

# 电动汽车智能充电策略研究综述

郑言冲<sup>1,2</sup> 肖新平<sup>1</sup> 文江辉<sup>1</sup> 蹇林旒<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(武汉理工大学理学院 武汉 430070)

<sup>2</sup>(南方科技大学电子与电气工程系 深圳 518055)

**摘要** 发展电动汽车是减少对石油的依赖以及解决环境污染的有效途径。但是,大规模电动汽车无序充电会严重影响电网的稳定性,主要表现在电网负荷峰值升高、电网电压下降以及电网能量损失变大等方面。众所周知,对电网进行扩容改造将需巨大的成本,而智能充电无需对电网进行大幅度改造即可有效地解决这一难题。智能充电不仅能为电力运营商创造可观的经济效益,同时还能使电动汽车用户受益。智能充电主要分为集中式充电和分散式充电。集中式充电根据电网信息和电动汽车的充电需求规划电动汽车的充电策略。充电策略的制定主要以电网运行成本最小、电网能量损失最小、电网负荷方差最小等为目标。分散式充电主要在获取电网状态信息和电动汽车的充电需求后制定浮动电价以激励电动汽车用户避开用电高峰期。最后,文章简要介绍了在智能充电框架下电动汽车与可再生能源融合的潜力、智能充电对电池的要求以及相应的通讯网络构建等问题。

**关键词** 电动汽车; 无序充电; 智能充电; 可再生能源

**中图分类号** TM 715 **文献标志码** A

## A Review of Smart Charging of Electric Vehicles in Distribution Network

ZHENG Yanchong<sup>1,2</sup> XIAO Xinping<sup>1</sup> WEN Jianghui<sup>1</sup> JIAN Linni<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

<sup>2</sup>(Department of Electrical and Electronic Engineering, South University of Science and Technology of China, Shenzhen 518055, China)

**Abstract** To develop electric vehicles is a way to reduce fossil fuel and alleviate air pollution. But a large scale of electric vehicles will bring a serious impact on the stability of grid, such as the peak widening, voltage deviations and the increase of energy losses. It is well known that it will cost much for the extension and renovation of the grid while smart charging can efficiently solve this problem without radical transformation of the grid. Smart charging of electric vehicles can not only bring economic benefits to the power company, but also benefit customers of electric vehicles. In this paper, the two main control architectures of smart charging, the centralized control and the decentralized control were reviewed. The research of centralized control is based on various targets, such as minimizing operating costs, minimizing energy loss or minimizing load variance. And the decentralized control mainly depends on the price mechanism to motivate users to change their charging behaviours. Finally, the integration of electric vehicles and renewable energy were introduced and the constructions of network communication devices were described.

**Keywords** electric vehicle; uncoordinated charging; smart charging; renewable energy

收稿日期: 2014-10-29 修回日期: 2014-11-05

**作者简介:** 郑言冲, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车与电网交互技术; 肖新平, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为系统控制及优化、统计预测与决策; 文江辉, 博士, 讲师, 研究方向为系统控制及优化、统计预测与决策; 蹇林旒 (通讯作者), 博士, 副研究员/助理教授, 研究方向为电动汽车与电网交互技术, E-mail: jian.ln@sustc.edu.cn.

## 1 引 言

随着全球经济的快速发展,全球性的能源危机正在逐步加重,尤其表现在对石油的需求上。国际能源署(IEA)发表的最新数据表明,全球在对石油的需求上持续增长,日需求量从 2005 年的 8430 万桶增长到 2014 年的 9280 万桶<sup>[1]</sup>。而运输业所消耗的石油量占到了所耗石油总量的 60% 左右,但其二氧化碳排放量仅在 2011 年就产生了约 6892 兆吨<sup>[2]</sup>。而电动汽车作为一种新能源汽车,以电机作为动力驱动,以电能为其动力来源,则可以完全脱离对石油的依赖。目前,美国、日本、西欧的电动汽车市场增长势头强劲,产业进入快速发展通道的迹象愈发明显。2012 年,美国、日本电动汽车销售规模分别达到 5.3 万辆和 2.7 万辆,西欧各国销售总规模达 2.4 万辆。

电动汽车以电池中的电能作为动力来源,电池的容量决定了电动汽车的最长续航里程。根据电动汽车的充电功率,大体可以将电动汽车的充电方法分为以下两类:

(1)慢充:也称常规充电,主要采用交流电小电流(约 15 A)的充电模式,一般充电时间为 5~8 小时。而有些电池容量较大的电动汽车,充电时间可能长达 10~20 小时。

(2)快充:主要采用的是直流大电流(150 A~400 A)充电模式,一般充电时间为 15 分钟~2 小时。

## 2 无序充电与智能充电

电动汽车无序充电指的是当电动汽车接入充电桩时立即以其额定的充电功率充电,直至电动汽车的电池容量达到最大值<sup>[3]</sup>。此时的电动汽车完全属于一种电力负荷,不会进行能量反馈<sup>[4]</sup>。电动汽车充电在时间和空间上均有很大的随机性,可控性和可预测性差。这对发电厂来说,根

据电动汽车的充电需求调节其发电功率存在着很大的困难。

智能充电主要是根据电网电量的供应情况而改变电动汽车的充电时间以及充电速率<sup>[5]</sup>,其中充电策略的确定可分为集中式调控和分散式调控。集中式调控主要以电网运行成本最小、排放的温室气体最少<sup>[6]</sup>、电网能量损失最小<sup>[7]</sup>、电网负荷方差最小<sup>[8,9]</sup>和负荷因子最大<sup>[10,11]</sup>为目标来确定电动汽车的充电策略,然后通过配电控制中心对电动汽车的充电功率进行控制;而分散式调控则主要是通过制定的电价机制使车主避开用电高峰期充电<sup>[12-14]</sup>。但是智能充电在实现上有一定的困难:首先是电池技术还不够成熟,如果频繁地对电池进行充放电,那么将会严重影响电池的寿命<sup>[15-17]</sup>;其次,电动汽车的用户要配合配电控制中心对其电池进行智能管理;再次,建立大量充电站以及配套网络通讯设备等设施的成本很大<sup>[18]</sup>。

### 2.1 无序充电及其导致的问题

无序充电主要会引起电网负荷峰值升高、电网电压下降以及电网能量损失增多,但少量的电动汽车无序充电并不会对电网的稳定性构成威胁,这是至今电力公司还没对电动汽车实施充电管制的原因。但是,一旦电动汽车的数量达到一定的规模,就会对电网产生严重危机<sup>[19]</sup>。对于住宅区的电网系统,在用电高峰期,充电的电动汽车越多对电网的影响越大<sup>[20]</sup>。Clement-Nyns 等<sup>[21]</sup>通过大量的仿真实验,得到了 1000 次实验下电动汽车无序充电对电网相关参数的统计数据,如表 1 所示。下面就电动汽车集中充电对电网的影响分别选取如下几个方面进行分析。

#### (1)电网负荷峰值升高

美国加州调查数据显示,该州 10%~15% 的电动汽车用户选择在白天充电,85%~90% 选择在工作后回到家中进行充电。因此大部分电动汽车会集中在 18:00—22:00 这个时间段充

表 1 电动汽车充电对电网的影响——1000 次模拟实验统计结果<sup>[21]</sup>

Table 1 Impacts of EV charging-simulation results

充电状态	负荷波峰值 (kVA)	电压 (V)	电网能量损失 (%)
无电动汽车充电	23	220	1.4
电动汽车无序充电	36	217	2.4
电动汽车智能充电	25	220	2.1

电, 而这个时间段正处于用电高峰期, 这会使得电网负荷峰值升高。Sundstrom 等<sup>[22]</sup>模拟了在常规负荷曲线下电动汽车充电对区域电网负荷的影响(如图 1)。结果表明, 充电汽车在没有任何指引的前提下充电会导致电网负荷的波峰进一步增大, 而电网波谷基本不变, 这表明无序充电将会进一步导致资源的浪费。而 Leemput 等<sup>[23]</sup>就单个家居电网进行了研究, 通过研究家庭电动汽车晚上回家充电的行为, 模拟结果表明电动汽车充电会增大家用电网负荷的波峰。

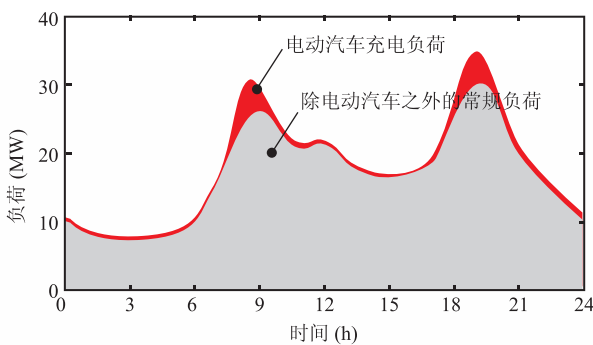


图 1 无序充电导致负荷峰值升高<sup>[21]</sup>

Fig. 1 The impact of uncoordinated charging

### (2) 电网电压下降

当大量电动汽车集中在用电高峰期充电时, 电网需要较大的输出电流, 而此时电网提供的输出功率一定, 将会导致输出电压减小, 影响电网电压的稳定性。Deilami 等<sup>[7]</sup>模拟了在不同电动

汽车市场占有率下, 其充电行为对电网电压的影响, 仿真结果表明在用电高峰期充电会使电网电压发生巨大的波动。图 2 模拟的是电动汽车占有率为 0 和 30% 对电网电压的影响情况, 其中, 实线表示的是一天之内在没有电动汽车充电的情况下某地区电网电压的变化情况, 而虚线表示的是所有电动汽车集中在 0:00—6:00 a.m. 充电时电网电压的变化情况<sup>[11]</sup>。

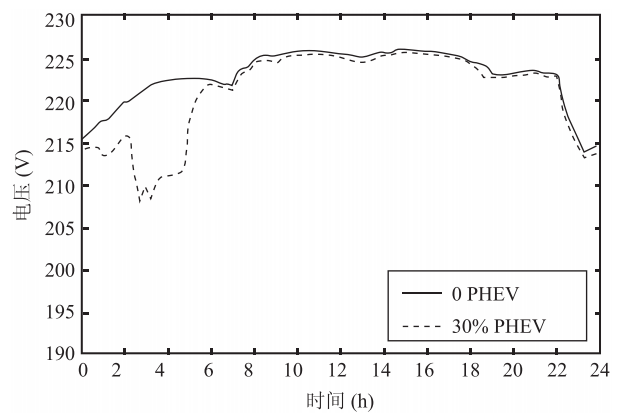


图 2 电动汽车占有率为 0 和 30% 时电网电压变化情况<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Voltage profile with 30% EVs compared to the voltage profile with 0 EV

### (3) 能量损失变大

Khayyam 等<sup>[24]</sup>模拟了无序充电以及在智能控制下电网能量损失情况。从模拟情况图(图 3)可以看到, 在用电高峰期, 电动汽车无序充电导

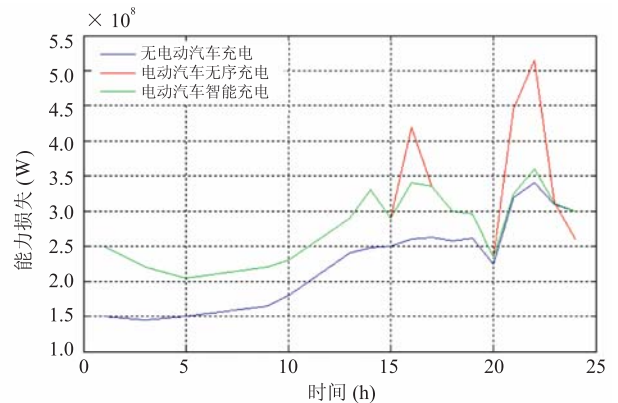


图 3 不同情形下电网能量损失<sup>[24]</sup>

Fig. 3 Loss power with different situation

致电网的能量损失较大,而在无电动汽车充电以及电动汽车在智能控制器调节的前提下充电时,能量损失较为平稳。在用电高峰期,大量的电动汽车充电导致电网负荷过高,输出电流陡增,电线发热将导致电网大量能量损失。

此外,大量的电动汽车集中在用电高峰期充电还会使变压器的寿命严重缩减,情况严重时可能需要更换成更大的变压器才能满足电动汽车的充电需求<sup>[25,26]</sup>。同时,大量电动汽车集中充电还会为输电线以及相关配套设施带来严峻的挑战。

## 2.2 智能充电及其经济效益

对电动汽车进行智能充电不仅能够维持电网的稳定,还能对环境的保护、车主的利益以及电网的收益起到至关重要的作用。在美国,一辆加入到智能电网中的电动校车与一辆传统校车相比,每年每个座位能够节省大约 5700 美元<sup>[27]</sup>。起初人们只是试探如何在大规模电动汽车充电的情形下维持电网的稳定性,在此基础上再考虑获利的可能性<sup>[28]</sup>,后来逐渐发现如果对电动汽车进行智能充电,不仅会使电力公司受益,还能改善环境状况以及让电动汽车用户获益。从对加州官方提供的数据进行仿真发现,对电动汽车进行智能充电可以减少 29.5% 的成本以及 79% 的 CO<sub>2</sub> 和 83% 的 NO<sub>x</sub> 的排放量<sup>[29]</sup>。Saber 等<sup>[6]</sup>利用电动汽车将可再生能源充分整合进电网,以最小化电网运行成本为目标优化电动汽车的充放电,计算结果表明,这样既可以减少发电厂的运行成本,又可以大大减少二氧化碳排放,同时还可以创造相当可观的经济效益。

## 3 智能充电方法介绍

### 3.1 集中式充电

集中式充电是将电动汽车充电进行集约化管理,按照电网的需求以及电动汽车用户的充电行为对此区域内的电动汽车能量进行统一调度,通

过既定的控制策略管理每辆车的充电。目前,电动汽车充电控制策略的确定基于多种形式。基于这些形式可以通过地面建设停车场以及配套的智能充电机对电动汽车进行智能充电。对于电网而言,这种集中管理和统一调度的模式能够实现整体上的最优,降低电网运营成本。具体操作流程见下图所示:

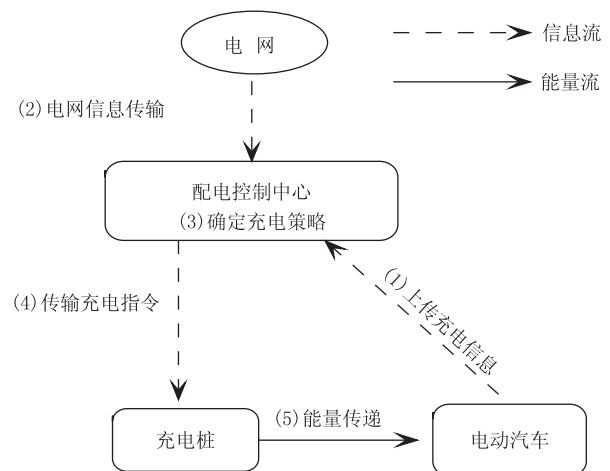


图 4 集中式充电方法操作流程

Fig. 4 The operational processes of centralized charging

电动汽车在准备接受充电服务时,可以向控制中心发送告知信号,上传电池实时信息,并通过人机交互界面完成相关参数设置,包括地理位置、离开时间以及离开时的电池荷电状态(State of Charge, SOC)值。控制中心在接受到电动用户的充电需求后,立即更新站内数据库信息,并结合电网的负荷情况找到最优的充电策略,再将充电的指令传输给充电桩对电动汽车进行充电。

关于电动汽车充电策略的确定,目前采用的方法各异,优化目标也不一。最小化电网能量损失仍是最主要运用的目标函数<sup>[11,30-34]</sup>,它针对确定性的家庭网络负荷,被用来衡量智能充电的有效性<sup>[11]</sup>;在以最小化电网能量损失为目标的前提下,在增加了电网电压、电网负荷以及电动汽车的相关约束下进行优化,在最小化能量损失的同时保证了电网的稳定性<sup>[30]</sup>。Masoum 等<sup>[31]</sup>设



计了一个智能负荷管理系统, 同时兼以削减波峰时期的用电需求, 该系统可以改善电网状况。而 Luo 等<sup>[32]</sup>发现单纯地以能量损耗为优化目标会导致电网电压下降, 然后对该问题进行了建模。Zhang 等<sup>[33]</sup>对电动汽车充电以及换电站同时考虑, 得到了最优的充电策略, 使得能量损失最小以及换电站利润最大化。Liu 等<sup>[34]</sup>仅对电动汽车的充电时刻进行了优化, 而充电速率为电动汽车常规充电速率。

此外, 也有学者考虑采用其他目标函数进行数学建模。Jian 等<sup>[8,9]</sup>选取了电网负荷方差为目标进行了优化, 效果也较理想; Davydova 等<sup>[35]</sup>选取了电网负荷因子为目标进行了优化; Mets 等<sup>[36]</sup>选取了以电网负荷峰值为目标建立了二次规划模型, 结果表明优化的充放电策略能够使得电力公司受益。

Sortomme 等<sup>[10]</sup>证明了在电动汽车与电网的交互过程中以最小电网能量损失、最大电网负荷因子以及最小电网负荷方差为目标建模对电网引起的损耗是基本等价的。以最小化电网能量损失为目标需要考虑电网的拓扑结构, 而以最小化电网负荷方差为目标则不需要, 但是以最小化电网负荷方差为目标建模为二次规划问题, 对于大规模的电动汽车充电情况需要更多的计算时间。与最小化负荷方相比, 最大化负荷因子是一个更好的选择。因为负荷因子是线性的, 以最大化负荷因子为目标进行计算的时间仅为以最小化负荷方差为目标的一半。

随着电动汽车充电规模的扩大, 电动汽车进行充电策略优化时的计算复杂度也会随之增加。对于该问题主要通过分层优化以及用智能算法加快计算进行求解。Jian 等<sup>[9]</sup>分两层进行优化, 第一层对各个充电站的配电功率进行了优化, 第二层在第一层优化得到的配电功率的基础上对电动汽车的充放电进行了优化, 结果表明全局优化与双层优化得到的结果相近; Qi 等<sup>[37]</sup>也提出了一种分层优化的模型, 对于所有的充电汽车, 先按

照区域进行合理划分, 再对划分区域后的电动汽车逐个进行优化以达到整个电网的稳定性需求; Soare 等<sup>[38]</sup>建立了以电网运行成本最小为目标的模型, 用改进的粒子群算法对模型进行求解, 大大提高了求解效率; Sousa 等<sup>[39]</sup>以电网运行成本最小为目标建立了优化模型, 用模拟退火算法进行求解, 结果表明该算法能够在较短的时间内得到最优解。

### 3.2 分散式充电

分散式充电的目标是电动汽车用户通过实时的电价信息确定充电的时间以达到充电成本最低。而电价机制则是电网配电控制中心根据电网信息以及电动汽车的用电需求确定的。目前, 关于电价机制的确定的研究方法各异。一个合理的电价机制应该要能激励电动汽车用户选择合理的时间充电。虽然这种方法不受时间和地点的限制, 更易实现, 但是每辆车的随机性过大, 缺乏集中管理调度, 故很难实现整体最优。分散式充电流程如下:

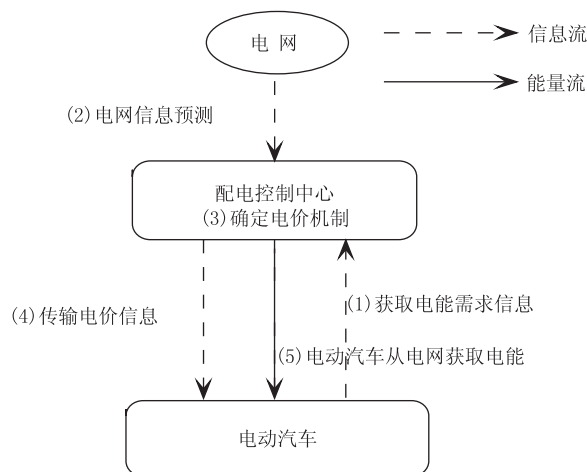


图5 分散式充电方法操作流程

Fig. 5 The operational processes of decentralized charging

电动汽车提前将其电能需求信息告知配电控制中心, 配电控制中心得到该充电需求后, 结合预测的电网信息并基于各种目标函数进行优化, 确定了电价信息后再反馈给电动汽车用户, 而电动汽车用户根据电价信息选择合适的时间进行充

电以使得其充电成本最小。

一个合理的电价机制是电动汽车智能充电得以实施的决定性因素。电动汽车用户通常根据实时的电价机制改变自己的充电行为,而电动汽车对电网的需求也会随之发生变化<sup>[40]</sup>。然而,这种电价机制可能会使大量的电动汽车集中在波谷充电,导致意想不到的第二个波峰的出现<sup>[41]</sup>。因此,电价机制并不是一成不变的,配电中心要根据电网信息以及电动汽车的需求信息对电价进行实时调控,以更好地满足电动汽车的充电需要并维持电网的稳定性。

对于电价机制的确定,在以往的研究中人们考虑的角度不一。单纯地以电力公司的利润最大化或者其运行成本最小化为目标得到的充电策略并不一定能激励电动汽车用户按照其设想的方法充电,还可能造成电网的不稳定<sup>[42]</sup>。但在相应的电价机制上通过合理地储存和调度电能可以改善这种情况<sup>[43]</sup>。Ahn 等<sup>[13]</sup>主要是通过接收来自于集中式电网控制器的命令来决定用户的充电行为,该方法能够在现有的电价机制上到达全局最优,同时能够对波谷进行填充,并且也不需要复杂的网络支持,但是需要充电用户放弃自主选择充电的权利。Nguyen 等<sup>[44]</sup>尝试在减少电网负荷方差的同时对用户的充电成本进行优化,用一种博弈的方法使得电动汽车用户改变其充电行为,即每个电动汽车用户都可以从控制中心获取数据,再对自己的充电行为优化,最后控制中心对现有的充电行为进行更新。该方法能够宏观地对电动汽车的充电行为进行监控,有效地改善电网状况,但是需要较强的通信设备以保证用户能够及时得知相关的信息。

## 4 智能充电存在的问题及潜力

### 4.1 电池充电效率及电池老化

电动汽车在智能充电的系统中需要频繁地改

变充电速率,这样会影响其充电的效率,同时对电动汽车的充电策略的确定带来一定的影响<sup>[45]</sup>。此外,电动汽车的充电效率会随着 SOC 值的增大而增大,但最终维持在一个相对稳定的区间(85%~95%)内,且不会有明显的变化<sup>[46]</sup>,因此在优化时可以取充电效率为其平均水平即可。

电池的过充或者过放都会对电池的寿命产生影响。这是由于过充或者过放均会导致电池的温度急剧上升,严重缩减其使用寿命。因此,在电动汽车进行充电时需要严格规定电池的 SOC 值范围以免损害电池。Fernandez 等<sup>[16]</sup>的研究得到了电池老化率与电池电流以及温度的关系式。将此关系式运用到能量优化管理系统中,得到了使电池老化率最低的充电策略。Lunz 等<sup>[17]</sup>研究了不同充电方式对电动汽车电池老化成本的影响,发现通过合理的充电方式不仅可以降低电池的老化成本,还能减少其充电成本。Zhang 等<sup>[15]</sup>提出一种积极的充电策略,可以使电池状态维持在一个较合理的 SOC 区域,以延长电池的寿命。

### 4.2 通信网络的构建

不管是对于集中式充电还是分散式充电,都需要依赖通信网络获取电动汽车用户的信息。无线通信以其成本低以及覆盖面广成为了主流的选择,而电动汽车用户还可以通过手机利用 3G 或者 4G 网络与控制中心保持通信并获取信息。Yuan 等<sup>[47]</sup>设计了一套充电管理系统,通过无线网络来控制,由中心管理系统来遥控,可以对电动汽车的充电速率以及充电时间进行优化。Shepelev 等<sup>[48]</sup>设计了一套网络系统,通过收集电动汽车数据来决定电动汽车的充电功率,再通过网络进行远程调控。Hild 等<sup>[49]</sup>则提出利用便携式电子设备接收电网信息,再根据电网状态以及其电池状态选择最优的充电策略。

### 4.3 与可再生能源相融合

实现电动汽车和可再生能源的融合有利于促进两者的共同发展,也有助于提高电网整体运行

的经济与环境效益。可再生能源发电可以降低电动汽车对石化产品的依赖, 同时减少碳的排放。通过电动汽车可以有效地解决可再生能源的间歇问题, 降低储存成本, 电动汽车可以对产生的电能进行消纳利用, 以降低二者单独接入电网时对电网稳定性产生的不利影响。

如何有效地将电动汽车与可再生能源融合起来是至今仍需要解决的难题。Wi 等<sup>[50]</sup>对家居网络下的光伏发电系统进行了研究, 在预测光能发电以及电能消费的基础上得到了电动汽车的最优充电策略。Mohammad 等<sup>[51]</sup>考虑到电动汽车的随机性, 建立了以电网运行成本最小的优化模型, 通过仿真说明了该方法能够有效地将电网、可再生能源以及电动汽车三者进行充分融合, 使得运行成本最小<sup>[51]</sup>。

## 5 总结及展望

本文首先就大规模电动汽车无序充电对电网的影响进行了分析, 指出如果不对电动汽车用户的充电行为进行指引, 将严重影响电网的正常运行。而智能充电不仅可以降低电网的运营成本, 还可以降低电动汽车用户的充电成本。智能充电主要分两个研究方向: 集中式充电和分散式充电。集中式充电主要是结合电网以及电动汽车用户的用电需求决定电动汽车的充放电速率和时间。该方式下, 配电控制中心占据主导地位, 电动汽车用户需要配合配电控制中心的调控。分散式充电主要是通过获取电网信息以及电动汽车用户的用电需求制定电价, 通过发布所制定的电价来改变电动汽车的充电行为, 此时电动汽车的充电行为受到价格的激励, 有相对的自主性。

智能充电的实行需要网络通讯设备的支持, 保证各种信息的获取, 以确定充电策略。目前, 各国均在倡导可再生能源的利用, 而电动汽车能很好地解决可再生能源使用中的间歇问题, 因此

可使电动汽车的使用更加节能化和无碳化。从另一个角度来看, 智能充电对电池的性能提出了严峻的挑战。在智能充电中, 如果不考虑电池的状态, 则将对电池产生严重的损耗, 大大增加电池成本。

随着电动汽车的普及, 其充电需求将会显著增加。这不仅是一个巨大的挑战, 也是一个机遇, 若利用不当将会对电网产生不可估量的影响, 若利用得当则将使各方都成为受益者。

## 参 考 文 献

- [1] Energy Information Administration. Short-term energy outlook [EB/OL]. [2014-08-14]. [http://www.eia.doe.gov/emeu/steo/pub/steo\\_charts.pdf](http://www.eia.doe.gov/emeu/steo/pub/steo_charts.pdf).
- [2] International Energy Agency. 2014 Key world energy statistics [OL]. [2014-10-28]. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>.
- [3] Morais H, Sousa T, Vale Z, et al. Evaluation of the electric vehicle impact in the power demand curve in a smart grid environment [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 82: 268-282.
- [4] Hartmann N, Özdemir ED. Impact of different utilization scenarios of electric vehicles on the German grid in 2030 [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(4): 2311-2318.
- [5] Sousa T, Morais H, Soares J, et al. Day-ahead resource scheduling in smart grids considering vehicle-to-grid and network constraints [J]. *Applied Energy*, 2012, 96: 183-193.
- [6] Saber AY, Venayagamoorthy GK. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [7] Deilami S, Masoum AS, Moses PS, 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.
- [8] Jian LN, Xue HH, Xu GQ, et al. Regulated charging of plug-in hybrid electric vehicles for minimizing load variance in household smart microgrid [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(8): 3218-3226.
- [9] Jian LN, Zhu XY, Shao ZY, et al. A scenario of

- vehicle-to-grid implementation and its double-layer optimal charging strategy for minimizing load variance within regional smart grids [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78: 508-517.
- [10] Sortomme E, Hindi MM, MacPherson SDJ, 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.
- [11] Clement K, Haesen E, Driesen J. Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids [C] // *Power Systems Conference and Exposition*, 2009: 1-7.
- [12] Liu H, Hu ZC, Song YH, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3480-3489.
- [13] Ahn C, Li CT, Peng H. Optimal decentralized charging control algorithm for electrified vehicles connected to smart grid [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(23): 10369-10379.
- [14] Zhang K, Xu L, Ouyang M, et al. Optimal decentralized valley-filling charging strategy for electric vehicles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78: 537-550.
- [15] Zhang X, Mi CC, Yin C. Active-charging based powertrain control in series hybrid electric vehicles for efficiency improvement and battery lifetime extension [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 245: 292-300.
- [16] Fernández IJ, Calvillo CF, Sánchez-Miralles A, et al. Capacity fade and aging models for electric batteries and optimal charging strategy for electric vehicles [J]. *Energy*, 2013, 60: 35-43.
- [17] Lunz B, Yan Z, Gerschler JB, et al. Influence of plug-in hybrid electric vehicle charging strategies on charging and battery degradation costs [J]. *Energy Policy*, 2012, 46: 511-519.
- [18] Zhang L, Brown T, Samuelsen S. Evaluation of charging infrastructure requirements and operating costs for plug-in electric vehicles [J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 240: 515-524.
- [19] Baharin N, Abdullah TART. Challenges of PHEV penetration to the residential network in malaysia [J]. *Procedia Technology*, 2013, 11: 359-365.
- [20] Masoum AS, Deilami S, Moses PS, et al. Impacts of battery charging rates of plug-in electric vehicle on smart grid distribution systems [C] // 2010 IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2010: 1-6.
- [21] 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.
- [22] Sundstrom O, Binding C. Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(1): 26-37.
- [23] Leemput N, Geth F, Claessens B, et al. A case study of coordinated electric vehicle charging for peak shaving on a low voltage grid [C] // 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, 2012: 1-7.
- [24] Khayyam H, Ranjbarzadeh H, Marano V. Intelligent control of vehicle to grid power [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 201: 1-9.
- [25] Hilshey AD, Hines PDH, Rezaei P, et al. Estimating the impact of electric vehicle smart charging on distribution transformer aging [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(2): 905-913.
- [26] Masoum AS, Moses PS, Hajforoosh S. Distribution transformer stress in smart grid with coordinated charging of plug-in eElectric vehicles [C] // 2012 IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2012: 1-8.
- [27] Noel L, McCormack R. A cost benefit analysis of a V2G-capable electric school bus compared to a traditional diesel school bus [J]. *Applied Energy*, 2014, 126: 246-255.
- [28] Judd SL, Overbye TJ. An evaluation of PHEV contributions to power system disturbances and economics [C] // NAPS' 08 40th North American Power Symposium, 2008: 1-8.
- [29] Arslan O, Karasan OE. Cost and emission impacts of virtual power plant formation in plug-in hybrid electric vehicle penetrated networks [J]. *Energy*, 2013, 60: 116-124.
- [30] Esmaili M, Rajabi M. Optimal charging of plug-in electric vehicles observing power grid constraints [J]. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 2014, 8(4): 583-590.
- [31] Masoum AS, Deilami S, Moses PS, et al. Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation



- considering voltage regulation [J]. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 2011, 5 (8): 877-888.
- [32] Luo X, Chan KW. Real-time scheduling of electric vehicles charging in low-voltage residential distribution systems to minimise power losses and improve voltage profile [J]. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 2014, 8 (3): 516-529.
- [33] Zhang M, Chen J. The energy management and optimized operation of electric vehicles based on microgrid [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29 (3): 1427-1435.
- [34] Liu Y, Li QS, Tao S, et al. Coordinated EV charging and its application in distribution networks [C] // 2013 International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering, 2013: 600-604.
- [35] Davydova A, Chakirov R, Vagapov Y, et al. Coordinated in-home charging of plug-in electric vehicles from a household smart microgrid [C] // AFRICON, 2013: 1-4.
- [36] Mets K, D'Hulst R, Develder C. Comparison of intelligent charging algorithms for electric vehicles to reduce peak load and demand variability in a distribution grid [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2012, 14 (6): 672-681.
- [37] Qi W, Xu ZW, Shen ZJM, 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.
- [38] Soares J, Sousa T, Morais H, et al. Application-specific modified particle swarm optimization for energy resource scheduling considering vehicle-to-grid [J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13 (11): 4264-4280.
- [39] Sousa T, Morais H, Vale Z, et al. Intelligent energy resource management considering vehicle-to-grid: a simulated annealing approach [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3 (1): 535-542.
- [40] Moghbel M, Masoum MAS, Shahnian F. Coordinated charging of PEVs in unbalanced residential network based on worst node voltage profile [C] // 2013 IEEE International Conference on Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013: 1-5.
- [41] Callaway DS, Hiskens IA. Achieving controllability of electric loads [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99 (1): 184-199.
- [42] Mohsenian-Rad AH, Wong VWS, Jatskevich J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1 (3): 320-331.
- [43] Adika CO, Wang L. Smart charging and appliance scheduling approaches to demand side management [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 57: 232-240.
- [44] Nguyen HK, Song JB. Optimal charging and discharging for multiple PHEVs with demand side management in vehicle-to-building [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2012, 14 (6): 662-671.
- [45] Amoroso FA, Cappuccino G. Impact of charging efficiency variations on the effectiveness of variable-rate-based charging strategies for electric vehicles [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196 (22): 9574-9578.
- [46] Khayyam H, Abawajy J, Javadi B, et al. Intelligent battery energy management and control for vehicle-to-grid via cloud computing network [J]. *Applied Energy*, 2013, 111: 971-981.
- [47] Yuan ZQ, Xu HP, Han HC, et al. Research of smart charging management system for electric vehicles based on wireless communication networks [C] // 2012 IEEE 6th International Conference on Information and Automation for Sustainability, 2012: 242-247.
- [48] Shepelev A, Chung CY, Chu CC, et al. Mesh network design for smart charging infrastructure and electric vehicle remote monitoring [C] // 2013 International Conference on ICT Convergence, 2013: 250-255.
- [49] Hild S, Leavey S, Graf C, et al. Smart charging technologies for portable electronic devices [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5 (1): 328-336.
- [50] Wi YM, Lee JU, Joo SK. Electric vehicle charging method for smart homes/buildings with a photovoltaic system [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2013, 59 (2): 323-328.
- [51] Khodayar ME, Lei W, Shahidepour M. Hourly coordination of electric vehicle operation and volatile wind power generation in SCUC [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3 (3): 1271-1279.