

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

吕思, 卫志农

(河海大学能源与电气学院, 江苏省 南京市 211100)

Coupling Electricity and Transportation Networks to Achieve Dynamic Wireless Charging: Review and Prospects

LYU Si, WEI Zhinong

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu Province, China)

Abstract: Transportation electrification is the main goal of future transportation systems development. One key feature of these systems is road electrification, whereby charging stations could be substituted with a dynamic wireless charging system that powers electric vehicles (EVs) as they are driven. This coupling between the transportation network (TN) and the electricity network (EN) will enhance charging convenience and thereby encourage EV uptake by consumers. Tight TN-EN coupling would not only maximize social welfare, but would also maintain transportation operations that are secure, economic, and efficient. Based on the highly electrified TN, we first introduce the research framework that has been applied to TN-EN cooperation. The traffic assignment model is then summarized and different approaches to this model are categorized based on how they handle the relevant problems. We then review and analyze the existing literature on these coupled networks, and consider several prospective directions for future research.

Keywords: transportation electrification; dynamic wireless charging; cooperation; transportation network; electricity network

摘要: 交通电气化是交通系统未来发展的主要目标, 其特征之一是公路电气化——采用动态无线充电技术取代充电站, 实现电动汽车在行驶过程中完成充电, 即“边走边充”。在该模式下, 交通网与电网的耦合程度进一步提升, 其耦合点由静止的充电站转变为移动的电动汽车, 能够提升用户充电的便利性以及用户响应电网的积极性和及时性。在两网紧

密耦合的情况下, 电力-交通网协同优化调度能够实现社会效益最大化, 使电网和交通网处于安全、经济、高效的运行状态。该文基于高度电气化的交通网, 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; 针对交通网, 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; 针对电力-交通网协同优化运行, 对已有研究做了总结和分析, 并对未来可行的研究方向做出了展望。

关键词: 电气化交通; 动态无线充电; 协同运行; 交通网; 电网

0 引言

近年来, 电动汽车 (electric vehicles, EVs) 凭借其环保、无污染的优势被广泛推广, 未来有望取代燃油汽车成为主流的交通工具。电动汽车渗透率的提升及其自身的交通属性为电网注入了大量具有时空不确定性的充电负荷, 该不确定性主要取决于电动汽车电池余量、路网状况以及充电站的位置和容量。为了最小化电动汽车充电对电网的影响, 同时降低用户在交通网中的走行时间, 单一考虑电网或交通网的调度方案均无法实现社会效益最大化, 因此, 有必要考虑电动汽车带来的电网、交通网的耦合特性, 研究电力-交通网协同优化运行。

目前已有相关文献^[1-3]以快速充电站 (fast charging station, FCS) 为背景, 考虑交通部门和电力部门的合作, 通过收取道路拥挤费用和设定充电站电价来调控电动汽车的行驶路线和充电选择, 同时通过调度分布

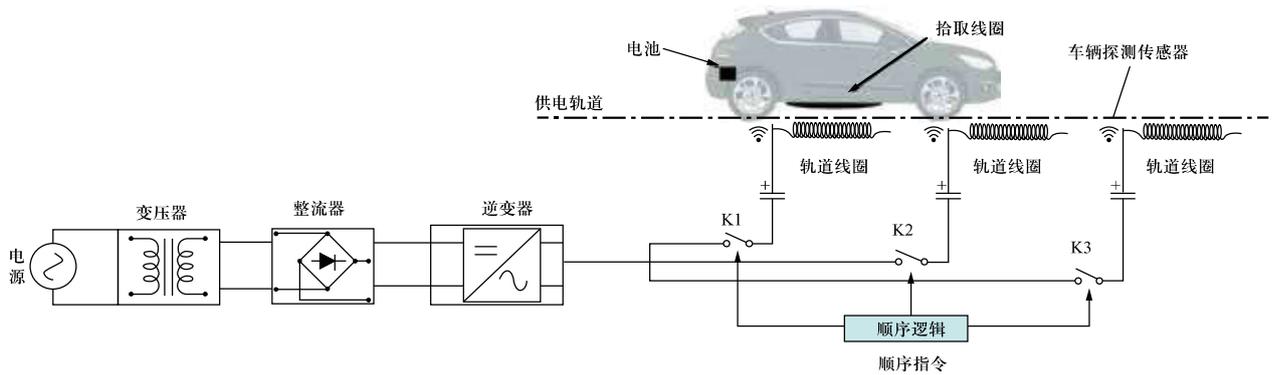


图 1 动态无线充电原理图

Fig. 1 Theory graph of dynamic wireless charging

式电源的出力，在确保电网安全的前提下，实现电力流的经济性最优以及交通流的走行时间最少。

以FCS为代表的插入式充电作为当前电动汽车充电的主要方式，存在以下缺陷：①空间占有率高，进而造成充电桩（站）数量有限，难以满足全部充电需求，增大了用户的里程焦虑；②对于服务范围广的充电桩（站），常常供不应求，用户的排队等待时间长，且大量EV同时接入会增大电网元件的过载风险；③充电桩（站）地点可能偏离用户的行驶路线，用户需要绕路充电，充电便捷性不足。

相比于插入式充电，动态无线充电（dynamic wireless charging, DWC）得益于其独特的充电方式，得到国际上广泛的研究和工程示范，其原理如图1所示^[4]。DWC通过埋于地面下的供电导轨以高频交变磁场的形式将电能传输给运行在地面上一定范围内的车辆接收端电能拾取机构，进而给车载储能设备供电^[5]。该方式增加了电池的充电频次，降低了每次充电的充电量，相较于FCS的低频次、高充电量，DWC将有助于延长电池寿命^[6]。此外，电动汽车在行驶过程中充电，有效增加了电动汽车的续航里程，降低了电动汽车对电池容量的依赖，提高了充电的便捷性。研究表明，虽然DWC系统的初期建设成本远高于充电桩（站）的建设成本，但是该充电模式加强了电网与交通网的耦合程度，即二者的耦合点不再是地理位置固定的FCS，而是在时间和空间上均具备动态特性的电动汽车，提高了用户与电网互动的积极性和及时性、消除了用户充电的等待时间，因此从系统层面有助于电网和交通网的安全、经济运行，其潜在回报要高于插入式充电^[7]。近年来，DWC试点工程已经在世界范围内展开^[8]，目前的最大充电功率和效率已经达到50 kW和95%^[9]。

1 电力-交通网协同运行研究框架

1.1 电力-交通网耦合系统

电力-交通网耦合系统如图2所示^[1]。T1—T12代表交通网中的节点，对应实际交通网中的交叉路口，各节点之间的线段表示道路。E1—E20代表电网中的节点。交通网中的各段电气化公路可以由电网中相对应的节点单独供电，也可以由某一电网节点对某区域的多段电气化公路供电。

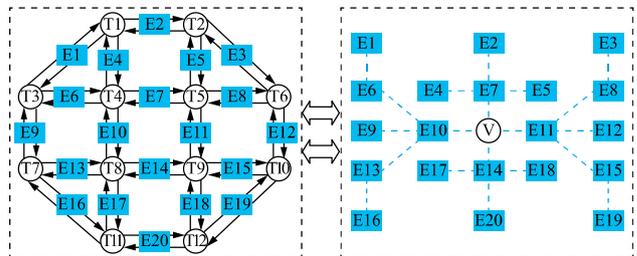


图 2 电力-交通网耦合系统

Fig. 2 Integrated TN-EN system

1.2 电力-交通网协同运行研究框架

电力-交通网协同运行的研究框架如图3所示。电网与交通网通过移动的电动汽车实现耦合。电动汽车会根据路网拥挤状况和各路段充电电价，以最小化出行成本为目标规划行驶路径，进而影响电网中充电负荷的时空分布和交通网中的交通流分布。在交通系统中，通过对阻塞路段收取拥挤费用来调控交通流分布，避免阻塞进一步加重；在电力系统中，通过节点电价调控电力负荷的分布，避免发生电压越限或元件过载。因此，电网中的电价和交通网中的拥挤费用可以作为两系统协同运行的有效调节手段。具体而言，电网根

据EV充电负荷和常规负荷的时空分布,以某一目标(运行成本最小、网损最小等)求解OPF问题,制定源端出力和节点电价,调控潮流分布;交通网根据各路段的电价和当前交通流分布,以某一准则(将在下一节介绍)求解交通分配问题(traffic assignment problem, TAP),制定各路段的拥挤费用,调控交通流分布。二者的协同运行将实现社会效益最大化。

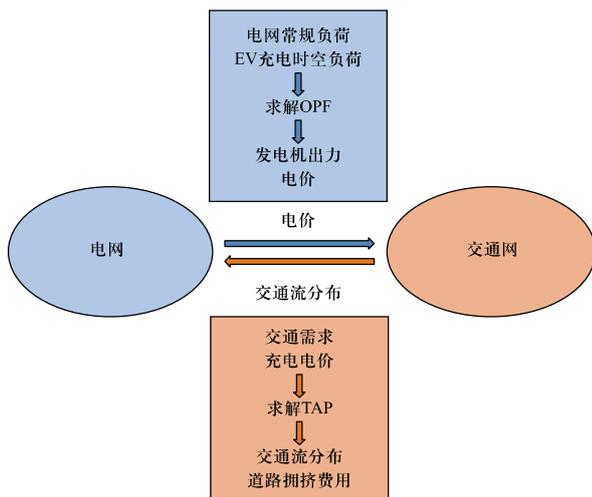


图3 电力-交通网协同运行研究框架

Fig. 3 Research framework of TN-EN cooperation

2 交通量分配模型

交通量分配是将各起止点(origin-destination, OD)的交通需求根据实际情况按照一定的准则分配到交通网的各个路段上,并求出各条路段的交通流量^[10]。平衡分配是当前广泛使用的分配准则,根据不同的分配目标,可分为用户均衡(user equilibrium, UE)准则和系统最优(system optimal, SO)准则。从时间间隔划分,交通分配问题又可分为静态交通分配(static traffic assignment, STA)、半动态交通分配(semi-dynamic traffic assignment, SDTA)和动态交通分配(dynamic traffic assignment, DTA),分类如图4所示^[11]。

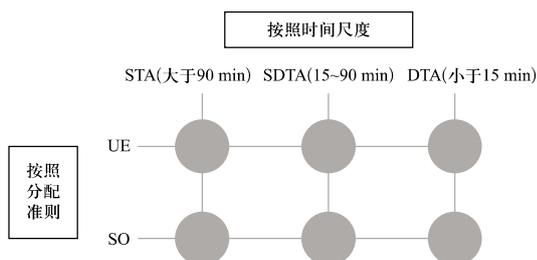


图4 交通分配模型分类

Fig. 4 Classification of the traffic assignment model

2.1 用户均衡(UE)/系统最优(SO)准则

用户均衡准则又称Wardrop第一原理,由Wardrop于1952年提出。其基本思想是:当出行者对路网状态充分了解并试图选择最短路径时,网络会达到平衡状态。在考虑交通拥挤对走行时间影响的网络中,平衡状态下每组OD的各条被利用的路径具有相等且最小的走行时间;未被利用的路径的走行时间大于或等于该最小走行时间。

系统最优准则又称Wardrop第二原理,其基本思想是:在考虑交通拥挤对走行时间影响的网络中,网络中的交通量应该按照某种方式分配以使网络中交通量的总走行时间最小。

UE准则考虑了用户选择路径时的自私心理,更贴合实际,是当前交通分配问题中常用的准则;SO准则反映了一种理想的目标,其分配结果通常可以作为交通规划的指导依据。但是在运行层面,需要依靠驾驶员之间的通信和互相协作才能达到系统最优的状态。在未来自动驾驶技术的支撑下,智能智慧交通系统(intelligent transportation system, ITS)可以通过先进的通信和控制技术使整个交通系统的运行状态达到或接近SO。

2.2 STA/SDTA/DTA

2.2.1 静态交通分配(STA)

静态交通分配所对应的时间尺度较长,通常为90 min以上。在该时段内,交通需求视为恒定不变,且都能够按时到达终点。最终的分配结果,即各路段的交通流量,可视为该时段内的平均流量。由于STA假设交通需求不随时间变化,因此只适用于对某一较长时段内的交通需求进行分配,无法计及时变需求。例如,在实际路网的交通流量分配中,一般以一天为单位,对一天的平均交通流量进行分配,进而得到每个路段一天的平均交通流量。显然,由于日内各时段的交通需求是不断变化的,STA得到的结果与实际分配结果会存在一定的误差。

2.2.2 半动态交通分配(SDTA)

半动态交通分配所对应的时间尺度通常为15~90 min,主要针对多时段交通分配问题。SDTA可以考虑时变交通需求以及交通流在各时段间的耦合。该模型中,假设每辆车在各个时段内均匀地出发,在该时段内无法到达终点的车辆被加至下一时段的交通需求中,进而实现交通流在时间上的耦合。同时,各时段

内的交通分配方式与STA相同。由此可见，半动态交通分配是一个变需求的交通分配问题，行程较长或阻塞情况较严重会造成更多的车辆无法在该时段内到达终点，进而作为剩余车流（residual flow）被加至下一时段的交通需求。

2.2.3 动态交通分配（DTA）

动态交通分配是指以时时刻刻变动的交通需求为对象的交通量分配，所对应的时间间隔小于15 min。不同于STA和SDTA以交通量（通过道路某一点或某一断面的交通体的数量）作为状态变量，DTA以交通密度（存在台数、排队台数）作为状态变量并使用连续方程式来描述交通流。此外，与STA相比，DTA在时间、空间上对非正常交通流做出描述；与SDTA相比，DTA的时间间隔更小，能够更加精确地描述OD间甚至各路段间交通流的动态传播过程（可以达到秒级），对实时OD信息的准确性要求较高，需要在各个路段配置大量的传感设备来提高实时数据的准确性和可靠性。DTA模型的有效性需要数据可靠性和计算效率作为支撑，目前仍是交通领域的一大热门研究方向。

以上三类交通分配模型的区别见图5。由此可见，STA对交通流的描述较为粗糙，是以交通网规划为目标开发出来的交通分配方法；而DTA能够较为细致地描述交通流，是以实时交通控制管理为目标开发出来的交通分配方法。SDTA是对以上两类模型的一个折中，具备广泛用途的同时避免了庞大的计算负担，适用于在日前层面处理交通分配问题。

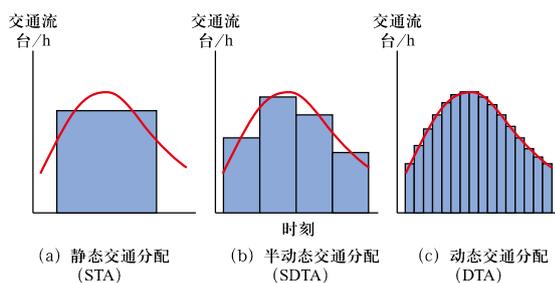


图5 三类交通分配模型的区别

Fig. 5 Difference of the three traffic assignment models

3 电气化交通背景下的电力-交通网协同优化运行

对于电气化交通背景下的电力-交通网协同优化运行问题，文献[12]分别采用直流最优潮流（direct-current optimal power flow, DCOPF）模型和SO准则来

描述潮流分布和交通流分布，基于两类不同场景制定了最优充电电价和最优拥挤费用。对于第一个场景，假设电力系统和交通系统统一由政府管理部门运行，将相应运行模型所对应的拉格朗日乘子（边际价格）分别作为两系统的最优价格，进而最小化交通系统的总走行时间成本和电力系统的总发电成本，达到社会最优状态。对于第二个场景，假设交通系统和电力系统各自独立运营，交通部门以节点边际电价从电网购电，再以零售价格的形式将电卖给有充电需求的电动汽车，通过对每个路段制定合适的零售电价来调控交通流分布，进而最小化交通系统的运营成本（整体走行时间成本和购电成本）。

文献[13]将EV充电负荷的移动特性考虑进来，研究了DWC背景下电动汽车充电对节点边际电价（locational marginal price, LMP）的影响。采用DCOPF对输电网侧的经济调度问题建模，采用排队网络刻画交通流分布，用户通过比较其心理电价与实际电价的大小来决定是否充电，其中心理电价与当前电池的SOC呈负相关。仿真结果表明，EV渗透率的提升会使相应节点的LMP增大，且不同节点的LMP变化幅度不同。为了减小相邻节点LMP的差异并最大化社会效益，提出采用零售电价的机制调控充电负荷的分布，对LMP较高的节点施加更高的零售电价，减少相应的充电负荷，进而减小与其他节点LMP的差异。

文献[14]将EV行驶过程中的耗能成本考虑进来，以LMP作为充电电价，建立了扩展的UE模型，并结合输电网侧的DCOPF模型，研究了两系统在不同场景（独立运行、合作运行、合作运行且电网阻塞、合作运行且交通网阻塞）下的运行状态。由于两系统之间的信息交互程度有限，利用ADMM法交替求解交通分配问题和最优潮流问题，以各段DWC的充电需求作为共享信息。仿真结果表明，两系统各自的阻塞均会改变耦合系统的运行状态和运营成本。上述文献均考虑输电网与交通网的耦合，电网侧采用DCOPF建模，相应的安全约束主要是线路容量约束，由LMP作为价格信号反映电网的阻塞状况，并结合零售电价或道路拥挤费用来调控交通网侧的车流分布，达到缓解电网阻塞、最大化社会效益的目的。对于配电网与交通网的耦合研究，文献[15]采用更加精确的交流最优潮流（alternating-current optimal power flow, ACOPF）模型对配电网建模，并采用UE准则刻画交通流分布，设定充电电价为给定常数，由系统独立运营商（independent system operator, ISO）调整路段拥挤费用

表1 电力-交通网协同运行文献比较

Table 1 Comparison of literatures on cooperation of TN-EN

文献编号	网络模型		价格机制		市场机制	时间断面
	交通网	电网	交通网	电网		
[12]	STA-SO	DCOPF	TLMP/Retail Price	ELMP	ISO/ Independent	单断面
[13]	Queuing Network	DCOPF	Retail Price	ELMP	ISO	单断面
[14]	STA-UE	DCOPF	—	ELMP	Independent	多断面
[15]	STA-UE	ACOPF	Toll	—	ISO	单断面
[16]	STA-UE	ACOPF	—	—	—	单断面

和分布式电源出力, 实现两系统的总运行成本最小。仿真结果表明, 由于配电网末端节点的电压跌落问题较其他节点更为严重, 因此由该节点供电的DWC路段会收取更高的路段拥挤费用来严格控制充电负荷, 确保配电网安全运行。

文献[16]研究了交通系统的路段通行容量受限时对交通网和配电网运行的影响, 仿真结果表明, 在通行量最大的路段设置阻塞会导致交通流的整体走行时间显著增加, 对交通系统影响最大; 在通行量大的路段设置阻塞并导致电网末端节点对应的路段车流量增加, 会最大程度地增加电压越限风险, 对配电网影响最大。相关结论对耦合系统风险评估具有指导意义。

上述文献的总结和比较见表1。对于电气化交通背景下的电力-交通网协同优化运行问题, 现有研究主要集中在单时间断面, 采用STA模型并结合UE、SO准则来刻画交通流分布, 采用DCOPF和ACOPF模型来描述电网潮流分布。协同调度的主要调控手段是源端(发电机、分布式电源)出力和荷端价格激励(路段拥挤费、充电电价), 调度目标是 minimized 耦合系统的运行成本(发电成本、交通流通行时间成本、EV耗电成本)。

4 研究展望

4.1 电力-交通网协同运行机理研究

当前研究主要集中在电力-交通网的协同经济运行, 尚缺乏对两网协同运行机理的深入研究。例如电气化公路对两网协同空间的影响、电力-交通网融合对各自优化运行边界的影响以及当前两网协同运行存在的障碍等。上述机理研究能够提供两网协同运行的可行性和必要性支撑, 是实现两网协同运行的理论前

提。以电气化公路对两网协同空间的影响为例, 在基于充电桩(站)的插入式充电模式下, 电动汽车的充电地点固定, 充电时间较长, 参与电网互动的潜力较大, 且互动场景多样(削峰填谷、消纳可再生能源等), 有助于电力-交通网的协同优化运行; 在动态无线充电的模式下, 用户对插入式充电设施的需求降低, 电动汽车转变为具有时空变化特性的充放电负荷, 且充放电时间主要集中于时长较短的通勤时段(详见4.4节), 因此该模式或将减少车网互动的场景, 导致电动汽车参与电网互动的潜力有所下降。

4.2 电力-交通网多时段协同优化运行

由第3章可知, 当前研究主要集中于单断面上的电力-交通网协同优化调度, 采用静态UE/SO模型描述交通流的分布情况。该模型假设各OD间的交通流量是稳定不变的, 仅仅适用于对一天甚至更长时期的交通流建模, 难以描述日内交通需求的时变特征, 无法推定某个特定时段的路网状况。在电网侧, 电力负荷同样具有时变特征, 且不同时间段的电力负荷差异显著, 另一方面, 随着当前新能源渗透率不断提升, 源端出力的波动性增加, 各时段的源-荷平衡面临更大的挑战。因此, 有必要从多断面的角度研究电力-交通网协同运行, 考虑日内交通需求和电网源荷的波动性, 实现耦合系统在整个调度周期内的经济运行。

值得一提的是, 多断面协同调度并不是单断面协同调度的简单堆积。例如, 交通网中在某一时刻出发的交通流并不一定能够在该时段内抵达终点, 尤其是当交通网中存在阻塞(车速慢, 耗时长)或者该OD的路程较长(距离远, 耗时长)时。在这种情况下, 该交通流可能会历经多个时间断面, 进而影响到本时段和后续时段中出行车流的走行时间。因此, 各时段

内的交通流并不独立，在对交通流分布进行建模时，考虑交通流在各时段间的耦合是十分必要的。Agent-based模型^[17] (agent-based model, ABM) 是交通流研究中用于识别个体行为差异 (车速、时长、路径选择等) 的典型方法，可用于处理不同时间断面间的交通流耦合问题。

4.3 考虑不确定因素的电力-交通网协同优化运行

当前研究主要面向确定型的交通需求和电网负荷，未计及不确定性。交通网侧、交通需求和用户路径的选择存在较大的不确定性。虽然目前交通预测技术已经相对成熟，但其面向的对象是燃油汽车这类传统交通需求，不确定性相对较小。对于电动汽车，其行驶车速、驾驶习惯均会对耗电功率产生影响，进而影响电池容量和充电需求。此外，当前广泛使用的UE准则存在一个很强的假设，即用户充分了解全局路网的运行状态，且用户在选择路径时是完全理性的。显然，实际情况中用户的充电选择以及对行驶路线的选择具有很强的随机性，因为每个用户对路网状况的认知是存在差异的，且用户对路径的选择也很难做到完全理性^[18]。电网侧广泛接入的分布式可再生能源以及电网负荷也具备较大的不确定性。因此，结合以上不确定性因素研究电力-交通网协同优化运行，得到更贴合实际的协同运行方案，确保两网的经济性和安全性，是未来一个重要研究方向。

4.4 电力-交通网协同需求响应

对于传统的插入式充电，电动汽车充电高峰期主要集中在下班回家后到第二天上班前的时段，较长的充电时间为EV参与需求响应，与电网互动以消纳夜间风电提供了可能。已有大量文献对此进行了研究^[19-21]。与插入式充电不同，在电气化交通背景下，电动汽车充电高峰转移至通勤时段，与交通需求的峰值基本重合，如图6所示。在这种情况下，电网和交通网的阻塞情况可能同时发生，需要从源头上避免阻塞。电力系统和交通系统需要联合设计合理的价格激励机制，一方面保障电网安全，另一方面改善交通网的运行效率。在该机制下，交通需求由刚性转为弹性，用户错峰出行，实现交通网侧的“削峰”，同时也减少了高峰期的充电需求；电力负荷参与现有的需求响应，在高峰期适当削减用电量，为EV充电负荷提供更大的裕量。

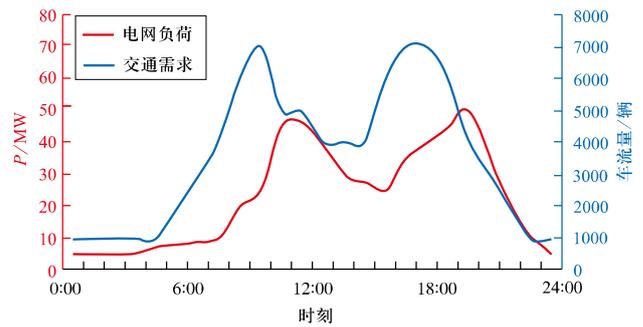


图6 日内交通需求和电网负荷曲线

Fig. 6 Intra-day traffic demand and electric load curve

4.5 电力-交通网安全运行

电网和交通网是保障社会稳定、经济运行的关键基础设施，当前已有大量国内外文献对两网各自的安全运行进行了深入研究，但是在二者协同安全运行的领域研究较少^[22-23]，尤其是考虑动态无线充电的电力-交通网协同安全运行还处于空白。研究两系统在大扰动 (极端恶劣天气、安全攻击等) 和小扰动 (道路限行、交通事故、电网元件故障等) 下的弹性以及互相支撑的能力和具体机制，有针对性地设定事前预防方案和事后恢复方案，是两网协同优化运行的重要保障。

4.6 基于自动驾驶和智慧交通系统的电力-交通网协同优化运行

自动驾驶汽车是未来汽车的发展方向，也是道路交通具有革命性影响的交通工具。随着人工智能、传感检测等核心技术的突破和完善以及整体可靠性的提升，自动驾驶汽车会逐步被公众接受，成为出行和物流的主流交通工具。在EV自动驾驶模式下，智慧交通系统可通过先进的计算、通信、控制技术，考虑车对车^[24] (vehicle to vehicle, V2V)、车对网 (vehicle to grid, V2G)、网对车 (grid to vehicle, G2V)，按照SO准则调控交通流分布，使交通系统的整体运行效率达到最高。此外，先进的感知和控制技术可以最小化EV接受线圈与DWC装置的偏移量，提高动态无线充电的效率。基于以上技术，电力-交通网协同优化调度将实现更大的社会效益。研究该新场景下的电力-交通网协同调度、协同需求响应、协同安全分析等问题，并与当前场景 (人工驾驶、车与车各自独立) 的效果进行比较，为基于自动驾驶和智慧交通系统的两网协同运行提供理论依据，是未来一个重要研究方向。

4.7 多场景下的电网-交通网耦合形态研究

当前研究主要集中于配电网-城市交通网的协同运行,未考虑输电网-高速路网的潜在耦合形态。相比于城市交通网,高速路网中的电动汽车充电需求更大,敷设动态无线充电装置能够有效降低用户的里程焦虑,带来更高的经济效益和社会效益^[25]。从地理位置来看,高速路网的分布更广,与输电网和高压配电网的分布存在重合,基于动态无线充电的高速路网可以实现与输电网的耦合,电动汽车可以在行驶过程中通过充放电来响应电网,有效缓解输电网中的线路阻塞、弃风弃光等问题。因此,设定合适的机制实现两网在城际高速和输电系统层面的协同运行,是未来一个重要研究方向。

5 结语

本文以高度电气化的交通网为背景,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,归纳了交通分配问题中的各类模型,对当前电力-交通网协同优化运行的研究进行了总结,并结合当前研究的不足和未来交通系统的发展趋势,对未来可行的研究方向做出了展望。

参考文献

- [1] Wei W, Wu L, Wang J, et al. Network equilibrium of coupled transportation and power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6764-6779.
- [2] F. He, Y. Yin, J. Wang, et al. Sustainability SI: optimal prices of electricity at public charging stations for plug-in electric vehicles[J]. Networks and Spatial Economics, 2013, 16(1): 131-154.
- [3] M. Alizadeh, H.-T. Wai, M. Chowdhury, et al. Optimal pricing to manage electric vehicles in coupled power and transportation networks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2017, 4(4): 863-875.
- [4] A. Ahmad, M. S. Alam, R. Chabaan. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1):38-63.
- [5] 朱春波, 姜金海, 宋凯, 等. 电动汽车动态无线充电关键技术研究进展[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 60-65.
Zhu Chunbo, Jiang Jinhai, Song Kai, et al. Research progress of key technologies for dynamic wireless charging of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2):60-65(in Chinese).
- [6] S. Jeong, Y. J. Jang, D. Kum. Economic analysis of the dynamic charging electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11):6368-6377.
- [7] S. Li, C. C. Mi. Wireless power transfer for electric vehicle applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1):4-17.
- [8] 刘超群, 魏斌, 吴晓康, 等. 电动汽车移动式无线充电技术工程化应用研究[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2211-2218.
Liu Chaoqun, Wei Bin, Wu Xiaokang, et al. Engineering application of dynamic wireless charging technology for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2211-2218(in Chinese).
- [9] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, et al. Wireless power transfer for vehicular applications: overview and challenges[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1):3-37.
- [10] Y. Sheffi. Urban Transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods[M]. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1985.
- [11] M. C. J. Bliemer, M. P. H. Raadsen, L. J. N. Brederode, et al. Genetics of traffic assignment models for strategic transport planning[J]. Transport Reviews, 2017, 37(1): 56-78.
- [12] F. He, Y. Yin, J. Zhou. Integrated pricing of roads and electricity enabled by wireless power transfer[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 34: 1-15.
- [13] C.-H. Ou, H. Liang, W. Zhuang. Investigating wireless charging and mobility of electric vehicles on electricity market[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5):3123-3133.
- [14] S. D. Manshadi, M. E. Khodayar, K. Abdelghany, et al. Wireless charging of electric vehicles in electricity and transportation networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4503-4512.
- [15] W. Wei, S. Mei, L. Wu, et al. Optimal traffic-power flow in urban electrified transportation networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1):84-95.
- [16] W. Wei, J. Wang, L. Wu. Quantifying the impact of road capacity loss on urban electrified transportation networks: An optimization approach[J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2016, 5(4): 268-288.
- [17] Nadav Levy, Ido Klein, Eran Ben-Elia. Emergence of cooperation and a fair system optimum in road networks: a game-theoretic and agent-based modelling approach[J]. Research in Transportation Economics, 2018, 68:46-55.
- [18] A. J. Pel, E. Chaniotakis. Stochastic user equilibrium traffic assignment with equilibrated parking search routes[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 101:123-139.
- [19] 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.
- [20] 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).
- [21] 李秋硕, 肖湘宁, 郭静, 等. 电动汽车有序充电方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 32-38.
Li Qiushuo, Xiao Xiangning, Guo Jing, et al. Research on scheme for ordered charging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 32-38(in Chinese).
- [22] Shunbo Lei, Chen Chen, Yupeng Li, et al. Resilient disaster recovery logistics of distribution systems: co-optimize service restoration with repair crew and mobile power source dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, Early Access.
- [23] Xu Wang, Mohammad Shahidehpour, Chuanwen Jiang, et al. Resilience enhancement strategies for power distribution network coupled with urban transportation system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4068-4079.
- [24] Rongqing Zhang, Xiang Cheng, Liuqing Yang. Flexible energy management protocol for cooperative EV-to-EV charging[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(1): 172-184.
- [25] Suman Debnath, Andrew Foote, Omer C. Onar, et al. Grid impact studies from dynamic wireless charging in smart automated highways[C]// 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC).

收稿日期：2019-06-30；修回日期：2019-08-07。



吕思

作者简介：

吕思（1995），男，硕士研究生，研究方向为电力-交通网协同运行，优化理论及其在电力系统中的应用，E-mail: woailanqust@163.com。

卫志农（1962），男，博士，教授，博士生导师，研究方向为电力系统运行与控制、输配电系统自动化，E-mail: wzn_nj@263.net。

（责任编辑 张鹏）

“柔性直流输电与大规模新能源并网”专题征稿启事

自2010年11月第一个基于模块化多电平换流器（MMC）的柔性直流工程投入运行以来，世界范围内规划和建设的柔性直流工程呈井喷式增长，截至2019年5月，中国已有7个柔性直流工程投入运行，且世界首个柔性直流电网工程——张北工程也即将进入调试阶段。柔性直流输电技术在远距离大容量输电、海底电缆输电、大电网异步互联、新能源并网、城市输配电等领域都具有独特优势。

为了促进柔性直流输电技术及其在大规模新能源并网应用方面的发展，分享该领域的最新学术和技术成果，《全球能源互联网》编辑部特邀请浙江大学徐政教授和国家电网有限公司郭贤珊教高担任特约主编，主持“柔性直流输电与大规模新能源并网”专题，专题拟于2020年3月出版，截稿日期2019年11月30日。

专题征稿范围（包括但不限于）

- 1) 柔性直流输电与柔性直流配电技术；
- 2) 柔性直流电网技术；
- 3) 柔性直流技术应用于大电网异步互联；
- 4) 柔性直流技术应用于改善电网结构；
- 5) 柔性直流技术应用于大规模海上风电接入电网；
- 6) 柔性直流技术应用于电网侧储能；
- 7) 功率半导体器件、高压直流断路器、大容量直流变压器、高压直流电缆等柔性直流输电关键设备研制；
- 8) 柔性直流输电工程规划、设计、调试和运行技术。