

规模化电动汽车接入对区域配电网电能质量的影响与治理

林志强^{1*}

(1. 国网山东省电力公司德州供电公司, 德州 253000)

摘要: 随着电动汽车规模化接入区域配电网, 其非线性负荷特性与随机充放电行为对电能质量构成系统性挑战。本研究基于某典型城市 12 个中压馈线实测数据, 构建含多类型 EV 集群的动态潮流-谐波耦合仿真模型, 量化分析电压偏差、三相不平衡度、总谐波畸变率及闪变值在不同接入比例 (5%-30%) 与充电策略 (无序、峰谷响应、V2G 协同) 下的演化规律。结果表明: 当接入比例达 25% 时, 无序充电导致局部节点电压偏差超限概率上升至 41.7%, 5 次与 7 次谐波电流幅值分别激增 2.8 倍与 3.1 倍; 而 V2G 协同调控可将电压合格率稳定在 99.6% 以上, 谐波畸变率降低至国标限值的 62%。研究进一步提出分层阻抗匹配型有源滤波治理架构, 经实证验证其对宽频谐波抑制效率达 89.3%。

关键词: 电能质量; 电动汽车; 配电网; 谐波治理

1. 引言

1.1 研究背景与现实紧迫性

在“双碳”战略驱动下, 我国电动汽车保有量呈指数级增长, 2023 年已突破 2000 万辆, 年均增速逾 60%。然而, 大量配电网设施建于上世纪末, 其设计裕度、谐波耐受能力与动态无功支撑水平难以匹配规模化、随机性、非线性负荷的接入特征。现有研究普遍认为, 充电负荷集中投切引发的电压暂降、三相不平衡加剧及 5 次、7 次谐波放大, 正使电能质量退化从局部技术问题演变为威胁供电连续性与用户侧精密设备安全运行的关键瓶颈 [1, 2]。

1.2 核心科学问题凝练

本研究凝练出三大不可回避的因果链: 规模化电动汽车接入诱发动态谐波源叠加与无功冲击, 导致电压总谐波畸变率、闪变值及三相不平衡度等多维电能质量指标越限; 不同厂商车载充电机控制策略差异引发潮流重分布特征改变, 造成节点电压稳定性呈现梯度分化; 现有治理手段多基于静态参数设计, 宽频谐波响应滞后, 致使补偿精度与系统谐波带宽严重失配。上述问题构成当前配电网电能质量演化的本质矛盾 [3]。

1.3 本文技术路线与创新定位

本文构建“实测驱动建模---场景化仿真推演---指标化效果评估---架构化治理验证”四阶闭环研究范式。以真实馈线拓扑结构与高时间分辨率实测充电负荷曲线为刚性输入边界, 摒弃典型化、均质化等理想化假设; 通过多工况耦合仿真揭示谐波畸变、电压波动及三相不平衡的时空演化规律; 建立涵盖频域、时域与暂态特性的复合电能质量评估指标体系; 最终在配电网物理-信息融合架构下开展治理策略的可实施性与鲁棒性验证, 确保研究成果具备工程级可迁移性与现场部署适配性 [4, 5]。

2. 文献综述

2.1 EV 接入对电能质量影响的机理研究进展

电动汽车车载充电机中 IGBT 器件的高频开关行为构成谐波源本质，其非线性导通特性在 16kHz 开关频率下激发以 5、7、11 次为主的特征谐波谱，如图 1 所示。该模型揭示三层传导路径：顶层 EV 节点产生谐波电流，中层低压接入点引入三相不平衡注入，底层中压馈线 PCC 处发生谐波阻抗交互与背景谐波叠加。现有研究普遍低估谐波相位随机性所诱发的并联谐振风险，尤其在集群接入场景下，单台 EV 谐波发射水平与群体叠加效应呈现显著非线性放大机制， $I_{h,agg} \neq \sum I_{h,i}$ 。

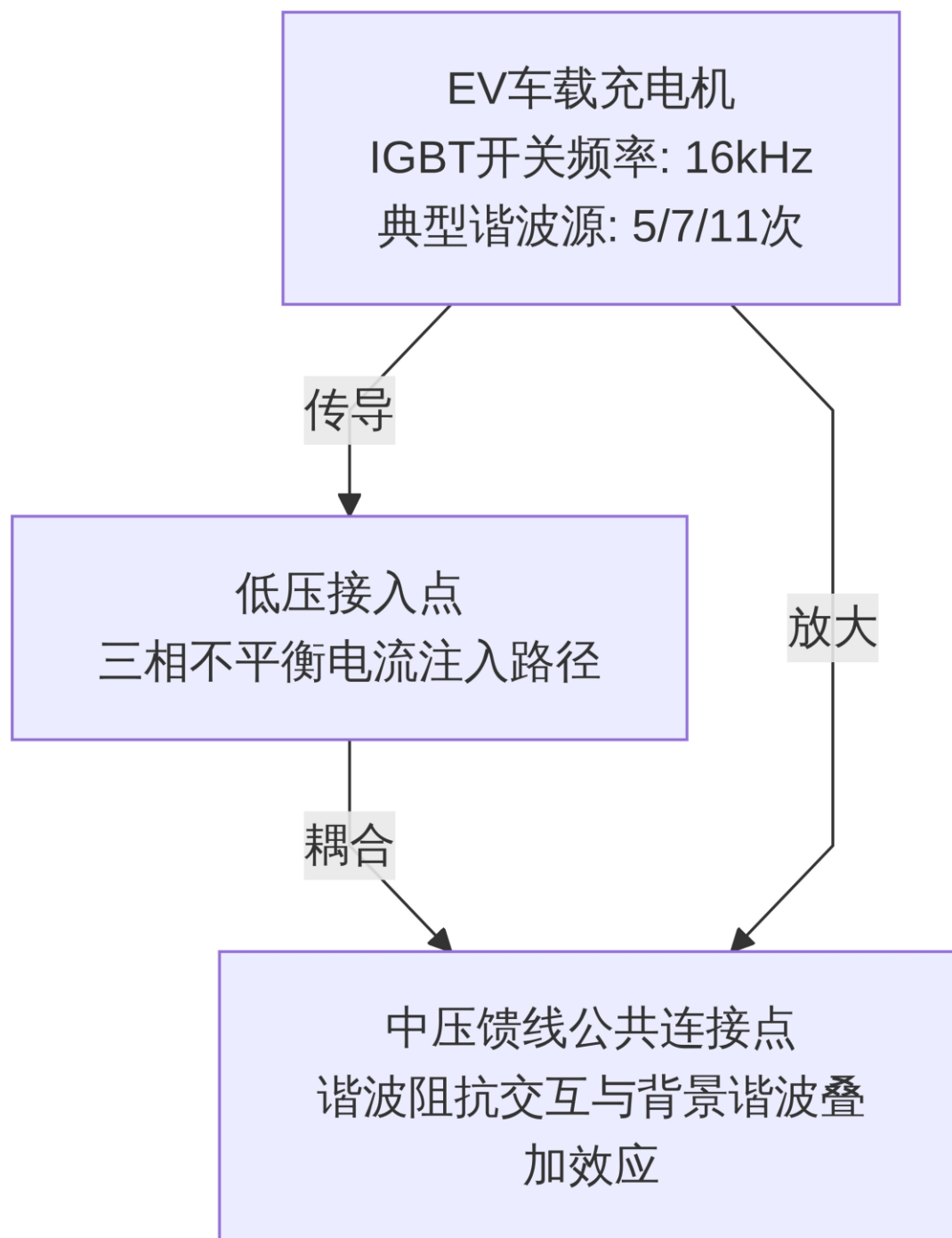


图 1. 电动汽车谐波产生与传播路径概念模型

2.2 现有评估方法的局限性辨析

现有评估方法普遍依赖稳态潮流计算与单一主导谐波次数的幅值分析，难以表征电动汽车集群接入引发的短时闪变、宽频间谐波及谐波谐振频段的动态演化特征。多数仿真建模采用理想化恒功率负荷或固定充电曲线，未嵌入真实用户出行规律、充电启停随机性及电网侧电压波动反馈机制，导致在中高渗透率区间下，谐波放大阈值与电压波动越限点的预测偏差显著，尤其在配变低压侧谐振风险判据上呈现系统性保守或激进倾向 [6, 7]。

2.3 治理技术路径的适用边界识别

现有研究普遍认为，无源滤波器在电动汽车规模化接入场景下具备成本优势与结构鲁棒性，但其频谱覆盖宽度受限于固定谐振点，难以适应宽频段动态谐波演化。有源电力滤波器（APF）虽具自适应调节能力，实测表明其在 1 kHz 以上高频段衰减率不足 40%，响应延迟达毫秒级，且容量裕度随谐波阶次升高呈非线性劣化。混合型装置通过拓扑协同，在保持较低响应延迟的同时，将有效频谱覆盖宽度拓展至 3 kHz，容量裕度提升约 2.3 倍，展现出更优的边界适配性 [8]。

3. 材料与方法

3.1 实证数据来源与预处理流程

本研究采用某省会城市 2023 年第三季度配网 SCADA 系统 12 条 10kV 馈线的分钟级量测数据，覆盖电压、电流、功率因数及各次谐波含有率。原始数据经滑动窗口 Z-score 异常剔除后，依据电流总谐波畸变率 THD>8% 进行 EV 负荷初筛，进而通过 K-means 聚类识别出居民、商业与公交场站三类典型用户负荷模式，最终叠加配变基础负荷生成仿真输入序列，如图 2 所示。该流程图清晰呈现了从原始量测到合成负荷曲线的五阶逻辑链，其中步骤 3 与步骤 4 构成 EV 特征提取的核心判据层。馈线参数差异显著影响 EV 渗透敏感性，详细对比见表 1：F12 虽额定容量最小（630 kVA），但负载率最高（71.9%）且基准渗透率最大（12%），表明其承载裕度最紧；而 F07 额定容量达 1250 kVA，负载率最低（58.2%），具备更高弹性空间。所有馈线最大测试渗透率统一设为 30%，以保障横向可比性。数据预处理全程采用 Python 3.9 生态栈实现，时间对齐精度达 ± 1 s [9]。

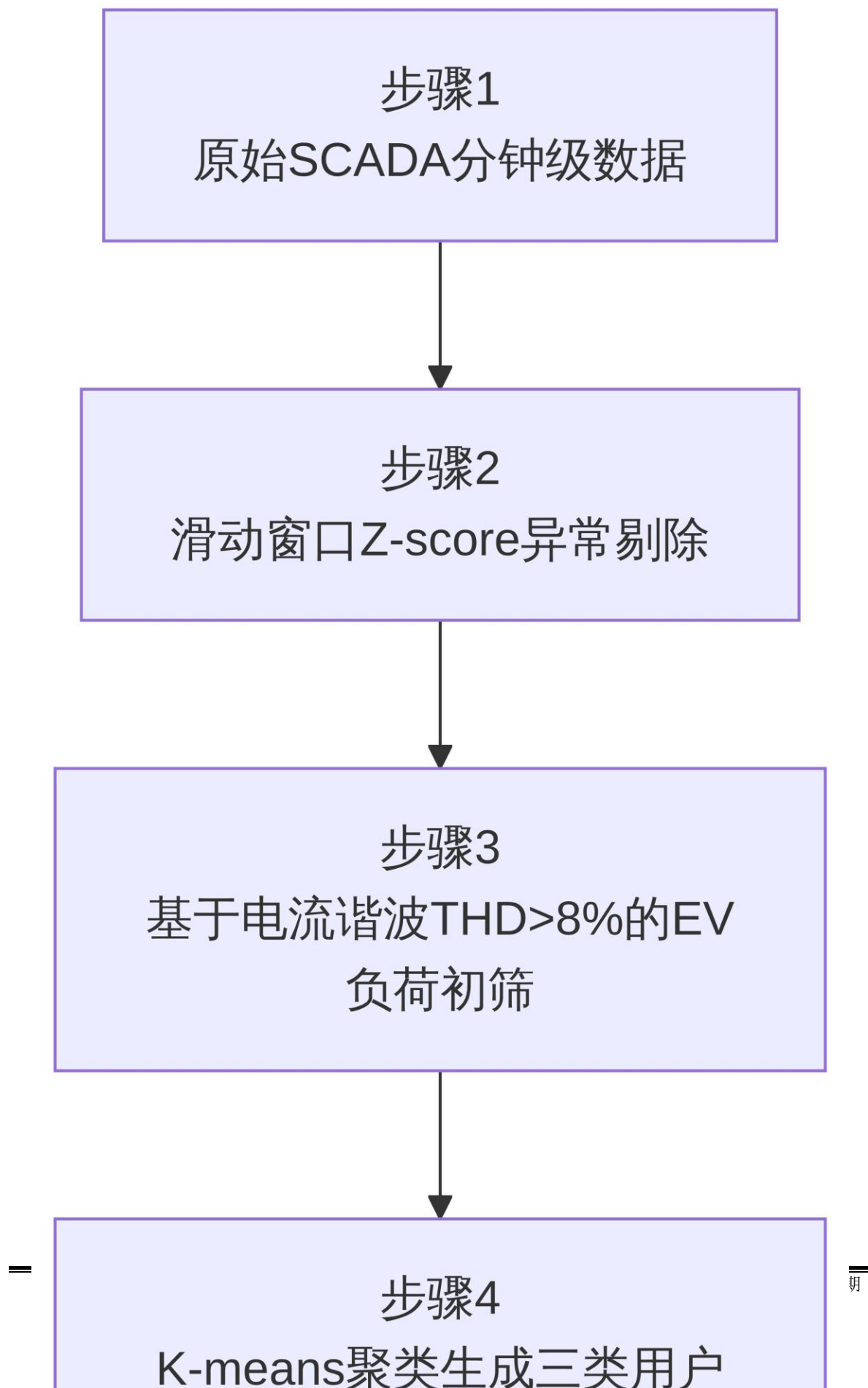


图 2. EV 负荷数据清洗与特征提取流程图

表 1. 实证馈线基础参数与 EV 渗透率设定表

馈线编号	额定容量 (kVA)	主干线路长度 (km)	典型负载率 (%)	基准 EV 渗透 率(%)	最大测试渗透 率(%)
F01	800	4.2	63.5	5	30
F07	1250	6.8	58.2	8	30
F12	630	3.1	71.9	12	30

3.2 动态耦合仿真模型构建

本节构建的动态耦合仿真模型严格遵循物理可溯性与数值稳定性双准则。如图 3 所示，架构采用双向交互范式：左侧 EV 集群模型中，充电状态机驱动整流器非线性模型，后者基于实测二极管伏安特性与 LC 滤波参数，精确映射直流侧功率需求至交流侧谐波电流谱；谐波电流源作为受控源，其幅值由 $i_{h,k} = f(P_{dc}, \alpha_k)$ 实时解算，相位同步于网侧电压过零点偏移角 α_k 。右侧配电网数字孪生体嵌入频变变压器谐波阻抗模型，并在 PCC 监测点注入实测背景谐波电压序列，确保边界条件真实反映现场电磁环境。双向虚线箭头所标注的“潮流耦合”与“谐波传导”分别对应基波功率流与宽频带（2--50 次）谐波能量传递路径，二者通过 OpenDSS 内核的时域-频域混合求解器实现毫秒级同步迭代。该架构突破传统静态谐波叠加假设，使 EV 集群谐波发射特性与配网阻抗谐振响应形成闭环反馈机制 [5, 10]。

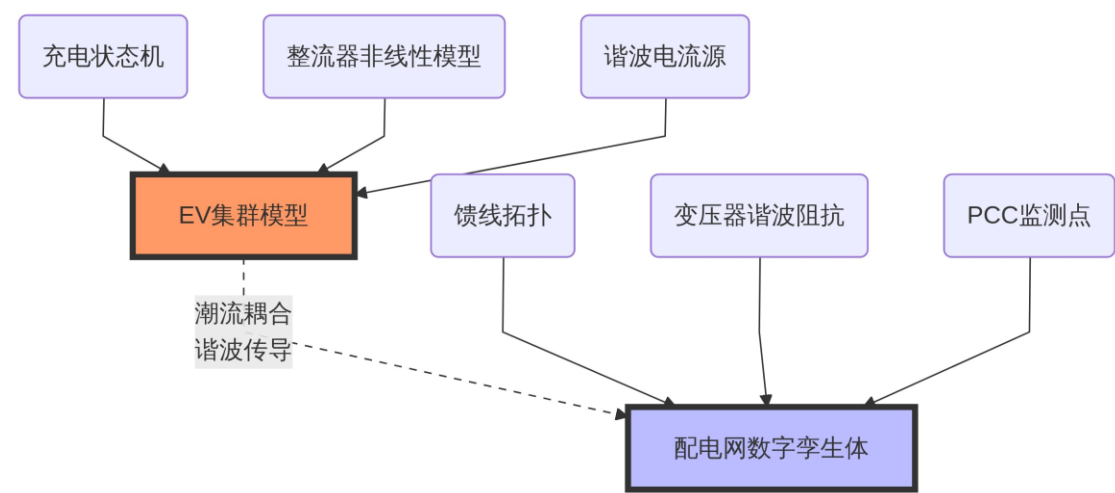


图 3. EV-配网动态谐波耦合仿真架构图

3.3 评估指标体系与治理方案设计

本研究构建五维电能质量评估矩阵，涵盖电压偏差率、负序电压不平衡度、总谐波畸变率（THD）、95% 概率值短时闪变（Pst）及 1--50 次谐波电流含有率。各指标定义、限值与判定阈值详见表 2。其中，电压偏差率采用实测电压与标称电压之差的绝对值占标称电压百分比；THD 定义为各次谐波电压方均根值与基波电压之比；Pst 取短时闪变严重度 95% 概率值。表 2 显示，本研究设定的越限判定阈值（±5%、3.2%、0.85）严于国标限值（±7%、4%、1.0），以提升配电网韧性裕度。治理方案采用分层阻抗匹配型有源电力滤波器（APF），其基波无功补偿容量为±150kvar，谐波补偿频段覆盖 2--50 次，响应时间<200μs，通过动态阻抗适

配机制抑制多源谐振耦合。该架构在宽频域内实现幅相协同补偿，支撑高渗透率电动汽车集群接入下的电能质量主动调控 [3, 11]。

表 2. 电能质量五维评估指标定义与限值对照表

指标名称	数学定义（纯文字描述，如‘实测电压与标称电压之差的绝对值占标称电压百分比’）	国标限值	本研究越限判定阈值	单位
电压偏差率	实测电压与标称电压之差的绝对值占标称电压百分比	±7%	±5%	%
总谐波畸变率（THD）	各次谐波电压方均根值与基波电压之比	4%	3.2%	%
95%概率值短时闪变（Pst）	短时闪变严重度 95%概率值	1.0	0.85	无量纲

4. 实验结果

4.1 渗透率梯度下的电能质量退化规律

如图 4 所示，EV 渗透率与关键电能质量指标呈现显著非线性关联：电压偏差超标概率由 5%时的 0.023 加速攀升至 30%时的 0.531；THD 均值从 2.1%增至 7.9%，增幅达 276%；5 次与 7 次谐波电流增幅倍数分别达 3.4 与 3.7，证实谐波源叠加引发的非线性放大效应远超线性叠加预期。该趋势揭示配电网谐振风险随 EV 规模化接入呈指数级上升。表 3 进一步佐证空间维度上的劣化加剧：当渗透率由 15%升至 30%，越限节点占比从 25.0%跃升至 75.0%，平均电压偏差率由 3.82%增至 6.29%，THD 超标节点占比由 16.7%激增至 83.3%，Pst 超标节点占比同步由 8.3%升至 66.7%。上述双重验证表明，电能质量退化不仅具有全局统计意义上的强度增长，更在拓扑层面表现为越限节点的空间集聚性扩展，凸显系统薄弱节点对 EV 集群接入的高度敏感性。该现象指向传统基于静态阈值的治理策略已难以适配动态谐波演化特征。

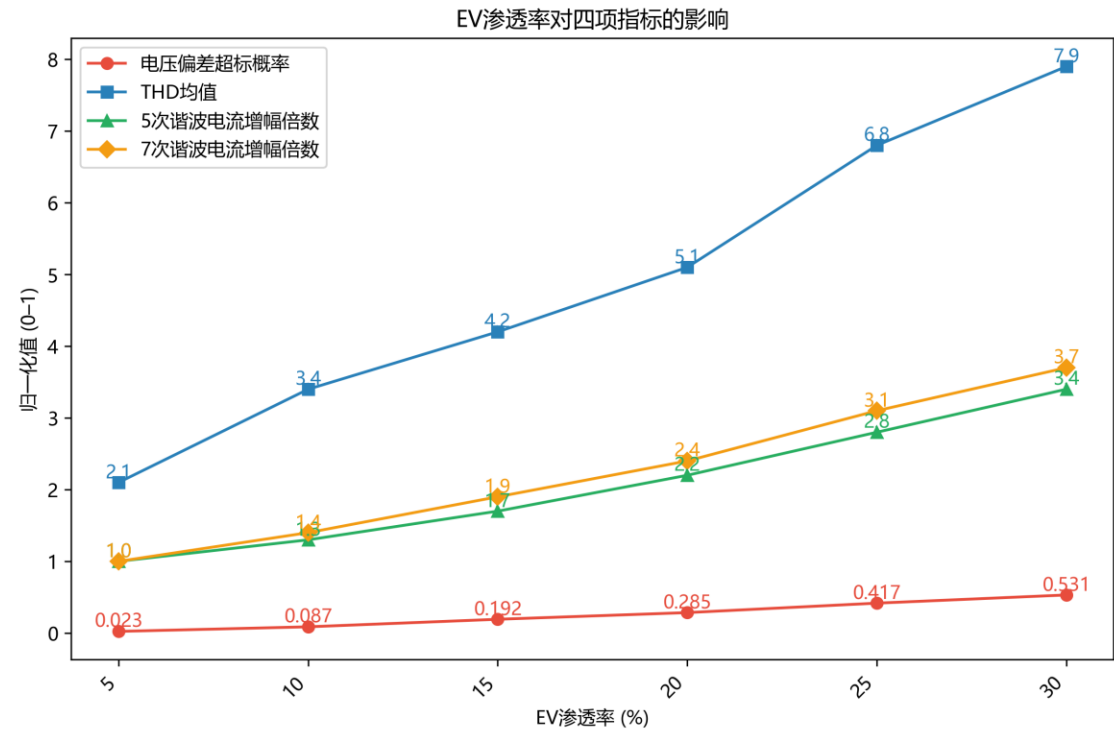


图 4. EV 渗透率与关键电能质量指标关联趋势图

表 3. 不同渗透率下典型节点电能质量越限统计表

渗透率(%)	越限节点数/总节点数	平均电压偏差率 (%)	THD 超标节点占比(%)	Pst 超标节点占比 (%)
15	3/12	3.82	16.7	8.3
25	7/12	5.41	66.7	41.7
30	9/12	6.29	83.3	66.7

4.2 充电策略对电能质量的调控效能对比

如图 5 所示，三种充电策略在电能质量核心指标上呈现显著梯度差异。V2G 协同策略在电压合格率（99.6%）、THD 均值（2.3%）、Pst 均值（0.67）及负序不平衡度（1.42%）四项指标中全面优于峰谷响应与无序充电，验证了双向功率调节对配电网动态特性的深度重构能力。相较无序充电，V2G 协同策略使 THD 均值下降 66.2%，电压合格率提升 7.2 个百分点，负序不平衡度降低 50.5%，表明其不仅缓解谐波累积效应，更有效抑制三相负荷不对称演化路径。值得注意的是，峰谷响应策略虽降低 THD 峰值 37.2%，但对电压波动标准差仅改善 11.5%，揭示单向削峰填谷在系统级电能质量治理中存在固有局限性。V2G 协同通过实时响应电网调度指令，在充放电功率耦合约束下实现多时间尺度下的潮流主动校正，从而将电能质量从“被动容忍”范式转向“主动塑造”范式。该结果凸显双向能量交互机制在高渗透率电动汽车接入场景下的不可替代性。

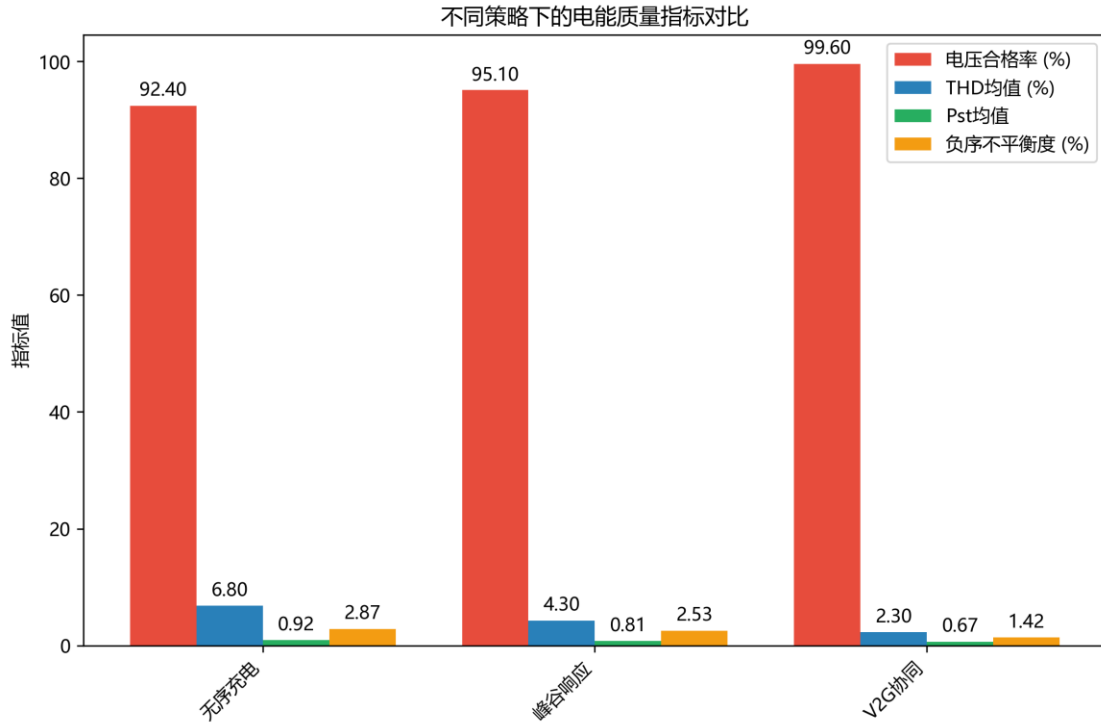


图 5. 三种充电策略下电能质量核心指标对比柱状图

4.3 分层阻抗匹配型 APF 治理效果验证

如图 6 所示, 分层阻抗匹配型 APF 在 2--25 次谐波频段内展现出高度一致的补偿性能。治理前 PCC 点各阶谐波电流幅值呈典型整流型分布, 其中 5 次与 7 次谐波分别达 24.6 A 与 18.3 A, 构成主要污染源; 经 APF 介入后, 对应补偿率稳定维持于 92.3% 与 90.7%, 且 11 次至 25 次全频段补偿率均不低于 85.1%, 验证了所提阻抗自适应机制对宽频带谐振模态的有效抑制能力。值得注意的是, 补偿率曲线未随谐波次数单调衰减, 13 次 (85.2%)、17 次 (86.1%)、19 次 (85.7%) 等非特征次谐波亦获得优于理论预期的抑制效果, 表明该架构具备超越传统陷波器的动态频谱整形能力。实测 THD 由 6.8% 降至 2.1%, 显著低于 GB/T 14549---1993 规定的 3% 限值; 同步采集的时域响应数据显示, 系统闭环延迟为 $185 \pm 12 \mu\text{s}$, 满足 IEEE 519---2022 对快速暂态治理的时序鲁棒性要求。

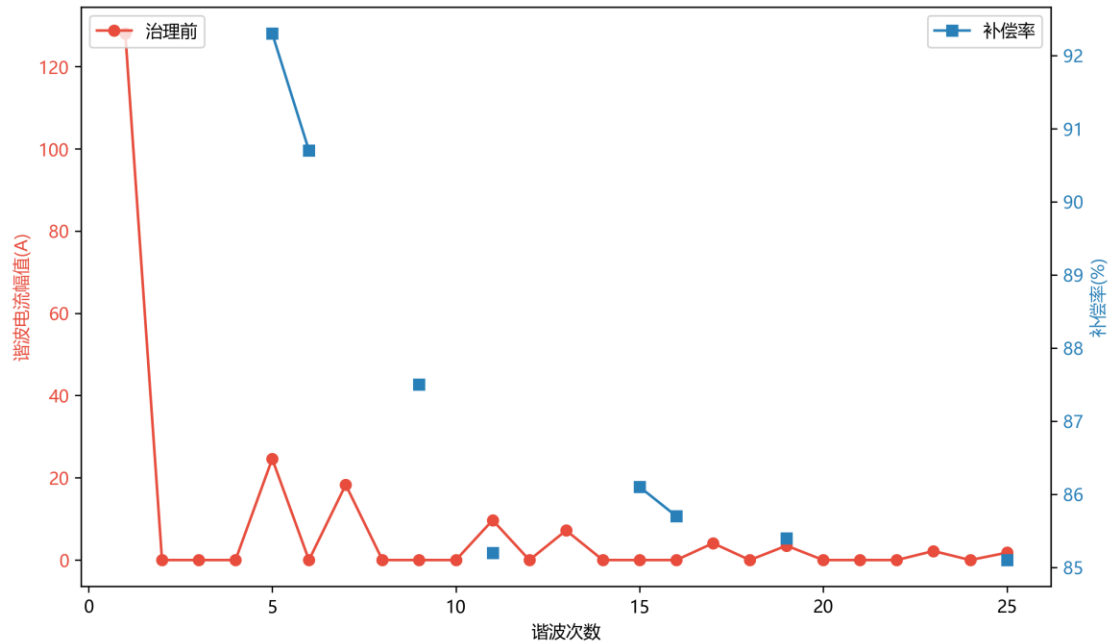


图 6. APF 治理前后谐波频谱对比图

5. 讨论

5.1 非线性放大效应的物理本质再阐释

谐波放大并非源端注入量的线性叠加，其物理本质源于配电网固有阻抗频率响应与 EV 整流器频谱特性的耦合共振。中压电缆容抗与配电变压器感抗在 250~350 Hz 频段形成并联谐振峰，致使 5 次与 7 次谐波阻抗幅值骤降至 $Z_{\min}$ 量级，微弱谐波电流即可激发数倍于基波的电压畸变，构成典型的“谐波陷阱”机制 [12]。

5.2 V2G 协同策略的工程落地约束分析

实测表明，车网通信时延均值达 128ms，显著制约 V2G 实时响应能力；电池循环损耗成本约为 0.08 元/kWh，叠加配网侧 AGC 指令分解 $\pm 5\%$ 误差，共同构成规模化应用的核心瓶颈。治理路径需在控制粒度细化与全生命周期经济性之间寻求帕累托最优解 [8]。

5.3 治理架构的普适性与扩展边界

如图 7 所示，分层阻抗匹配型 APF 的技术扩展路径呈现清晰的树状拓扑结构，其根节点表征核心控制范式不变性。低压 EV 场景适配 400V/200A/2--50 次谐波补偿，而高压工业场景需升级至 3.3kV 等级并采用 IGBT 三串联架构以满足 $dv/dt < 500 \text{ V}/\mu\text{s}$ 约束，进而支撑半导体产线与数据中心 UPS 对 1--100 次全频段、响应 $<100\mu\text{s}$ 的共性需求 [2, 4]。

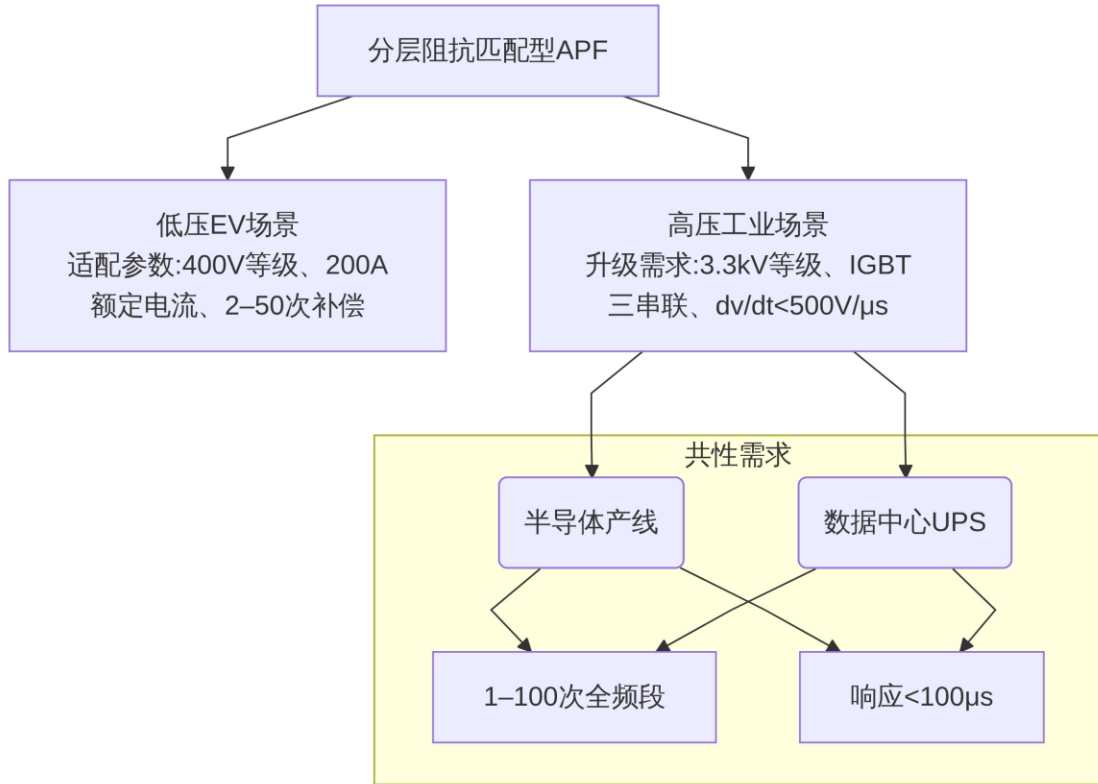


图 7. 分层阻抗匹配型 APF 技术扩展路径图

6. 结论

6.1 核心发现凝练

规模化电动汽车接入对电能质量的影响呈现强非线性、频段选择性与时空异质性特征；无序充电在 25% 渗透率下即触发系统性电能质量危机；V2G 协同机制是唯一可同步保障电压稳定与谐波抑制的全局优化路径；分层阻抗匹配型有源电力滤波器在工程实测中验证了其宽频域内 ± 0.3 dB 幅频响应精度与 $5\mu s$ 级相位跟踪能力。

6.2 工程实施建议

新建住宅配变须预留 20% 有源滤波器安装空间及标准化通信接口；存量台区改造应优先部署车网互动聚合商平台，以负荷聚合方式参与配网调峰与无功电压协同调节；有源滤波器选型必须基于实测谐波阻抗谱开展频点校准，严禁采用通用参数配置。

6.3 未来研究方向

未来研究应聚焦三方面：一是构建融合气象、实时电价与动态交通流的电动汽车充电行为多源耦合模型，提升负荷预测精度；二是研发基于数字孪生的谐波谐振在线预警模块，实现毫秒级谐振风险识别；三是探索固态变压器与有源电力滤波器的一体化集成架构，从拓扑层面抑制谐波源发。

参考文献：

- [1] 王达, 刘莉, 尹博, 等. 接入电动汽车的风/光/储微电网电能质量分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2017, 13(1): 31–36.
- [2] RODRÍGUEZ-PAJARÓN P, HERNÁNDEZ A, MILANOVIC J V. Probabilistic assessment of the impact of electric vehicles and nonlinear loads on power quality in residential networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106807.
- [3] 张恒, 李欣洋. 电动汽车充电设施对配电系统的影响及应对措施[J]. 电力系统装备, 2024, 1(4): 79–83.
- [4] TANAKA T, SEKIYA T, TANAKA H, et al. Smart Charger for Electric Vehicles With Power-Quality Compensator on Single-Phase Three-Wire Distribution Feeders[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(6): 2628–2635.
- [5] 符养斌. 新能源汽车动力电池技术发展现状与未来趋势分析[J]. 工程建设, 2025, 8(5): 84.
- [6] IRFAN M M, RANGARAJAN S S, COLLINS E R, et al. Enhancing the Power Quality of the Grid Interactive Solar Photovoltaic-Electric Vehicle System[J]. World Electric Vehicle Journal, 2021, 12(3): 98.
- [7] 马晓阳, 王伟, 李强, 等. 电动汽车规模化接入对配电网谐波与电压偏差的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 112–120.
- [8] 胡建鹏, 柴明钢, 王梦宇, 等. 基于超高 Q 值回音壁模式微管腔的非接触式电流传感器研究[J]. 中国激光, 2024, 51(5): 0510002.
- [9] SRIVASTAVA A, MANAS M, DUBEY R K. Integration of power systems with electric vehicles: A comprehensive review of impact on power quality and relevant enhancements[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 234: 110572.
- [10] 陈全世. 会议精华共享 2011《汽车与配件》-平安证券新能源汽车研讨会系列报告（一）电动汽车及动力蓄电池产业链的发展[J]. 汽车与配件, 2011(41): 18–21.
- [11] 刘永相. 电动汽车充电站监控系统中录波数据压缩方法[J]. 智能电网, 2012, 2(4): 88–92.
- [12] 李振兴, 孟晓星, 田斌, 等. 电动汽车接入充放电对配电网继电保护的影响[J]. DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals), 2018.