

# 面向电动汽车规模化充电的小区配电变压器容量优化

吕秋敏 方 施

桐庐电力开发有限公司 浙江 杭州 311500

**【摘要】**：随着电动汽车普及率快速提升，居民小区作为主要充电场景，其原有配电系统的承载能力面临严峻考验。小区配电变压器是电能分配的核心节点，其容量配置直接决定了能否满足规模化、高功率的充电需求。如何在保障电网安全稳定与用户可靠供电的前提下，科学优化变压器容量，是支撑交通电气化转型必须解决的关键技术问题。

**【关键词】**：电动汽车规模化充电；小区配电；变压器容量优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.04.064

## 引言

规模化电动汽车充电负荷具有时空聚集性与功率波动大的特点，对小区配电网的规划与运行构成了新的挑战。传统以居民生活用电为基础的变压器容量设计方法已难以适应这一变化。因此，需要建立新的分析框架与优化模型，对变压器容量进行精细化配置与动态评估，以应对充电负荷增长带来的容量不足与设备过载风险。

## 1 面向电动汽车规模化充电的小区配电变压器容量概述

### 1.1 电动汽车充电现状

当前，电动汽车充电行为主要集中于居住区、工作场所及公共充电站等场景，其中居民小区是私人乘用车夜间停放与日间补充电能的核心场所。充电方式以交流慢充为主，部分区域开始部署直流快充设施。充电时间呈现明显的夜间聚集特征，与居民生活用电晚高峰存在重叠趋势，充电功率需求随车辆电池容量与用户习惯差异而不同。充电设施的建设速度与电动汽车保有量的快速增长之间存在匹配问题，充电服务的便捷性与电网支撑能力成为影响用户体验与推广进程的关键因素。

### 1.2 小区配电变压器作用

小区配电变压器在电力系统中承担着关键的电能转换与分配职能，其作用是将上级电网的中压电能降压为可供居民用户及公共设施直接使用的低压电能。作为配电网的末端节点，它直接决定了向小区内所有电力负荷，包括照明、空调、电梯及各类家用电器供电的能力与质量。变压器的性能状态与容量配置直接影响供电可靠性、电压稳定性以及电网的整体运行效率，是保障居民正常用电生活的基础环节。

### 1.3 容量相关概念

变压器容量通常指其额定视在功率，表示在额定电压和电流条件下能够长期安全稳定输出的最大功率能力。实际运行中需考虑负载率，即实际负载与额定容量的比值，过高负载率可能导致过热与绝缘加速老化。容量裕度是指在满足现有负荷基础上预留的应对负荷增长或波动的额外能力。过载能力是指在特定短时间内变压器可以承受超过额定容量的能力，但这通常

以牺牲设备寿命为代价。理解这些概念是进行容量评估与优化设计的基础。

### 1.4 规模化充电影响

规模化电动汽车充电负荷的接入，将对小区配电变压器产生多方面的显著影响。最直接的影响是大幅增加变压器的总负荷水平，可能使其从轻载或正常负载状态进入重载甚至过载状态。充电负荷在时间上的集中特性，特别是夜间居民用电高峰时段的叠加，会加剧变压器的峰值负载，导致负载曲线尖峰化。这种快速增长的随机性功率需求，还会引发电网电压波动、三相不平衡加剧以及谐波含量增加等电能质量问题，对变压器及其他配电设备的稳定运行构成潜在威胁。

## 2 面向电动汽车规模化充电的小区配电变压器容量面临的挑战

### 2.1 容量不足隐患

当规模化电动汽车充电负荷叠加原有居民负荷超过变压器额定容量时，将引发变压器长期过载运行。过载会导致变压器绕组和铁芯温度持续升高，加速绝缘材料的热老化进程，显著缩短设备使用寿命。严重过载可能触发保护装置动作，造成供电中断，影响居民正常生活。持续的容量不足还会引发电网电压下降，影响末端用户电器正常工作，甚至损坏敏感设备。

### 2.2 负荷波动难题

电动汽车充电负荷具有高度的随机性与间歇性，用户充电开始时间、充电时长及所需功率存在较大不确定性。这种特性使得小区总负荷曲线波动剧烈，峰谷差加大。剧烈的负荷波动会给变压器带来周期性的热应力冲击，加剧机械与绝缘疲劳。负荷的快速变化增加了电网调控难度，对电压稳定与频率调节提出更高要求，可能引发电能质量下降，增加电网运行风险。

### 2.3 设备老化风险

原有小区配电变压器设计寿命通常基于历史居民负荷特性。规模化充电负荷带来的长期过载或频繁的负荷冲击，会大幅提升变压器运行温度与承受的电气应力。这会加速绝缘油的老化、纤维素绝缘材料的脆化以及绕组结构的松动。设备老化

风险增加直接导致故障概率上升，维修与更换需求提前，增加运维成本与停电风险，威胁电网的长期安全稳定运行。

## 2.4 规划设计缺陷

传统小区配电网规划主要依据历史居民用电负荷增长模式进行，未能充分预见电动汽车爆发式增长带来的功率需求冲击。早期设计标准中缺乏对规模化大功率充电设施的充分考虑，导致变压器选址、容量配置及供电半径规划存在固有局限。配电线路、开关设备等配套设施的容量与规格也可能无法适应新的负荷需求，形成系统性的瓶颈，使得局部扩容往往难以从根本上解决问题，需要进行整体性改造。

## 3 面向电动汽车规模化充电的小区配电变压器容量优化策略

### 3.1 智能调度方案

智能调度方案的核心在于构建一个集成了实时监测、通信交互与优化算法的协同控制系统。该系统持续采集配电变压器的负载、电压及温度等关键运行参数，同时与充电桩管理平台交互，获取电动汽车的接入状态、电池电量及用户充电需求。基于这些实时与预测数据，中央调度单元依据平抑负载波动、保障电压质量与满足用户充电需求等多重目标，通过优化算法进行计算决策。算法将充电负荷的时空分布调控问题转化为受变压器容量、线路安全及用户时间窗约束的数学规划模型进行求解。求解结果生成具体的控制指令，动态调整各充电桩的输出功率或安排充电任务的启动时序。这些指令通过可靠的通信网络下发至终端执行，实现对充电过程的精准有序管理。该方案通过主动引导充电负荷与电网供电能力在时间与空间上相匹配，从而在不改变硬件配置的前提下，最大化利用现有变压器容量，提升电网运行的安全性与经济性。

### 3.2 设备升级措施

设备升级措施聚焦于通过硬件层面的直接改造与替换来提升配电系统的固有承载能力与运行适应性。该措施的实施始于对现有配电设施进行系统性评估，识别出容量瓶颈与性能薄弱环节。对于负载率长期偏高或容量确已不足的配电变压器，将其更换为额定容量更高或过载能力更强的节能型变压器是根本性解决方案。在实施变压器增容的需对关联的高低电压进线、开关柜及保护装置进行相应复核与升级，确保整个电能传输路径的容量匹配与协调性。针对因电动汽车充电引起的局部电压偏差或三相不平衡问题，可加装或升级自动电压调节器与动态无功补偿装置。部署更先进的在线监测与故障诊断设备，能够提升对变压器运行状态的感知能力与预警水平。通过这一系列硬件层面的增强，配电系统的基础供电能力得到实质性扩展，为应对规模化充电负荷提供了坚实的物理基础。在设备升级过程中，还应考虑采用模块化、预制化的建设模式，以缩短施工周期并减少对居民正常用电的影响。升级后的系统具备更

强的抗扰动能力与更长的使用寿命，为未来可能出现的更高充电功率需求或新型用电设备接入预留了安全裕度，实现了基础设施的长期适应性。

### 3.3 储能系统应用

储能系统应用是通过在配电网侧或用户侧配置储能装置，以能量时移的方式参与电网运行，从而缓解变压器容量压力的柔性调节策略。储能系统，通常以电化学电池储能为主，在电网负荷低谷时段或电价较低时从电网充电，储存电能。当配电变压器面临负载高峰，特别是电动汽车集中充电导致负荷攀升时，储能系统转为放电模式，向小区内的充电负荷或公共设施供电。这种充放电行为的主动控制，能够直接削减变压器在高峰时段的实时取用功率，实现显著的削峰填谷效果。储能系统的功率与容量配置需根据小区的典型负荷曲线、充电负荷预测及优化目标进行合理设计。其运行可接受智能调度系统的统一协调，或根据预设的阈值与电价信号自主响应。储能系统的引入不仅延缓了变压器扩容投资，还能通过参与需求响应或利用峰谷电价差获取额外收益，同时增强了局部电网的供电弹性与电能质量调节能力。储能系统还能作为小区配电系统的备用电源，在电网临时故障或检修时提供短时应急供电，保障关键充电需求与部分公共负荷的持续运行。这进一步提升了小区供电的可靠性与韧性，为用户提供了更高品质的用电体验。

### 3.4 需求侧管理

需求侧管理侧重于运用经济激励与技术引导等手段，影响电动汽车用户的充电行为模式，从负荷源头实现优化分布。技术引导层面主要通过推广智能充电设施来实现，这些设施支持用户远程设置充电计划、调整充电功率，并具备响应电网调度指令的接口功能。经济激励是更为核心手段，实施精细化的分时电价或尖峰电价政策，利用显著的价格信号差异，引导用户自发地将充电行为调整至电网负荷低谷或电价较低的时段。可设计多样化的充电服务套餐或建立积分奖励机制，对积极参与与负荷调整的用户给予直接费用减免或其他形式的回报。配套的用户宣传教育有助于提升公众对电网互动与节能充电的认知度与接受度。需求侧管理通过激发用户侧的灵活性资源，将原本随机集中的充电负荷在时间上进行分散与平移，有效降低了变压器峰时负载压力，是一种基于市场机制且社会接受度较高的容量优化途径。

## 4 面向电动汽车规模化充电的小区配电变压器容量优化效果评估

### 4.1 技术指标评估

技术指标评估旨在量化分析各项优化策略实施后对配电系统技术性能的改善程度。关键评估指标包括变压器平均负载率与峰值负载率的变化，用以衡量容量利用效率的提升与过载风险的降低。负荷曲线峰谷差的缩小程度直接反映削峰填谷效

果。电压合格率、电压波动范围以及总谐波畸变率等电能质量指标用于评估供电质量的改善情况。变压器绕组热点温度、绝缘老化速率等设备状态指标可预测其寿命延长效果。系统供电可靠性指标,如系统平均停电时间与频率,则综合反映优化后电网的稳健性提升。

#### 4.2 经济效益分析

经济效益分析需全面权衡优化策略的投入成本与产生的各类经济收益。投入成本涵盖设备升级采购费用、储能系统建设成本、智能控制系统开发部署费用以及运营维护新增开支。经济收益主要包括因延缓或减少变压器扩容甚至新建变电站所节约的巨额资本性投资。通过削峰填谷降低的电网高峰购电成本,以及参与需求响应项目获得的直接补贴或电费减免。储能系统通过峰谷电价套利产生的收益。还需考虑因提高供电可靠性和电能质量而减少的用户停电损失与设备损坏索赔,以及延长变压器等设备使用寿命带来的资产折旧节约。

#### 4.3 可靠性提升评价

可靠性提升评价聚焦于优化策略对小区供电连续性和稳定性的增强作用。通过减轻变压器过载压力,直接降低了因设备过热保护或故障导致的意外停电概率。智能调度与储能系统的配合,可在主供电源短时故障或变压器计划检修时,提供一定程度的备用电源支撑,保障关键负荷或部分充电需求的供

电。优化后的负荷曲线更为平稳,减少了因负荷剧烈波动引发的保护误动或电压崩溃风险。整体配电系统运行在更宽松的容量裕度下,应对负荷自然增长与突发事件的缓冲能力显著增强,从而系统性提升了供电可靠率与用户满意度。

#### 4.4 环境效益考量

环境效益考量主要分析优化策略对促进节能减排与可持续发展的贡献。通过智能调度与需求侧管理引导电动汽车在电网可再生能源出力较高或整体负荷较低的时段充电,提高了清洁电力的消纳比例,间接降低了化石能源发电的碳排放。储能系统的应用进一步提升了电网对间歇性可再生能源的接纳能力。变压器负载率的优化与设备能效的提升减少了电网侧的电能传输损耗。从全生命周期角度,延缓或避免变压器等设备的过早更换,节约了原材料生产与设备制造过程中的资源消耗与环境污染,对实现低碳电力与交通系统具有积极意义。

### 5 结语

综上所述,面向规模化充电需求的小区配电变压器容量优化,是一个涉及负荷预测、设备选型与经济性评估的系统性工程。其核心在于平衡投资成本、运行安全与供电质量,通过科学规划与管理,确保配电网在交通电气化进程中保持足够的适应性与可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 胡志毅,孙忠良,李森,等.结合 NHTS 和蒙特卡洛算法的规模化电动汽车充电负荷影响分析[J].自动化与仪器仪表,2026,(02):117-120.
- [2] 马翼飞,刘健,刘韵笛.规模化电动汽车入网负荷预测及其对电网的影响研究[J].内燃机与配件,2026,(01):9-11.
- [3] 米红玉.基于主动配电网的规模化电动汽车充电建设[J].能源与节能,2025,(S1):28-31.
- [4] 鲁港.规模化电动汽车接入下直流配电网拓扑优化研究[D].兰州交通大学,2025.
- [5] 曹振铎.基于 LSSVM 与 PSO 算法的小区配电网设施设计方案优化[D].沈阳农业大学,2022.
- [6] 刘辉.峰荷期间配电变压器的轮次调整[J].农村电工,2019,27(06):42.
- [7] 崔晨.配电变压器功率损耗分析及自动投切装置的研究[D].山东理工大学,2018.