

电气工程中的谐波抑制技术研究

吴宇翔

中国船舶集团有限公司第七一三研究所 河南 郑州 450015

摘要: 电气工程中, 谐波抑制技术是保障电网安全稳定运行的关键。谐波源于非线性负载, 会导致设备过热、效率下降及通信干扰等危害。当前谐波抑制技术主要包括无源滤波、有源电力滤波器(APF)、多电平换流器及脉冲宽度调制优化等。随着智能电网发展, 谐波抑制正朝着智能化、模块化及绿色化方向演进, 通过引入人工智能与新型材料, 实现谐波的精准检测与动态补偿, 提升电力系统整体性能与可靠性。

关键词: 电气工程; 谐波; 抑制技术

引言: 在电气工程领域, 随着电力电子设备的广泛应用和新能源的大规模并网, 电网中的谐波污染问题日益突出。谐波不仅会降低电能质量、增加设备损耗, 还可能引发系统稳定性问题, 对工业生产和日常生活造成不利影响。因此, 谐波抑制技术成为保障电网安全经济运行的关键。本文系统梳理了谐波的产生机理与危害, 深入分析了传统与新兴谐波抑制技术的原理及特点, 并探讨了其在不同工程场景中的应用挑战与发展方向。

1 电气工程中谐波产生机理与特性分析

1.1 谐波源分类

(1) 非线性负载: 这是电力系统中最主要的谐波源, 如整流器、变频器、电弧炉等。此类负载工作时会改变电流波形, 使其偏离正弦波, 进而产生谐波。例如, 整流器通过半导体器件的导通与关断将交流电转换为直流电, 过程中会产生大量特征谐波; 变频器在调频调速时, 内部的开关器件动作会引发电流畸变, 生成高次谐波。(2) 新能源并网设备: 随着新能源产业发展, 光伏逆变器、风力发电变流器等并网设备成为新型谐波源。这类设备需将新能源产生的不稳定电能转换为符合电网标准的电能, 转换过程中的电力电子器件开关动作会导致电流、电压波形畸变, 向电网注入谐波。

1.2 谐波的数学描述

(1) 傅里叶级数分解与谐波频谱分析: 非正弦周期波形可通过傅里叶级数分解为基波和一系列频率为基波整数倍的谐波。谐波频谱分析则是将分解后的各次谐波按频率排序, 直观呈现各次谐波的幅值、相位分布, 为谐波检测与治理提供数据支撑。(2) 谐波次数、幅值、相位等参数定义: 谐波次数指谐波频率与基波频率的比值, 通常取正整数; 幅值是谐波的最大瞬时值, 反映谐波的强弱程度; 相位则表征谐波在时间轴上的起始位置, 不同相位的谐波叠加会对电网产生不同影响^[1]。

1.3 谐波的危害与影响

(1) 对电网的影响: 谐波会导致电网电压畸变, 破坏电能质量, 同时使电网阻抗增大, 增加线路损耗; 还会降低电网功率因数, 导致变压器、输电线路等设备利用率下降, 增加电网运行成本。(2) 对用电设备的影响: 谐波电流流经电机时, 会产生附加转矩, 引发电机振动、噪声增大, 加速绝缘老化, 缩短设备使用寿命; 高次谐波还会使电容器局部过热、绝缘击穿, 导致电容器损坏。(3) 对通信系统的干扰: 谐波产生的电磁辐射会干扰周围通信线路, 使通信信号衰减、失真, 影响通信质量, 严重时可能导致通信中断, 对依赖稳定通信的工业控制等领域造成不利影响。

2 电气工程中的谐波抑制技术分类与原理

2.1 无源滤波技术

(1) LC滤波器设计: 无源滤波技术核心是利用电感(L)和电容(C)的阻抗频率特性, 通过合理组合构成滤波电路, 实现对特定次谐波的抑制。其中单调谐滤波器针对单一频率谐波设计, 通过精确匹配电感、电容参数, 使电路在目标谐波频率下发生串联谐振, 呈现极低阻抗, 将谐波电流分流至滤波支路, 从而减少流入电网的谐波分量; 高通滤波器则对高次谐波呈现低阻抗特性, 可有效滤除频率高于某一阈值的多次谐波, 常见结构有C型、RC型等, 适用于谐波成分复杂的场景^[2]。(2) 优缺点分析: 该技术的显著优势在于结构简单, 无需复杂的控制电路和电力电子器件, 制造成本低、可靠性高, 维护工作量小, 适合对特定固定频率谐波的抑制。但局限性也较为突出, 由于电感、电容参数固定, 滤波特性不可调节, 难以适应电网运行工况和负载的动态变化; 当电网阻抗与滤波器阻抗匹配不当的时, 易引发串联或并联谐振, 不仅无法抑制谐波, 还可能放大谐波, 加剧电网电能质量问题。

2.2 有源电力滤波器 (APF)

(1) 并联型、串联型及混合型APF拓扑结构: 并联型APF通过与负载并联接入电网, 主动向电网注入与谐波电流幅值相等、相位相反的补偿电流, 抵消负载产生的谐波, 是目前应用最广泛的拓扑形式; 串联型APF串联在电网与负载之间, 主要用于抑制电压型谐波, 通过调节自身输出电压, 抵消电网电压中的谐波分量, 保障负载端获得正弦电压; 混合型APF结合了并联型与串联型的优势, 由无源滤波部分和有源滤波部分组成, 无源部分负责滤除主要的低次谐波, 有源部分则用于补偿剩余谐波和动态调整滤波特性, 兼顾了滤波效果与经济性。(2) 谐波检测算法: 谐波检测是APF实现精准补偿的前提, 常用算法包括瞬时无功功率理论, 该算法基于 α - β 静止坐标系, 可实时检测出三相电路中的有功电流、无功电流及谐波电流分量, 响应速度快, 适用于动态负载场景; FFT (快速傅里叶变换) 算法通过对电流、电压信号进行频域分析, 能准确识别各次谐波的幅值和相位, 但存在频谱泄漏和栅栏效应, 实时性相对较差; 小波变换算法则具备良好的时频局部化特性, 可有效检测出暂态谐波和冲击性谐波, 在复杂谐波场景下具有独特优势^[3]。(3) 控制策略: PI控制是APF最基础的控制策略, 通过比例和积分调节消除稳态误差, 实现对补偿电流的精准跟踪, 但动态响应速度有限; 滞环控制通过将实际补偿电流与参考电流的差值控制在预设滞环宽度内, 实现对参考电流的快速跟踪, 动态响应快、抗干扰能力强, 但开关频率不固定, 易产生开关损耗; 预测控制则基于电路模型对未来时刻的电流状态进行预测, 提前优化开关器件的动作, 具有动态响应快、控制精度高的特点, 适用于高性能要求的APF系统。

2.3 多电平换流器技术

(1) 级联H桥、模块化多电平换流器 (MMC) 的谐波特性: 多电平换流器通过增加输出电压的电平数, 使输出电压波形更接近正弦波, 从而显著降低谐波含量。级联H桥换流器由多个H桥单元串联组成, 每个单元可独立输出不同电压等级, 通过叠加形成多电平输出, 其谐波主要集中在开关频率整数倍附近, 且幅值随电平数增加而大幅衰减; MMC由多个子模块串联构成, 子模块通过电容储能和开关器件动作实现电压调节, 输出电压波形平滑, 谐波含量极低, 尤其在高压大容量场景下, 谐波抑制优势更为明显。(2) 载波调制与空间矢量调制 (SVPWM) 的谐波优化: 载波调制通过将参考电压与载波信号比较生成开关信号, 常用的正弦脉宽调制 (SPWM) 可通过优化载波频率和调制比降低谐波; 阶梯波调制则

适用于级联H桥换流器, 通过合理设置各H桥单元的输出电压, 使叠加后的输出波形接近阶梯波, 减少低次谐波。SVPWM则基于空间矢量理论, 通过选择合适的电压空间矢量并合理分配其作用时间, 使输出电压的磁链轨迹接近圆形, 不仅能降低谐波含量, 还能提高电压利用率, 是多电平换流器的主流调制方式^[4]。

2.4 脉冲宽度调制 (PWM) 优化技术

(1) 特定谐波消除 (SHE-PWM): 该技术通过精确求解开关角, 使PWM输出波形中特定次数的谐波被精准消除, 同时保证基波电压幅值满足要求。其核心是建立开关角与谐波幅值的数学模型, 通过求解非线性方程组确定最优开关角, 适用于对特定谐波要求严格的场景, 如高压大功率变频器, 但开关角求解过程复杂, 且对电网电压波动的适应性较差。(2) 随机PWM、空间矢量PWM的谐波分散效果: 随机PWM通过随机改变开关频率或脉冲位置, 将集中在开关频率整数倍附近的谐波能量分散到较宽的频率范围内, 降低谐波峰值, 避免谐波对电网和用电设备造成集中干扰, 同时可减少电机的电磁噪声, 但会使电流纹波的有效值略有增加; 空间矢量PWM (SVPWM) 通过优化电压矢量的选择和作用时间, 使输出谐波分布更均匀, 谐波幅值更低, 相较于传统SPWM, 其谐波抑制效果更优, 且电压利用率更高, 广泛应用于各类电力电子变流器中。

2.5 其他新兴技术

(1) 磁性材料谐波抑制: 传统磁性材料在交变磁场作用下易产生磁滞损耗和涡流损耗, 且磁导率随频率变化较大, 会加剧谐波产生。非晶合金和纳米晶材料具有优异的磁性能, 如高磁导率、低矫顽力、低损耗, 将其应用于变压器、电感等磁性元件中, 可显著降低元件自身产生的谐波, 同时提高元件对谐波的抑制能力, 减少谐波在电网中的传播, 尤其适用于高频谐波场景。(2) 人工智能在谐波检测与抑制中的应用: 人工智能技术为谐波抑制提供了新的解决方案。在谐波检测方面, 神经网络和深度学习算法可通过对大量电网数据的训练, 精准识别复杂工况下的谐波成分, 包括暂态谐波、间谐波等传统算法难以检测的谐波类型, 且响应速度快; 在谐波抑制方面, 可利用人工智能算法优化APF的控制策略、多电平换流器的调制参数等, 实现谐波抑制的自适应调节, 提高谐波抑制的精度和稳定性, 适用于电网工况复杂多变的场景^[5]。

3 电气工程中谐波抑制技术的工程应用与挑战

3.1 工业场景应用

(1) 钢铁、化工等重工业的谐波治理案例: 钢铁行

业的电弧炉、轧钢机，化工行业的整流装置等均为强非线性负载，谐波污染严重。工程中常采用“无源滤波+有源补偿”的混合方案，如某钢铁厂针对电弧炉产生的3、5、7次谐波，部署单调谐无源滤波器滤除主导谐波，再搭配并联型APF补偿动态谐波和无功功率，治理后电网电压畸变率从12%降至3%以下，设备运行稳定性显著提升。

(2) 新能源发电系统（光伏、风电）的谐波补偿：光伏逆变器、风电变流器的开关动作易产生高次谐波，影响并网点电能质量。实际应用中，多在逆变器出口配置LC高通滤波器抑制高频谐波，同时采用改进型SVPWM调制技术优化输出波形；大规模新能源电站则配套集中式APF，实现对谐波的动态补偿，保障平稳并网。

3.2 智能电网中的谐波抑制

(1) 分布式电源接入对谐波的影响：分布式光伏、储能等设备零散接入配网，易导致谐波叠加、分布复杂，传统固定滤波装置难以适配。为此，工程中采用自适应滤波技术，通过实时检测配网谐波分布，动态调整滤波参数，避免谐波放大。

(2) 谐波监测与抑制的协同控制策略：依托智能电网的大数据和通信优势，构建全域谐波监测网络，实时采集各节点谐波数据；通过云端平台分析谐波分布规律，动态调度分布式APF、SVG等装置协同工作，实现“监测-分析-抑制”闭环控制，提升电网谐波治理效率。

3.3 现存挑战与未来方向

(1) 高功率密度、低成本滤波器的设计：现有APF等设备存在功率密度低、成本偏高的问题，难以满足分布式场景的安装与经济性需求。未来需通过拓扑优化、宽禁带半导体器件（如SiC、GaN）应用，提升设备功率密度，同时优化核心器件国产化替代，降低制造成本。

(2) 宽频域谐波抑制：高频开关电源、电力电子设备产生的

2-150kHz宽频域谐波，常规滤波技术难以有效抑制，且易通过电磁耦合干扰通信与控制回路。当前亟需研发宽频响应的有源滤波技术、电磁屏蔽材料，以及适配宽频域的谐波检测算法。

(3) 标准化与商业化推广的难点：谐波治理行业缺乏统一的技术标准与检测规范，导致不同厂家设备兼容性差；同时，谐波治理的收益量化与成本分摊机制不健全，制约了商业化推广。未来需加快完善行业标准体系，建立基于“谁污染、谁治理”的成本分摊机制，推动谐波治理市场化发展。

结束语

电气工程中的谐波抑制技术是保障电网安全高效运行的核心环节。随着电力电子设备与新能源系统的深度融合，谐波问题愈发复杂，传统治理手段面临动态适应性不足、宽频域抑制能力有限等挑战。未来需进一步推动技术创新，结合人工智能算法优化控制策略、开发高功率密度滤波装置，并完善谐波治理标准体系与市场化机制。通过产学研协同攻关，实现谐波抑制技术的智能化、绿色化发展，为构建新型电力系统提供关键支撑。

参考文献

- [1]王磊,张伟,李华.电力系统谐波分析在电力电子设备中的应用研究[J].电气时代,2020,36(5):41-44.
- [2]管振欣.电机驱动系统中的谐波抑制技术研究[J].防爆电机,2024,59(05):50-52.
- [3]王腾龙.浅议建筑电气设计中的谐波治理问题[J].电气工程应用,2023,11(4):19-22.
- [4]吴沁,杨靖.基于电气工程的通信网络物理层安全强化研究[J].中国宽带,2024,20(08):88-90.
- [5]王帅.电气工程中智能电网技术的发展与应用[J].模具制造,2024,24(04):219-221.