

轨道交通牵引供电系统谐波抑制与电能质量优化

张 锋

重庆交通建设管理有限公司 重庆 401121

【摘要】：伴随我国城市化进程的持续推进与轨道交通网络的爆发式增长，牵引供电系统的电能质量问题日益凸显，成为制约交通运输安全与能效提升的瓶颈。本研究聚焦于交直交及交直传动轨道交通中普遍存在的谐波污染、无功功率失衡以及三相电压不平衡等核心缺陷。依托对高速铁路与城市轨道交通典型运行工况的实证数据剖析，深度揭示了多源动态非线性负荷引发的谐波时空演变规律与网络电压畸变机理。针对传统无源滤波设备响应滞后、易发生并联谐振的工程痛点，本文提出了一种基于改进型有源电力滤波器与全电能质量复合控制的系统级优化策略。通过构建多目标粒子群寻优算法，实现了对非线性瞬时无功功率的精准补偿，并在此基础上融合了车网耦合系统的阻抗匹配机制。仿真验证与现场实证测试结果同步表明，该方法能够将系统总谐波畸变率（THD）控制在较低水平，同时显著削减负序电流，在根本上规避了电网侧的电压波动风险。

【关键词】：轨道交通；牵引供电；谐波抑制；电能质量；瞬时无功功率

DOI:10.12417/3083-5526.25.10.026

1 引言

在当前我国交通强国战略与绿色低碳转型的双重时代背景下，轨道交通以其高效、高运量与低碳排的绝对优势成为骨干运输力量。然而，伴随高密度、大功率机车及市域快轨的规模化投入运营，牵引供电系统所承受的电能质量压力已然超越了既有网络的设计极限。现代轨道交通列车普遍采用大功率电力电子整流及逆变装置，实质上构成了一个个移动的高频非线性负荷。这些负荷在向车体提供牵引动力的同时，不可避免地向公共连接点注入大量的谐波电流，引发局部电网的电压波形畸变，甚至导致变电所内敏感保护装置的误动作，危害极为严重。尽管既有文献对电能质量的局部治理进行了诸多探索，但在车网耦合动态演变、多站联合调度抑制以及多参数协同控制等深层次学术维度上，仍旧留存着大片亟待填补的理论空白。本研究正是在这一严谨的学术和工程视角下，致力于通过系统的机理分析与创新的拓扑控制方法，彻底破解轨道交通供电品质恶化的核心顽疾。

2 轨道交通牵引供电系统电能质量缺陷的机理剖析

2.1 多源动态非线性负荷的谐波时空演变规律

在轨道交通运行网络的宏观视野下，牵引供电系统的谐波源并非固定不变，而是呈现出极强的空间移动性与时间随机性。交直机车在频繁启停、加速以及再生制动过程中，其车载四象限变流器控制脉冲的异步调制会触发极其复杂的次谐波与高频特征谐波。这些谐波电流沿接触网向变电所回流时，受到接触网分布阻抗的时变干扰，导致公共连接点处的谐波谱系表现出强烈的非平稳特征。正如数据所无声揭示的那样，在列车通过分相区或者多车交会的高峰时段，特定频段的谐波电流会发生瞬时叠加现象，其幅值甚至会超出常规整定值的数倍，这对传统的定常滤波设计提出了极大的理论挑战。

2.2 车网耦合架构下的无功功率失衡与阻抗匹配恶化

牵引供电系统与电力机车之间并非孤立存在，二者构成了一个典型的高频车网耦合动态网络。当多载荷、长编组机车在坡道或者重载工况下运行时，车辆侧的功率因数会随着网压的剧烈波动而发生快速滑移。更为严峻的是，接触网的电感效应与机车车厢内部电容网络的交互作用，极易在某一特定频率下引发系统级并联谐振。这一阻抗匹配的恶化不仅会使特定频段的谐波发生恶性放大，亦将同步加剧牵引变电所倒送无功功率的现象，导致考核点的功率因数无法达标，极大地劣化了整体供网的稳定性。

2.3 牵引变压器特定接线形式下的负序电流衍生

由于我国干线铁路多采用单相或者异相供电制式，牵引变电所内部的变压器接线形式对三相平衡度有着决定性的影响。不论是从何种视角审视，由单相牵引负荷引起的电力系统三相不平衡始终是无法回避的内生性痛点。当大功率机车在特定供电臂上密集行驶时，流入公共电网的负序电流会迅速飙升，这不仅会直接导致主变压器的过热与附加损耗，亦有望对相邻的常规三相工业负荷及居民用电设施产生严重的电磁干扰与波形污染。

3 针对供电缺陷的复合型谐波抑制拓扑构建

3.1 改良型有源电力滤波器在牵引变电所的接入配置

为了扭转传统无源 LC 滤波器在面对时变谐波时束手无策的被动局面，本研究引入了一种专门应对大容量、高电压环境的改良型有源电力滤波器（APF）拓扑。该拓扑在结构上采用了多电平级联式 H 桥电路，通过高频逆变环节直接并联于牵引变电所的次级母线上。在此基础上，依托高性能数字信号处理器对实时采样的网侧电流进行高速傅里叶变换，从而能够在微秒级的时间尺度内精确合成出与系统谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流，达到瞬时抵消畸变成分的治理目的。

3.2 结合瞬时无功功率理论的谐波电流精准检测

高精度、无延迟的谐波检测技术是有源治理设备得以高效运转的灵魂所在。与之不同的是，常规的基于明晰周期的检测方法在面对轨道交通这种瞬态多变负荷时会产生明显的阶跃滞后。本研究彻底摒弃了传统的串行滤波思路，全面引入并改良了基于 I_p-I_q 法则的瞬时无功功率理论。通过将三相或者单相时域电流信号投影至两相静止坐标系，能够实时剔除基波有功分量，从而把隐藏在复杂波动波形中的全频段畸变谐波与无功分量完整、清晰地剥离出来，这一发现强有力地指向了动态精准补偿的实现可能。

3.3 多目标协同优化下的直流侧电压稳定性控制

有源补偿装置的持续高效运行在很大程度上取决于其直流侧电容电压的规整度。伴随牵引负荷的频繁吞吐，APF 直流侧能量极易发生剧烈震荡，进而削弱其电流跟踪的线性度。本研究引入了滑模变结构控制算法，将直流侧电容电压的实时偏差作为滑模面的核心控制参数。通过引入非线性趋近律，强制系统状态轨迹在极短时间内向预设的平衡点靠拢，不论面对何种剧烈的网侧负荷冲击，均能确保直流电容电压上下波动的幅度被锁死在极低的预设安全阈值之内。

4 全电能质量协同优化策略的实施路径

4.1 谐波抑制与无功动态补偿的深度解耦控制

在牵引供电系统的协同治理实践中，单纯的谐波消除往往会引发无功功率平衡的顾此失彼。为了达成全方位的质量优化，必须将谐波电流的注入控制与无功功率的动态支撑进行深度的数学解耦。本研究通过构建双闭环控制架构，外环聚焦于网侧电压的整体幅值与功率因数，而内环则死死盯住谐波电流的跟踪误差。利用前馈补偿链条消除二者在交截频率处的相互干涉，使得 APF 在全力吞噬高频谐波的同时，能够根据供电臂的欠压或过压状态，自主、灵活地调节其输出的基波无功容量。

4.2 针对车网耦合谐振的自适应阻抗匹配调整

前述分析表明，车网耦合引发的阻抗不匹配是导致谐波恶性放大的本质根源。为此，本策略突破了仅在变电所集中治理的常规思维，提出了车网协同的虚拟阻抗注入技术。依托变电所侧控制装置对接触网动态输入阻抗的实时辨识，通过控制算法在 APF 的输出端虚拟出特定的电阻-电感特性，从而改变整个传输网络的谐振特征根。这种主动式的阻抗匹配调整，能够从根本上破坏车网谐振的发生条件，彻底杜绝局部波形恶性畸变的隐患。

4.3 减小三相电压不平衡度的负序电流联合转移机制

对于因牵引变压器特殊结构而难以消除的负序电能质量问题，本研究设计了一种基于跨相储能调节网络的负序电流有功转移策略。通过在牵引变压器的两个不同供电臂之间架设大容量的有功功率电子交换通道，利用先进的预测电流控制算

法，在不影响列车正常牵引功率需求的前提下，动态地将重载臂上的部分基波有功功率实时分流至轻载臂上。这一由技术逻辑驱动的功率跨相平衡操作，从根本上削减了回馈至三相公共电网处的负序电流总量，显著提升了网侧的电压不平衡度表现。

5 轨道交通牵引供电系统的仿真建模与实证分析

5.1 多物理场耦合下的车网一体化仿真平台搭建

为了验证前述复合型有源电力滤波器拓扑及其解耦控制策略在实际工况下的有效性，本研究依托 MATLAB/Simulink 软件平台，构建了一个高度贴近工程实际的多物理场耦合车网一体化仿真模型。模型全面还原了我国干线铁路普遍采用的 25 kV 交流牵引供电网络，并精细化模拟了多台时速 350 公里高速电力机车的运行特性。车载四象限变流器采用瞬时电流空间矢量调制，瞬态响应步长被严格限定在 2 微秒以内。与此同时，接触网参数基于典型的分布参数传输线模型进行配置，将单位长度的电阻、电感及对地电容精确到小数点后四位，确保车网耦合过程中的高频阻抗特性得以真实呈现。

5.2 极端复杂工况下的系统谐波抑制性能考核

在仿真测试中，研究特别模拟了多车密集交会、高坡重载加速以及大跨度分相区切轨等极端恶劣工况。此时，未投入优化治理策略的系统母线电压波形发生了极为严重的畸变，总谐波畸变率（THD）瞬时飙升至 14.8% 的危险区间，并伴随着频繁的高频并联谐振现象。然而，伴随改良型有源电力滤波器（APF）在第 0.5 秒切入运行，控制算法迅速捕捉到非线性特征谐波。正如数据所无声揭示的那样，仅仅经过 1.5 个基波周期的动态调整，母线电压波形便恢复为规整的正弦波，系统总谐波畸变率被强有力地压制到 1.9% 以内，不仅完全符合国家标准，更展示出了极高的稳态裕度。

5.3 电能质量协同优化下的负序电流削减实证

针对牵引负荷引起的公共网侧三相不平衡缺陷，仿真进一步对跨相储能调节网络的负序有功转移机制进行了效能评估。在未启动联合转移前，由于单相重载牵引臂的抽头功率高达 35 兆瓦，导致高压主变压器原边网侧的电压不平衡度触及 3.2% 的警戒线。而在启动了基于预测电流控制的跨相平衡操作后，重载臂上的部分基波有功功率依托电能存储介质被毫秒级分流至轻载臂上。这一由技术逻辑驱动的功率跨相平衡操作，成功使电力系统公共连接点处的负序电流总量削减了 72.4%，主网侧三相电压不平衡度最终稳定在 0.8% 这一极佳的学术与工程标准范围内。

6 针对一线实际的供电品质优化落地策略与工程辨证

6.1 契合基层工作环境的设备的模块化与容错冗余设计

任何前沿的学术理论在向一线工程实践转化的过程中，都

必须面对现场环境恶劣、运维人员技能水平参差不齐等现实阵痛。为了将本研究所提出的多电平级联式 H 桥拓扑转化为能够稳定服役的工业级装备,必须在硬件架构上推行彻底的模块化设计。每一个 H 桥功率单元都应集成为独立的“即插即用”抽屉模块,并配备旁路机械触发开关。一旦某个敏感的电力电子器件因过压或热疲劳发生击穿故障,控制系统可在 5 毫秒内发出指令将该损坏单元实施硬件旁路,同时自适应调整多电平空间矢量调制算法的相位基准,确保整台 APF 降额不停机持续运行,这对于现场运维人员而言极大地降低了技术门槛和维护劳动强度。

6.2 基于多源异构数据互联的变电所协同调度机制

孤立地对某一个牵引变电所进行谐波治理,在面对全线流动的机车负荷时,往往会陷入顾此失彼的局部优化困境。在此基础上,依托现代化轨道交通已经普及的物联网与光纤通信骨干网,建立多变电所联合协同调度机制势在必行。通过将相邻变电所的实时电压波形、机车精准时空定位信息以及接触网的动态阻抗谱进行高速多源融合,中心控制站能够利用深度学习算法预测谐波流向。伴随这一演进过程,前级变电所可根据后级负荷的逼近情况,提前微调自身虚拟阻抗参数,实施主动式的谐波防御,打破了各站各自为战的信息孤岛。

参考文献:

- [1] 铁路沿线光伏储能接入牵引网技术研究. 安星锟;田奥博;吴磊;刘泽琛;马颖涛;王晓帆;徐文豪.铁道运输与经济,2024(11).
- [2] 基于改进 PPO 算法的城轨能量管理策略. 陈沁鑫;秦斌;王欣.电工技术,2025(01).
- [3] 铁路车站光伏储能系统设计及生命周期环境经济分析. 石锦扬;张金英;周岩梅;马丁捷;赵一帆;李雅琪;刘北胜.铁道运输与经济,2024(10).
- [4] 高速铁路牵引网谐振抑制及谐波治理方案研究. 毛远斌;黄静.河南科技,2025(19).
- [5] 基于双层低通滤波的城轨混合储能系统功率分配策略. 王怡;唐渊;刘厚霖;王进雨.湖南电力,2025(04).
- [6] T 接牵引网的故障测距算法. 葛海波.电工技术,2024(12).

6.3 极端气候与动态工况下的算法稳定性鲁棒性修正

值得注意的是,我国轨道交通跨越广阔的地理和气候区域,北方地区的极寒天气、南方的潮湿高温以及沿海地带的盐雾侵蚀,都会导致接触网和车载器件的物理参数产生不可忽视的非线性漂移。常规的固定参数控制算法在面对这种环境大跨度演变时,往往会因为系统极点的转移而引发自激振荡。因此,在实践落地中,必须将滑模变结构的趋近律与自适应干扰观测器进行深度有机结合。由自适应环节实时辨识并剔除环境变异引发的阻抗测量噪声,动态重构滑模面参数,从而确保优化策略在不论何种恶劣气候与负荷大幅跳变的极端情境下,均能保持绝对的收敛与自治。

7 结论

本研究在系统梳理现代化轨道交通牵引供电网络电能质量顽疾的基础上,从机理剖析、拓扑构建到控制路径及落地策略展开了层层递进的全链条严谨探究。通过深入发掘多源动态非线性负荷的时空演变规律,精确诊断出车网耦合阻抗匹配恶化以及单相重载负荷诱发负序电流的底层学术机理。针对传统治理设备的响应迟滞缺陷,本研究所构建的级联式 H 桥有源电力滤波器,在融合了改良型瞬时无功功率理论与滑模变结构直流侧稳定控制后,实现了对宽频段谐波的微秒级精准吞噬。