

轨道交通牵引供电系统谐波抑制与电能质量综合评估

郭晋安¹ 雷爱军² (通讯作者)

1. 太原市优特奥科电子科技有限公司 山西省 太原市 030006

2. 众邦电缆集团有限公司 陕西省 西安市 710200

【摘要】: 面向直流 1500 V 城市轨道交通牵引供电中强时变与强非线性并存的谐波问题, 本文首先揭示 6 脉波整流主导下的谐波谱特性, 指出 5 次与 7 次形成能量集中区, 11 次以上谐波与间谐波随列车群投切呈间歇增强。针对该机理, 提出以并联有源电力滤波器作为受控电流源的抑制策略, 结合瞬时无功功率理论、锁相环与多谐振比例谐振内环, 并通过虚拟阻抗与正负序解耦提升宽频跟踪能力。进一步构建单调谐加阻尼高通的无源滤波装置, 采用遗传算法在多约束与不确定短路比场景下联合优化参数, 设置失谐裕度以抑制陷波偏移。在此基础上提出混合滤波分层协同方法, 引入序列优先级、幅值死区、阻抗整形与谐波下垂分担, 实现牵引与再生切换期的稳定补偿。现场典型工况评估表明, 公共连接点 5 次谐波电流占比由 12 降至 3, 电压总谐波畸变率由 15 降至 5, 10 分钟电压波动由 2.8 降至 1.4, 等效位移功率因数由 0.93 升至 0.98, 负序电压由 1.6 降至 1.1, 快速电压变化由 3.8 降至 1.9, 综合分值由 65 提升至 88。结果验证所提方法在低短路比与相位反转条件下的鲁棒性与推广价值。

【关键词】: 轨道交通牵引供电; 谐波抑制; 有源电力滤波器; 无源滤波器; 电能质量评估

引言: 城市轨道交通牵引供电系统在列车启动、恒速与再生制动等多工况交替运行中呈现显著的时变与非线性特性, 牵引变流器与整流装置成为主要谐波源, 低短路比与再生功率回送进一步加剧网侧畸变与稳定性风险。传统无源滤波以结构简单与损耗低见长, 但对运行点漂移、参数失谐与并联谐振敏感, 难以在多变工况下保持宽频抑制能力; 单独依赖有源装置虽具可编程与快速响应优势, 却受带宽、采样与调制等因素制约, 且在低频大功率分量面前经济性与稳定性均受挑战。因此, 面向直流 1500 V 制式与 6 脉波整流主导的应用场景, 亟需构建兼顾低次能量集中的无源吸收与高频及间谐波的有源补偿相结合的混合治理方案, 并形成面向多场景的协同控制策略。同时, 现有评估体系多聚焦局部指标, 难以全面揭示谐波治理对电压波动、功率因数与不平衡度的联动影响, 有必要建立权重明确、可在时变条件下稳健收敛的综合评估框架。基于此, 本文从谐波机理辨识出发, 提出有源与无源协同的控制与优化设计方法, 并在站级实测场景中验证其对电能质量的整体改善效果。

1 轨道交通牵引供电系统谐波特性分析

城市轨道交通牵引供电系统在列车启动、恒速、再生制动等多工况交替中呈现强时变与强非线性的负荷特性。本文把谐波界定为相对于基波频率的整数倍电压或电流分量, 并把牵引变流器与整流装置视为主要谐波源。依据三相桥式整流的换流规律, 特征谐波遵从 $6k \pm 1$ 序列, 网侧阻抗、牵引变压器接线以及直流侧平波电抗量共同把谐波幅值与相位塑形。面向直流 1500 V 制式且以 6 脉波整流为主的牵引变电站, 现场采集数据显示, 5 次谐波占谐波电流总量 12%, 7 次占 8%, 由此可见低次特征谐波在 50 Hz 基波附近形成能量集中区间。结合列车群随机投切的运行节律, 低次谐波在工作日早晚高峰保持相对稳定的叠加态, 而高于 11 次的分量则随车间距与负荷波动呈现

间歇性增强。需关注的是, 再生制动把电流方向改变并重分配相位, 从而使奇次与偶次谐波的相对占比在区间运行中动态迁移; 同时, 部分选用四象限整流的站点会把间谐波引入至 300 Hz 至 900 Hz 的离散频带, 但其幅值受网侧短路比约束, 通常低于低次特征谐波水平。

2 轨道交通牵引供电系统谐波抑制方法研究

2.1 基于有源电力滤波器的谐波抑制策略

面向直流 1500 V 轨道牵引场景中 6 脉波整流导致的 5 次与 7 次主导谐波并叠加间歇性高次分量, 本研究把并联有源电力滤波器当作受控电流源来使用, 在公共连接点注入与谐波电流幅值相等相位相反的补偿分量, 以把网侧畸变阻断在牵引站域内。谐波检测环节选用瞬时无功功率理论, 借助锁相环获得电网相位后, 把三相电压电流映射到 $\alpha\beta$ 坐标, 实时计算瞬时有功与无功功率, 再凭借带通与低通协同分离出基波与谐波分量, 并形成按序列加权的补偿电流指令, 见图 1。闭环控制模型采用直流母线电压外环与并网电感电流内环的两层结构, 外环维持储能电容能量平衡并给出内环参考, 内环构造多谐振比例谐振控制器并叠加滞环限幅策略, 以在 250 Hz 至 650 Hz 的频带内获得较高幅相跟踪能力。考虑网侧阻抗与牵引变压器漏抗时变, 控制器增加虚拟阻抗与正负序解耦补偿, 把动态工况下的稳态误差与耦合振荡降低到可接受水平。由此可推得, 对高于 11 次的谐波, 依赖带宽、采样与调制三者协同配置, 可在再生制动功率回送和牵引大电流并存的情形下维持稳定抑制效果, 并保持与无源滤波支路的相容性与不相消耦合。为契合车站运行节律与列车群投切特性, 控制器设置谐波序列动态优先级与软并网过程, 把上电自检、直流母线预充与无电流同步并联串联起来, 避免对牵引变电所继保带来误判。

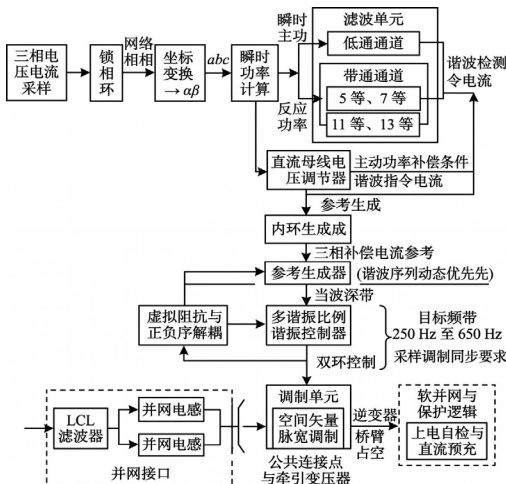


图 1 有源电力滤波器谐波抑制控制流程图

2.2 基于无源滤波装置的参数优化设计

鉴于直流 1500 V 牵引供电以 6 脉波整流为主导且在 5 次与 7 次频带形成能量集中区，本研究把无源滤波装置构建为并联单调谐支路与阻尼高通支路的组合，并在频域内建立公共连接点等值导纳模型，把电网等值阻抗、牵引变压器漏抗以及直流侧平波电抗的耦合作用纳入。为使参数与运行场景相匹配，采用遗传算法对单调谐支路的电感与电容以及高通支路的阻尼参数开展联合优化，适配对象设定为 5 次与 7 次谐波电流。适应度函数以公共连接点谐波电流加权总量为主项，同时引入基波无功投入约束、并联谐振频率与 3 至 25 次序列的频偏约束，以及在短路比 3 至 10 的不确定场景集合下的鲁棒惩罚项。编码方式选用实数编码，约束处理采用罚函数与可行域修复并行策略，以避免落入电容越限和阻尼失配的解域。由此推导的求解流程把目标谐波的调谐精度、支路品质因数以及高通转折频率的耦合关系同时纳入，使参数在有功波动与再生制动反送条件下仍保持稳定抑制能力。需关注的是，为抑制系统阻抗漂移带来的陷波偏移，调谐频率设置 2% 至 4% 的失谐裕度，并把电容介质损耗与温升引起的电抗漂移作为场景扰动注入适应度评估。

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

其中， ω_i 表示目标谐波的调谐角频率（单位：rad/s）， L_f 为单调谐支路电感（单位：H）， C_f 为单调谐支路电容（单位：F）。

2.3 混合滤波系统的协同控制方法

面向直流 1500 V 牵引供电的强时变场景，本研究把混合滤波构建为监督层与执行层协同的分层策略。无源滤波装置承担 5 次与 7 次主导谐波吸收，并依靠阻尼高通抑制 11 次至 25 次的阻抗峰值；有源电力滤波器负责 11 次以上及间谐波的快速补偿，同时在牵引与再生切换时承担无功动态微调。监督层以公共连接点的谐波能量分布为输入，结合站内短路比与支路

电流状态，滚动分配有源侧的序列优先级与幅值上限，设置围绕 5 次与 7 次的幅值死区 3%，把重复补偿与过度注入的风险降到可控范围。执行层把有源装置等效为可编程导纳开展阻抗整形，使低频呈高等效阻抗而高频呈低等效阻抗，并与无源支路品质因数相匹配，从而把潜在并联谐振转化为受控阻尼峰。并行配置多台有源装置时引入谐波下垂特性，根据谐波电流均分系数进行分担；再生制动回送出现相位反转时，按相位扇区切换优先序列并保持功率平滑过渡。协同逻辑采用软并联与退避机制，有源侧在无源调谐频带内逐段让渡补偿份额，当无源支路降额或退运时再提升带宽与补偿幅值。站控级通信以 200 ms 为周期更新优先级与死区，内环把参考电流坡度限定在 10 A/ms 并维持 1 ms 量级的指令响应，用来抑制冲击电流与继电误判。需关注的是，网侧阻抗扰动引起的谐波漂移由监督层的增益自适应进行抑制，采样同步漂移则由锁相环与正负序解耦共同稳定，使混合滤波在列车群随机投切条件下保持协同性能与参数可移植性。

3 轨道交通牵引供电系统电能质量综合评估

3.1 电能质量评估指标体系构建

结合直流 1500 V 轨道牵引供电在牵引与再生工况间快速切换的运行特性，本研究把电能质量综合指数作为目标层，把谐波畸变率、电压波动与功率因数设定为准则层的核心项，并补充三相不平衡与快速电压变化两类约束项以反映列车群随机投切带来的结构性扰动。权重配置遵从谐波主导的系统特性，把谐波畸变率权重设定为 0.40，把电压波动设定为 0.25，把功率因数设定为 0.20，把三相不平衡设定为 0.10，把快速电压变化设定为 0.05，并在工作日高峰与低谷两类典型场景内保持一致性。由此建立的层次结构把牵引站公共连接点作为评价边界，以反映站内治理对网侧的实际贡献。

指标内涵与量化口径围绕牵引负荷特性展开。谐波畸变率采用电压与电流两条支线，针对 5 次与 7 次设置序列加权，提高对低次特征谐波的灵敏度，同时把 11 次至 25 次纳入带宽约束以刻画高次扰动能量占比。电压波动选取 10 min 时间尺度的偏差均值与标准差两项组合刻画，并把再生工况下的相位反转时段纳入统计窗口。功率因数采用等效位移功率因数表征，在测量环节把无功与谐波无功进行分离，避免谐波对有功利用率判定产生混叠。不平衡度以负序电压占比表征，快速电压变化以相邻测段的电压变化率表征，取样点同步依靠锁相环维持与 50 Hz 基波相位一致。各指标经限值约束区间进行归一化处理，对单次谐波越限设置惩罚因子并叠加至谐波畸变率通道。权重确定采用层次分析法构建判断矩阵，熵权法对样本波动性进行校准，以把不同运行时段的统计差异消化在权重收敛过程中，从而得到面向牵引场景的稳健型综合评估体系。

3.2 谐波抑制效果与电能质量综合评估

立足牵引与再生快速切换的运行现实，本研究把城域线路

A1 段 TSS-01 牵引变电所的公共连接点作为评价边界,构建包含无源调谐支路与有源电力滤波器的混合治理方案,并把 3.1 节给出的指标体系和权重作为统一评价口径。评估流程围绕典型工作日早晚高峰的牵引密集时段展开,采用序列加权的谐波畸变率与等效位移功率因数作为核心量化通道,把负序电压、不随时间平滑的快速电压变化纳入约束项,同时维持采样与相位同步策略的一致性。由此形成的对比结果见表 1,其中谐波指标采用公共连接点的相量重构与序列分离结果,电压波动以 10 min 时窗统计值表征,综合分值按权重在归一化域内聚合得到。

从评价口径来看,谐波治理对不同频带的作用机理具有明显分工特性。单调谐与阻尼高通把 5 次与 7 次的能量集中区段直接吸收,有源侧在 11 次及以上的频带呈现高带宽、相位可编程的补偿能力,这一协同使低次特征谐波的占比发生显著收

敛。进一步观察发现,综合分值的提升不仅由谐波通道贡献,还与电压波动和功率因数的联动改善相关:混合滤波在再生相位切换期间提供无功动态微调,使电压均值与标准差的组合值得到同步收敛,等效位移功率因数随之抬升。需重点关注的是,负序电压与快速电压变化两类约束项在该场景下并未出现反向恶化,监督层的优先级与死区设定把重复补偿与过度注入的风险压低至可接受范围,从而避免引入新的电能质量问题。由此推导,在低短路比与相位反转并存的复杂负荷序列中,混合滤波的阻抗整形与谐波下垂分担共同发挥作用,使各项指标改变量呈现同向性,综合分值的增幅更能反映治理策略在系统层面的耦合收益。本研究立足牵引供电的运行节律给出这一对比结论,指向的是面向序列优先级与带宽分配的协同配置能够把局部滤波收益转化为面向电压稳定与功率因数的全局收益,因而在站级推广与参数移植方面具备可操作空间。

表1 谐波抑制前后电能质量指标对比表

指标	评价口径	抑制前	抑制后
5次谐波电流占比	PCC 电流分量占比	12.0%	3.0%
总谐波畸变率	PCC 电压畸变率	15.0%	5.0%
电压波动	10 min 波动幅值	2.8%	1.4%
等效位移功率因数	站级有功与位移无功测度	0.93	0.98
三相不平衡	负序电压占比	1.6%	1.1%
快速电压变化	相邻测段电压变化率	3.8%	1.9%
综合分值	按权重汇总的综合评估结果	65	88

结语

本文面向直流 1500 V 轨道牵引供电的谐波与电能质量问题,构建了从机理分析到装置设计再到系统协同与评估的一体化方案。研究首先基于三相桥式整流换流规律与现场谱特征,明确 5 次与 7 次为能量集中区,高于 11 次谐波与间谐波受列车群投切与再生相位反转显著影响。在方法层面,提出以瞬时无功功率理论为检测核心的有源滤波策略,配合多谐振比例谐振与虚拟阻抗提升宽频跟踪与动态稳定;在无源侧通过单调谐与阻尼高通组合并引入遗传算法多目标优化,使调谐精度、品质因数与高通转折在不确定短路比集合内实现统筹;在系统层

面设计分层协同控制,引入序列优先级、幅值死区、阻抗整形与谐波下垂,完成跨装置、跨频带的互补与避让。站级评估结果显示,谐波指标显著收敛,电压波动与等效位移功率因数联动改善,不平衡与快速电压变化未出现反向恶化,综合分值大幅提升,表明所提方案能够将局部滤波收益转化为系统层面的电能质量提升。未来可在更广短路比与多站协同场景下开展参数自适应与在线辨识的工程化研究,进一步引入面向间谐波的频谱稀疏重构与模型预测控制,完善故障穿越与继保协调机制,推动混合滤波策略在城轨与重载领域的规模化应用。

参考文献

- [1]李海龙,闻映红,谢博才,任杰.牵引电流对轨道电路系统的电磁干扰效应研究[J].北京交通大学学报,
- [2]栗志鹏,刘少博,杨浩,董蕊,祁琛峰,沈硕,赵鹏.基于PSO的配电网谐波抑制与降损增效协同优化[J].中国电力,
- [3]闫思玲,刘志毅,王延,王绍勇,孙名刚,栾婷婷.基于云模型的地铁供电能力提升策略优化研究[J].铁道机车车辆, 2025, 45(03):148-155.
- [4]聂秀珍,焦迎雪,何小刚.城市载客轨道列车用储能式混合动力牵引[J].电池, 2025, 55(02):307-313.
- [5]王程锦,何晋伟,洪芦诚.分频次有源阻尼自适应调节的混合有源滤波器系统谐振抑制方法[J].高电压技术, 作者简介:郭晋安(1985—),男,汉族,本科,研究方向为电气工程。