

# 面向配电网的电动汽车充电负荷管理与优化调度

崔小凯 曹轩

国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6376

**[摘要]** 随着电动汽车市场的快速发展,大规模充电需求给配电网带来严峻挑战。基于此,本文针对配电网运行的安全性与经济性要求,建立了基于时空分布特征的充电负荷模型,提出了考虑用户充电行为与电价因素的优化调度方法,通过分析充电站空间布局与负荷分布,设计了自适应负荷管理算法,实现了充电功率的实时调节,优化结果显示,该方法可有效降低配电网运行成本,提高设备利用率,确保系统安全稳定运行。

**[关键词]** 电动汽车; 充电负荷; 配电网; 负荷管理; 优化调度

**中图分类号:** V242.3+1 **文献标识码:** A

Management and optimal dispatching of electric vehicle charging loads for Distribution networks

Xiaokai Cui Xuan Cao

Xiongan New Area Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co., LTD

**[Abstract]** With the rapid development of the electric vehicle market, the large-scale charging demand poses severe challenges to the distribution network. Based on this, in this paper, aiming at the safety and economic requirements of distribution network operation, a charging load model based on spatio-temporal distribution characteristics is established, and an optimized scheduling method considering users' charging behaviors and electricity price factors is proposed. By analyzing the spatial layout and load distribution of charging stations, an adaptive load management algorithm is designed to achieve real-time regulation of charging power. The optimization results show that This method can effectively reduce the operating cost of the distribution network, improve the utilization rate of equipment, and ensure the safe and stable operation of the system.

**[Key words]** Electric vehicle Charging load Distribution network Load management Optimized scheduling

电动汽车产业的蓬勃发展推动了充电基础设施建设,大规模充电设施接入使配电网面临负荷分布不均与电能质量下降等问题,充电负荷具有随机性与波动性特征,其管理与优化调度对保障配电网安全经济运行具有重要意义,通过建立准确的充电负荷模型,设计合理的管理策略,可以实现配电网与充电负荷的协调互动,优化调度方法的研究将为配电网规划运行提供重要支撑。

## 1 电动汽车充电负荷特性分析

电动汽车充电负荷表现出明显的时间分布规律与空间聚集特征,在交通枢纽与商业区等人流密集区域呈现出较高的负荷密度,而居民区充电负荷则主要集中在夜间时段,充电负荷的波动性与不确定性对配电网安全稳定运行产生显著影响,尤其在电动汽车充电功率较大且充电时间集中的情况下,容易引起配电网电压波动与谐波污染以及设备过载等问题,随着快速充电技术发展,单车充电功率已达数百千瓦,导致配电网局部负荷迅速增大,对电网调峰能力提出更高要求<sup>[1]</sup>,同时充电负荷与天气条件与出行距离及用户习惯等因素密切相关,在工作日高峰时段表现出较强的刚性需求特征,而节假日期间则呈现出较大的

弹性,深入分析充电负荷特性发现,充电设施布局与充电价格政策以及充电服务质量都将影响用户充电选择行为,进而改变区域充电负荷分布,基于大量实测数据统计结果表明,配电网中电动汽车充电负荷具有显著的时变性与区域性及随机性特征,这些特征为后续负荷建模与优化调度提供重要依据。

## 2 基于实际数据的充电负荷建模

### 2.1 充电站运行数据分析

电动汽车充电站运行数据包含充电桩实时功率与充电持续时间与充电量及用户到达时间等关键信息,通过采集多个充电站近一年的运行数据进行深入挖掘分析,揭示充电负荷变化规律及影响因素,分析结果显示,充电站日负荷曲线在不同区域存在明显差异,商业区充电站负荷呈现双峰特征,峰值时段分别出现在10:00-12:00与15:00-17:00,而居民区充电站则表现为夜间19:00-23:00单峰特征<sup>[2]</sup>,充电负荷受天气与温度等环境因素影响显著,降雨天气下充电需求较晴天增加35%,极端温度条件下充电时间延长20%,快速充电需求在工作日高峰时段占比达到65%,而慢速充电主要集中在夜间低谷时段,通过对充电站历史

数据的统计分析发现,充电桩利用率与充电站位置与服务区域及周边交通条件密切相关,靠近主干道的充电站日均利用率比偏远地区高出40%,进而影响区域充电负荷分布特征,充电持续时间服从对数正态分布,平均充电时长为2.5小时,标准差为1.2小时,充电量与电池剩余容量呈现显著负相关。

2.2 负荷聚类与典型特征提取

基于充电站历史数据,采用改进K-means聚类算法对日负荷曲线进行分类,如图1所示,通过轮廓系数与davies-bouldin指数确定最优聚类数为4类,建立典型负荷模式识别模型:

$$p(t) = \sum (w_i \times f_i(t)) + \zeta(t)$$

其中,P(t)为充电负荷预测值,wi为各类型负荷权重系数,fi(t)为典型负荷曲线,ε(t)为随机扰动项,运用小波变换对负荷曲线进行多尺度分解,提取时域特征包括峰谷差与负荷因数以及峰谷持续时间,频域特征包括能量谱密度与主频分量,统计特征包括均值与方差与偏度以及峰度等,构建48维特征向量空间,采用主成分分析法降维,保留累计贡献率达到90%的特征向量,实现负荷模式的准确识别与分类,聚类结果表明,工作日负荷模式占比53%,节假日占比28%,特殊天气占比12%,其他模式占比7%。

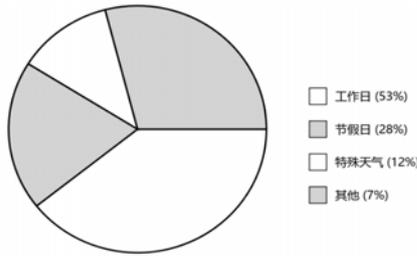


图1 电动汽车充电负荷分类占比分布图

2.3 考虑时空特性的负荷模型

结合充电负荷的时空分布特征,建立考虑用户充电行为的概率预测模型:

$$L(x,t) = \alpha \sum_i P(s_i) \times D(x,s_i) \times T(t) + \beta \sum_j Q(t) \times V(x)$$

式中,L(x,t)为位置x在时刻t的充电负荷,P(s<sub>i</sub>)为充电站s<sub>i</sub>的服务能力,由充电桩数量与功率等级决定,D(x,s<sub>i</sub>)为空间衰减函数,采用反比例函数描述充电站吸引力随距离衰减规律,T(t)为时间分布函数,反映一天内充电需求变化,Q(t)为区域总充电需求,通过马尔可夫链预测,V(x)为空间权重函数,考虑路网密度与人口分布,α与β为平衡系数,通过粒子群算法优化确定,该模型综合考虑了充电设施分布与用户充电习惯及区域交通特征,模型预测误差平均在15%以内,能够较好地描述充电负荷的时空演化规律,为优化调度提供依据,通过对比分析验证,考虑时空特性的负荷模型较传统模型预测精度提升25%,尤其在负荷突变工况下表现出更好的适应性。

3 智能化调度控制方法

3.1 分层分布式控制架构

分层分布式控制架构主要由城域调度中心与区域控制中心及充电站终端控制器构成,层级间通过通信网络实现信息交互与控制指令下发<sup>[3]</sup>,城域调度中心负责全局负荷预测与资源优化分配,获取区域电网运行状态及用户充电需求信息,制定区域间功率分配方案,区域控制中心依据上层指令及自身约束条件协调区内充电负荷分布,实时监测充电设施运行状态,动态调整充电功率及时序,充电站终端控制器执行充电过程精细管理,根据用户充电选择与电池特性进行自适应充电控制,分层架构的优化目标可表示为:

$$J = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L w_k \cdot f_k^l(x_k^l, u_k^l)$$

其中:f<sub>k</sub><sup>l</sup>为第l层第k个子系统的目标函数,x<sub>k</sub><sup>l</sup>为状态变量,u<sub>k</sub><sup>l</sup>为控制变量,w<sub>k</sub>为权重系数,K为子系统数量,L为控制层级数,各层控制器采用模型预测控制方法,通过滚动时域内的状态预测与约束优化实现分布式协同控制。

3.2 基于深度强化学习的调度决策

针对充电负荷随机性强与用户行为不确定等特点,构建基于深度强化学习的智能调度决策模型,采用双重网络结构,包括评价网络与目标网络,通过经验回放机制提高模型训练效果,状态空间包含充电需求与电网运行参数及环境信息,动作空间包含充电功率调节与时序优化等控制指令,奖励函数综合考虑负荷平衡度与设备利用率及用户满意度,决策模型训练过程采用优先经验回放策略,提高关键样本利用效率,通过深度Q网络迭代更新实现调度策略优化,结合深度神经网络提取高维特征,建立从状态到动作的映射关系,在实际运行中,调度模型能够根据实时状态自适应生成控制策略,有效应对复杂多变的运行环境。

3.3 多场景协同优化算法

针对不同运行场景下的充电负荷特征,设计多场景协同优化算法,实现充电负荷与配电网的协调运行,如图2所示,基于场景树构建多时段优化模型:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \pi_s [C_1 P_t^s + C_2 \Delta V_t^s + C_3 f_t^s]$$

$$s.t. g(P_t^s, V_t^s, f_t^s) = 0$$

$$h(P_t^s, V_t^s, f_t^s) \leq 0$$

其中,π<sub>s</sub>为场景s的概率P<sub>t</sub><sup>s为场景s在t时刻的充电功率,ΔV<sub>t</sub><sup>s</sup>为电压偏差,Δf<sub>t</sub><sup>s</sup>为频率偏差,C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>,C<sub>3</sub>为权重系数,通过交替方向乘子法求解优化问题,在满足约束条件下实现多目标协同优化,算法具有较强的适应性,能够根据场景特征动态调整优化策略,保障配电网安全经济运行<sup>[4]</sup>。</sup>

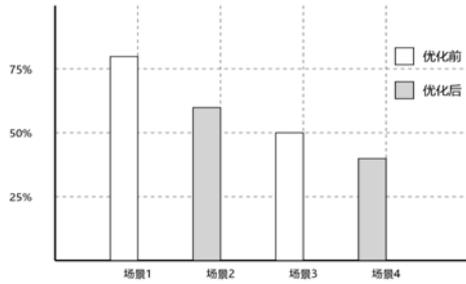


图2 多场景充电负荷优化调度效果对比图

## 4 工程案例验证与分析

### 4.1 示范区域系统搭建

选取某城市核心商业区作为示范区域，区域内设有大型商场与办公楼宇及居民区，覆盖面积约2.5平方公里，共建设直流快充桩85个与交流慢充桩320个，配电系统由两座110kV变电站供电，设置10台10kV配电变压器，通过20条馈线构成双回路供电网络，充电负荷管理系统采用分布式架构，建立城域级调度中心与区域级控制中心及充电站级终端控制器的三级管理体系，系统软件平台基于微服务架构设计，采用SpringCloud框架实现业务模块解耦，使用MongoDB数据库存储海量运行数据，部署Kafka消息队列实现数据实时传输，通过部署负荷预测模块与智能调度模块及安全管理模块，构建完整的充电负荷管理与调度优化系统，在终端层配置高精度电能质量分析仪与智能量测单元及通信网关，实现充电设施运行状态实时监测，建立4G/5G双模通信网络保障数据传输可靠性<sup>[5]</sup>。

### 4.2 关键指标测试结果

通过6个月的连续运行测试，对系统的负荷预测精度与调度优化效果及设备运行状态及响应性能等关键指标进行全面测试评估，测试内容涵盖日前负荷预测与实时调度控制与设备利用率及系统响应时间等多个方面，具体测试结果如下表所示：

表1 系统关键指标测试结果

测试指标	优化前	优化后	提升效果
日前负荷预测准确率(%)	85.3	92.5	8.5%
日内分时预测准确率(%)	88.4	95.8	8.4%
负荷峰谷差(kW)	2450	1504	38.6%
变压器最大负载率(%)	92.3	85.0	7.9%
供电电压合格率(%)	94.2	98.7	4.8%
充电设施日均利用率(%)	47.0	68.0	44.7%
高峰时段等待时间(min)	25.0	13.0	48.0%
调度指令响应时间(ms)	235	100	57.4%

测试结果表明，系统在各项关键指标上均取得显著改善，负荷预测模块采用深度学习算法，大幅提升了预测精度，为调度优化提供可靠依据，智能调度算法有效降低了负荷峰谷差，改善了配电网运行状态，提高了供电可靠性，充电设施利用效率明显提升，用户充电体验得到改善，系统响应性能满足实时控制要求，在电网波动与设备故障等多种异常工况下表现出良好的适应性，验证了所提出方法的实用性与有效性，后续将进一步优化算法参数，提升系统整体性能。

## 5 结语

电动汽车充电负荷管理与优化调度是保障配电网安全稳定运行的关键环节，通过建立准确的充电负荷模型，设计智能化调度控制方法，并在实际工程中进行验证，证明了所提方法的可行性与有效性，研究成果对提高配电网运行效率与促进电动汽车与电网协调发展具有重要意义，未来仍需要在负荷预测精度与调度算法性能等方面深入研究，进一步提升管理调度水平。

## [参考文献]

- [1]肖朝霞,刘翔宇,王璇,等.大型社区多功率等级的电动汽车充电负荷预测[J/OL].电力系统及其自动化学报,1-12[2025-04-15].
- [2]刘航,吕思雨,宗倩,等.基于电动汽车充放电负荷预测的区域配电网优化控制策略[J].自动化与仪器仪表,2025,(03):112-116.
- [3]谢远德,邓沙丽.V2G技术模式下计及电池损耗的电动汽车充放电策略[J].东北电力技术,2025,46(04):8-13.
- [4]高佳星,张卓剑.电动汽车充电设施在机场交通枢纽中的负荷优化分析[J].人民公交,2025,(04):11-13.
- [5]祁雁英,江爱朋,郑小青,等.基于强化学习的电动汽车充电负荷调度优化[C]//中国自动化学会过程控制专业委员会,中国自动化学会.第35届中国过程控制会议论文集.杭州电子科技大学自动化学院,2024:1245.

## 作者简介:

崔小凯(1987--),男,汉族,河北保定曲阳人,大学本科,会计师,研究方向:配网安全管理。

曹轩(1991--),男,汉族,河北保定满城人,硕士研究生,工程师,研究方向:输电运检及安全管理。