电气设备谐波抑制方案设计与治理技术研究

李贺海　郭晓蒙　王怀令

机械工业第六设计研究院有限公司　河南　郑州　450000

摘　要：电气设备谐波为基波整数倍频率的正弦分量，由非线性负载产生，以各次谐波含有率和总谐波畸变率作为主要表征参数，不同电压等级对应不同限值。谐波抑制方案遵循综合性、经济性和可靠性原则，采用源侧、网侧及敏感负荷侧分层抑制架构，通过参数匹配与多场景适配实现优化。主流治理技术包括无源滤波、有源滤波、混合型及设备本体优化。各类技术在滤波效能、运行能耗和工况适应性上各具特点，需结合实际条件综合权衡选用。

关键词：电气设备；谐波抑制；混合型滤波；设备本体优化

引言：电力系统中电气设备谐波问题日益突出，其产生机理与非线性负载运行特性密切相关。谐波畸变不仅增加设备附加损耗，还影响电能质量水平。为此，需从系统层面制定综合抑制方案，明确设计原则与整体架构，并合理选用无源滤波、有源滤波、混合型或设备本体优化等治理技术。不同治理技术在滤波效能、运行能耗及工况适应性上各有差异，应结合实际条件综合权衡。本文围绕上述基础理论、抑制设计、技术性能及适配性展开系统梳理，有助于谐波治理方案的科学制定与工程实施。

1 电气设备谐波基础理论分析

1.1 谐波基本定义与分类

在电力系统中，谐波是指周期性非正弦电气量中频率为基波频率整数倍的正弦波分量。基波频率通常为工频 50 赫兹或 60 赫兹。对非正弦周期信号进行傅里叶级数分解后，除了基波分量之外，其余频率高于基波且为基波整数倍的分量即为谐波。从分类角度来看，谐波可按不同维度进行划分。按频率与基波的关系，可分为整数次谐波和间谐波，间谐波是指频率不为基波整数倍的其他频率分量。按谐波次数可分为奇次谐波与偶次谐波，奇次谐波在电力系统中更为常见。按波动特性还可分为准稳态谐波、波动谐波和快速变化谐波等类型。

1.2 电气系统谐波产生机理

电气系统中谐波产生的根本原因在于非线性负载的存在。当正弦电压施加于线性负载时，负载电流保持与电压相同的正弦波形，不产生谐波；而当正弦电压施加于非线性负载时，负载的阻抗特性随电压瞬时值变化，导致电流波形发生畸变，不再保持正弦形态。这种非线性特性使得电流中含有基波频率整数倍的分量，即谐波电流。电力电子装置是当前最主要的谐波源，包括各类交直流变流装置、变频器、整流器以及双向晶闸管可控开关设备等[1]。这些设备在开关过程中以脉冲方式从电网吸取电流，而非连续平滑的波形，从而向电网注入大量谐波成分。电弧炉、电焊机等工业设备以及部分新型照明负载也是重要的谐波产生来源。

1.3 谐波主要特性与表征参数

谐波的核心特性表现为电压和电流波形相对于理想正弦波形的畸变。这种畸变会使电气设备承受额外的损耗与发热，影响电力系统的安全经济运行。表征谐波水平的关键参数主要有两类。一是各次谐波含有率，表示某一次谐波分量有效值与基波分量有效值之比。二是总谐波畸变率，即所有谐波分量有效值的方均根值与基波分量有效值之比。国际标准对不同电压等级下的总谐波畸变率作出了明确限定，电压不超过 1 千伏的系统限值为 8.0%，1 千伏至 69 千伏系统为 5.0%，69 千伏至 161 千伏系统为 2.5%，161 千伏以上系统为 1.5%。电流总谐波畸变率一般要求控制在 5%以下。这些参数共同构成了评估电能质量和谐波危害程度的量化指标体系。

2 电气设备谐波抑制总体方案设计

2.1 谐波抑制方案设计原则与设计思路

谐波抑制方案的设计需要从系统整体角度出发，遵循综合性、经济性和可靠性的基本原则。综合性是指方案必须兼顾不同电压等级和不同容量设备之间的协调配合，避免单点治理而其他部位谐波放大的情况。经济性要求在设计过程中权衡设备投入成本与治理效果之间的关系，选取性价比合理的抑制策略。可靠性则强调抑制装置本身不能成为新的故障点，其运行不得影响主设备的正常工作状态。在设计思路上，应首先开展系统谐波

分布调查，明确各次谐波的来源和传播路径，再结合系统短路容量和背景谐波水平，确定整体治理方向。方案制定还需考虑系统未来负荷增长和运行方式变化的可能性，预留适当的调节裕度。

2.2 针对性谐波抑制整体架构设计

整体架构设计是指在明确设计思路的前提下，构建覆盖谐波源侧、电网侧和敏感负荷侧的立体化抑制体系。在谐波源侧，应优先从源头降低谐波发射水平，对各类非线性设备的接入方式和运行参数进行合理限定。在电网侧，需根据系统阻抗特性和谐波分布特征，在关键节点设置相应的滤波或补偿装置，有效阻断谐波电流在电网中的扩散[2]。在敏感负荷侧，则应采取隔离或保护措施，确保关键设备端口的电压畸变率维持在允许范围内。这种分层架构的优势在于各层级之间相互支撑、互为补充，即使某一层级的抑制措施受到条件限制，其他层级仍能发挥一定的治理作用。各层级装置的控制策略也应协同一致，避免产生谐振或无功倒送等次生问题。

2.3 抑制方案参数匹配与优化配置

参数匹配与优化配置是将设计方案转化为工程实施的关键环节，其核心在于使各抑制装置的电气参数与实际系统条件精确适配。滤波支路的调谐频率需要根据系统中占比较大的特征谐波次数来确定，同时考虑电网频率的日常波动范围，避免因频率偏差导致滤波效果显著下降。无功功率补偿容量则需结合负载的自然功率因数和目标功率因数进行核算，确保补偿后系统功率因数达到 0.90 以上，同时不出现过补或欠补的现象。优化配置方面，可采用系统化的分析方法，在多组滤波支路之间合理分配补偿容量和调谐点，使得各次谐波均能得到有效衰减。对于系统的阻抗特性变化，参数配置还需保证各滤波支路不落入谐振区域，从而保证整个运行区间内的安全性和抑制效果。

2.4 多场景谐波抑制方案适配设计

电力系统的运行状态和负荷构成在不同时段、不同工况下存在显著差异，谐波抑制方案必须具备针对多场景的适配能力。在轻载工况下，系统阻抗和谐波水平相对较低，此时应优先保证无功功率的合理平衡，避免抑制设备自身产生过多的空载损耗。在重载或满负荷工况下，非线性设备出力增大，谐波电流排放量随之上升，抑制方案需相应提升滤波容量和响应速度，确保总谐波畸变率始终满足运行要求[3]。在故障或暂态扰动场景中，系统电压和频率可能出现短时偏移，抑制装置的控制逻辑应具备快速响应和自动退出或切换的功能。适配设计还应考虑系统的运行方式调整，例如线路切换或机组启停等情况，通过灵活的投切组合和控制参数调整，使抑制方案在多场景中均能保持较为理想的治理性能。

3 主流电气谐波治理关键技术研究

3.1 无源滤波谐波治理技术

无源滤波技术是较早应用于谐波治理的传统手段，其基本原理是利用电感、电容和电阻元件构成特定频率的谐振回路，为谐波电流提供低阻抗通道，从而将相应频率的谐波分量从系统中分流并滤除。无源滤波装置的结构形式相对简单，通常由滤波电容器、滤波电抗器和电阻器按一定方式组合而成。该技术的主要优点在于设备造价较低，运行维护工作量不大，且在滤除谐波的同时能够补偿部分无功功率，提高系统功率因数。其局限性也较为明显，滤波效果受系统阻抗参数变化的影响较大，当电网频率发生波动或系统运行方式改变时，滤波特性会出现偏移，导致谐波滤除效率下降。此外，无源滤波器与系统阻抗之间在某些频率下可能产生并联谐振或串联谐振，反而造成特定次谐波电流放大，给设备安全运行带来不利影响。

3.2 有源滤波谐波治理技术

有源滤波技术是近年来发展较为迅速的一种谐波治理手段，其工作原理基于实时检测补偿对象的电压或电流信号，通过信号处理提取出谐波分量，再由逆变器产生与检测到的谐波幅值相等、相位相反的补偿电流注入电网，从而抵消原有谐波成分。与无源方案相比，有源滤波技术具有更好的动态响应特性，能够跟踪谐波幅值和频率的实时变化，对系统的阻抗变化和运行方式调整适应性更强[4]。一台有源滤波器可同时对多次谐波进行补偿，不受谐波次数的限制，避免了与系统发生谐振的风险。其不足之处在于设备成本较高，功率损耗相对较大，补偿容量受功率开关器件耐压和通流能力的制约。目前有源滤波装置的开关频率通常达到数千赫兹，动态响应时间可控制在数十毫秒以内，单机补偿容量已能覆盖百安培级别的电流需求。

3.3 混合型谐波治理技术

混合型谐波治理技术是在单一无源滤波或有源滤波基础上发展而来的复合型方案，其核心思路是将无源滤波装置和有源滤波装置按一定方式组合连接，使两者协同工作，扬长避短。在该方案中，无源部分承担大部分谐波滤除任务和无功补偿功能，降低有源部分所需的容量等级，从而减少总体设备投资和运行损耗；有源部分则负责对残余谐波进行精细补偿，同时抑制无源部分可

能出现的谐振现象。这种结构既可发挥无源滤波器大容量、低成本的优势，又能借助有源滤波器的快速精确补偿能力弥补无源方案动态响应不足的缺陷。混合型方案在容量配置上具有较高的灵活性，无源支路的调谐点可根据系统主导谐波特征设定，有源部分的容量可按系统剩余谐波水平配置，兼顾了治理效果和工程经济性两个方面的要求。

3.4 设备本体优化抑波技术

设备本体优化抑波技术是从谐波源自身出发，在非线性设备的设计和制造环节采取措施，降低其谐波电流发射水平，从源头上减少注入系统的谐波量。对于整流类设备，可通过增加整流脉冲数来改善输入电流波形，在相同功率条件下，脉冲数越高，输入电流中包含的特征谐波次数也越高且幅值相对越小。对于变频调速装置，可在控制策略中采用特定消谐脉宽调制或空间矢量调制方法，使输出电压和电流的谐波含量得到有效控制[5]。对于开关电源类设备，通过优化功率因数校正环节的设计，可以显著降低电流波形的畸变程度，使功率因数接近 1.0 的同时谐波电流大幅下降。这类技术的优势在于治理环节前置，不必依赖后续加装滤波装置，减少了系统级治理的负担，且不影响电网侧的整体阻抗特性。

4 各类谐波治理技术性能对比与适配性分析

4.1 不同治理技术滤波效果对比

在滤波效果方面，各类治理技术表现出明显差异。无源滤波技术对特定调谐频率的谐波具有较低的阻抗通道，因此对固定次数的谐波滤除率较高，通常可达到 70%至 80%的水平，但对于非调谐频率的谐波以及电网频率波动情况下的谐波成分，其滤波效能会显著下降。有源滤波技术由于采用实时检测和动态补偿的工作机制，对多次谐波均能实现有效抑制，总谐波畸变率的校正幅度一般可达到 90%以上，且不受系统阻抗参数变化的影响。混合型技术结合了两者的特点，由无源部分承担基波频率附近的滤波任务，有源部分对残余高次谐波进行补充治理，整体滤波效果较为均衡。设备本体优化技术是通过减少谐波源的发生量来降低治理压力，其抑波效果受设备自身结构和控制精度的限制，一般能使谐波电流发射水平下降 40%至 60%。

4.2 不同工况下治理技术适配性分析

各种谐波治理技术在不同运行工况下的适用性各有侧重。在负荷波动较小且特征谐波稳定的系统中，无源滤波技术能够发挥较高的性价比，其调谐频率与系统主导谐波匹配程度较好时，治理效果持续可靠。在负荷快速变化、谐波频谱分布较宽的场合，有源滤波技术的动态响应优势得以充分体现，能够在数毫秒内跟踪谐波变化并输出相应补偿电流。混合型技术适用于既有较大容量的准稳态谐波、又存在部分波动性谐波的复杂工况，通过无源和有源的容量合理分配来实现综合适配。设备本体优化技术适合在新建设备选型阶段或设备改造条件受限的场合优先应用，从设备层面降低谐波发生量，再配合适当的系统级治理，可以形成较为完善的整体解决方案。

结束语：谐波治理需立足基础理论分析，明确非线性负载产生机理及关键表征参数。抑制方案设计应遵循综合性、经济性与可靠性原则，构建分层整体架构，注重参数匹配及多场景适配。无源滤波、有源滤波、混合型及本体优化等技术各有适用条件，实际工程中需依据滤波效能、运行能耗及工况条件综合权衡，择优选用或合理组合，实现治理效果与经济投入之间的协调。随着电力电子装备应用日益广泛，谐波治理技术持续优化仍是电能质量保障的重要方向。

参考文献

[1] 魏铮. 新能源场站 35kV SVG 设备谐波抑制能力现场试验方案设计与验证 [J]. 大众科学,2026,47(1):22-24.

[2] 张迪, 王赫, 吕应刚. 考虑电磁干扰的海洋石油钻井平台电气设备谐波抑制方法研究 [J]. 电器工业,2026,(1):115-119.

[3] 汤瑞. 燃机电厂电气设备的谐波分析与抑制方法 [J]. 科学界,2026,6(5):72-74.

[4] 金键, 袁景钰. 大型石油化工装置变电所中低压柜配电系统的谐波抑制设计与治理技术研究 [J/OL]. 中国科技期刊数据库工业 A,2026,(2):059-063.

[5] 邓升阳. 电气系统谐波抑制及无功补偿技术应用研究 [J/OL]. 中国科技期刊数据库工业 C,2026,(5):009-012.