

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201916

## 三网融合下充电服务网规划与运营探讨

刘俊勇, 向月, 姚昊天, 唐铄雅, Shafqat Jawad

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 电动汽车由于其节能减排的特点而呈现快速发展趋势。作为电动汽车的重要支撑, 充电服务网的规划布局与运营模式决定了电动汽车的发展前景。首先, 基于充电服务网基本元素及发展形态的研究, 总结了多因素影响下的电动汽车集群规模推演与充电负荷预测方法。其次, 进行充电服务网与配电网、交通网的耦合关系分析, 建立三网融合下的综合评价指标体系, 评估三网匹配程度。对充电基础设施规划方法的发展进行了系统阐述, 提出了三网协同规划研究方法。分析了充电服务网价格机制及运营策略, 提出了多重因素影响的充电服务费制定策略。最后, 概述了在泛在电力物联背景下充电服务网的新型业务形态。

**关键词:** 电动汽车; 充电服务网; 三网融合; 协同规划; 运营模式

### Discussion on planning and operation of charging service network integrated with power and transportation networks

LIU Junyong, XIANG Yue, YAO Haotian, TANG Shuoya, Shafqat Jawad

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Electric vehicles present a fast-growing trend due to their outstanding energy conservation and emission reduction characteristics. As significant support for electric vehicles, the actual planning and operation of the charging service network determine the advancement prospects of electric vehicles. Firstly, in light of the elements and development formation of the charging service network, electric vehicle clusters' scale evolution method and charging demand forecasting under the influence of multiple factors are highlighted. Secondly, the coupled relationship among the charging service, power distribution, and transportation network is analyzed. A comprehensive evaluation system under the integration of three networks is established to evaluate the performance of the coupled networks. The development of the charging infrastructure planning method is systematically portrayed, and collaborative network planning method of charging service as well as power and transportation networks is proposed. In addition, the price mechanism and operation strategy of the charging service network is analyzed; the charging service price formulation strategy affected by multiple factors is suggested. Finally, the new business model of charging service network based on technologies such as the ubiquitous power Internet of Things (IoT) is addressed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51807127).

**Key words:** electric vehicle; charging service network; three networks integration; collaborative planning; operating mode

## 0 引言

当前世界环境与能源问题日益突出, 电动汽车由于其动力来源可再生以及节能减排的特性已被世界各国视作替代传统汽车的下一代交通工具<sup>[1-2]</sup>, 在过去十年内相关技术得到了快速发展。而充电服务

网作为电动汽车的重要配套基础设施, 对推进电动汽车发展有着重要作用<sup>[3]</sup>。

电动汽车及其配套的充电服务网同时作为配电网与交通网的重要组成元素。对配电网而言, 配电网规划运行需要考虑充电负荷大规模接入带来的可靠性、经济性问题, 同时充电服务网的规划运行也受制于配网容量及可靠性方面的约束限制<sup>[4]</sup>; 对交通网而言, 充电站的规划运营会改变交通网流量分布, 同时交通网特性也会影响充电站的规划运营<sup>[5]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51807127); 四川大学新世纪高等教育教学改革项目资助(SCU8007)

因此，以电动汽车作为联结，充电服务网、配电网与交通网三网间的耦合关联程度日益紧密，无论是规划还是运营层面都不应该将三个网络看作孤立个体单独进行研究，只有进行三网的协同规划与运营，才能实现多方效益的最大化<sup>[6]</sup>。

针对上述问题，本文首先阐述了充电服务网的基本概念与发展形态，在此基础上综述分析了充电服务网元素及集群特性，包括电动汽车规模推演与充电负荷建模预测。然后，分析了三网耦合关联关系，建立了三网融合下的综合评价指标体系。基于充电服务网特性及三网耦合关系的研究，对三网协同规划理论、充电服务网的价格机制、运营策略以及运行调度方式进行了分析综述。

### 1 充电服务网概念及发展形态

充电服务网的主要组成元素按规模大小可以分为集中型充电站、交直流充电桩、充电机等。交直流充电桩与充电机系统简单、占地面积小，通常建立在停车场、住宅及超市旁。集中型充电站通常由

多台交直流充电桩组成，位于车流量大的城市中心区域，可以提供充换电等多种服务。充电基础设施在为电动汽车提供能量补给的同时，也通过无线射频识别设备、传感器、图像识别等技术实现对电动汽车状态数据的识别、收集与处理。

充电服务网是综合考虑充电服务特性、配电网特性、交通网流量特性等，由不同规模的充电站、充电桩、充电机协调组成的复杂充电服务网络。充电服务网依托多种类型的充电基础设施，融合配电网、交通网与信息网等多种网络。充电服务网在为电动汽车提供能源支撑的同时，考虑与配电网、交通网间的耦合关系，进行充电服务网的优化运营。在运行层面，充电服务网还可以协调集群电动汽车参与电网实时调度，提供调峰调频备用服务等。此外，充电服务网需要考虑三网耦合关系进行合理的充电服务费价格制定。在当今电力市场环境下，充电服务网可以参与日前及备用市场与其他主体进行竞争博弈。充电服务网未来发展形态如图 1 所示。

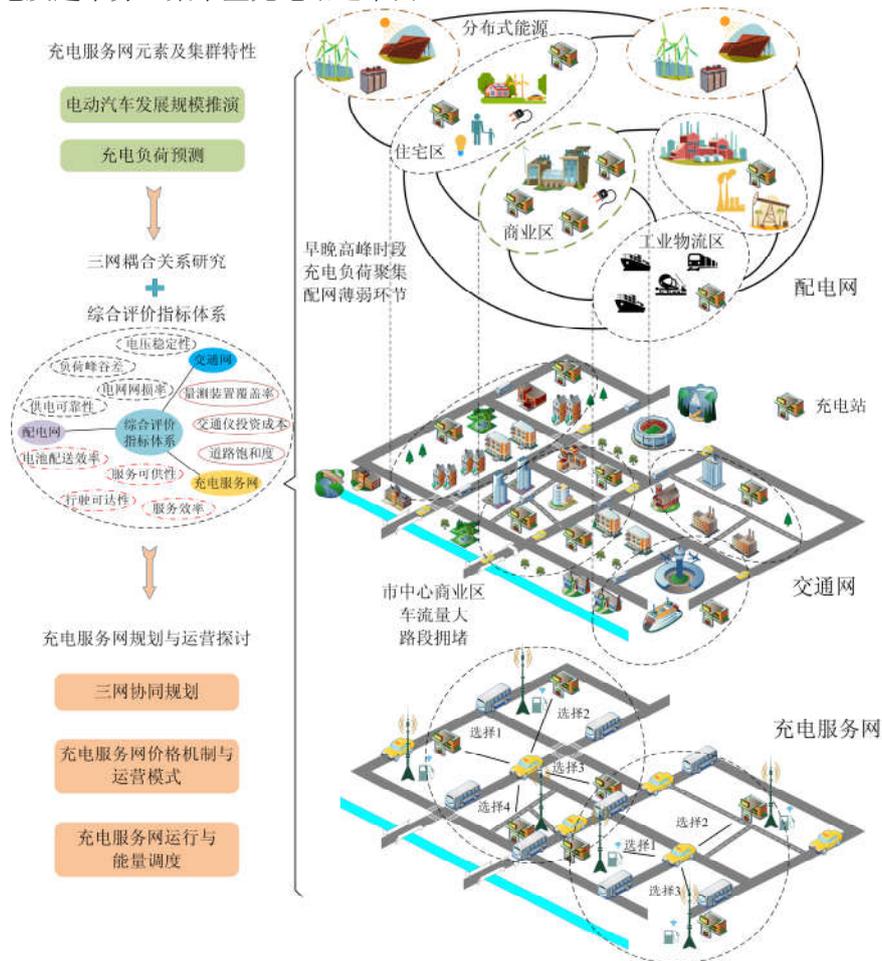


图 1 三网融合下的充电服务网未来发展形态

Fig. 1 Future development formation of charging service network under the intergration of three networks

## 2 充电服务网元素及集群特性

作为支撑电动汽车正常运行的重要基础设施, 充电服务网具有为电动汽车充电供能的重要作用。为了适应并推动电动汽车的快速发展, 充电服务网的超前规划与优化运营研究势在必行。充电服务网元素及集群特性作为充电服务网规划运营相关研究的基础, 需要对多重因素影响下的电动汽车集群规模推演与充电负荷预测方法进行深入研究。

### 2.1 电动汽车集群规模推演研究

充电负荷的宏观特性受到电动汽车规模的直接影响。当前针对电动汽车元素及集群特性的研究主要集中在充电负荷时空预测上, 有关电动汽车规模推演的研究较少。文献[7]考虑了经济发展的不同时段特性, 构建了基于 Gompertz 模型的电动汽车规模推演数学预测方法。文献[8]强调了电动汽车的发展会受到传统汽车的影响, 采用 Lotka-Volterra 模型对其竞争关系进行推演, 研究了电动汽车规模的竞争性增长过程。文献[9]采用千人保有量法, 综合考虑经济发展和人均 GDP 等因素, 对电动汽车发展规模进行了预测。

上述文献在进行电动汽车规模推演时没有综合考虑影响电动汽车发展的多方面关联因素, 因此对电动汽车规模的预测具有局限性。文献[10]综合考虑了政策影响、经济条件、竞争者数量、城市规划等多方面因素, 提出了电动汽车发展规模预测模型。文献[11]分析了政策、经济、汽车购买价格等多方面电动汽车发展规模影响因素, 建立多因素影响的电动汽车保有量数学预测模型。

电动汽车的发展受到经济、环境、政策、技术、基础设施建设等多方面因素的制约与影响, 因此对电动汽车规模的有效预测应该综合考虑电动汽车不同发展时期下的多方面影响因素及其因果耦合关系, 揭示电动汽车基于复杂内部因素驱动的渐进式发展演化机理。运用流图构建电动汽车发展阶段的时序框架, 通过因果关系图构建多种影响因素的多重反馈因果关系, 如图 2 示例所示。在此基础上, 由一阶微分方程对各要素关联关系进行量化, 实现定性分析与定量分析相结合, 通过系统动力学仿真实现电动汽车规模预测<sup>[12]</sup>。

从微观角度, 可以基于多代理技术, 构建综合考虑经济性、技术成熟度、社会效益与环境效益的用户综合效用评价模型, 分析电动汽车发展过程中涉及的多利益主体的行为模式, 构建多代理演化模型, 对多重因素影响下的电动汽车发展规模进行预测推演<sup>[13-14]</sup>。

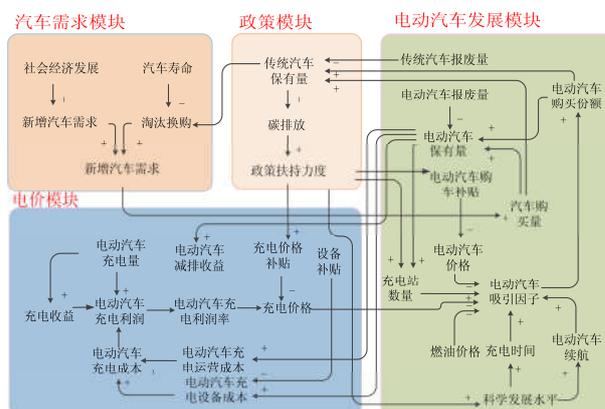


图 2 电动汽车规模因果与相互关系

Fig. 2 Causal loop diagram of EV's scale evolution

### 2.2 充电负荷建模及预测研究

充电负荷大量接入配电网, 会使城市负荷曲线与传统电网相比有很大改变, 同时也会显著改变交通网流量分布。因此在电动汽车发展与配套充电服务网基础设施建设的同时, 需要研究电动汽车充放电行为与配电网、交通网等其他网络间的互动耦合关系, 进行三网协同规划与优化运营策略。首先必须从“时-空-量”的角度对电动汽车充电负荷进行有效预测。

电动汽车充电行为在多方面因素影响下具有时间和空间上的不确定性, 考虑不同的影响因素会形成不同的充电负荷建模及预测方法, 如图 3 所示降水量、气温、电动汽车渗透率等因素都会影响充电负荷。文献[15]分析了电动汽车的驾驶特性与停车需求特性, 基于蒙特卡洛法, 提出了电动汽车充电负荷时空分布预测方法。文献[16]采用用地决策法, 对电动汽车充电负荷的空间分布进行了预测, 构建了充电负荷空间分布预测模型。文献[17]通过对居民出行调研数据进行统计分析, 拟合得到电动汽车的出行目的、行程距离及结束时间, 构建了基于出行链的充电负荷时空分布模型。

对于交通网, 电动汽车同样会受到网络拓扑结构与道路流量的约束。然而上述针对充电负荷的传统预测方法, 很少考虑交通拥堵等交通网特性对充电负荷时空分布的影响。鉴于此, 文献[18]额外设计了交通耗时系数以考虑交通网特性对电动汽车出行的影响, 确定出行时间对应各目的地的概率分布, 实现在交通流约束下对充电负荷的有效预测。文献[19]进一步对电动汽车、交通网、配电网耦合下的充电负荷时空分布进行研究。采用 OD 分析刻画出行轨迹, 考虑交通网车速-流量特性, 实现充电负荷预测。

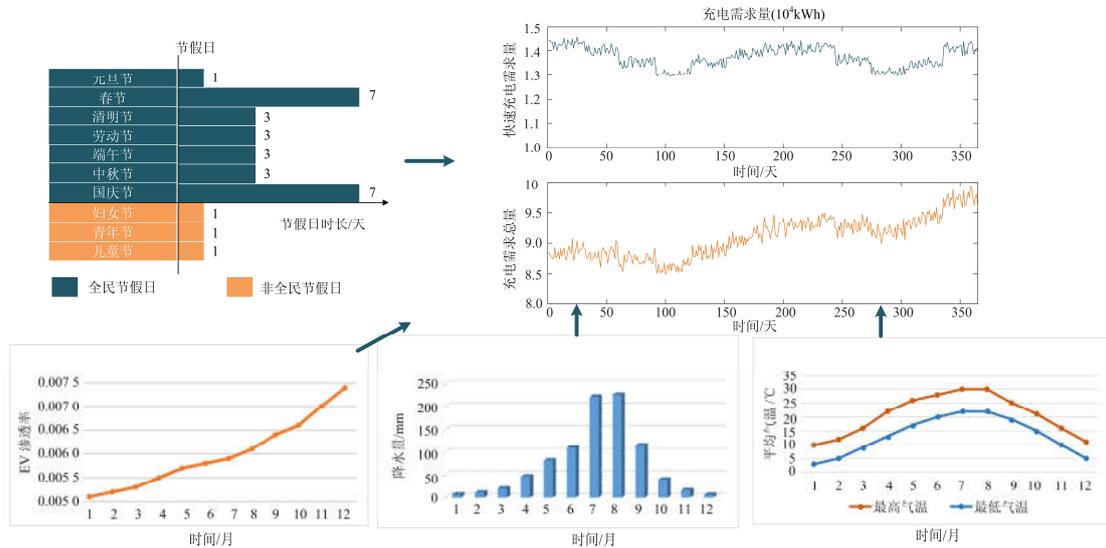


图 3 充电负荷影响因素

Fig. 3 Influencing factors of charging demand

电动汽车的购买决策行为受到很多因素的影响，而随之带来的电动汽车规模增长也会影响充电负荷的时空分布。文献[20]基于多代理技术，提出了一种协同研究电动汽车规模演化模型和充电负荷预测模型的新型综合动态建模方法。首先构建了综合考虑个人用户社会经济特征、购买倾向特征、产品技术价格属性以及外部环境特性的个人用户购车决策模型，如图 4 所示。在此基础上，研究个人购车决策行为的集群特性进而得出电动汽车规模的多代理演化模型。考虑电动汽车规模与充电负荷特性的相互依存关系，将电动汽车规模演化规律作为输入变量，得出电动汽车的长期充电负荷预测模型如图 5 所示。

未来私家电动汽车所占的比重将会大大上升，私家电动汽车相比于公交车等专用车辆的出行空间更为灵活，用户决策行为不确定性更强。在未来的充电负荷预测及规模推演中，应该考虑对用户主观

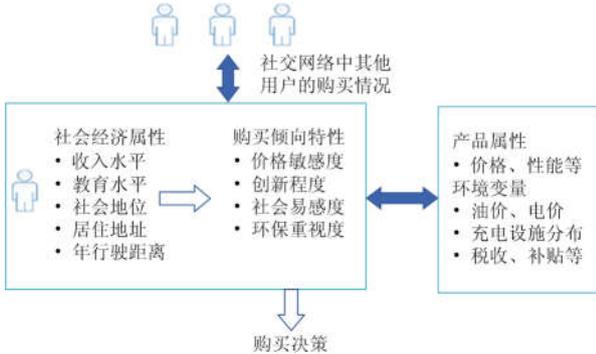


图 4 用户购车决策模型框架

Fig. 4 Framework of purchase decision model

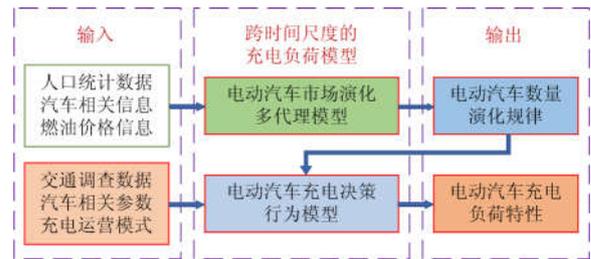


图 5 基于多代理的规模与负荷预测双层框架

Fig. 5 Agent-based two layer framework for scale evolution and charging demand

因素进行量化，从而更精确地分析其购买决策行为与出行行为对充电负荷的影响。然后，影响充电负荷时空分布的多方面因素间存在复杂的耦合关系，未来应考虑采用大数据、人工智能等技术挖掘多因素耦合特性及影响机理。

### 3 三网耦合关系及综合评价体系

电动汽车以充电服务网作为能源支撑，同时也具有配电网与交通网的双重特性。因此，三网间存在着复杂的关联关系。随着电动汽车的快速发展，以电动汽车和充电网作为联结，充电服务网、配电网、交通网逐渐演变成相互耦合、相互依存、存在因果反馈关系的高度融合网络。首先对充电服务网、配电网以及交通网进行建模并分析网络耦合关系。在此基础上，研究三网融合下的多维度综合评价指标体系，对三网融合匹配度进行评估，为三网协同规划及充电服务网运营提供依据。

### 3.1 三网建模及耦合关联关系

充电服务网是由地理位置分散的充电基础设施组成的复杂网络, 充电站、充电桩等多种类别的充电基础设施之间存在着复杂的关联关系, 因此需要研究充电站、充电桩等大规模基础设施的优化配置布局方案与高效运营策略。针对充电服务网, 可以运用复杂网络理论梳理网络的统计特征, 探讨充电服务网的拓扑性能, 找出内部多种充电基础设施间的关联关系。考虑多维度因素对充电服务网节点重要性进行排序, 挖掘网络重要节点, 以重要节点为主导研究充电服务网网络演化模式与优化运营策略。

对于交通网首先基于图论描绘交通网基本元素特性及其关联关系, 在此基础上采用路网邻接矩阵描述每个路段的有向路权量化属性, 得出交通路网基本拓扑结构<sup>[21]</sup>。采用速度-流量模型分析电动汽车行驶速度与道路通行能力及车流量间的关系。出行起止点(OD)矩阵作为交通规划控制的基础, 可以有效确定某一时间段电动汽车出行起止点间的交通量, 刻画电动汽车出行轨迹。进一步可以构建交通流均衡分配理论模型, 实现基于交通流的充电站规划<sup>[22]</sup>。OD 矩阵数据的获得传统上是通过费时费力的大规模交通出行分布调查。文献[23]基于 OD 量与交通量的关系, 提出了基于状态空间模型的动态 OD 估计模型。文献[24]基于完善数学规划法, 提出了一种由路段流量、道路特征等特性反推获得区域 OD 矩阵的方法。

电动汽车同时具有配电网与交通网的双重属性。一方面电动汽车作为交通工具参与交通网的运行, 其行驶特性会显著改变交通流分布, 早晚高峰电动汽车聚集在充电站进行充电, 可能会导致附近的交通路段发生拥堵; 另一方面, 电动汽车充电时又以充电负荷的形式接入配电网, 充电负荷在“时-空-量”上的不确定性, 会显著改变配网运行特性, 导致配电网产生负荷峰谷差大、可靠性差、电源容量不足等一系列问题。

因此, 以电动汽车为纽带, 充电服务网、配电网、交通网逐渐演变成了相互耦合、相互依存、存在因果反馈关系的高度融合网络。对电动汽车与充电服务网而言, 无论是规划布局还是运营调度, 都不能只考虑充电服务网个体特性, 必须考虑到高度耦合的配电网、交通网特性及三网间的因果反馈关系。针对三网耦合关联状态, 首先可以通过数据挖掘技术对电力网负荷曲线、交通网道路流量以及充电服务网历史数据进行关联性分析, 初步挖掘充电服务网-配电网-交通网间的基本耦合关系。随后采

用相依网络理论对三网耦合关联特性进行数学建模。相依网络理论考虑复杂网络间存在的相依存特点, 可以针对相依网络的鲁棒性进行研究。在此基础上可以将相依网络理论进一步扩展, 用于分析构建充电服务网、配电网、交通网等相依网络间存在的更普遍的耦合关联关系。

### 3.2 三网融合综合评价指标体系

当前针对充电服务网规划方案及运营能力评价方面的研究较少, 且大多是针对充电服务网个体进行的。文献[25]考虑了配电网支撑能力与网损指标以及充电服务网特性指标, 基于层次分析法构建了充电站规划方案的多因素综合评估体系。文献[26]考虑电动汽车充电需求与充电基础设施配置两方面因素对充电服务网服务能力的影响, 提出了针对充电服务网运营能力的仿真评估方法。

在充电服务网、配电网、交通网进行协同规划发展与优化运营的过程中, 存在着政府、供电公司、售电公司、用户与充电设施运营商等多方利益主体及其各自的利益诉求。如供电公司希望电动汽车的充放电行为在满足发电容量与网络安全的限制下, 积极参与配电网协调运行, 提高配电网经济可靠性; 充电设施运营商希望可以将充电站建设在车流量最大的市中心高峰路段, 实现自身运营收益最大; 用户希望充电站建立在充电价格合理、交通便利可达的位置; 政府则希望充电站选址在通畅路段, 通过充放电行为缓解高峰路段车流量压力, 同时提高用户满意度与电动汽车普及度。多方利益诉求与限制往往难以同时满足, 甚至相互排斥。

因此, 在三网协同发展过程中, 需要建立三网融合综合评价指标体系, 确立规划运营过程中多种影响因素的因果反馈关系与互斥关系, 协同考虑三网多维度规划运营目标及影响因素评估三网匹配程度, 实现三网协同规划运营的顶层布局模式。考虑到电动汽车不同发展阶段下主要影响因素的不断变化, 指标评价体系也应随之动态更新发展, 适应性地评估地区现有三网融合匹配性及三网薄弱区域, 给出未来发展规划方向以及合理运营策略。

## 4 三网融合下充电服务网规划运营研究

### 4.1 三网协同规划理论

充电服务网基础设施作为电动汽车充电的重要支撑, 优化的选址定容方案, 可以有效提高电动汽车充电服务的经济效益、用户效益与社会效益。

充电服务网的规划过程不仅需要考虑到电动汽车的电池充电需求、续航里程等电动汽车特性, 同时也应该考虑配电网、交通网的目标及约束条件, 如

配电网容量及安全约束、城市交通流量特性等<sup>[27]</sup>。文献[28]在总结了充电站传统规划评价指标的基础上, 计及充电站对电网的谐波污染程度, 进一步提出了基于模糊物元评估方法的充电服务网规划综合评价指标体系。传统充电站规划的方法鲜有考虑到投资收益与用户满意度的影响, 文献[29]提出考虑投资预算等约束条件的充电站双层优化配置模型, 模型上下层分别选取投资效益与用户效用为目标进行充电站规划求解。考虑到交通流影响, 文献[30]构建了充电站及其专用输电线路的两阶段协同规划模型, 并以全寿命周期成本最小为目标对充电站进行定容。

传统针对充电服务网基础设施的规划研究虽然考虑了电动汽车的配电网属性与交通网属性, 但是

并没有建立具体的配电网与交通网网络结构, 没有针对三个网络间的因果反馈关系进行耦合分析, 没有考虑多重因素影响进行三网协同规划。

当前针对充电服务网及其耦合网络进行协同规划的研究还主要集中在充电服务网与配电网的协同规划。文献[31]基于双层规划理论对充电服务网与配电网的协同规划问题进行耦合建模, 上下层分别以年社会最大效益、配电网规划投资成本作为目标进行协同规划。在充电服务网与配电网的协同规划中, 气候条件、政策影响、市场环境等多方面因素都会产生长期动态影响, 配电网和充电服务网的规划运营也需要动态适应性更新。可以采用时间窗滚动刷新机制以及关联度分析法进行充电站与配电网的动态协同规划<sup>[32]</sup>, 具体规划流程如图 6 所示。

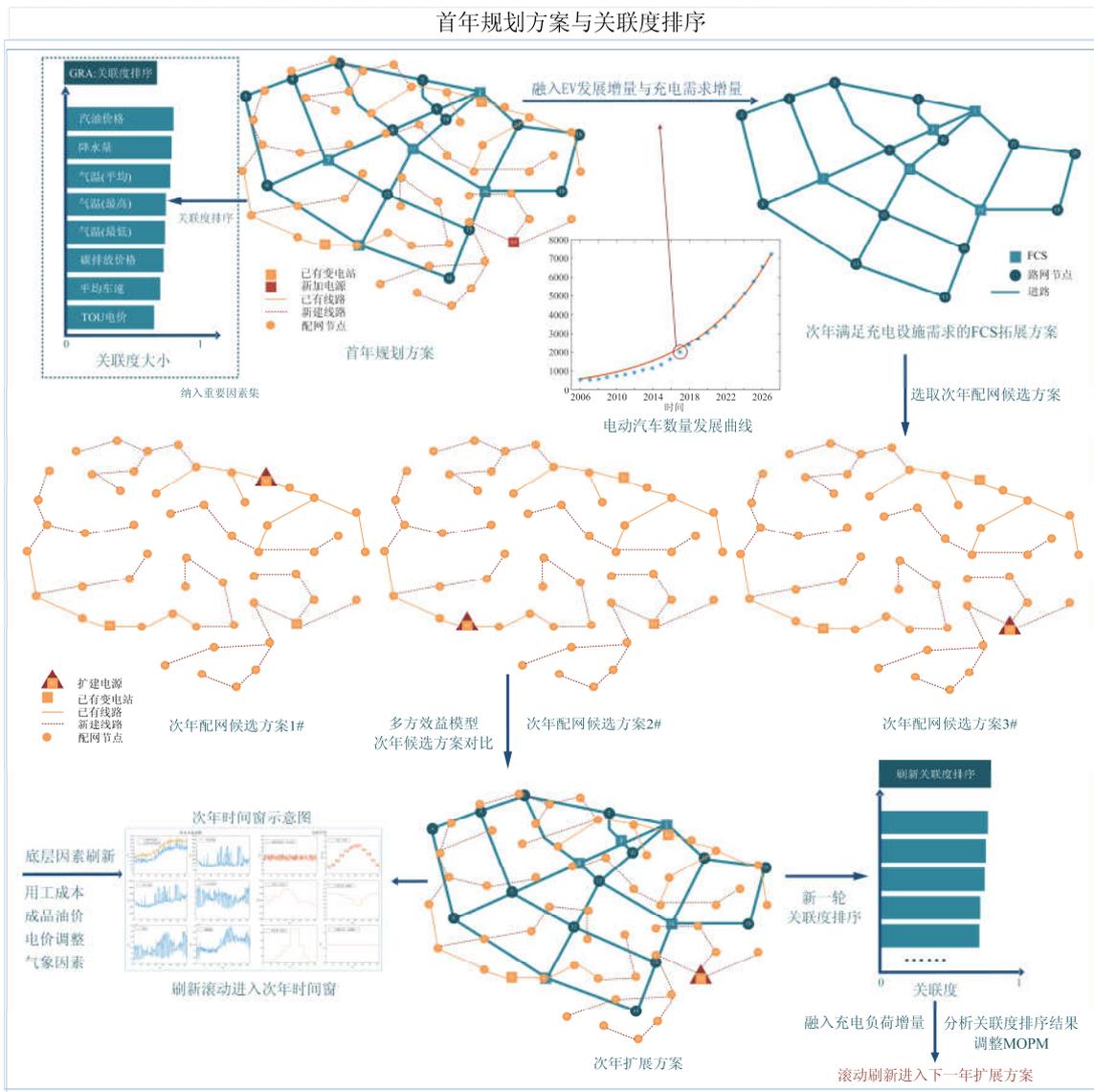


图 6 首年基于时间窗滚动刷新的规划方案及关联度排序

Fig. 6 First year planning scheme and correlation sorting based on time windows scroll update

考虑多网络耦合状态,文献[33]提出了基于车-路-网耦合的多目标协同规划方法,基于交通网 OD 矩阵刻画电动汽车出行轨迹与交通流量。通过对交通网与配电网进行耦合建模,进行多目标协同规划,实现多网融合下的充电站与配电网的最优协同规划结果。

上述文献虽然考虑到了充电服务网、配电网与交通网的耦合关联特性,但是并没有进行三网协同规划,因此其规划方案仍然具有局限性。充电服务网规划过程与配电网、交通网间存在着复杂的因果反馈关系。因此,在规划层面上就应该对基于多目标综合评价指标体系对配电网-交通网-充电服务网进行顶层布局与规划方案的优化组合。基于三网融合综合评价指标体系,评估三网融合薄弱环节。融合上述协同规划理论方法,综合考虑充电服务网、配电网、交通网的多维度协同规划目标,以充电服务网建设为基础,进行三网协同规划。

在充电服务网规划过程中,需要考虑配电网可靠性、发电容量、电能质量、经济性等一系列效益指标,考虑配电网负荷水平及潮流分布情况进行充电站的优化选址定容;同时也需要考虑交通网道路流量的影响及制约关系,一方面需要基于交通网的路径结构及交通流量分布,考虑车流量、用户充电的便利性、充电站建设的经济性与投资回报率等效益进行选址定容方案的优化;另一方面充电基础设施的规划布局应该考虑对交通流量的反馈控制作用,改善交通流量分布以及缓解道路阻塞。

在配电网规划过程中考虑充电站的选址定容优化方案,可以有效降低配网投资与运行成本。考虑充电基础设施规划结果,通过三网融合下的综合指标评价得出配电网薄弱性环节,提前进行发电侧扩容、变电站选址、网架改造等配网改造措施,以提前适应充电服务网发展。

对于交通网的规划过程,需要协同考虑充电基础设施的选址定容方案,计及充电站布局带来的交通网流量转移特性,进行交通网的合理规划。针对大型集中式充电站,进行附近交通路段的提前扩容延展与交通节点的优化布局,以适应大规模电动汽车聚集充电带来的道路阻塞现象。

基于综合评价指标体系进行三网协同规划,给出三网整体利益最优下的协同设施布局方案,可以为网络运营带来优势和便利。

#### 4.2 充电服务网价格机制及运营模式研究

充电服务网通过对充电业务以及相关关联业务的有效运营,可以实现充电基础设施建设与运营成本的回收与盈利。下面针对充电服务网主要的运营

模式及价格机制进行综述分析。

充电服务网盈利的基本运营模式是为电动汽车提供能源补给,而充电业务的关键部分就在于充电价格的制定。电动汽车实际充电价格为充电电价与充电服务费之和,其中充电服务费是充电服务网为了回收投资成本、实现运营盈利而收取的额外费用。合理的充电服务费方案能够激励充电桩投资与成本的合理回收。当前针对电动汽车充电价格的研究很少涉及到充电服务费的制定策略。文献[34]根据负荷变化的斜率制定了基于峰谷分时电价的充电服务费定价模型。文献[35]基于充电需求受价格引导的分布特性,设计了独立决策时的充电站运营商充电服务费定价方案,进一步构建充电服务费联盟博弈模型。文献[36]对充换电服务收费标准进行测算,建议充电服务费的收取在电动汽车推广应用初期以不高于燃油替代收费标准实施。

当前国内外文献在充电服务费制定时所考虑的因素较少,也没有形成统一的制定标准。在三网融合背景下,合理的充电服务费定价策略需要同时考虑对交通网阻塞缓解以及配电网负荷转移的双重作用,实现充电服务网、配电网与交通网指标的匹配。具体来说,在配电网方面需要考虑充电负荷“时-空-量”分布不确定性的影响;交通网方面需要考虑道路的拥塞情况、道路车容量、交通网结构等方面的影响;充电服务网方面,充电桩数量、充电站的地理分布情况、电动汽车位置信息等也会影响充电服务费的制定,如图7所示。鉴于此,可以基于对运行历史数据的分析,利用统计回归等计量经济学方法,量化多维因素之间的相互关系。根据量化所得影响因素,分析设备利用率、交通便利性、清洁能源使用情况、油价变化、充电服务成本等各类因素数据之间的关联关系,构建多维复杂因素之间的因果关系图。

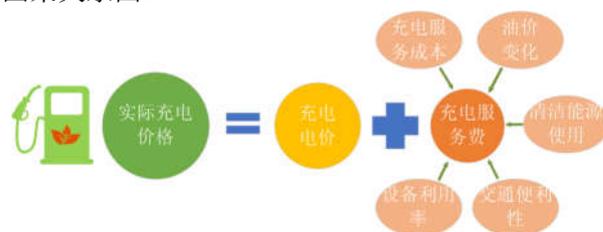


图7 充电服务费及其影响因素

Fig. 7 Charging service fee and influencing factors

充电服务网的另一种运营模式是协调电动汽车参与配电网调度,将闲置的电动汽车通过V2G技术作为需求侧响应资源,与电网进行能量与信息的双向交互,实现电动汽车的有序充放电。基于此,可

以实现与可再生能源协同调度，促进可再生能源的消纳；为系统提供调峰、调频、备用等辅助服务<sup>[37]</sup>。

当前电动汽车 V2G 模式主要是通过电动汽车聚合商协同调度电动汽车集群的可调度负荷容量与储能容量，参与电网优化运行。文献[38]提出电动汽车运营商对集群电动汽车充放电进行管理，构建的电动汽车与风机协同参与的机组组合模型，可以促进风电消纳，提高运营商与用户的收益。文献[39]提出了规模化电动汽车通过集中控制管理中心参与电网负荷频率调整的模式，验证了电动汽车为系统提供短时备用的能力。文献[40]将集群充电站作为电动汽车代理商，参与上层电网二次调频服务，同时控制下层电动汽车充放电行为，基于电动汽车快速响应特性，可以有效抑制系统频率偏差。

上述文献只考虑了充电服务网作为独立个体参与电网调度的情况，但是随着电力市场改革的日益推进，越来越多的售电侧主体将参与日前市场及辅助服务市场的竞争<sup>[41]</sup>。充电服务网在与其他售电商进行博弈的情况下，需要优化其投标策略与竞价机制以提高运营收益。因此，需要对充电服务网在市场竞争机制下参与电网调度的运营模式进行研究。文献[42]提出电动汽车代理商可以通过对大规模电动汽车进行充放电调度参与辅助市场，为系统提供调频服务与旋转备用服务，并进一步对其经济效益进行分析，基于实际数据验证了所提策略的可行性。文献[43]考虑风电厂与电动汽车聚合商共同组成虚拟电厂的情况，基于寡头竞争的博弈均衡理论，提出了风电厂与电动汽车聚合商共同参与投标竞争的电力市场多时段随机博弈均衡模型，可以同时提高双方收益并减小投标偏差。文献[44]考虑电动汽车代理商与车主的主从博弈，基于日前和备用市场的统一出清模型，构建电动汽车代理商参与备用服务市场的最优竞价策略与充电价格制定策略的双层联合优化模型。文献[45]针对电动汽车聚合商参与电力市场的主要环节及其影响因素，对用户与聚合商间的充放电合约及市场机制进行了研究，在此基础上构建了电动汽车聚合商参与现货市场与备用市场的优化模型。

为突破充电基础设施基础运营盈利难的困局，充电服务网也提出了一系列新型运营模式。如基于开放共享的充电服务网信息物理平台，横向连接电动汽车制造商、网约车平台、售后维修、新能源汽车分时租赁商、停车场等多方产业链。以充电服务网基础设施为核心，衍生出电动汽车销售、维修、共享电动汽车租赁、电动汽车充电桩分时共享机制等一系列增值服务，如图 8 所示。基于在线互联网

平台实现用户的便捷共享充电、有序充电、充电功率灵活控制、充电导航、充电状态查询、无感支付等一系列智能服务，在提高用户体验和满意度的同时，提高充电服务网运营收益。



图 8 充电服务网创新运营模式

Fig. 8 Operation mode of charging service network

### 4.3 充电服务网运行调度与能量管理

充电服务网参与配网协同运行及市场竞争等运营模式必须基于对区域电动汽车充放电行为的有序控制<sup>[46]</sup>。传统上充电服务网对电动汽车充放电行为的控制都是基于直接控制方式<sup>[47]</sup>，给出的电动汽车充放电策略并没有考虑用户的接受程度与主观倾向性。当前另一种电动汽车 V2G 调控方式是通过分时电价、峰谷电价等价格机制对用户充放电行为进行引导与激励，由用户主动改变充放电行为<sup>[48]</sup>。文献[49]以充电站负荷削峰填谷为目标，基于分时峰谷电价机制，由内部用户自主响应，实现充电站内的电动汽车有序充电，可以显著提高经济效益。文献[50]选择充电站作为其服务范围内的电动汽车代理商，通过实时电价机制引导电动汽车的充电行为，最终实现负荷峰谷差最小的控制目标。文献[51]针对分时电价会导致新的充电负荷高峰的问题，设置了充放电电价上下限，建立电动汽车充放电时段优化模型，可以实现负荷峰谷特性的有效转移。

上述电动汽车 V2G 技术主要是采用分时电价机制激励或直接控制方式改变电动汽车充放电行为。但是分时电价值一旦确定就很难轻易改变，因而不能根据用户充放电行为的变化而灵活动态调整，具有一定的局限性。未来基于泛在电力物联网-移动智能-大数据技术，可以实现电网负荷曲线、实时电价、新能源出力变化等电网侧信息与电动汽车运行状态、充电服务网基础设施状态、交通网实时道路流量信息的共享融通。充电服务网与电动汽车车主可以基于多维度信息主动进行需求侧管理，实现充放电行为的实时动态调整，从而更好地参与配电网调度及市场竞争，提高充电服务网与用户的收益。

## 5 结论

充电服务网作为电动汽车重要配套基础设施, 其网络优化规划及合理运营是推动电动汽车快速发展的基础。由于电动汽车与充电服务网具有的配电网与交通网双重属性, 三网间的耦合关联关系使得充电服务网-配电网-交通网逐渐演变为高度融合的相依网络, 充电服务网的规划运营涉及到多方利益与影响因素的制约。在规划层面上需要考虑三网协同规划, 在运营模式中针对充电服务费的制定也应考虑到三网间的耦合关联关系。作为泛在电力物联网的重要应用场景, 充电服务网在三网融合背景新型互动与规划运营模式有待深入研究和探讨。

### 参考文献

- [1] XIANG Yue, LIU Junyong, LI Ran, et al. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 647-659.
- [2] SONG Y, YANG X, LU Z. Integration of plug-in hybrid and electric vehicles: experience from China[C] // *Power and Energy Society General Meeting*, July 25-29, 2010, Providence, RI, USA: 1-6.
- [3] 薛飞, 雷宪章, 张野飏, 等. 基于复杂网络的电动汽车智能充换电服务网络评估方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(9): 20-24.  
XUE Fei, LEI Xianzhang, ZHANG Yebiao, et al. A complex network-based method to evaluate smart charging and swapping network for electric vehicles[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(9): 20-24.
- [4] 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 model[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(4): 1-5.
- [5] GUO Qinglai, WANG Yao, SUN Hongbin, et al. Research on architecture of ITS based smart charging guide system[C] // *Proceedings of 2011 IEEE Power and Energy Society*, July 24-29, 2011, San Diego, CA, USA: 1-5.
- [6] 梅杰, 高赐威. 交通特性在电动汽车并网研究中的考虑[J]. *电网技术*, 2015, 39(12): 3549-3555.  
MEI Jie, GAO Ciwei. Considerations of traffic characteristics in research of grid integration of electric vehicles[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(12): 3549-3555.
- [7] 杜传祥, 魏秀岭. 基于 Gompertz 模型的西安市电动汽车保有量的预测研究[J]. *现代工业经济和信息化*, 2018, 8(3): 89-90, 93.  
DU Chuanxiang, WEI Xiuling. Research on prediction of electric vehicle quantities in Xi'an based on Gompertz model[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2018, 8(3): 89-90, 93.
- [8] 张国方, 陈行, 李顺喜. 基于 Bass 模型和 Lotka-Volterra 模型预测电动汽车保有量[J]. *武汉理工大学学报*, 2017, 39(8): 91-98.  
ZHANG Guofang, CHEN Hang, LI Shunxi. Research on forecast of electric vehicle's ownership based on the comparison of Bass model and Lotka-Volterra model[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2017, 39(8): 91-98.
- [9] 王中阳, 王威, 戴建卓, 等. 基于弹性系数法和千人保有量法的山西省电动汽车保有量的预测[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(5): 142-147.  
WANG Zhongyang, WANG Wei, DAI Jianzhuo, et al. Forecasting of electric vehicle quantity based on the elastic coefficient and Shaanxi vehicles ownership per thousand people method[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(5): 142-147.
- [10] 郭云鹏, 彭明伟, 李梁, 等. 基于多信息融合的电动汽车保有量预测模型分析[J]. *浙江电力*, 2015, 34(1): 55-58.  
GUO Yunpeng, PENG Mingwei, LI Liang, et al. Analysis on EV amount forecasting model based on multi-source information fusion[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2015, 34(1): 55-58.
- [11] 童芳, 兰凤崇, 陈吉清. 新能源汽车发展影响因素分析及保有量预测[J]. *科技管理研究*, 2016, 36(17): 112-116.  
TONG Fang, LAN Fengchong, CHEN Jiqing. Influential factors analysis and prediction of new energy vehicle development[J]. *Science and Technology Management Research*, 2016, 36(17): 112-116.
- [12] 陈蓉珺, 何永秀, 陈奋开, 等. 基于系统动力学和蒙特卡洛模拟的电动汽车日负荷预测[J]. *中国电力*, 2018, 51(9): 1-8.  
CHEN Rongjun, HE Yongxiu, CHEN Fenkai, et al. Long-term daily load forecast of electric vehicle based on system dynamics and Monte Carlo simulation[J]. *Electric Power*, 2018, 51(9): 1-8.
- [13] 杨威, 向月, 刘俊勇, 等. 基于多代理技术的电动汽车规模演化模型[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2146-2154.  
YANG Wei, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Multi-agent modeling for the scale evolution of plug-in

- electric vehicles[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2146-2154.
- [14] YANG W, LIU J, LIU Y, et al. Multi-agent based simulation architecture for distribution system regarding PEVs[C] // 2014 International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 3200-3206.
- [15] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 13-20.  
ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [16] 王晓寅, 刘俊勇, 唐现刚, 等. 基于空间负荷预测的电动汽车有序充电方法研究[J]. 浙江电力, 2014, 36(2): 7-21.  
WANG Xiaoyin, LIU Junyong, TANG Xiangang, et al. Study on coordinated charging of electric vehicle based on spatial load forecasting[J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 36(2): 7-21.
- [17] 陈丽丹, 聂涌泉, 钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 216-225.  
CHEN Lidan, NIE Yongquan, ZHONG Qing. A model for electric vehicle charging load forecasting based on trip chains[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 216-225.
- [18] 许威, 吕林, 许立雄, 等. 基于马尔科夫链的电动汽车充电需求计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(3): 12-19.  
XU Wei, LÜ Lin, XU Lixiong, et al. Calculation of charging demand from electric vehicles based on Markov chain[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(3): 12-19.
- [19] 邵尹池, 穆云飞, 余晓丹, 等. "车-路-网"模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5207-5219.  
SHAO Yinchu, MU Yunfei, YU Xiaodan, et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5207-5219.
- [20] YANG Wei, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Agent-based modeling for scale evolution of plug-in electric vehicles and charging demand[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1915-1925.
- [21] BEAK S, KIM H, LIM Y. Multiple-vehicle origin-destination matrix estimation from traffic counts using genetic algorithm[J]. Journal of Transportation Engineering, 2004, 130(3): 339-347.
- [22] XIANG Yue, LIU Junyong, TANG Shuoya, et al. A traffic flow based planning strategy for optimal siting and sizing of charging stations[C] // IEEE PES 2015 Asia-Pacific Power and Energy Conference, November 15-18, 2015, Brisbane, Australia: 1-5.
- [23] 何兆成, 余志. 城市道路网络动态 OD 估计模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 94-98.  
HE Zhaocheng, YU Zhi. Dynamic OD estimation model of urban network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 94-98.
- [24] 肖志国. 区域 OD 矩阵反推技术评价及其理论研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
XIAO Zhiguo. Study on evaluation and theory of regional OD matrix estimation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [25] 赵胜霞, 刘俊勇, 向月, 等. 考虑配电网接纳能力的电动汽车充换电服务网基础设施配置方案分析与评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 94-101.  
ZHAO Shengxia, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Analysis and assessment considering accommodation capability of distribution network for infrastructure deployment of EV charging/swapping service network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 94-101.
- [26] 夏露, 刘畅, 李斌, 等. 面向私人电动汽车的城市公共充电网络运营服务能力评估方法与仿真研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3544-3548.  
XIA Lu, LIU Chang, LI Bin, et al. Evaluation methodology and simulation of service capability of urban public charging network for private electric vehicles[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3544-3548.
- [27] 丁丹军, 戴康, 张新松, 等. 基于模糊多目标优化的电动汽车充电网络规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 43-50.  
DING Danjun, DAI Kang, ZHANG Xinsong, et al. Network planning for electric vehicle charging based on fuzzy multi-objective optimization[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 43-50.
- [28] 谭洋洋, 杨洪耕, 徐方维, 等. 电动汽车充电站规划方案的模糊物元评估方法[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 36-42.  
TAN Yangyang, YANG Honggeng, XU Fangwei, et al. Fuzzy matter-element assessment method of electric vehicle charging station planning[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 36-42.
- [29] 谭洋洋, 杨洪耕, 徐方维, 等. 基于投资收益与用户效

- 用耦合决策的电动汽车充电站优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5951-5960.
- TAN Yangyang, YANG Honggeng, XU Fangwei, et al. Optimal allocation of charging station for electric vehicle based on coupled decision of investment benefit and user utility[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5951-5960.
- [30] 张程嘉, 刘俊勇, 刘友波, 等. 计及全寿命周期成本的两阶段电动汽车充电网络规划模型[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3722-3731.
- ZHANG Chengjia, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Two-stage electric charging network planning model considering life cycle cost[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3722-3731.
- [31] 段豪翔, 吕林, 向月. 计及分时充电电价激励的电动汽车充电站与配电网协同规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 103-110.
- DUAN Haoxiang, LÜ Lin, XIANG Yue. Coordinated planning for electric vehicle charging station and distribution network considering time-of-use charging price[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2017, 29(1): 103-110.
- [32] TANG Shuoya, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Combined planning strategy for charging infrastructures and distribution network integrated with district information[C]// IET International Conference on Intelligent and Connected Vehicles, September 22-23, 2016, Chongqing, China: 1-7.
- [33] XIANG Yue, YANG Wei, LIU Junyong, et al. Multi-objective distribution network expansion incorporating electric vehicle charging stations[J]. Energies, 2016, 9(11): 909.
- [34] 辛苗苗, 李永攀, 张延迟, 等. 计及电网峰谷运行的电动汽车充电服务费定价策略[J]. 上海节能, 2018(8): 612-618.
- XIN Miaomiao, LI Yongpan, ZHANG Yanchi, et al. Pricing strategy of electric vehicle charging service charge based on peak and valley operation of power grid[J]. Shanghai Energy Conversion, 2018(8): 612-618.
- [35] 苏舒, 严辉, 丁宁, 等. 市场竞争模式下的充电服务费联盟博弈定价模型[J]. 供用电, 2018, 35(9): 28-35.
- SU Shu, YAN Hui, DING Ning, et al. Alliance game pricing model of charging service fee under market competition mode[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(9): 28-35.
- [36] 沈珑桓, 宋国兵. 电动汽车电池更换服务收费标准研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3): 26-29.
- SHEN Longhuan, SONG Guobing. Research on toll standard of electric vehicles battery swap service[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(3): 26-29.
- [37] 刘辉, 魏岩岩, 汪旒, 等. 电动汽车入网调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 90-95.
- LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 90-95.
- [38] 师景佳, 袁铁江, KHAN S A, 等. 计及电动汽车可调度能力的风/车协同参与机组组合策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3433-3440.
- SHI Jingjia, YUAN Tiejiang, KHAN S A, et al. Unit commitment strategy considering cooperated dispatch of electric vehicles based on scheduling capacity and wind power generation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3433-3440.
- [39] 黄媛, 刘俊勇, 陈井锐, 等. 计及电动汽车入网的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 24-28.
- HUANG Yuan, LIU Junyong, CHEN Jingrui, et al. Load frequency control considering vehicle to grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 24-28.
- [40] 李家壮, 艾欣, 胡俊杰. 电动汽车参与电网二次调频建模与控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 495-503.
- LI Jiazhuang, AI Xin, HU Junjie. Supplementary frequency regulation modeling and control strategy with electric vehicles[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 495-503.
- [41] 陈亦杰, 刘故帅, 张忠会. 考虑电动汽车群和新增实体的电力市场多方交易策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 33-40.
- CHEN Yijie, LIU Gushuai, ZHANG Zhonghui. A study on multi-party trading strategy of electricity market considering electric vehicle group and new entity[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 33-40.
- [42] 陆凌晨, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 43-49.
- LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Economic analysis of ancillary service provision by plug-in electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 43-49.
- [43] 王昞, 张华君, 张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 155-164.
- WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 155-164.
- [44] 杨思渊, 姜子卿, 艾芊. 考虑备用服务的电动汽车代

- 理商竞价与定价联合优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 25-32.
- YANG Siyuan, JIANG Ziqing, AI Qian. Joint optimization of bidding and pricing strategy for electric vehicle aggregators considering reserve service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 25-32.
- [45] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮. 电动汽车聚合商对备用服务能力的优化[J/OL]. 电力系统自动化: 1-7[2019-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20190314.1152.012.html>.
- WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang. Optimization of reserve service capability by electric vehicle aggregator[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-7[2019-05-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20190314.1152.012.html>.
- [46] CAI Hui, CHEN Qiyu, GUAN Zhijian, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 93-107. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.
- [47] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 22-28.
- HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bi-layer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 22-28.
- [48] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
- WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [49] 王彪, 尹霞. 实时电价下含 V2G 功能的电动汽车理性充放电模型及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 90-96.
- WANG Biao, YIN Xia. Modeling and analysis on the rational charging and discharging of electric vehicle with V2G function under real-time prices[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 90-96.
- [50] 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, 2014, 34(22): 3638-3646.
- [51] 闫志杰, 张蕊萍, 董海鹰, 等. 基于需求响应的电动汽车充放电电价与时段研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 16-22.
- YAN Zhijie, ZHANG Ruiping, DONG Haiying, et al. Price and period research of electric vehicles charging and discharging based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 16-22.

---

收稿日期: 2019-05-14

作者简介:

刘俊勇(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、泛在电力物联网、电动汽车接入等;

向月(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能电网与电动汽车交互、电力系统规划与优化运行等;

姚昊天(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为能源互联网。E-mail: yaoht97@sina.com

(编辑 姜新丽)