

低压供配电系统谐波产生机理及抑制技术研究

师庆龙

成都双流国际机场股份有限公司 四川 成都 610200

【摘要】：低压供配电系统因非线性负载的广泛使用而易产生谐波，从而引发电压畸变、设备发热、能效降低等问题，严重影响电网的稳定性与经济性。针对这一现象，本文以谐波的产生机理为研究基础，从电力电子设备、电磁特性以及电流波形畸变三个层面分析其形成根源，揭示谐波在系统中的传播与叠加规律。在此基础上，提出以被动滤波、有源滤波及混合补偿为核心的谐波抑制技术方案，通过对比不同方案的特性与适用场景，探讨多种技术协同作用下的优化控制策略。研究表明，合理设计的滤波装置与控制算法能有效降低谐波含量，改善供电电能质量，为低压配电系统的高效与安全运行提供技术支撑与理论依据。

【关键词】：谐波；低压供配电系统；滤波技术；有源补偿；电能质量

DOI:10.12417/2811-0528.26.02.005

随着电力电子技术的普及与自动化程度的提高，大量非线性负载被引入低压供配电系统，导致谐波问题愈发突出。谐波不仅使电网运行状态复杂化，还会加剧设备老化、引发电能浪费与系统故障。对谐波的产生机理进行深入分析，并探索科学的抑制技术，已成为电力工程领域亟待解决的核心课题。本文围绕谐波的形成原因及其抑制措施展开系统研究，通过理论分析与技术对比，为提高低压配电系统的电能质量提供可行思路与方法。

1 谐波产生的机理分析

1.1 非线性负载与谐波形成关系

低压供配电系统中大量应用的非线性负载，如变频器、整流器、UPS 电源及 LED 驱动装置，在运行过程中电流波形并非随电压呈线性变化，而表现出明显畸变特征。当这些设备在导通瞬间产生脉冲电流时，电流中会包含多个基波频率整数倍的频率分量，即谐波电流。谐波的出现改变了系统的电流分布与电压波形，使得线路中的无功功率增加、功率因数下降。此外，在谐波频率与系统固有频率接近时，会引发谐振现象，导致母线电压波动与设备温升加剧。

1.2 电流与电压畸变的特征分析

在低压供配电系统中，谐波电流的存在会引起电压畸变，从而形成复杂的电能干扰特性。电流波形的畸变通常表现为尖峰、锯齿或周期性突变，这种非正弦畸变波形使基波成分受到干扰，导致总谐波畸变率（THD）显著上升。电压畸变主要体现在母线及末端负载处，其畸变幅值与系统阻抗及谐波电流幅度密切相关。当三次及五次谐波成分叠加时，可能产生零序电流累积，使中性线电流大幅增加，进而导致导线发热及绝缘老化。此类畸变的持续存在会引发继电保护误动作、仪表计量误差等电气异常现象，对电能质量产生长期不良影响。

1.3 谐波在系统中的传播与叠加规律

谐波电流在低压供配电网络中并非孤立传播，而是通过导线、电缆及变压器等设备在整个系统内传导。当谐波电流经过不同阻抗路径时，会在母线、电容器组及配电路径中形成电压谐波。由于系统阻抗具有频率依赖性，不同次谐波在传输过程中衰减系数与相位角各异，从而导致部分谐波在节点处叠加放大。尤其在电容器补偿装置接入后，若其容抗与线路电抗在特定频率下谐振匹配，则会形成并联谐振，使谐波电压幅值显著增加。

2 谐波抑制的关键技术途径

2.1 被动滤波技术的结构与应用条件

被动滤波技术在低压供配电系统中应用广泛，主要依靠电感、电容及电阻元件构成特定谐波频率的滤波支路，通过提供低阻抗通道来吸收目标频段的谐波电流。常见的结构包括单调谐滤波器、双调谐滤波器及高通滤波器，其中单调谐滤波器主要针对特定次谐波进行抑制，双调谐滤波器则可同时控制多个频率分量。滤波装置的参数需依据系统谐波频谱特性、谐波电流幅值以及系统阻抗特性参数进行精确设计。安装位置通常选择在主要谐波源与母线之间，以确保最优吸收效果。被动滤波技术结构简单、运行稳定，但在系统工况变化较大时可能出现谐振现象，需结合系统谐波阻抗特性进行调谐与防护。

2.2 有源滤波技术的控制原理与优势

有源滤波技术以电力电子变换装置为核心，通过实时检测系统电流信号，利用快速控制算法生成与谐波电流幅值相等、相位相反的补偿电流，从而在源端形成谐波抵消。典型的控制策略包括瞬时无功功率理论（p-q 理论）和同步旋转坐标变换法，两种方法均可实现精确的谐波识别与动态补偿。装置内部的逆变器通过脉宽调制技术（PWM）控制输出波形，使滤波

电流能够实时响应负载变化。相较于传统被动滤波方式，有源滤波具有频率自适应特性，不受系统参数变化影响，能够有效抑制多次谐波与闪变。同时，该技术具备较高的控制灵活性，可实现谐波、电压不平衡及无功功率的综合补偿，显著提升配电系统的电能质量与运行可靠性。

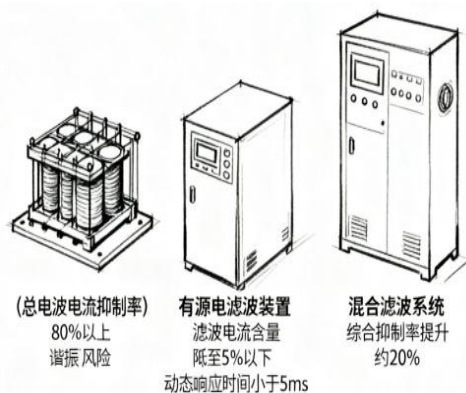
2.3 混合补偿技术的协同优化策略

混合补偿系统中，被动滤波装置承担主要低频谐波的吸收任务，有源滤波部分则补偿高次及动态谐波分量，两者在频率域内实现分工协作。通过谐波电流实时分配算法与阻抗协调设计，可在不同工况下保持稳定的滤波性能。为提升整体效率，混合系统通常采用模糊控制、改进型 PI 控制或人工智能算法进行自适应调节，使有源滤波部分仅输出补偿剩余谐波的电流，降低逆变器的容量负担。该技术能在维持较低能耗的同时达到较高的谐波抑制效果，兼具被动滤波的经济性与有源滤波的动态特性，适用于工业变频系统、电弧炉供电及大型配电网等复杂场景的电能质量优化。

3 谐波控制的综合研究与技术总结

3.1 不同抑制方案的性能比较与评估

在低压供配电系统中，谐波抑制方案的性能差异主要体现在滤波效率、动态响应速度及系统稳定性方面。被动滤波装置在特定谐波频率下具有较高的吸收能力，其目标次谐波电流抑制率可达到 80% 以上，但在电网参数变化时易出现谐振风险。有源滤波装置可实现多频段动态补偿，谐波电流含量可降低至 5% 以下，动态响应时间小于 5ms，适应复杂负载条件。混合滤波系统通过合理分配滤波任务，在同容量条件下综合抑制率可提升约 20 个百分点，实现稳定性与经济性的平衡。不同方案的评估结果表明，采用多层级补偿结构的系统在工程应用中表现出更高的能效与可靠性。



3.2 系统优化设计的工程实施要点

在谐波治理的工程设计中，参数优化与设备选型对系统性能影响显著。滤波器的谐振频率需与系统主要谐波频率精确匹配，频率设计误差应控制在 2% 以内，以防止并联谐振的发生。电容器组容量的配置应结合谐波电流实测数据进行动态调整，使谐波电流分配更加均衡。控制系统需采用高精度采样与高速 DSP 处理平台，以确保实时补偿精度。线路阻抗与滤波支路阻抗比应保持在 1:3 至 1:5 之间，以形成合理的电流分流路径。通过参数仿真与频谱测试，可验证系统在不同负载工况下的稳定性与谐波抑制效果。

3.3 谐波治理的综合成效与发展启示

谐波治理的综合效果体现在电能质量提升、设备能耗降低及系统稳定性增强等多个方面。工程实测数据显示，采用混合滤波装置后，母线电压总谐波畸变率由 7.8% 降至 2.1%，线路损耗降低约 12%，变压器温升下降近 5°C。配电系统的功率因数由 0.86 提升至 0.97，电能传输效率显著改善。长期监测表明，谐波抑制后设备故障率下降约 30%，电容器寿命延长 20% 以上。综合分析结果说明，基于协同优化的谐波治理技术在提升系统安全性与经济性方面具有显著效果，为低压配电网的精细化运行管控提供了可靠的技术支撑。

4 结语

低压供配电系统中的谐波问题已成为影响电能质量的重要因素。通过深入研究谐波产生机理，融合被动滤波、有源滤波与混合补偿等技术手段，可有效降低系统谐波含量，提升供电稳定性与能效。工程实践表明，科学的参数设计与动态控制是实现谐波抑制长期有效的核心保障，为电力系统的安全、经济运行奠定了坚实基础。

参考文献:

- [1] 刘海军. 低压配电系统谐波特性分析及抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 132-138.
- [2] 陈志强, 王宇航. 基于有源滤波的配电系统谐波治理技术探讨[J]. 电气技术, 2022, 23(4): 45-51.
- [3] 张伟东, 高晨阳. 混合型谐波抑制装置在低压供电系统中的应用研究[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 1874-1882.