

企业供配电系统谐波治理与电能质量提升技术应用

颜 飞

葫芦岛锌业股份有限公司 辽宁 葫芦岛 125003

摘要：本文首先深入剖析了企业供配电系统中谐波产生的机理、主要来源及其对系统造成的多维度危害；其次，系统梳理并对比分析了当前主流的谐波治理与电能质量提升技术，包括无源滤波器（PF）、有源滤波器（APF）、混合滤波器（HAPF）以及静止无功发生器（SVG）等，并探讨了其适用场景与技术特点；再次，阐述了从谐波检测、评估到治理方案设计与实践的完整技术路线；最后，对谐波治理与电能质量提升技术的未来发展趋势进行了展望，旨在为企业构建绿色、高效、可靠的现代化供配电系统提供理论参考与实践指导。

关键词：企业供配电系统；谐波治理；电能质量；有源滤波器；无源滤波器

引言

电能是现代社会的二次能源，其质量关乎国民经济与人民生活。对工业企业来说，稳定优质电能是保障生产、制造和设备安全的核心。但“双碳”目标下，高效、智能化设备大规模接入企业电网，让正弦交流电被“污染”，出现复杂非正弦波形，偏离理想正弦波的畸变现象即谐波。国际电工委员会对其有定义，谐波超限会引发电能质量问题。我国相关标准对谐波限值有规定。企业内谐波问题突出，因其是电力电子设备主要用户，负载复杂，且供配电系统独立，谐波易局部放大、危害集中。所以，科学识别谐波源、评估危害并治理是电气工程师的重要课题。本文旨在探讨企业谐波治理与电能质量提升技术路径，提供完整解决方案框架。

1 企业供配电系统谐波问题分析

1.1 谐波产生机理与主要来源

谐波的产生源于非线性负载的存在。在线性电路中，电压与电流呈线性关系，电流波形与电压波形同为正弦波。而非线性负载的阻抗会随着施加电压的变化而动态改变，导致其汲取的电流波形不再是正弦波，而是包含基波和一系列高次谐波的复合波形。在企业供配电系统中，谐波的来源极为广泛且具有鲜明的时代特征。其中，电力电子变流装置无疑是最主要的谐波源。变频调速装置（VFD）在风机、水泵等电机驱动系统中的普及，其前端普遍采用的二极管不控整流桥会从电网汲取脉动的电流，从而产生以5次、7次、11次、13次等为主的特征谐波。同样，不间断电源（UPS）在其整流或逆变工作模式下，以及遍布于计算机、服务器中的开关模式电源（SMPS），都会因其高频开关动作而向电网注入丰富的谐波电流。此外，一些传统的工业设备如电弧炉、电解槽，在工作过程中因电流剧烈波动，也会产生宽频

谱的谐波乃至间谐波。除了这些大功率设备，企业内数量庞大的气体放电灯（如荧光灯、节能灯）因其非线性镇流器特性，会成为不可忽视的3次谐波源^[1]。即便是变压器，在磁路饱和状态下，其励磁电流也会呈现尖顶波，含有少量的奇次谐波。这些多元化的谐波源共同作用，构成了企业电网复杂的谐波环境。

1.2 谐波对供配电系统的危害

1.2.1 对电力设备

谐波会大幅增加电力设备的附加损耗与过热风险。流经导体的谐波电流，因集肤和邻近效应使电阻增大，铜损显著；在铁芯设备中，谐波磁通引发额外涡流与磁滞损耗，铁损上升。这些损耗转化为热能，致设备温升超标，加速绝缘老化，缩短寿命，甚至引发火灾。同时，谐波与基波磁场作用产生额外电磁转矩，引发设备异常振动与噪声。此外，谐波还易使并联电容器形成放大回路，导致电容器承受超额定电流电压，进而鼓包、爆裂。

1.2.2 对继电保护与自动装置

谐波干扰基于基波设计的继电保护装置，可能致其误动或拒动，威胁系统安全。自动重合闸、BZT等装置也可能因谐波致电压波形畸变而判断失误，影响供电可靠性。

1.2.3 对计量与通信系统

谐波使传统电能表计量误差，少计电量损害供电利益；电子式表虽精度高，但也受干扰。谐波电压还耦合至通信线路，产生噪声，影响数据传输，威胁PLC和弱电系统。

1.2.4 对企业经济效益

谐波致设备效率降、损耗增，部分地区收惩罚性电费，增加电费支出。还引发电压闪变、设备误动，降生产效率与质量，造成经济损失。且设备加速老化，故障

率升，维护更换成本高。

2 谐波治理与电能质量提升关键技术

2.1 无源滤波器 (PF)

无源滤波器是利用电容器、电抗器和电阻器组成的LC串联谐振回路，在特定的谐波频率处呈现出极低的阻抗，从而为该次谐波电流提供一个低阻抗的旁路通道，使其优先流入滤波器而非返回电网。这种技术方案因其结构简单、初期投资成本低廉、运行可靠性高且维护方便而广受欢迎，同时还能兼顾无功功率补偿的功能。然而，无源滤波器的固有缺陷也十分明显。它的滤波效果是固定的，只能针对预先设计好的特定次数谐波进行有效滤除，对于其他次数的谐波则无能为力，甚至在某些情况下可能起到放大作用。更为关键的是，其滤波性能高度依赖于电网的阻抗特性，一旦系统运行方式改变或短路容量发生变化，滤波器的调谐点就可能发生偏移，导致失谐，滤波效果大打折扣。此外，如果设计不当，无源滤波器与系统阻抗之间可能在某个非特征频率点形成并联谐振，反而会放大该次谐波，带来新的安全隐患^[2]。再加上其物理体积庞大、占地面积多的特点，尤其是在处理低次谐波时，这些因素都限制了其在复杂多变的现代企业电网中的应用，使其更适合于谐波源特性稳定、频谱相对固定的大型工业场合。

2.2 有源滤波器 (APF)

有源滤波器核心是一个基于IGBT等全控型电力电子器件构成的电压源型逆变器。它的工作原理是通过高精度的电流传感器实时检测负载电流，利用先进的信号处理算法（如基于瞬时无功功率理论）从中快速分离出谐波分量和无功分量，然后控制逆变器生成一个与之大小相等、方向相反的补偿电流，并将其注入电网，从而在源头上抵消掉负载所产生的谐波电流，最终使得电网侧的电流恢复为纯净的正弦波。有源滤波器的最大优势在于其卓越的动态性能和广泛的适应性。它能够在毫秒级的时间内完成对谐波的跟踪与补偿，完美适应负载快速变化的复杂工况。理论上，它可以滤除从2次到50次甚至更高次的所有谐波，且其滤波效果不受电网阻抗变化的影响，从根本上规避了谐振风险。此外，现代APF通常集成了多种电能质量治理功能，不仅能治理谐波，还能实现动态无功补偿、三相不平衡校正以及抑制电压闪变等。然而，这些优异的性能是以较高的初期投资成本为代价的。同时，APF自身在运行过程中也需要消耗一定的电能，并且单台设备的补偿容量存在上限，对于谐波电流总量极大的应用场景，往往需要多台设备并联运行，这不仅增加了成本，也提升了系统集成的复杂度。因

此，APF特别适用于那些谐波源复杂多变、对电能质量要求极为苛刻的场所，如数据中心、半导体晶圆厂、现代化医院以及高端商业综合体等。

2.3 混合型有源滤波器 (HAPF)

为了在治理效果与经济成本之间取得最佳平衡，混合型有源滤波器应运而生。这种方案巧妙地将无源滤波器和有源滤波器的优势结合起来，形成一种协同工作的综合治理策略。在典型的HAPF架构中，无源滤波器部分被设计用来承担“粗滤”任务，即专门滤除那些能量占比最大、最为突出的低次特征谐波（如5次、7次），并同时提供系统所需的大部分基础无功功率补偿；而有源滤波器部分则扮演“精修”的角色，负责滤除剩余的高次谐波、消除无源部分可能与系统阻抗形成的谐振隐患，并提供快速、精细的动态调节能力以应对负载的瞬时波动^[3]。通过这种分工协作，HAPF方案能够以远低于纯有源方案的成本，实现接近其90%以上的综合性能。尽管其系统结构相对复杂，对前期的设计和后期的调试提出了更高要求，但其出色的性价比使其成为当前中大型工业项目谐波治理的首选方案之一，尤其适合那些既有明确主导谐波又有一定动态变化需求的复杂工业场景。

2.4 静止无功发生器 (SVG)

静止无功发生器本质上是一种功能特化的有源电力滤波器，其核心使命是实现动态无功功率的精确补偿。SVG通过高速控制其内部逆变器输出电流的相位，能够连续、平滑地向电力系统注入或吸收感性/容性无功功率，从而快速稳定系统电压，将功率因数维持在设定的高水平。虽然SVG的主要设计目标并非谐波治理，但其毫秒级的动态响应速度赋予了它抑制由冲击性负载（如大型轧机、焊机）引起的电压闪变和波动的能力。在实际应用中，许多高端SVG产品已经集成了谐波电流检测与补偿功能，使其成为一种集动态无功补偿、电压稳定和谐波治理于一体的多功能电能质量综合治理装置。在企业供配电系统中，SVG常被部署在对电压稳定性要求极高的敏感负荷前端，或是作为系统级的无功支撑点，与APF等设备配合使用，共同构建一个全面、高效的电能质量保障体系。

3 谐波治理工程实施方法论

3.1 谐波现状检测与评估

整个过程始于对现状的精准把握。必须使用专业的电能质量分析仪，在企业供配电系统的关键节点，如总进线柜、主要谐波源馈线以及对电能质量敏感的负荷前端，进行为期至少一周的连续、全面监测。监测数据应涵盖各次谐波电压、电流的含有率及总畸变率、电压电

流有效值、功率因数、三相不平衡度等核心指标^[4]。通过对这些海量数据的深度分析,可以精准定位主要的谐波污染源,量化谐波污染的严重程度,并与国家相关标准进行对标,从而为后续决策提供坚实的数据支撑。

3.2 治理方案设计与仿真

在充分掌握现状的基础上,进入治理方案的设计与仿真阶段。此阶段需要明确具体的治理目标,例如将总谐波电流畸变率(THDi)降低至5%以下,同时将功率因数提升至0.95以上。随后,根据谐波频谱的特性、负载变化的规律、项目的预算约束以及现场的安装空间等多重因素,审慎选择最合适的技术路线,无论是无源、有源还是混合方案。在此基础上,进行精确的容量计算与设备选型,并利用PSCAD、MATLAB/Simulink等专业电力系统仿真软件,建立企业电网的数字孪生模型,对拟定的治理方案进行虚拟验证。仿真的核心目的在于确认方案的有效性,并重点排查是否存在潜在的谐振风险,确保方案在投入实际运行前就已万无一失。

3.3 工程实施与调试

方案确定后,便进入工程实施与调试环节。这包括设备的现场安装、电气接线、通讯配置等一系列工作。安装完成后,必须进行严格而全面的调试。调试工作不仅包括验证设备能否正常启动和稳定运行,更重要的是要在各种典型的生产工况下——从轻载到满载,再到突加或突卸大功率负载——实时测量治理前后的电能质量关键指标,以确凿的数据证明治理效果达到了设计预期。同时,还需对设备自身的各项保护功能,如过流、过压、过热保护等,进行逐一测试,确保其在任何异常情况下都能可靠动作,保障系统安全。

3.4 运行维护与效果评估

项目投运并非终点,而是长效管理的开始。应建立规范的运行维护制度,定期对治理设备进行巡检和保

养。同时,可安排一次短期的复测,全面评估治理的长期效果,并形成详细的闭环评估报告。从长远来看,良好的电能质量所带来的价值将清晰地体现在设备故障率的显著下降、整体能耗的有效降低以及生产线效率的稳步提升等可量化的经济效益之中,从而证明前期投入的合理性与必要性。

4 结语

企业供配电系统谐波治理与电能质量提升是技术、经济与战略融合的系统工程。本文剖析谐波成因与危害,比较主流技术机理、性能及适用边界,构建完整工程方法论。展望未来,谐波治理技术将更智能、集成、高效。电能质量综合治理装置会融合多种功能成智慧终端,依托边缘计算与人工智能算法自主学习、预测问题、优化策略。宽禁带半导体器件应用将提升电力电子变换器性能,使设备更小、效率更高、损耗更低。借助物联网与云计算,治理设备可接入云端平台,实现远程监控等。谐波治理正从被动“救火”变为主动能源战略,成为企业构建绿色智能供配电基础设施的核心支柱,为高质量发展提供能源保障。

参考文献

- [1]吴文志.工业供配电谐波治理技术措施研究[J].光源与照明,2023,(04):234-236.
- [2]商晓峰,孙乙富,傅剑锋.现代工业项目的谐波治理设计方案[J].现代建筑电气,2023,14(11):35-41+47.
- [3]张伟.输配电及用电工程中的电能质量提升技术[C]//江西省工程师联合会.工程技术与新能源经济学术研讨会论文集(一).杭州旭源电力设备承装工程有限公司,2025:655-658.
- [4]熊仕斌,董镛,李俊达,等.新形势下电能质量管理的提升路径[J].中国电力企业管理,2025,(17):16-17.