及了电压水平，因而需要使用交流潮流平衡方程。

2) 电压水平约束：

$$V_{\min} \leq V_i(t) \leq V_{\max} \quad (8)$$

式(8)对各时刻各节点的电压水平进行了约束。

3) 网损约束：

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{t \in T} P_{\text{Loss}}(t) \quad (9)$$

式(9)给出了系统的总网损，这是充电控制问题多时段耦合性的部分体现。需要指出的是，网损可以作为约束条件考虑，也可以计入目标函数。

4) 充放电功率约束：

$$-p_{\text{chi}}^{\max}(t) \leq p_{\text{chi}}(t) \leq p_{\text{chi}}^{\max}(t) \quad (10)$$

式(10)中考虑了 V2G 控制的情形，在不计及 V2G 时，只需要将上述不等式改写成：

$$0 \leq p_{\text{chi}}(t) \leq p_{\text{chi}}^{\max}(t) \quad (11)$$

而式中 $p_{\text{chi}}^{\max}(t)$ 与 t 时刻节点 i 处接入电网的电动汽车数目和类型有关，它的取值往往来源于实时统计或充电需求模拟。

5) 能量需求约束：

$$E_i = \sum_{t \in T} p_{\text{chi}}(t) \Delta t \quad (12)$$

式中 E_i 表示研究周期 T 内节点 i 处用户总的电能需求。由于用户使用需求的随机性，电动汽车的数量、类型、soc 及未来使用行为具有很强的随机性，很难确定各个时刻关于 E_i 的约束。

上述模型中，尽管对电动汽车使用约束进行了简化，但引入非线性的网络潮流方程，电动汽车群充电控制问题成为一个多时段耦合的非线性优化问题，求解困难，现有的研究中常采用灵敏度方法分析^[50-51]或借助负荷率^[49]等概念进行简化。

3.4 区域电力系统充电控制问题

区域电力系统层面的充电控制，从系统运行人员角度出发，通过多个 aggregator 的协调控制支撑系统运行。它不仅涉及潮流平衡、充电约束，而且

需要考虑区域电力系统的安全、经济运行,目前主要是指计及充电负荷的优化调度或机组组合问题,通常目标函数具有下面的形式:

$$\min F = \sum_{t \in T} \sum_{i=1}^n \{A_{Gi}[P_{Gi}(t)] + S_{Gi}[u_{Gi}(t)]\} \quad (13)$$

式(13)包含了系统火电机组燃料费用和启停费用最小的目标函数,根据研究需要还可以计及节能减排等方面的效益。

约束条件方面,和机组相关的约束条件与传统问题一致,不再列出。充电负荷的引入改变了系统的有功平衡,并引入了电动汽车的相关约束:

1) 有功约束:

$$\sum_{i=1}^n u_{Gi}(t)P_{Gi}(t) - p_{ch}(t) + W(t) = D(t) + P_{Loss} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n u_{Gi}(t)P_{Gi}^{\max} + p_{ch}^{\max}(t) \geq D(t) + R(t) \quad (15)$$

式中 $D(t)$ 、 $W(t)$ 、 $R(t)$ 分别表示 t 时刻系统的负荷、可再生能源电力以及备用需求。式(15)中考虑了电动汽车 V2G 的因素,要求电动汽车在紧急情况下以最大功率向电网馈送电能。同时在计及可再生能源发电的条件下 $R(t)$ 的确定相对复杂,需要考虑可再生能源电力的随机性、波动性。

2) 电动汽车约束:

$$-p_{ch}^{\max}(t) \leq p_{ch}(t) \leq p_{ch}^{\max}(t) \quad (16)$$

$$E = \sum_{t \in T} p_{ch}(t)\Delta t \quad (17)$$

与电动汽车群充电控制而言,区域电力系统充电控制侧重考虑了系统的有功平衡,引入表示机组启停的整数变量,使模型进一步复杂。

上述模型给出了考虑 V2G 和可再生能源并网的机组组合问题的一般形式,根据实际研究的需要可引入电网潮流约束、可再生能源出力的概率预测等复杂条件,使问题更具现实意义;但与此同时,这也使模型更加复杂,求解更为困难。

研究人员对此问题进行了逐步深入的研究。文献[58]中模拟了充电负荷的随机特性,采用基于风险的调度方法,使充电负荷得到满足,在计及系统运行风险的同时通过优化调度实现了电能生产的经济性。文献[59]考虑充电负荷的可控性,建立了考虑 V2G 的机组组合模型,并用粒子群算法求解,分析了 V2G 在减少温室气体排放方面的效益,但对充电负荷的随机特性考虑不足。文献[60]考虑电

动汽车的可移动特性,将含有电动汽车的考虑安全约束的机组组合问题解耦为两个问题,分别加以解决,降低了问题求解的难度;研究对比了不同充电方式对区域电力系统运行的影响,表明有效的充电控制可以实现系统负荷的削峰填谷。文献[61]考虑了充电站充电负荷波动和满足的情况,建立了考虑充电站与电网互动的机组组合模型,有效降低了机组出力调整的频率,实现系统的安全、经济运行。文献[62-65]对含风电电力系统的电动汽车并网问题进行了初步分析,探讨了风电、充电负荷协调运行的效益。文献[66]基于充电需求模拟,利用充电负荷为系统提供备用,分析了不同充电模式对风火电电力系统机组组合的影响,但忽略了电动汽车电池储能容量约束和线路传输容量的限制。文献[67]中计及了线路传输容量的限制和机组停运、线路故障等各种随机因素,但忽视了充电需求的特征,过分强调了电动汽车的可移动特性,试图以电动汽车移动替代输电线路传输电能,而不适用于大规模电力系统的研究。文献[66-67]中的研究表明,在机组组合模型中计及充电控制因素可以降低系统运行费用,减少弃风量。

3.5 充电控制策略研究中存在的问题

目前的充电控制策略研究中尚存在以下几点比较突出的问题。

首先,以对电动汽车的直接调度为基本假设,认为运行人员在电动汽车空闲时间可以完全控制其充(放)电过程。事实上,运行人员不具备此权限,需要通过价格信号或充电服务计划等手段吸引、调动用户充电行为或向用户换取充电控制权力。这需要对用户响应进行分析、模拟,文献[68]初步涉及用户对实时电价信号的响应情况。

其次,忽略了 V2G 技术对电池寿命的影响。现有的 V2G 控制研究往往忽视了频繁的充放电过程对电池寿命的不利影响,这使得充电控制中用户收益、花费的计算不够准确,同时也使得某些充电控制策略因充放电频繁、对电池寿命影响较大,而失去实际应用的价值与可能性。文献[69]就 V2G 技术对电池寿命的影响进行了专门阐述,在未来的充电控制策略中应尽可能计及这方面的影响。

再次,未深入探讨多电动车充放电过程的分解协调问题。在电动汽车群、区域电力系统层面的充电控制问题中,往往只能给出多辆电动汽车总的充放电安排,而尚不能将其分解到每辆电动汽车上。

文献[70]提出一系列基本原则可使充放电负荷在电动汽车间自动分配,但此方法本质上是以每辆电动汽车的频繁充放电交替过程代替多辆电动车间的时序配合,对电池寿命有较大影响。文献[71-72]对充电控制进行了分层处理;后者的三层处理相对完善,顶层通过出力安排获得电动汽车群充电功率,中层借鉴文献[70]思路按储能状态SOC对各车充电功率进行控制,底层取电网频率作为反馈调整充电功率并为电网提供辅助服务。这种框架体系下,顶层充电功率的实现、用户充电需求的满足将成为关键问题。

最后,研究成果集中于充电控制在维持系统有功平衡方面,对充电控制作为系统运行、控制手段支撑系统运行方面的研究还尚未深入。尽管有研究工作已经涉及充电控制在FACTS系统中的应用^[41,42],但其他方面应用的研究十分有限。

4 结论

伴随着相关技术的成熟,电动汽车的普及已经成为一种趋势,这将会对电力系统运行产生深刻影响。大规模可控性的充电负荷和电动汽车储能设备为负荷调度提供了基础,使其成为一种新的电力运行手段、策略,以补充传统发电调度策略的不足。

充电负荷控制不仅能够有效地限制充电负荷对系统运行的不利影响,而且能够产生巨大的效益——从维持系统有功平衡到为系统提供辅助服务;从降低系统建设、运行成本到丰富电网运行、控制手段。我们需要对充电负荷性质、充电控制策略进行更为深入的研究,限制充电负荷的不利影响,充分发掘充电负荷控制的用途和效益,推进电动汽车普及进程。在未来的研究工作中下列问题应得到特别的关注:

1) 充电负荷时空分布特性。这是充电设施规划、实施充电负荷控制的基础,具有重要意义。

2) 随机性的充电控制策略。区域电力系统、配电网层面的充电控制策略应充分考虑用户充电需求的不确定性。但考虑到电动汽车数目众多、约束条件复杂,这会使模型的求解进一步复杂。

3) 充电控制策略具体实现。充电控制策略最终要能够给出每辆电动汽车的充电功率曲线。解决此问题需要考虑多辆电动车充电过程分解协调、计及充电次数的限制、考虑用户对控制信号的响应行为。

4) 充电控制效益的挖掘与统一。目前充电控制策略研究集中在系统有功平衡方面,但在其他方面的潜在效益有待进一步挖掘,并发展相应的控制策略。在未来控制策略研究中,需要综合考虑各方面所具有的效益,以使总体效益达到最大。

参考文献

- [1] Duvall M, Knipping E, Alexander M, et al. Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles. Volume 1: Nationwide greenhouse gas emissions[R]. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, :2007, 1015325.
- [2] 中华人民共和国科技部. 电动汽车科技发展“十二五”专项规划[EB/OL]. [2012-08-07]. http://www.gov.cn/zwggk/2012-04/20/content_2118595. MOST of China. 12th Five-Year Development Plan on EVs Technologies[EB/OL]. [2012-08-07]. http://www.gov.cn/zwggk/2012-04/20/content_2118595(in Chinese).
- [3] Boulanger A G, Chu A C, Maxx S, et al. Vehicle Electrification: Status and Issues[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1116-1138.
- [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, 32(2): 127-131.
Gao Ciwei, Zhang Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 32(2): 127-131(in Chinese).
- [5] Claire W. Plug-in hybrid electric vehicle impacts on hourly electricity demand in the United States[J]. Energy Policy, 2011, 39(6): 3766-3778.
- [6] Wu Di, Aliprantis D C, Gkritza K. Electric energy and power consumption by light-duty plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 738-746.
- [7] Darabi Z, Ferdowsi M. Aggregated impact of plug-in hybrid electric vehicles on electricity demand profile[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 501-508.
- [8] 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.
- [9] 田立亭, 史双龙, 贾卓, 等. 电动汽车充电功率需求的统计建模方法[J]. 电网技术, 2010, (11): 126-130.
Tian Liting, Shi Shuanglong, Jia Zhuo, et al. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, (11): 126-130(in Chinese).
- [10] 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(in Chinese).
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Gan L, Z Xiao-Ping. 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.
- [14] Sungwoo Bae, Kwasinski A. Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 394-403.
- [15] Santos A, McGuckin N, Nakamoto H Y, et al. Summary of travel trends : 2009 national household travel survey[R]. 2011.
- [16] Heydt G T. The impact of electric vehicle deployment on load management strategies[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(5): 1253-1259.
- [17] Denholm P, Short W. An evaluation of utility system impacts and benefits of optimally dispatched plug-in hybrid electric vehicles[R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2006.
- [18] Michael K M, Kevin S, Robert P. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids part1 : technical analysis[R]. Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2007.
- [19] Scott Michael J, Kintner-Meyer Michael, Elliott Douglas B, et al. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids part2: economic assessment[R]. Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2007.
- [20] Green R C, Wang Lingfeng, Alam M. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook[C]//Power and Energy Society General Meeting. 2010 IEEE. 2010: 1-8.
- [21] Pieltain Ferna X, Ndez L, Go X, et al. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 206-213.
- [22] Clement-Nyns K, Haesen 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.
- [23] Taylor J, Maitra A, Alexander M, et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations[C]//Power & Energy Society General Meeting. 2009: 1-6.
- [24] 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). Piscataway, NJ, USA, 2012: 6.
- [25] Rowand M. The Electricoity utility-business case[C]//Plug-In Conference, EPRI. San Jose. 2008.
- [26] 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.
- [27] Camus C, Farias T, Esteves J. Potential impacts assessment of plug-in electric vehicles on thePortuguese energy market[J]. Energy Policy, 2011, 39(10): 5883-5897.
- [28] JustineJ, 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 Conference. 2008: 1-7.
- [30] Grahm P, Soder L. The customer perspective of the electric vehicles role on the electricity market[C]//Energy Market(EEM), 2011 8th International Conference on the European. 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). 2011: 1-8.
- [32] Willett K, Jasna T. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [33] Willett K, Jasna T. 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.
- [34] Galus Matthias D, Marek Z, Göran A. On integration of plug-in hybrid electric vehicles into existing power system structures[J]. Energy Policy, 2010, 38(11): 6736-6745.
- [35] Henrik L, Willett K. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G[J]. Energy Policy, 2008, 36(9): 3578-3587.
- [36] Guille C, Gross G. The integration of PHEV aggregations into a power system with wind resources[C]//Bulk Power System Dynamics and Control 2010 iREP Symposium. 2010: 1-9.

- [37] Brooks A N. Vehicle-to-grid demonstration project: Grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle[M]. California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, Research Division, 2002.
- [38] Andersson S L, Elofsson A K, Galus M D, et al. Plug-in hybrid electric vehicles as regulating power providers: Case studies of Sweden and Germany[J]. Energy Policy, 2010, 38(6): 2751-2762.
- [39] Pillai J, Bak-Jensen B. Integration of vehicle-to-grid in the western danish power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(1): 12-19.
- [40] White Corey D, Zhang K Max. Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3972-3980.
- [41] Islam F R, Pota H R, Anwar A, et al. Design a Unified Power Quality Conditioner using V2G technology[C]// Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2012 IEEE International. 2012: 521-526.
- [42] Crosier R, Wang Shuo, Jamshidi M. A 4800-V grid-connected electric vehicle charging station that provides STACOM-APF functions with a bi-directional, multi-level, cascaded converter[C]// IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Piscataway, NJ, USA, 2012: 1508-1515.
- [43] Mitra P, Venayagamoorthy G K. Wide area control for improving stability of a power system with plug-in electric vehicles[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(10): 1151-1163.
- [44] Bessa Ricardo J, Matos Manuel A. Economic and technical management of an aggregation agent for electric vehicles: a literature survey[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(3): 334-350.
- [45] Wencong Su, Eichi H, Wente Zeng. et al. A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(1): 1-10.
- [46] Matthias G, Göran A. An approach for plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) integration into power systems [C]//Smart Energy Strategies Conference. Zurich, Switzerland, 2008: 53-56.
- [47] 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.
- [48] Moura S J, Fathy H K, Callaway D S, et al. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 545-555.
- [49] Sortomme E, Hindi M M, MacPherson S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [50] Deilami S, Masoum A S, Moses P S, 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.
- [51] Richardson P, Flynn D, Keane A. Optimal charging of electric vehicles in low-voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 268-279.
- [52] Venayagamoorthy G K, Mitra P, Corzine K, et al. Real-time modeling of distributed plug-in vehicles for V2G transactions[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2009: 3937-3941.
- [53] 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.
- [54] Sortomme E, El-Sharkawi M A. Optimal Charging Strategies for Unidirectional Vehicle-to-Grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 131-138.
- [55] Sortomme E, El-Sharkawi M A. Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 351-359.
- [56] Sekyung Han, Soohye Han, Sezaki K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 65-72.
- [57] Yang H, Chung C Y, Zhao J. Application of plug-in electric vehicles to frequency regulation based on distributed signal acquisition via limited communication [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, PP(99): 1.
- [58] 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(in Chinese).
- [59] Yousuf S A, Kumar V G. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid —A cost-emission optimization[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(3): 898-911.
- [60] 蔡秋娜, 文福拴, 薛禹胜, 等. 基于 SCUC 的可入网混合动力汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(01): 38-45.
- Cai Qiuna, Wen Fushuan, Xue Yusheng, et al. An SCUC-based optimization approach for power system

- dispatching with plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(01): 38-45(in Chinese).
- [61] 张舒, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车换电站与电网互动的机组组合问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 49-54.
Zhang Shu, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Research on unit commitment considering interaction between battery swapping station and power grid[J]. Proceedings of the CSEE 2012, 32(10): 49-54(in Chinese).
- [62] 于大洋, 宋曙光, 张波, 等. 区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 24-29.
Yu Dayang, Song Shuguang, Zhang Bo, et al. Synergistic dispatch of pevs charging and wind power in chinese regional power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 24-29(in Chinese).
- [63] Yang H M, et al. Application of plug-in electric vehicles to frequency regulation based on distributed signal acquisition via limited communication[J]. Power IEEE Transactions on Power Systems, 2012, PP(99): 1-9.
- [64] Lisa G, Sten K, Filip J. Integration of plug-in hybrid electric vehicles in a regional wind-thermal power system[J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 5482-5492.
- [65] Soares M C, Bruno B, Alexandre S, et al. Plug-in hybrid electric vehicles as a way to maximize the integration of variable renewable energy in power systems: The case of wind generation in northeastern Brazil[J]. Energy, 2012, 37(1): 469-481.
- [66] Liu Cong, Wang Jianhui, Botterud A, et al. Assessment of impacts of PHEV charging patterns on wind-thermal scheduling by stochastic unit commitment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012. 3(2): 675-683.
- [67] Khodayar M E, Wu L, Shahidehpour M. Hourly coordination of electric vehicle operation and volatile wind power generation in SCUC[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012. 3(3): p. 1271-1279.
- [68] Galus M D, Andersson G. Demand management of grid connected plug-in hybrid electric vehicles (PHEV)[C]// IEEE Energy Conference. 2008: 1-8.
- [69] Zhou Chengke, Qian Kejun, Allan Malcolm, et al. Modeling of the cost of ev battery wear due to v2g application in power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1041-1050.
- [70] 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.
- [71] Changsun A, Li Chiao-Ting, Peng Huei. Optimal decentralized charging control algorithm for electrified vehicles connected to smart grid[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(23): 10369-10379.
- [72] Li C T, Ahn Changsun, Peng Huei, et al. Synergistic control of plug-in vehicle charging and wind power scheduling[J]. Power IEEE Transactions on Power Systems, 2012, PP(99): 1-9.



王锡凡

收稿日期: 2012-10-08。

作者简介:

王锡凡(1936), 男, 院士, 博士生导师, 从事电力系统分析规划、电力市场与新型输电方式等方面的教学研究工作;

邵成成(1989), 男, 博士研究生, 研究方向为可再生能源并网运行与智能电网, C.C.Shao22@gmail.com;

王秀丽(1961), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统规划、可靠性分析及电力市场方面的教学研究工作;

杜超(1987), 男, 博士研究生, 研究方向为可再生能源并网运行与电力市场。

(责任编辑 王剑乔)