

考虑交通综合能源灵活性的高速公路多服务区运行优化

高亮¹,朱昆¹,杨晓辉²,曾卓为²,吴世华²

针对高速公路场景下电动汽车的多态行为,文中使用了时-空-电三维网络流模型,通过整合车辆行驶轨迹、充电站选择策略及电池状态监测模块,系统化描述电动汽车从出发地到目的地的全周期行为。由于高速公路单向通行特性限制了车辆路径选择,电动汽车驾驶者仅能通过调整服务区充电节点实现能源补给。该模型不仅可实时反映车辆电池荷电状态(SoC)变化,还能量化分析充电排队等现象,相关数学模型的具体约束条件将在后续章节展开论述。

2 高速公路多服务区能源自治运行优化模型

文中从高速公路服务区运营商角度出发,构建高速公路多服务区能源自治运行优化模型:

1) 目标函数:文中以最小化服务区运行成本为目标,综合考虑了多个服务区的弃风弃光成本、储能运行及维护成本、向主网购电成本、CHP发电成本以及车辆排队的时间成本。目标函数具体如下:

$$\min \{C_{\text{pv}}^{\text{curtail}} + C_{\text{wind}}^{\text{curtail}} + C_{\text{storage}}^{\text{cop}} + C_{\text{grid}}^{\text{cost}} + C_{\text{chp}}^{\text{chp}} + \lambda C_{\text{ev}}^{\text{charging}}\} \quad (1)$$

式中: λ 为排队成本的权重系数; $C_{\text{pv}}^{\text{curtail}}$ 为弃光总成本; $C_{\text{wind}}^{\text{curtail}}$ 为弃风总成本; $C_{\text{storage}}^{\text{cop}}$ 为储能运行总成本; $C_{\text{grid}}^{\text{cost}}$ 为主网购电总成本; $C_{\text{chp}}^{\text{chp}}$ 为热电联产机组运行总成本; $C_{\text{ev}}^{\text{charging}}$ 为电动汽车排队的时间成本。

2) 功率平衡约束条件:式(2)表示了多个服务区的冷、热、电三种能源的能量平衡约束,功率平衡约束条件具体如下:

$$\begin{cases} P_{t,m}^{\text{chp}} + P_{t,m}^{\text{grid}} + P_{t,m}^{\text{wind}} + P_{t,m}^{\text{pv}} + P_{t,m}^{\text{disch}} = P_{t,m}^{\text{ev}} + \\ P_{t,m}^{\text{ch}} + P_{t,m}^{\text{pvcur}} + P_{t,m}^{\text{windcur}} + P_{t,m}^{\text{load}} + P_{t,m}^{\text{chil}} + P_{t,m}^{\text{heat}} \\ \eta_{\text{chp}} H_{t,m}^{\text{ch}} + \eta_{\text{heat}} P_{t,m}^{\text{heat}} + H_{t,m}^{\text{out}} = H_{t,m}^{\text{Space}} + H_{t,m}^{\text{Water}} + H_{t,m}^{\text{in}} \\ \eta_{\text{chil}} P_{t,m}^{\text{chil}} = C_{t,m}^{\text{chilload}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: η_{heat} 、 η_{chp} 、 η_{chil} 分别为电热转换效率、服务区热电联产机组效率、服务区电冷转化效率; $P_{t,m}^{\text{chil}}$ 、 $P_{t,m}^{\text{load}}$ 、 $P_{t,m}^{\text{wind}}$ 、 $P_{t,m}^{\text{heat}}$ 和 $P_{t,m}^{\text{pv}}$ 分别为服务区 m 在 t 时刻能量转换一体化装置供冷功率、服务区日常用能负荷、风电出力、能量转换一体化装置供热功率、光伏出力; $H_{t,m}^{\text{in}}$ 、 $H_{t,m}^{\text{out}}$ 分别为服务区在 t 时刻蓄热装置的蓄热量和放热量大小; $H_{t,m}^{\text{Water}}$ 、 $H_{t,m}^{\text{Space}}$ 分别为服务区热水负荷和服务区空间热负荷; $C_{t,m}^{\text{chilload}}$ 为服务区冷负荷量。

3) 电动汽车约束:为简化综合能源系统调度模型的求解过程,假设高速公路服务区运营商能够协调

电动汽车的充电和排队行为。在构建模型的过程中,将网络流的平衡条件、服务区所能承受的最大排队流量限制、最大充电功率的约束条件,以及电动汽车在各个网络节点起始时的车辆数目,综合整合并表述为公式(3)。

$$\begin{cases} f_{n,t,\text{soc}}^{\text{travel}} = f_{n+1,t+1,\text{soc}}^{\text{travel}} \\ \sum_{\text{soc} \in C} f_{n,t,\text{soc}}^{\text{block}} \leq \overline{f}^{\text{block}} \\ \sum_{\text{soc} \in C} f_{n,t,\text{soc}}^{\text{charge}} \leq \overline{f}^{\text{charge}} \\ f_{n,t,\text{soc}}^{\text{travel}} = f_0 \\ f_{n,t,\text{soc}}^{\text{charge}} = f_1 \\ f_{n,t,\text{soc}}^{\text{block}} = f_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_0 、 f_1 、 f_2 分别表示模型中行程弧、充电弧和排队弧的初始值; $\overline{f}^{\text{block}}$ 表示每个服务区每个时刻最大排队车辆数; $\overline{f}^{\text{charge}}$ 表示每个服务区充电桩数量。

3 算例分析

3.1 算例参数

本研究选取包含五个服务区的高速公路网络进行实证检验,路段总里程600公里,相邻服务区平均间距100公里。为提升模型解析精度,在相邻节点间增设一个虚拟节点,并将一个运营周期划分为48个时段进行动态优化。基于沿线服务区的地理分布特征,各站点因太阳辐射强度和风力条件的区域性差异(具体参数参见文献[8]),其光伏与风电出力呈现梯度分布特征。在电动车参数设定方面,采取以下基本假设:

1) 车辆出发时段集中在6:00-24:00,且均匀分布,平均每小时发车12辆;

2) 电池初始荷电状态(SoC)控制在80%-100%区间;

3) 车型配置采用统一标准(参数详见表1)。考虑到凌晨时段(0:00-6:00)车流量显著减少,模型暂未计入该时段始发车辆的影响。

表1 电动汽车相关参数

参数	数值
充电功率/kW	16
耗电率/(kWh/km)	0.16
电池容量/(kW·h)	96
行驶速度/(km/h)	100
最大行驶里程/km	600

3.2 优化结果分析

各服务区车辆的充电负荷结果如图2所示。

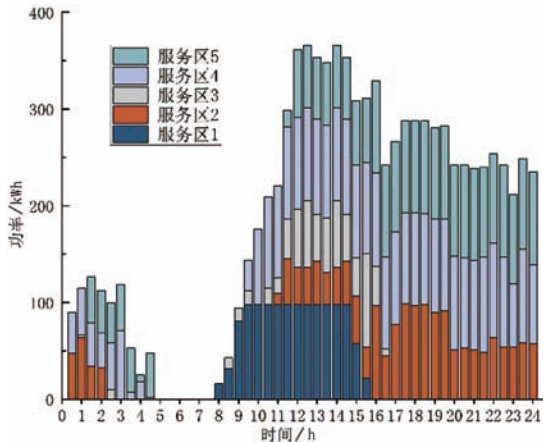


图2 各服务区的充电负荷

得益于网络流模型优化策略的综合效应,电动汽车的充电活动聚集于可再生能源发电的高产时段。具体而言,服务区1和4在9:00至15:00时段承载了主要的充电负荷,这一时段恰好与两站点的光伏发电高峰相契合。同样地,服务区2、4、5在17:00-22:30期间风电出力显著提升,电动汽车充电负荷也相应地集中在这一时段。优化结果表明,通过合理引导电动汽车前往可再生能源资源丰富的服务区进行充电,服务区运营商能够有效促进高速公路沿线服务区的可再生能源,从而达成降低服务区整体运行成本的优化目标。

3.3 排队权重系数对优化结果的影响

针对节假日大流量场景,本研究构建充电排队调控仿真模型,设定车流量为常规时段的2倍(24辆/小时),重点探究排队权重系数对充电效率的影响机制。需特别说明的是,服务区运营商在此模型中需在成本控制与社会责任间寻求平衡——在控制成本的同时,履行交通疏导责任。

权重系数的大小直接反映了服务区运营商对于协调电动汽车以减少排队时间的重视程度。表2对比了在不同权重系数设置下,电动汽车的平均排队时间、主网购电量以及服务区运行成本的变化情况。

从表2的数据可以看出,当高速公路上的电动汽车流量增加至每小时24辆时,运营商若表现出更强的减少排队时间的意愿(即权重系数增大),则电动汽车的平均排队时间会相应缩短。这主要是因为,运营商更倾向于引导电动汽车前往有空闲充电桩的充电

站,而非单纯依据可再生能源出力强度选择充电站。这一策略调整虽然能有效减少排队时间,但相应地,为了满足更高的充电需求,运营商不得不从主网购买更多的电量,进而导致服务区运行成本的上升。

表2 不同排队权重系数时的优化结果

排队权重系数	运行成本/元	主网购电量/kWh	平均排队时间/h
1	7 192.78	2 152.36	1.27
1.5	7 958.05	2 911.07	0.51
2	8 305.36	3 158.67	0.25
2.5	8 562.78	3 250.19	0.12
3	8 658.07	3 281.75	0.07

此外,基于上述仿真结果,进一步分析了平均每小时车流量和排队权重系数对平均排队时间的影响,具体结果如图3所示。这一分析有助于更全面地理解不同因素如何共同作用,从而影响电动汽车在服务区的充电体验。

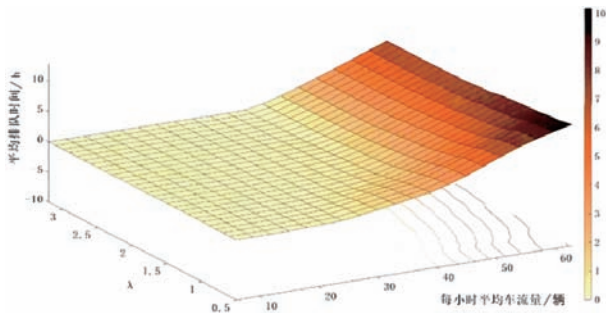


图3 车流量和排队权重系数对平均排队时间的影响

从图3可以看出,当车流量少于20辆/小时,在排队权重系数(λ)小于1的情况下,则几乎不存在车辆排队等待充电的现象。这是由于服务区充电站目前的充电设施基本能够满足所有车辆的即时充电需求。而当车流量增至20-40辆/小时这一区间时,电动汽车开始出现排队充电的情况。此时,运营方的关注点转向了更有效地引导电动汽车前往具备空闲充电设施的站点(即提高排队权重系数),在 $0.5 < \lambda < 1.5$ 的区间内,排队时长出现了显著下降,表明运营商的引导策略起到了显著效果,有效缓解了车流量增加带来的排队问题。

进一步分析表明,一旦车流量超过40辆/小时,即便进一步继续提升排队权重系数,也难以显著减少电动汽车的排队时长。这表明,在电动汽车普及率较高的背景下,仅依靠高速公路运营商的协调管理是无法完全实现电动汽车的有序充电的。因此,为了应对不断攀升的充电需求,需加大对服务区充电站的建设力度。

4 结语

针对提升公路沿线可再生能源利用率、降低高速公路服务区运行成本等问题,文中从高速公路服务区运营商的视角出发,提出一种考虑交通综合能源灵活性的高速公路多服务区运行优化模型。通过算例仿真,验证了所提优化策略的可行性和有效性,并得出以下结论:

1) 在文中所提出的运行优化框架下,运营商能够灵活调度供能侧的能量转换设备,实现能量的交换,进而提升服务区的清洁能源利用水平。

2) 在节假日期间,高速公路面临电动汽车充电需求激增的情况。此时,运营商通过合理引导电动汽车有序充电,可以有效减少排队时间,促进充电效率的提升,但这一策略可能会略微增加服务区的运营成本。

3) 随着未来电动汽车普及率的持续增长,现有服务区内的充电设施预计将难以充分满足高速公路上的充电需求。因此,除了进一步优化充电引导策略外,还需加快充电站点的建设,以应对日益增长的充

电需求。

参考文献:

- [1] 崔杨,姜涛,仲悟之,等.电动汽车与热泵促进风电消纳的区域综合能源系统经济调度方法[J].电力自动化设备,2021,41(02):1-7.
- [2] 史昭娣,王伟胜,黄越辉,等.多能互补发电系统储电和储热容量分层优化规划方法[J].电网技术,2020,44(09):3263-3271.
- [3] 高赐威,张亮.电动汽车充电对电网影响的综述[J].电网技术,2011,35(02):127-131.
- [4] 欧名勇,陈仲伟,谭玉东,等.基于峰谷分时电价引导下的电动汽车充电负荷优化[J].电力科学与技术学报,2020,35(05):54-59.
- [5] 李帅兵,朱宇辰,谭九鼎,等.计及负荷时空特性的高速公路链式微网光-储-充容量优化配置方法[J].电网技术,2025,49(07):2768-2778.
- [6] 梁露,韩飞.考虑排队时间和充电费用的电动汽车充电站选址模型[J].交通信息与安全,2023,41(04):154-162.
- [7] 戚路军.高速公路服务区充电桩建设运营对策研究[J].交通科技与管理,2023,4(24):158-161.
- [8] 张煜.高速公路服务区能源自洽规划运行方案研究[D].北京:华北电力大学,2024.