

电力与交通系统协同运行控制的研究综述及展望

何正友, 向悦萍, 杨健维, 王玘, 廖凯

(西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 611756)

Review on Cooperative Operation and Control of Transportation and Power Systems

HE Zhengyou, XIANG Yueping, YANG Jianwei, WANG Qi, LIAO Kai

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan Province, China)

Abstract: The continuous increase in electrification and re-electrification of transportation has resulted in the formation a deeply integrated relationship between power and transportation systems. This paper presents a coordinated power-transport operation-control framework, in addition to summarizing and analyzing the current research status on power-transport integration. The interactions between power and transportation systems, load modeling of electrified traffic, and power-transport collaborative operation and associated control methods are considered to this end. Finally, the technologies expected to play a key role in the coordinated development of the power and transportation systems are explained. The findings of this study reveal that the realization of optimized collaborative power-transport operation and control could enhance power-grid operation efficiencies, alleviate the demand-supply imbalance in transportation, and improve user experience. Additionally, this study offers an important method to realize a clean, low-carbon, high-efficiency, and safe energy system.

Keywords: coordination of transportation and power system; electrified transportation; electric vehicle; optimized operation and control

摘要: 随着交通电气化与再电气化程度的不断提高, 电力系统与交通系统逐步呈现出深度融合的形式。提出了电力-交通协同运行控制框架, 从电力-交通交互影响、电气化交通负荷建模、电力-交通协同运行控制方法等角度, 归纳并分析了电力-交通协同运行控制的研究现状。最后, 阐述了电力系统与交通系统协同发展的关键技术。电力-交通协同优化运行可以提升电网运行效益、缓解交通出行的供需失衡、提升用户体验, 是能源系统实现低碳、清洁、高效、安

全的重要手段。

关键词: 电力-交通协同; 电气化交通; 电动汽车; 优化运行控制

0 引言

能源的发展是人类经济发展的基础, 每一次能源的变革都促进了交通的创新。如蒸汽机的发明带来了最早的蒸汽机车、蒸汽轮船; 电能的利用与信息技术的普及推动了电气化铁路的大规模建设; 石油的开采与内燃机的大规模应用促成了汽车工业的飞速发展。然而, 随着人们快捷出行需求的日益增加, 交通对能源的需求和消耗显著提高。与此同时, 石油储量短缺, 石油消耗所带来的环境污染日益严重, 未来交通的动力问题面临着能源供给革新的巨大挑战。

近年来, 可再生能源的开发加速了对氢燃料、太阳能等新能源汽车的研发与探索, 储能和信息技术的发展推动了电动汽车、电气化轨道交通、飞行器与舰船等电气化交通工具的发展。其中, 受政策扶持和成本降低驱动, 全球电动汽车产销量迅猛增长。据国际能源署 (IEA) 发布的《全球电动汽车展望2019》报道, 2018年全球电动汽车保有量已达到512万辆, 到2030年, 中国将以57%的市场份额稳居世界第一^[1]。与此同时, 中国目前的高速铁路、重载铁路全部采用电力牵引, 全国路网的主要干线铁路也基本实施了电气化改造。截至2018年底, 中国电气化铁路总里程已达92 185 km, 电气化率70%, 年牵引供电用电量达711亿kWh^[2], 占全国总用电量的1%~1.5%。其中, 北京、上海、广州地铁负荷占全市总负荷的1.5%~2.5%, 成为了城市电网的最大单体负荷^[3]。电气化交通的发展给未来交通动力问题提供了低碳环保、经济高效的

基金项目: 国家自然科学基金 (U1766208, 51525702, 51977180); 四川省科技计划项目 (2019YFH0089)。

National Natural Science Foundation of China (U1766208, 51525702, 51977180); Sichuan Science and Technology Program (2019YFH0089)。

解决方案,以缓解交通系统中的化石能源供应危机与环境污染问题。

然而,电气化交通的接入对电网的稳定运行也产生了一系列影响和挑战。大规模无序充电负荷接入电网,将会引发诸如负荷峰谷差加大^[4]、电能质量下降^[5]、网损增大^[6]等多方面问题,从而影响电网运行的稳定性与经济性,减少变压器寿命^[7]。功率大、冲击性强、间歇性强的城市轨道交通也给城市电网带来了电压波动、谐波等问题,同时,其杂散电流会引起城市电力变压器出现直流偏磁现象。另一方面,近年来的多起大停电事故引起了世界范围的高度关注,其中,城轨地铁停运、地面交通阻塞甚至瘫痪,是所有大停电事故中的常见现象。显然,电力系统故障向交通系统的传导,加剧了电力系统故障造成的社会影响。

电力系统是能源系统的重要组成部分,交通系统是能源系统的重要负荷,电气化交通的迅速发展使得电力系统与交通系统的交互影响日益显著。文献[3]将交通系统与能源系统融合,提出了交通能源互联网的概念;文献[8]探讨了城域电力-交通融合网络的发展趋势与关键技术等问题;文献[9]早在2014年便提出了电力系统与电气化交通系统的融合。可见,电力系统与交通系统的协同发展将是城市经济高效、安全稳定运转与可持续发展需求下的必然趋势,电力系统与交通系统的协同运行控制是能源系统实现低碳、清洁、高效、安全的重要手段,对能源转型与交通强国战略的推动具有重要意义。

基于此,本文将从电力系统与交通系统的耦合,电力系统与交通系统的交互影响,以及电力-交通协同运行调度与控制方法等方面对电力-交通协同运行控制问题进行归纳与分析。综合分析现有研究,本文首先阐述电力-交通协同运行控制架构,总结电力系统与交通系统交互影响的研究成果,重点梳理两系统协同运行控制的研究现状,最后探讨电力系统与交通系统协同发展的研究展望。

1 电力系统与交通系统的耦合与协同

1.1 电力系统与交通系统的耦合

交通系统电气化、智能化是发展的必然趋势,随着电气化交通的发展,电力系统和交通系统间的耦合关系不断加深,电气化交通及其充电/供电设施成为电力系统与交通系统融合的枢纽。以电动汽车为例,电力系统与交通系统通过电动汽车的充放电行为及行驶

行为互相影响,交通系统路网结构和流量等因素会影响用户对电动汽车行驶行为和充电行为的决策,从而影响电力系统的负荷分布和稳定运行;与此同时,电网充电设施的位置、容量,以及安全运行约束等因素也会影响电动汽车的充电行为与行驶特性,从而影响交通流的分布。

电力系统与交通系统的耦合结构如图1所示。

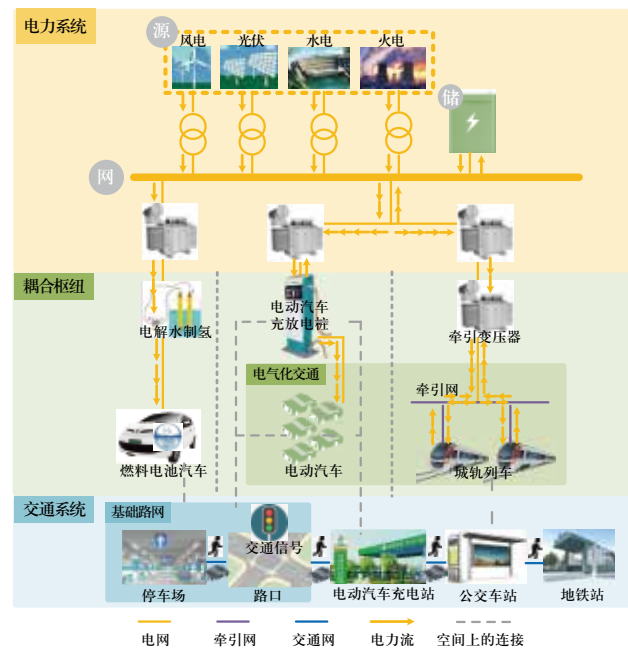


图1 电力系统与交通系统的耦合结构示意图

Fig. 1 Diagram of the integrated power-transport system

目前,高比例可再生能源电力系统对灵活性资源要求日益增加,电气化交通可作为灵活性资源参与电力系统调度,是电力与交通协同运行的典型应用场景。随着电气化程度的加深,交通系统与电力系统逐步由相互独立演变为高度耦合,电力系统与交通系统存在诸多复杂的交互影响。现如今,现代信息通信技术迅猛发展,其在电力-交通协同运行控制中的应用可减少系统间信息交互的成本,增加系统间信息交互带来的潜在收益,为两系统协同提供了可能性。

因此,亟需利用系统间信息交互,明确系统间交互作用机理,通过系统互联协同的手段使得紧密联系的电力、交通进一步协调发展。

1.2 电力-交通协同运行控制架构

电力-交通协同运行控制框架由终端层、感知层、通信层、数据层、运营层、市场层、平台层组成,具体架构如图2所示。由于电气化交通的占比与影响相对较

大，本文研究暂不包括制氢和燃料电池汽车。

终端层由电力系统与交通系统的物理实体设备组成，感知层通过传感与数据采集等设备监测终端层的运行状态，采集终端层的运行数据，运行数据通过通信层传输，最终在数据层中存储、计算。运营层与市场层运行于物理实体设施之上，分别以优化算法与交易机制为核心，基于数据层的信息处理，经一系列优化与分析，决策调控或交易方案，通过通信层的信息

传输，向终端层传达具体的调控指令。平台层以软件为核心，基于感知层的数据采集、通信层的信息传输、数据层的数据存储与处理、运营层的优化算法、市场层的交易机制，形成一系列的应用软件或系统，作用于终端层的调控响应。电力-交通协同运行控制需结合电力与交通的现有调控系统，通过两网的数据交互与共享，兼顾两网运行效益，实现两网融合后的全局优化与协同运行控制。

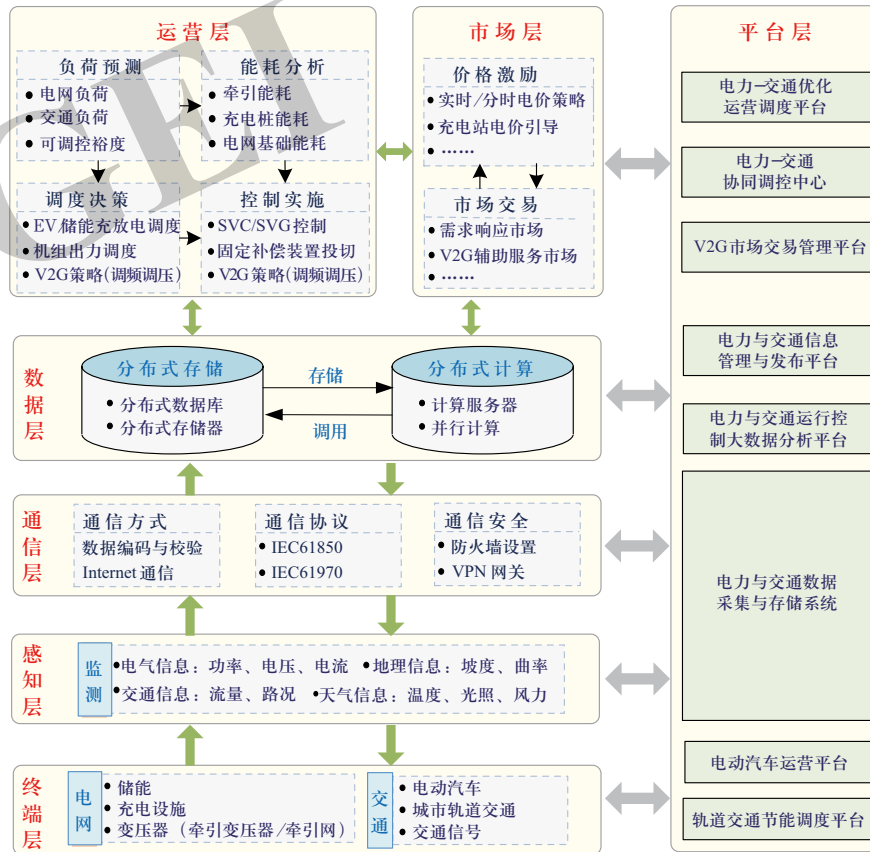


图2 电力-交通协同运行控制框架

Fig. 2 Framework of power - traffic cooperative operation and control

2 电力系统与交通系统的交互影响

2.1 电气化交通的接入对电网运行的影响

电动汽车的迅速扩张，将可能使未来的城市电网中出现大规模的可移动储能^[10-11]。电动汽车接入电网所带来的影响主要分为对电能质量的影响、对系统可靠性的影响以及对系统运行经济性的影响。在电能质量方面，电动汽车的接入增加了高度非线性的电力电子装置，易产生谐波，其产生的谐波水平与充电设施的技术条件、充电功率相关^[12-13]。同时，无序充电会引起配电网电压偏差^[14]和严重的三相不平衡状态^[15]。

在系统可靠性方面，大规模电动汽车无序充电易造成电网负荷“峰上加峰”，导致配变负载率超过其安全运行水平^[16]。在系统运行经济性方面，电动汽车充电会给电网运行带来明显的网络损耗^[17]，因此，对电动汽车进行合理的有序充电引导，有利于平滑负荷曲线，降低网损。同时，并网时所产生的大量谐波会影响变压器的寿命^[18]，因此，适当的充电控制有益于改善电动汽车这种非线性充电负荷对变压器的影响。

城市轨道交通的迅速发展也给城市电网带来了电压波动、谐波^[19-20]等问题。同时，功率大、冲击性强、间歇性强的城市轨道交通在高密度运行情况下会产生

杂散电流,杂散电流通过变压器中性点接地网入侵城市电网主变压器,导致变压器出现直流偏磁,造成温度升高、损耗增大、振动加剧及噪音异常等问题,影响变压器工作寿命。目前已有成都、长沙、深圳、贵阳等多个城市出现了由城市轨道交通杂散电流导致的电力变压器直流偏磁现象^[21]。

除上述负面影响之外,电动汽车的接入也会给电网带来一定的效益^[22],主要体现在电动汽车有序充电、退役电池储能以及参与电网的辅助服务。其中,电动汽车有序充电可根据电力系统调节需求调整车辆的充电行为,促进电网削峰填谷,实现“虚拟储能”的作用^[23]。电动汽车退役电池通过梯级利用变为储能电站。同时,电动汽车作为可调度负荷,其储能容量可帮助系统平衡负荷,向电网提供无功功率支持、有功功率调节,参与系统调频调压(负荷备用)和旋转备用^[24]等辅助服务,减轻系统对机组的调节需求,提高可再生能源消纳能力和系统运行经济性。另外,在大规模电动汽车接入城市电网的同时,可再生分布式电源的高比例接入增加了发电侧出力的随机性,合理的电动汽车充放电调度可平滑出力波动,帮助提高系统的可再生能源消纳能力。上述效益中电动汽车有序充电、参与电网辅助服务的可行性较高,是电网与交通网可进行协同优化运行控制的重要前提,具体综述见3.2节。

2.2 电网运行对交通网的影响

由于交通系统对电力供应的需求日益增加,交通系统的运转也会受到电力系统运行状态的影响。电气化交通的大规模发展不只是给电网运行带来了挑战和机遇,也给交通系统的运行带来了新的问题。2018年5月,深圳市充电站故障引起电动出租车大面积停运堵塞。可见,电网的扰动可能经由充电站和电动汽车的耦合向交通网蔓延,电动汽车的行为特性和交通网的路况发生突变,故障在交通网与电网中交互传播,甚至可能发展为连锁故障。电力系统故障向交通系统的传导,加剧了电力系统故障造成的社会影响。文献[25]建立了交通网与电网耦合网络的级联失效模型,考虑充电站故障扰动下的重新分配,提出了充电站故障扰动的传播分析方法。与此同时,城市轨道交通作为城市内最大运量的交通运输工具,其供电系统的故障将导致大量的客运量转移,客运压力会转移到其他线路或公共交通上,可能引发新的交通拥堵,以及充电站过载。因此,人的出行行为特性与客运转移

规律,也是电力-交通协同过程中,不可忽略的影响因素。

然而,现有研究成果中对交通网与电网故障传播的研究较少。因此,在电力-交通协同的背景下,亟需研究电网扰动或故障在交通网中的传播特性,分析人们在遭遇出行阻碍时的决策行为,针对电力-交通间扰动或故障的交互传播,探究相应的解决方案或预防措施,为电力-交通协同系统的稳定运行提供重要保障。

3 电力-交通协同运行控制

本章将从电气化交通的负荷建模与预测、电气化交通的优化调度与控制、考虑电气化交通的电力系统优化运行,以及电力-交通协同的系统优化运行这4个方面,对电力-交通协同运行控制的研究展开阐述与分析。

3.1 电气化交通负荷建模与预测

对电气化交通负荷进行建模与预测,有助于电力系统评估电气化交通负荷带来的影响,分析系统运行状态与发展趋势,对研究有效的电力-交通协调运行控制策略具有重要意义。

3.1.1 电动汽车负荷

用户出行需求与使用习惯差异较大、电池特性不统一等因素导致电动汽车负荷性质复杂,现有的电动汽车负荷建模主要从时序特征建模、空间分布建模2个方面展开研究。电动汽车时序负荷建模与预测主要基于用户出行需求展开研究,相关研究重点关注起始充电时间、行驶里程、SOC等因素^[26],大多直接采用美国国家公路交通安全管理局的统计结果^[27],并从中总结得到了广泛使用的描述车辆出发和返回时刻、单次停车时长的对数正态分布概率密度函数^[28]。基于概率统计的蒙特卡洛随机模拟方法^[28]可以较好地体现电动汽车随机充电的行为特征,故常被用于电动汽车充电负荷时序建模与预测的研究工作中。文献[29]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,采用蒙特卡罗模拟方法求取了电动汽车时序充电负荷的期望。电动汽车空间分布建模主要从充电站出发,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^[30]。排队论、复合泊松过程、基于起止点(origin-destination, OD)分析法、基于出行链和马尔

科夫过程^[31]的仿真方法常用于挖掘电动汽车充电负荷空间分布特性。

由于用户行为存在大量的不确定性，电动汽车充电需求与分布规律很难实现更精确的建模与预测。为了更好地服务电力-交通协同运行，需进一步考虑电网与充电站/桩间的交互作用关系。基于大数据、云计算等智能新技术，挖掘海量用户出行及用能行为的统计学特征，以数据为驱动，深入研究用户行为对电动汽车负荷时空分布的影响，分析海量电动汽车运动轨迹对电网潮流分布的影响，进而实现更贴近现实且精细全面的电动汽车充电负荷建模与预测。

3.1.2 城市轨道交通负荷

城市轨道交通系统涉及到电力系统、电力传动控制、动力学、材料、信号等多个学科，系统负荷的动态建模与负荷特性分析十分复杂。目前城轨牵引负荷建模的研究方法主要分为基于牵引计算的动态建模^[32]、基于电气拓扑与控制理论的仿真建模^[33]与基于实测数据的数值建模^[34]。针对牵引负荷能耗预测的研究方法主要分为基于牵引计算和供电计算的仿真预测^[32]与基于实测数据的数值预测^[35]。文献[35]结合行车运行图，实现了高速铁路牵引变电所牵引负荷的精确预测。

然而，牵引网或牵引变电站与上级电网间的耦合关系，以及客流量对牵引负荷的影响机理等电力-交通交互场景，在当前研究中涉及较少，难以深入地刻画乘客、电网、城轨交通间的交互作用关系。

3.2 电气化交通的优化调度与控制

3.2.1 电动汽车的优化调度

如2.1节所述，一定规模的电动汽车将引起配电网运行指标越限^[36]。为减小电动汽车接入电网带来的影响，现有对电动汽车运行控制的大量研究主要集中在电动汽车的有序充放电调度与控制、智能充电导航。

1) 电动汽车有序充放电调度与控制。

有序充放电调度与控制作为缓解电动汽车接入对电网运行影响的手段，可有效改善电动汽车接入引起电能质量下降问题，减小负荷峰谷差，缓解配变过载，降低网损。电动汽车的调度与控制是相互关联的，调度主要为了确定电动汽车在较长时段内的最优充放电策略，电动汽车的控制问题主要研究如何通过改变部分电动汽车的充放电状态以保证系统的稳定运行^[37]。

在有序充放电调度方面，文献[14]建立了以网损最小、电压偏移最小为目标的电动汽车充电优化模

型；文献[38]提出的有序电动汽车充电优化方法，可显著减少电动汽车充电引起的压降、网损和过载等问题；合理的充放电电价机制也常被用来引导用户的充放电行为^[39]；文献[40]建立了基于节点阻塞电价的电动汽车充电双层优化模型。

充放电控制方面的研究可以分为单一车辆充电控制、集群控制、区域电力系统电动汽车充放电控制。文献[41]结合分层控制和分布式控制，提出了基于多智能体协同控制的电动汽车充电优化策略；文献[42]研究了多辆电动汽车的联合充电控制以降低网络损耗；文献[43]通过有序充电控制器控制住宅区常规负荷和电动汽车充电负荷之和不高于功率限制值。在谐波问题方面，文献[44]基于有源滤波技术对交流充电桩进行了有效谐波抑制；文献[45]分析了在不同结构下充电桩对电力系统产生的谐波影响，提出了电动汽车充电站充电质量的监控和谐波处理方案。

同时，许多充放电管理方法结合了调度与控制手段，文献[46]通过主控制中心的优化调度获得电动汽车充电负荷指导曲线，通过次控制中心选用集中式/分布式控制策略实现电动汽车充电负荷对指导曲线的跟随；文献[47]提出了上层对电动汽车代理商进行协调调度，下层由代理商对辖区内电动汽车进行有序充放电控制的双层优化策略。

当前，与共享单车类似的共享电动汽车发展迅速。共享电动汽车的使用取决于服务价格和交通系统拥挤状况^[48]。文献[49]从充电调度和运行备用能力2个方面，研究了共享自动驾驶电动汽车系统与电网的相互作用，提出了一种评估共享自动驾驶电动汽车与乘客互动、使用启发式充电策略在指定充电站充电的模拟方法，并提出了一种基于电价的充电调度算法，验证了共享自动驾驶电动汽车为电网提供旋转和非旋转操作备用的可行性。文献[50]考虑共享电动汽车，基于多智能体提出了一种软件代理控制体系结构的配电网馈线调度和能源管理系统，实现了以最大化利用可再生能源来为共享电动汽车充电为目标的优化机制。共享电动汽车与电动私家车、出租车、公交车的运行机制有着明显的差别，若能利用交通实时服务价格，结合辅助服务或需求响应计划，对共享平台的战略行为和发展模式进行深入研究，对共享电动汽车的行业发展有着显著的推动作用。

2) 电动汽车智能充电导航。

电动汽车智能充电导航常结合交通信息，考虑用户出行需求、用户满意度与续航里程，通过优化电动

汽车出行的距离成本、时间成本（到达充电站的时间、充电等候时间、充电时间）以及充电站设备利用均衡率等目标，智能规划其在行驶途中的充电路径。

在电力-交通协同的背景下，结合交通路况与配电网运行信息，对电动汽车进行智能充电引导，以缓解充电拥堵、降低配变过载、减小充电成本为目标，可实现电动汽车用户、交通系统、电力系统的三方共赢。文献[51]初步建立了集合交通信息和充电站负荷信息进行充电路径推荐的架构；文献[52]提出了包含电力系统控制中心、交通系统控制中心、充电站和电动汽车终端4个模块的快速充电导航系统框架；文献[53]提出了一种基于交通网和配电网信息的大规模电动汽车的最优充电路径规划策略；文献[54]建立了考虑道路阻抗和交叉口节点阻抗的“时间-流量”路阻模型，提出了融合实时交通信息和电网信息的电动汽车路径规划和充电导航策略。目前，高德地图、国网电动汽车公司和特来电等企业已将智能充电导航集成在手机APP中，面向电动汽车车主提供导航及其他充电服务。

3.2.2 电动汽车参与辅助服务

电动汽车作为可调度的移动储能，可向电网提供无功功率支持、有功功率调节，主要参与系统调频调压（负荷备用）和旋转备用^[23]等辅助服务，从而减轻系统对机组的调节需求，提高系统运行经济性和可再生能源的消纳能力。国内外学者重点研究了电动汽车参与系统调频的辅助服务。文献[55]提出了基于线性矩阵不等式的电动汽车参与负荷频率控制的方法；文献[56]考虑电动汽车充电需求，提出了分布自治的电动汽车参与一次调频的控制策略；文献[57]提出了计及车辆限制和用户需求的电动汽车参与电网频率调节的控制策略；文献[58]从SOC的角度研究了电动汽车集群的自组织分类方法，提出了一种自适应调节下垂系数的电动汽车充放电控制终端变参数下垂调频控制方法。

3.2.3 城市轨道交通的能量管理

不同于电动汽车负荷在配电网中的随机分布，城市轨道交通作为庞大的单体负荷，有其专门的母线与变电站，从配电网运行的角度，通常被等效考虑为母线或变压器上的单一负荷。因此，在电力-交通协同运行层面，一般不考虑城轨负荷的优化调度，更多研究针对于城轨交通内的能量管理策略。城轨交通的能量管理常利用储能技术，对再生制动能量进行回收。文献[59]建立了包含列车和超级电容储能装置的城轨

交通供电系统仿真平台，提出了储能装置能量管理控制参数和容量配置方案的协同优化方法。文献[60]建立了一种考虑前瞻效应的含光伏发电的牵引供电混合储能系统能量管理策略。文献[61]基于变步长多步预测的模型预测控制，提出了城市轨道交通的实时能量管理策略，以减少系统能量损耗。文献[62]考虑城轨列车的发车间隔，提出了基于运行状态的在线优化能量管理策略，在减少制动能量对电网冲击的同时，实现节能，提高城轨运行的经济性。

3.3 考虑电气化交通的电力系统优化运行

考虑电气化交通的电力系统优化运行研究主要集中在机组组合、经济调度、调频和备用服务等，在配电网层面还包括含电气化交通的配网重构、最优潮流、无功优化、阻塞管理等。电动汽车作为可调度负荷和储能容量，各国学者常利用其分布式储能特性，借助其与电网的交互，跟踪分布式发电的出力，提高新能源的消纳。文献[11]首次提出了结合V2G的机组组合，将V2G视为小型便携式电厂，参与电网生产运行。同时，考虑电动汽车的电力系统机组组合研究常常结合风电^[63-64]，以电动汽车的可调度能力实现对风电的灵活消纳，形成风/车协同参与的机组组合策略。在经济调度方面，文献[65]以虚拟电厂的形式考虑了新能源发电和电动汽车的互补，实现了电力实时平衡调度；文献[66]建立了考虑电动汽车负荷和风电随机特征的随机经济调度模型；文献[67]提出了时空调度双层协同优化模型，上层在时间上优化输电网中电动汽车充电负荷与发电机的协同调度，下层在空间上优化配电网中电动汽车的充电负荷调度。电力系统常对电动汽车进行有序充放电调度，以实现电动汽车参与调频和备用服务，相关内容已在3.2节详细阐述。

在配电网层面，电动汽车负荷与分布式电源出力的随机性使得基于负荷恒定的静态配网重构方式已经不能满足工程实际需求，需要研究考虑电动汽车与分布式电源的动态配网重构方案^[68]。文献[69]研究了含电动汽车的交直流配电网的潮流及其优化问题；文献[70]提出了一种多时间尺度有功无功混合控制的电动汽车集群优化充电策略，在满足充电需求的同时参与电网优化调度并提供无功支持。

除了参与系统协同调度，电动汽车也会参与电网能量管理，尤其是微电网能量管理。文献[71]兼顾光伏出力，提出了电动汽车充放电功率、电网电价时段划分及储能能量状态的微电网能量管理策略；文献

[72]引入电动汽车需求侧响应机制,提出了考虑电动汽车响应的光储微电网储能优化配置方法;文献[73]考虑电动汽车不确定性,满足电动汽车用户的驾驶需求,提出了基于鲁棒优化的微电网能源管理模型。

轨道交通不具备电动汽车的调度灵活性,且轨道交通的供电网络通常相对独立于配网,故考虑电气化交通的电力系统优化运行研究一般不涉及轨道交通。但也有研究针对以轨道交通为主的微电网展开。文献[74]提出了一种由光伏、再生制动能量反馈单元和储能单元组成的城市轨道交通高架站微电网,设计了微电网的能量管理模式,并基于虚拟同步发电机的协调控制方法实现了微电网运行模式的平稳切换。文献[75]认为未来城市电网与轨道交通供电网络可以融合,有利于电力资源的充分利用,同时节省土地资源。天津市津滨轻轨线供电系统的部分区段直接从35 kV城市电网获取电能,是轨道交通供电网络与城市电网科学融合的初步尝试。在轨道交通直接由城市电网供能的发展趋势下,电力系统优化运行研究将逐渐纳入对轨道交通的考虑。

3.4 电力-交通协同的系统优化运行

由于轨道交通的供电相对独立,而电动汽车可由系统灵活调度,因此,对电力-交通协同的系统优化运行研究主要集中在城市路网与配电网的协同优化运行。文献[76]考虑动态无线充电为主要充电模式,介绍了电力-交通网协同运行的研究框架,对交通流分配问题进行了归纳和总结,阐述了不同模型所适用的问题类型。

交通流、路段通行容量及拥挤情况等信息充分地反映了交通网在电力与交通协同系统中的影响。电力-交通协同的系统优化运行需要更多地考虑交通网的运行情况。文献[48]充分总结了电力系统与交通系统的网络流模型,包括交通流分配问题、电网潮流问题等,阐述了交通网与配电网耦合的网络均衡建模,并从电价与道路拥挤费用的角度,更多地考虑交通网的建模与运行,分析了两网协同运行的研究现状。文献[77]考虑了配电网与交通网的耦合,基于Wardrop第一原理刻画了交通流的分布,研究了路段拥挤费用和分布式电源出力的调控。文献[78]提出了一种考虑时变电力和交通需求的多周期最优交通流、电力流模型,对电力-交通耦合网络进行了拥塞分析。另一方面,制定随供需变化的价格机制,引导交通负荷主动响应,也是电力系统与交通系统协同运行控制的重要

手段。文献[79]考虑了输电网与交通网的耦合,结合道路拥挤费用来调控交通网侧的车流分布,以LMP作为电价信号反映电网阻塞情况。

同时,两系统整体运营建模对电力-交通协同优化调度的研究也十分重要。文献[80]针对电力、交通两系统由政府部门统一管理运营与独立运营的2种场景,研究了通过最优充电电价和最优拥挤费用来调控交通流的分布,进而实现交通系统运营成本最小化。文献[81]提出了交通网与配电网相互依存的建模框架,利用电动汽车与充电站间的通信交换电价、需求等数据,帮助电力系统估计电动汽车充电需求,从而求解电力系统最优潮流和电动汽车最优路径选择。

4 电力与交通协同发展研究展望

现有的电力与交通协同运行研究工作大多局限于电网和交通网的孤立建模,对两网之间通过充电装置/牵引变压器等枢纽设施形成的强耦合关系考虑得不够充分。随着信息物理系统和物联网的发展,电网与交通网运行数据的采集、传输、存储与分析将更容易实现,借助信息通信技术、大数据技术、人工智能等技术支持,电力与交通协同发展需从以下几个方面进行重点研究。

1) 协同系统海量运行节点的数据采集、传输与存储:有效选取交通系统与电力系统的信息采集点,借助传感技术,突破高性能低成本低延迟数据采集传输技术,研发可靠的信息采集芯片或终端设备,搭建高并发的传感网络架构和隐私友好的信息传输共享框架^[8],实现对电力系统与交通系统终端运行状态的实时监测与全面感知。

2) 基于多源数据融合与数据驱动的电力-交通协同运行分析:基于系统海量数据,研究大数据与人工智能技术在电力-交通协同运行中的应用,研究动态、多模、多源、高维系统运行数据的分析技术;基于实时状态监测,研究电力、交通系统的运行趋势预测方法,进行系统运行可靠性评估。

3) 多时间尺度下电网与交通网的广义网络流建模与分析:在多时间尺度下,对协同网络中电力流、交通流的稳态均衡和动态特性等重要演变过程进行广义表征与定量计算,研究交通与电网协同的统一理论建模;借助网络理论,借鉴电力系统分析方法,研究协同运行网络的状态估计、稳态计算、动态分析等方法。

4) 用户社群复杂社会化行为表征建模与信息激

励影响分析：结合行为经济学、心理学、社会学等理论，考虑用户在感知、分析、决策等心理过程中的有限理性特征^[8]，深度挖掘用户社群的交通出行与用能行为特征，以及紧急情况下的决策特性，描绘用户社群的认知与决策行为模型；基于供需双向信息交互，研究用户社群行为预测方法；研究用户社群对信息激励的响应行为模型，研究可有效改变用户社群出行与用能决策行为，以优化交通能源协同系统运行的信息激励与引导方案，使社群行为与决策变得更可控、可预测。

5) 电力-交通协同系统的故障特性分析与保护控制技术：考虑电力-交通协同系统随机扰动或运行故障对用户社群的行为影响，研究电力-交通协同故障分析建模，厘清电力与交通系统间随机扰动的渗透发展机理；建立电力-交通协同系统故障传播模型，分析随机扰动在协同系统中的连锁传播特性；研究电力-交通协同系统的故障诊断技术，及保护与自愈控制策略，保障电力系统、交通系统安全稳定运行，社群用户出行通畅、用能安全。

6) 电力-交通协同系统各类运营平台间的互联互通与数据隐私共享：基于车联网技术，集成电动汽车充电数据采集、智能充电导航与结算、V2G调度与费用结算等功能于一体，连接电网、企业（车辆生产企业、运营企业、充电服务企业等）、交通管理部门与用户，研发电动汽车与电网的交互运营平台；基于边缘计算与云平台等前沿信息技术，研发分布自治、集中调控的电力-交通协同运营调度平台；研究各平台间的数据共享体系，实现平台信息的互联互通。

5 结语

随着电气化交通的迅速扩张，电力系统与交通系统的交互影响日渐显著，电力网与交通网协同运行控制是交通系统与电力系统协调发展的必然趋势。电力-交通协同优化运行控制可以提升电网运行效益、缓解交通出行的供需失衡、增强用户体验。

在新基建推动的大环境下，依靠5G基站、特高压、城际高速铁路和城市轨道交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能等领域的新型基础设施建设，以信息网络为基础，实现电力-交通协同发展过程中的数字转型、智能升级、融合创新，有效促进能源生产消费革命、交通绿色升级，推动能源与交通系统的协调发展与深度融合，对实现传统产业优化升

级、环保限制加强、可持续发展战略的有效落实具有现实而深远的意义。

然而，现有关于电力-交通协同的研究大多局限于电网和交通网的独立建模，多集中于电动汽车的充放电调度以及考虑电动汽车的电力系统优化运行控制。并且，当前的理论研究成果转化或落地较少。因此，在未来的电力-交通协同研究中，需要更多地考虑交通流的稳态均衡和动态演变，交通流的演变与电网潮流间的交互影响。同时，积极推动研究成果的落地应用也十分重要。另外，电力-交通协同发展的生态体系形成仍有许多基础性的问题亟待解决，例如：

1) 电力-交通协同发展离不开城市所在地交通管理、能源供应部门、社会相关企业的沟通协作，行业间的战略合作与信息互通需要进一步推进。

2) 电力与交通协同发展过程中涉及到众多部门、企业与用户，电力-交通协同运行各环节的利益主体、权责部门需要明确。

3) 电力-交通协同发展离不开良好的市场效益，需要探索新的商业模式与市场化运作机制。

4) 作为电力-交通协同发展的重要参与者，用户对系统引导与政策响应的程度影响着系统的综合发展空间，面向用户的宣传渗透需更积极、更广泛。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Global EV outlook 2019[R/OL]. (2019-05)[2020-06]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.
- [2] 景德炎. 电气化铁路直购电研究与建议[J]. 中国铁路, 2020(1): 29-37.
JING Deyan. Research and suggestion on directly purchased electricity for electrified railways[J]. China Railway, 2020(1): 29-37(in Chinese).
- [3] 胡海涛, 郑政, 何正友, 等. 交通能源互联网体系架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 12-24.
HU Haitao, ZHENG Zheng, HE Zhengyou, et al. The framework and key technologies of traffic energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 12-24(in Chinese).
- [4] 张聪, 许晓慧, 孙海顺, 等. 基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 19-24.
ZHANG Cong, XU Xiaohui, SUN Haishun, et al. Smart charging strategy of large-scale electric vehicles based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 19-24(in Chinese).
- [5] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研

- 究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.
- MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148(in Chinese).
- [6] 段小宇, 胡泽春, 宋永华, 等. 含电动汽车充电负荷和分布式电源的配电网两阶段优化运行策略[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 87-95.
- DUAN Xiaoyu, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Two-stage optimization of distributed network operation strategy with electric vehicle and distributed energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 87-95(in Chinese).
- [7] KELLY L, ROWE A, WILD P. Analyzing the impacts of plug-in electric vehicles on distribution networks in British Columbia[C]//2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). October 22-23, 2009, Montreal, QC, Canada. IEEE, 2009: 1-6.
- [8] 杨天宇, 郭庆来, 盛裕杰, 等. 系统互联视角下的城域电力-交通融合网络协同[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 1-9.
- YANG Tianyu, GUO Qinglai, SHENG Yujie, et al. Coordination of urban integrated electric power and traffic network from perspective of system interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 1-9(in Chinese).
- [9] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy Internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11(in Chinese).
- [10] 刘永相, 徐华池, 江冰, 等. 基于充电网络与车联网平台的能源互联网生态体系研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(5): 492-501.
- LIU Yongxiang, XU Huachi, JIANG Bing, et al. Energy Internet ecosystem based on charging and vehicular network platforms[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 492-501(in Chinese).
- [11] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid: a cost-emission optimization[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(3): 898-911.
- [12] 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(in Chinese).
- [13] CHAN M S W, CHAU K T, CHAN C C. Modeling of electric vehicle chargers[C]//IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.98CH36200). August 31 - September 4, 1998, Aachen, Germany. IEEE, 1998: 433-438.
- [14] 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.
- [15] 苏明玉, 许寅, 王颖, 等. 考虑配电网韧性与充电便利性的电动汽车充电站布点方法[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 341-348.
- SU Mingyu, XU Yin, WANG Ying, et al. Placement of charging stations for electric vehicles considering distribution system resilience and charging convenience[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 341-348(in Chinese).
- [16] RICHARDSON P, FLYNN D, KEANE A. Impact assessment of varying penetrations of electric vehicles on low voltage distribution systems[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. July 25-29, 2010, Providence, RI, USA. IEEE, 2010: 1-6.
- [17] 陈加盛, 张建华, 林建业, 等. 以降低电网损耗为目标的电动汽车充电策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(3): 139-144.
- CHEN Jiasheng, ZHANG Jianhua, LIN Jianye, et al. Strategies for electric vehicle charging with aiming at reducing network losses[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(3): 139-144(in Chinese).
- [18] SEXAUER J M, MCBEE K D, BLOCH K A. Applications of probability model to analyze the effects of electric vehicle chargers on distribution transformers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 847-854.
- [19] 刘炜. 城市轨道交通供电系统仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- LIU Wei. The urban rail transportation power supply system simulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006(in Chinese).
- [20] 李建民, 尹传贵. 城市轨道交通牵引供电系统谐波分析[J]. 城市轨道交通研究, 2004, 7(6): 46-49.
- LI Jianmin, YIN Chuangui. On inter-harmonics to electric supply system of rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2004, 7(6): 46-49(in Chinese).
- [21] 王爱民, 林圣, 李俊逸, 等. 城市轨道交通长线路杂散电流仿真模型[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1379-1386.
- WANG Aimin, LIN Sheng, LI Junyi, et al. Stray current simulation model of the long line of DC metro systems[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1379-1386(in Chinese).
- [22] 陈学有, 文明浩, 陈卫, 等. 电动汽车接入对电网运行的影响及经济效益综述[J]. 陕西电力, 2013, 41(9): 20-28.
- CHEN Xueyou, WEN Minghao, CHEN Wei, et al. A review of impact and economic benefits of electric vehicles integration into grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(9): 20-28(in Chinese).
- [23] 刘坚. 电动汽车储能技术应用潜力及功能定位研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 44-50.
- LIU Jian. An analysis on the application potential and position of electric vehicle energy storage[J]. Journal of Global Energy

- Interconnection, 2020, 3(1): 44-50(in Chinese).
- [24] 潘军, 吴红斌. 计及旋转备用的电动汽车与风电/火电协调优化调度[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(3): 409-414.
PAN Jun, WU Hongbin. Coordinated optimal dispatching of electric vehicles for spinning reserve with wind-thermal power system[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(3): 409-414(in Chinese).
- [25] 张宇威, 杨军, 吴赋章, 等. 基于电网-交通网耦合的充电站故障传播分析框架[J]. 电力建设, 2020, 41(1): 13-22.
ZHANG Yuwei, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Analysis on disturbance propagation of charging station fault considering grid-traffic network coupling[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(1): 13-22(in Chinese).
- [26] 陈丽丹, 张尧, FIGUEIREDO A. 电动汽车充放电负荷预测研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 177-191.
CHEN Lidan, ZHANG Yao, FIGUEIREDO A. Overview of charging and discharging load forecasting for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 177-191(in Chinese).
- [27] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2009 National household travel survey [EB / OL]. <http://nhts.ornl.gov>.
- [28] 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(in Chinese).
- [29] 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).
- [30] 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(in Chinese).
- [31] 潘胤吉, 邱晓燕, 吴甲武, 等. 基于马尔可夫决策过程的电动汽车充电行为分析[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 129-137.
PAN Yinji, QIU Xiaoyan, WU Jiawu, et al. Analysis on charging behaviors of electric vehicles based on Markov decision processes[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 129-137(in Chinese).
- [32] 万庆祝, 吴命利, 陈建业, 等. 基于牵引计算的牵引变电所馈线电流仿真计算[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 108-113.
WAN Qingzhu, WU Mingli, CHEN Jianye, et al. Simulating calculation of traction substation's feeder current based on traction calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 108-113(in Chinese).
- [33] 吴双. 高速铁路牵引供电系统负荷建模[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
WU Shuang. High-speed railway traction power supply system load modeling. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013(in Chinese).
- [34] 杨少兵, 吴命利. 基于实测数据的高速动车组谐波分布特性与概率模型研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(3): 33-38.
YANG Shaobing, WU Mingli. Study on harmonic distribution characteristics and probability model of high speed EMU based on measured data[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(3): 33-38(in Chinese).
- [35] 魏波, 胡海涛, 王科, 等. 基于实测数据和行车运行图的高铁牵引变电站负荷预测方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 179-188.
WEI Bo, HU Haitao, WANG Ke, et al. Research on traction load forecasting method for high-speed railway traction substation based on measured data and train timetable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 179-188(in Chinese).
- [36] 田立亭, 张明霞, 汪免伶. 电动汽车对电网影响的评估和解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 43-49.
TIAN Liting, ZHANG Mingxia, WANG Huanling. Evaluation and solutions for electric vehicles' impact on the grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 43-49(in Chinese).
- [37] 赵俊华, 文福拴, 杨爱民, 等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 2-10.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 2-10(in Chinese).
- [38] 李惠玲, 白晓民. 电动汽车充电对配电网的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 38-43.
LI Huiling, BAI Xiaomin. Impacts of electric vehicles charging on distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 38-43(in Chinese).
- [39] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195(in Chinese).
- [40] 麻秀范, 王超, 洪潇, 等. 基于节点阻塞电价的电动汽车双层充电优化策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3706-3714.
MA Xiufan, WANG Chao, HONG Xiao, et al. A two layer model for electric vehicle charging optimization based on location marginal congestion price[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3706-3714(in Chinese).

- [41] 许少伦, 严正, 冯冬涵, 等. 基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 7-13.
XU Shaolun, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Cooperative charging control strategy of electric vehicles based on multi-agent[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 7-13(in Chinese).
- [42] 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.
- [43] 齐先军, 李冬伟, 纪姝彦. 采用功率限制的住宅区电动汽车有序充电控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3715-3721.
QI Xianjun, LI Dongwei, JI Shuyan. A coordinated charging control strategy for electric vehicles in residential area with power limitation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3715-3721(in Chinese).
- [44] 周娟, 任国影, 魏琛, 等. 电动汽车交流充电桩谐波分析及谐波抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 18-25.
ZHOU Juan, REN Guoying, WEI Chen, et al. Harmonic analysis of electric vehicle AC charging spot and research on harmonic restriction[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 18-25(in Chinese).
- [45] 陈新琪, 李鹏, 胡文堂, 等. 电动汽车充电桩对电网谐波的影响分析[J]. 中国电力, 2008, 41(9): 31-36.
CHEN Xinqi, LI Peng, HU Wentang, et al. Analysis of impacts of electric vehicle charger on power grid harmonic[J]. Electric Power, 2008, 41(9): 31-36(in Chinese).
- [46] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 等. 含新能源接入的电动汽车有序充电分层控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3689-3695.
ZHAN Kaiqiao, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Electric vehicle coordinated charging hierarchical control strategy considering renewable energy generation integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3689-3695(in Chinese).
- [47] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于双层优化的电动汽车充电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 30-37.
YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37(in Chinese).
- [48] WEI W, WU D M, WU Q W, et al. Interdependence between transportation system and power distribution system: a comprehensive review on models and applications[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 433-448.
- [49] IACOBUCCI R, MCLELLAN B, TEZUKA T. Modeling shared autonomous electric vehicles: potential for transport and power grid integration[J]. Energy, 2018, 158: 148-163.
- [50] FREUND D, RAAB A F, KÜSTER T, et al. Agent-based integration of an electric car sharing fleet into a smart distribution feeder[C]//2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). October 14-17, 2012, Berlin, Germany. IEEE, 2012: 1-8.
- [51] GUO Q L, WANG Y, SUN H B, et al. Research on architecture of ITS based smart charging guide system[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. July 24-28, 2011, Detroit, MI, USA. IEEE, 2011: 1-5.
- [52] GUO Q L, XIN S J, SUN H B, et al. Rapid-charging navigation of electric vehicles based on real-time power systems and traffic data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1969-1979.
- [53] 严奔遥, 罗禹贡, 朱陶, 等. 融合电网和交通网信息的电动车辆最优充电路径推荐策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 310-318.
YAN Yiyao, LUO Yugong, ZHU Tao, et al. Optimal charging route recommendation method based on transportation and distribution information[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 310-318(in Chinese).
- [54] 邢强, 陈中, 冷钊莹, 等. 基于实时交通信息的电动汽车路径规划和充电导航策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 534-549.
XING Qiang, CHEN Zhong, LENG Zhaoying, et al. Route planning and charging navigation strategy for electric vehicles based on real-time traffic information[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 534-549(in Chinese).
- [55] 张立岩, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于线性矩阵不等式的电动汽车网络化鲁棒控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 54-62.
ZHANG Liyan, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Networked robust control of electric vehicles based on linear matrix inequalities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 54-62(in Chinese).
- [56] 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.
- [57] 鲍彦, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.
BAO Yan, JIA Limin, JIANG Jiuchun, et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126(in Chinese).
- [58] 陈仲伟, 欧名勇, 谭玉东, 等. 电动汽车群自组织协调下垂调频控制方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 77-83.
CHEN Zhongwei, OU Mingyong, TAN Yudong, et al. Self-organized droop frequency regulation method for EV aggregator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 77-83(in Chinese).
- [59] 陈怀鑫, 杨中平, 林飞, 等. 基于遗传算法的城轨交通超级电容储能装置能量管理和容量配置优化研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(9): 59-66.
CHEN Huaixin, YANG Zhongping, LIN Fei, et al.

- Management and configuration for stationary super-capacitor energy storage system applied in urban rail transit based on genetic algorithm[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(9): 59-66(in Chinese).
- [60] 郑政. 含光伏发电的牵引供电系统混合储能优化配置研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
ZHENG Zheng. The optimal allocation of hybrid energy storage system for traction power supply system with photovoltaic power generation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [61] JIA Z D, JIANG J C, LIN H T, et al. A real-time MPC-based energy management of hybrid energy storage system in urban rail vehicles[J]. *Energy Procedia*, 2018, 152: 526-531.
- [62] 李旭阳. 城轨交通超级电容储能系统在线优化控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
LI Xuyang. Research on on-line optimal control strategy of urban rail transit super-capacitor energy storage system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017(in Chinese).
- [63] 汪春, 吴可, 张祥文, 等. 规模化电动汽车和风电协同调度的机组组合问题研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(11): 41-48.
WANG Chun, WU Ke, ZHANG Xiangwen, et al. Unit commitment considering coordinated dispatch of large scale electric vehicles and wind power generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(11): 41-48(in Chinese).
- [64] 师景佳, 袁铁江, Saeed Ahmed Khan, 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 Tiejia, 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(in Chinese).
- [65] 朱建全, 段翩, 刘明波. 计及风险与源-网-荷双层协调的电力实时平衡调度[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(13): 3239-3247.
ZHU Jianquan, DUAN Pian, LIU Mingbo. Electric real-time balance dispatch via bi-level coordination of source-grid-load of power system with risk[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(13): 3239-3247(in Chinese).
- [66] 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).
- [67] 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).
- [68] 徐慧敏, 张强, 陆文钦, 等. 含分布式电源和电动汽车的配电网动态重构研究综述[J]. *电工技术*, 2020(6): 39-43.
XU Huimin, ZHANG Qiang, LU Wenqin, et al. Review on dynamic reconfiguration of distribution network with distributed generation and electric vehicles[J]. *Electric Engineering*, 2020(6): 39-43(in Chinese).
- [69] 于晓蕾. 含电动汽车的交直流配电网最优潮流研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
YU Xiaolei. Research on optimal power flow of AC/DC distribution system with electric vehicles[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015(in Chinese).
- [70] 高爽, 原凯, 孙充勃, 等. 电动汽车集群优化充电多时段有功无功混合控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(4): 1-6.
GAO Shuang, YUAN Kai, SUN Chongbo, et al. Multi-stage active and reactive mixed power control strategy for optimal charging of aggregated electric vehicles[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(4): 1-6(in Chinese).
- [71] 苏粟, 蒋小超, 王玮, 等. 计及电动汽车和光伏-储能的微网能量优化管理[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 164-171.
SU Su, JIANG Xiaochao, WANG Wei, et al. Optimal energy management for microgrids considering electric vehicles and photovoltaic-energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 164-171(in Chinese).
- [72] 杨丽君, 杨博, 安立明, 等. 考虑电动汽车响应的光储微电网储能优化配置[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(4): 340-347.
YANG Lijun, YANG Bo, AN Liming, et al. Optimal configuration of grid-connected pv-and-storage microgrid considering EVs' demand response[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(4): 340-347(in Chinese).
- [73] SHEN X J, WEI H Y, WEI L. Study of trackside photovoltaic power integration into the traction power system of suburban elevated urban rail transit line[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114177.
- [74] LU T, TIAN M, ZHANG N, et al. Energy management and coordination control of microgrid in elevated station of urban rail transit[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2019, 10(4): 398-404.
- [75] 李建民, 班希翼. 郑州轨道交通全网供电系统与城市电网的融合模式研究[J]. *都市轨道交通*, 2020, 33(3): 123-128.
LI Jianmin, BAN Xiyi. Integrating power supply system of Zhengzhou urban transit into state grid[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2020, 33(3): 123-128(in Chinese).
- [76] 吕思, 卫志农. 基于动态无线充电的电力-交通网协同优化运行研究综述与展望[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(5): 484-491.
LYU Si, WEI Zhinong. Coupling electricity and transportation

networks to achieve dynamic wireless charging: review and prospects[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 484-491(in Chinese).

- [77] WEI W, MEI S W, WU L, et al. Optimal traffic-power flow in urban electrified transportation networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 84-95.
- [78] LV S, WEI Z N, SUN G Q, et al. Optimal power and semi-dynamic traffic flow in urban electrified transportation networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 1854-1865.
- [79] MANSHADI S D, KHODAYAR M E, ABDELGHANY K, et al. Wireless charging of electric vehicles in electricity and transportation networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4503-4512.
- [80] HE F, YIN Y F, ZHOU J. Integrated pricing of roads and electricity enabled by wireless power transfer[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 34: 1-15.
- [81] AMINI M, KARABASOGLU O. Optimal operation of interdependent power systems and electrified transportation networks[J]. Energies, 2018, 11(1): 196.

收稿日期：2020-07-16；修回日期：2020-10-13。



何正友

作者简介：

何正友（1970），男，教授，长江学者特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者，研究方向为交通能源融合、信息理论在电力系统中的应用等，E-mail: hezy@swjtu.edu.cn。

向悦萍（1996），女，博士研究生，研究方向为电力交通协同交互，E-mail: x_yueping@163.com。

杨健维（1983），女，博士，副教授，研究方向为电动汽车优化调度，E-mail: jwyang@swjtu.edu.cn。

王玘（1990），男，博士，助理教授，研究方向为电力大数据与人工智能、电力系统态势感知，E-mail: wangqi@126.com。

廖凯（1988），男，博士，副教授，研究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源电力系统保护与控制，E-mail: liaokai_lk@hotmail.com。

（责任编辑 李锡）

“城市能源系统智慧低碳转型的驱动机制及关键技术” 专题征稿启事

《全球能源互联网》编辑部特邀英国卡迪夫大学吴建中教授、厦门大学赵英汝教授、天津大学贾宏杰教授担任特约主编，共同主持“城市能源系统智慧低碳转型的驱动机制及关键技术”专题，期望能够通过本专题，促进电气、热能、信息、交通等工程技术与经济、公共管理等社会学科融合，推动城市能源系统研究产出更多系统性优秀成果。本刊不收取任何版面费、审稿费等，录用稿件有丰厚稿酬，所有发表论文均可多渠道公开获取。真诚欢迎关注本领域研究的专家团队积极投稿。

专题第1期拟于2021年3月出版。

一、专题征稿范围（包括但不限于）

- 1) 城市能源系统建模与分析方法；
- 2) 城市能源系统规划与架构体系设计；
- 3) 城市能源系统的智能运行；
- 4) 城市能源系统的可靠性和故障恢复；
- 5) 城市能源系统的能效、减排和安全评估；
- 6) 城市能源系统中的大数据和人工智能；
- 7) 城市能源系统的能量调度与管理技术；
- 8) 城市能源系统低碳转型技术的价值评估；
- 9) 城市能源系统低碳转型技术的利益协同、市场机制与激励政策；
- 10) 中、欧代表性城市能源系统典型案例等。

二、投稿方式

请前往www.gei-journal.com/cn，在线提交全文，专题栏目选择“城市能源系统智慧低碳转型的驱动机制及关键技术”。投稿前请仔细阅读投稿指南、投稿要求及论文模板。

三、联系方式

吴建中: wuj5@cardiff.ac.uk

赵英汝: yrzhao@xmu.edu.cn

贾宏杰: hjjia@tju.edu.cn

《全球能源互联网》编辑部：

kai-bai@geidco.org, xi-li@geidco.org