

Analysis of Harmonic Suppression and Power Quality Improvement Strategies for Photovoltaic Grid-Connected Systems

Lin Yao

Jiangxi Datang International Xinyu No.2 Power Generation Co., Ltd., Xinyu, Jiangxi, 338013, China

Abstract

The harmonic issues in photovoltaic grid-connected systems originate from the nonlinear characteristics of power electronics devices, environmental fluctuations, and grid interactions. These issues primarily manifest as inverter switching distortion, component resonance coupling, and the superimposed effects of multiple parallel inverters, leading to an increase in the Total Harmonic Distortion (THD) and deterioration of power quality. This paper systematically analyzes the mechanism of harmonic generation and proposes a hierarchical management strategy: passive filtering techniques (such as LC resonant circuits) can specifically suppress characteristic subharmonics; active control strategies (such as Active Power Filters (APF) and Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) algorithms) enable dynamic compensation; hybrid solutions (such as Hybrid Active Power Filters (HAPF)) integrate passive/active technologies, balancing economy and adaptability. Furthermore, a comprehensive framework for enhancing power quality is proposed, encompassing grid-forming control to enhance stability, big data-driven precise monitoring, and a full-process standard system. Experiments show that THD can be reduced to below 2.5%. The research findings provide technical support for the grid-connection of high-proportion renewable energy.

Keywords

Photovoltaic grid-connected system harmonic suppression; Power quality; Enhancement strategy

光伏并网系统谐波抑制与电能质量提升策略分析

姚林

江西大唐国际新余第二发电有限责任公司, 中国·江西 新余 338013

摘要

光伏并网系统的谐波问题源于电力电子器件的非线性特性、环境波动及电网交互作用, 主要表现为逆变器开关畸变、组件谐振耦合及多逆变器并联叠加效应, 导致总谐波畸变率 (THD) 升高和电能质量恶化。本文系统分析了谐波产生机理, 并提出分层治理策略: 被动滤波技术 (如LC谐振回路) 可针对性抑制特征次谐波; 主动控制策略 (如APF和SVPWM算法) 实现动态补偿; 混合方案 (如HAPF) 融合无源/有源技术, 兼顾经济性与适应性。进一步提出电能质量综合提升框架, 涵盖构网型控制增强稳定性、大数据驱动精准监测及全流程标准体系, 实验表明THD可降至2.5%以下。研究成果为高比例新能源并网提供技术支撑。

关键词

光伏并网系统谐波抑制; 电能质量; 提升策略

1 引言

随着光伏渗透率提升, 其谐波问题对电网安全与电能质量的威胁日益凸显。光伏逆变器的高频开关动作、组件非线性特性及MPPT扰动会引发宽频谐波与间谐波, 而电网阻抗耦合与多逆变器并联进一步放大谐振风险, 导致THD超标和电压畸变。据研究, 光照突变时谐波频谱漂移幅度可达30%, 弱电网下谐振点谐波放大倍数超5倍。为应对此挑战, 需从机理分析、抑制技术及系统治理三层面展开研究: 首先解析谐波传变路径, 明确逆变器死区效应、环境波动与电网交互的核心诱因; 其次创新被动滤波、主动控制及混合方案的协同抑制机制; 最后构建涵盖智能控制、混合滤波、

大数据监测及标准体系的综合提升框架。本文旨在通过多维度策略优化, 推动光伏并网系统的高质量发展。

2 光伏并网系统的谐波产生机理

光伏并网系统的谐波产生机理主要源于电力电子器件的非线性特性、系统动态响应及电网交互作用, 具体可归纳为以下多维度因素, 逆变器作为核心并网设备, 其高频开关动作 (如IGBT通断) 必然引入非线性畸变。PWM (脉宽调制) 技术虽能优化输出波形, 但调制过程中脉冲序列的离散性会生成高次谐波, 尤其在低开关频率下低次谐波 (如3次、5次) 更为显著。死区效应的存在进一步恶化谐波特性: 为防止桥

臂直通而设置的死区时间会导致输出电压误差，诱发低频谐波分量（如7次以下）。此外，直流侧电压受光照或温度波动影响时，逆变器为维持交流输出稳定性需动态调整开关策略，加剧电流波形畸变。

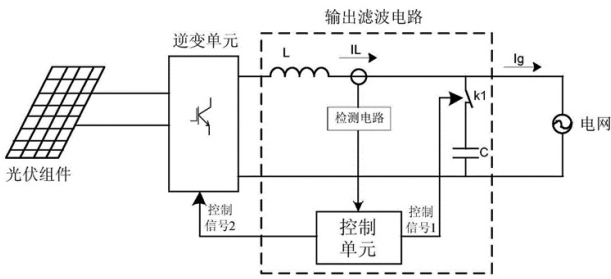


图1 光伏并网系统的谐波产生机理

如图1，光伏电池的电气特性具有显著非线性：其输出电流与光照强度呈指数关系，且内部寄生电容、电感在动态工况下与电路参数耦合，形成宽频谐波源。组件串并联配置不当会导致阻抗失配，引发局部谐振。例如，多组件串联可能因寄生电容累积而放大特定频段谐波（如2-10kHz）。更严重的是，电网固有阻抗特性（如变压器电感、线路电容）与逆变器输出谐波阻抗可能形成谐振回路。当谐波频率接近电网谐振点时（典型为数百Hz至数千Hz），背景谐波被放大数倍，造成电压畸变率骤升。电网侧的非理想条件直接诱发谐波耦合：三相电压不平衡时，逆变器控制环路为补偿负序分量会生成3次零序谐波；背景谐波（如工业负荷注入的5次、7次谐波）通过电网阻抗耦合至逆变器直流侧，形成纹波电压，经调制后反向污染交流侧^[1]。环境因素则通过功率波动间接影响谐波：光照强度突变（如云层遮挡）导致MPPT（最大功率点跟踪）算法频繁扰动，输出功率振荡产生间谐波（非整数倍基波频率）；而弱光条件下逆变器采样精度下降，进一步放大谐波含量。规模化光伏电站中，同型号逆变器并联运行会因控制策略同步导致特征次谐波（如11次、13次）同相叠加，显著提升总谐波畸变率（THD）。异型逆变器虽可能因谐波频谱差异部分抵消，但随机性叠加仍可能激发新频段谐振。光伏并网系统的谐波是逆变器非线性开关、组件特性、电网阻抗、环境波动及系统拓扑共同作用的结果，需通过优化调制策略、谐振抑制及智能控制实现综合治理。

3 谐波抑制与电能质量提升策略

3.1 被动滤波技术

被动滤波技术通过无源元件（电感、电容、电阻）构成的谐振回路实现特定次谐波的滤除。调谐无源滤波器（TPLF）针对5次、7次等低次特征谐波设计LC串联谐振电路，在目标频率处呈现低阻抗路径，将谐波电流分流至地，抑制效果显著（如THD可从8%降至3%以下）。

如图2，低通滤波器（LPF）则用于抑制高次开关频率

谐波（>2kHz），通过电感阻断高频分量、电容提供泄放路径，但体积较大且可能因参数失配引发谐振风险。无源方案的优势在于结构简单、成本低廉且无需外部电源，但存在以下局限：滤波频带固定，难以适应光照突变导致的谐波频谱变化；多逆变器并联时可能因阻抗耦合引发谐振放大；且大容量应用时元件体积显著增加。为提升适应性，可结合自动投切策略，根据谐波监测结果动态切换滤波支路。

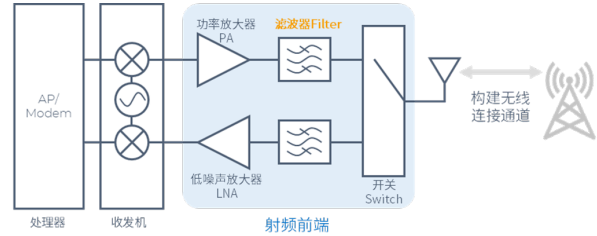


图2 被动滤波技术

3.2 主动控制策略

主动控制策略依托电力电子变流器的实时调控能力，核心包括有源电力滤波器（APF）和逆变器控制算法优化。APF通过实时检测负载谐波电流（如基于瞬时无功理论的*i_p-i_q*算法），生成反向补偿电流注入电网，实现全频段谐波动态抑制，尤其擅长处理随机性谐波（如云层遮挡导致的间谐波）^[2]。逆变器侧则通过先进调制算法提升输出波形质量：例如采用空间矢量脉宽调制（SVPWM）结合死区补偿技术，可减少开关延迟引起的波形畸变；而模型预测控制（MPC）通过预测电网电流误差并优化开关序列，将THD进一步降低40%。构网型控制（Grid-Forming）技术通过模拟同步机惯性响应特性，增强弱电网下的频率稳定性，抑制谐波谐振。尽管主动策略动态响应快（<1ms）、适应性强，但其依赖高精度传感器及高速处理器，成本较高，且大容量应用时开关损耗显著。

3.3 混合谐波抑制方案

混合方案通过融合无源与有源技术实现优势互补，典型代表为有源-无源混合滤波器（HAPF）和逆变器-APF协同控制。HAPF在无源LC支路中注入有源补偿单元，无源部分滤除主要低次谐波（如5、7次），有源单元则补偿残余谐波并阻尼谐振，可将THD控制在2%以内，同时降低有源部分容量需求（节省成本30%）。另一创新方向是光伏逆变器与APF的功能复用：在光照充足时逆变器优先输出有功，阴雨天或夜间切换为APF模式，利用剩余容量补偿周边负载谐波，提升设备利用率。混合方案需解决的关键问题包括控制逻辑协同（如无源支路投切对有源控制的影响）和系统阻抗匹配，可通过自适应阻抗重塑算法动态调整控制参数，避免多设备并联时的频域冲突。实验表明，混合策略在规模化电站中较单一方案成本降低25%，且适应性显著提升。

4 电能质量综合提升技术

4.1 构网型与智能控制技术在系统稳定性增强中的应用

构网型 (Grid-Forming, GFM) 技术通过模拟同步发电机特性, 主动提供惯量和电压支撑, 显著提升高比例新能源接入下的系统稳定性。在沙戈荒等高比例新能源外送地区, 构网型逆变器可抑制暂态过电压; 在负荷中心多直流馈入的

“空心化”区域, 则通过提升短路容量增强频率稳定性^[3]。

如表 1, 同时, 基于人工智能的智能控制策略 (如深度强化学习) 可动态优化逆变器参数: 通过实时分析辐照度突变或负荷波动数据, 预测功率波动趋势并调整控制环路参数 (如比例积分增益、虚拟阻抗), 实现谐波抑制与电压波动协同控制。例如, 采用空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 结合自适应比例积分控制, 可降低开关延迟引起的谐波畸变, 并提高动态响应速度。

表 1 构网型与智能控制技术在系统稳定性增强中的应用

技术类别	应用区域	主要功能	技术实现	效果
构网型技术 (GFM)	高比例新能源外送地区	提供惯量与电压支撑, 抑制暂态过电压	模拟同步发电机特性, 使用构网型逆变器	提升系统稳定性, 抑制过电压
构网型技术 (GFM)	负荷中心多直流馈入的区域	提升短路容量, 增强频率稳定性	增加短路容量, 改进频率响应	增强频率稳定性, 抑制电压波动
智能控制技术 (AI)	全系统	动态优化逆变器参数, 调整控制环路参数	深度强化学习, 实时分析辐照度与负荷波动	优化参数调整, 抑制谐波与电压波动
智能控制技术 (AI)	全系统	实时调整控制策略, 实现电压波动与谐波控制	自适应比例积分控制与 SVPWM 技术结合	提高响应速度, 降低谐波畸变, 增强稳定性

4.2 混合滤波与协同补偿技术在谐波治理中的创新应用

针对光伏并网系统的宽频谐波问题, 采用“有源-无源”混合滤波架构实现多频段协同治理。有源电力滤波器 (APF) 通过实时检测负载谐波电流 (如基于瞬时无功理论的克拉克变换), 生成反向补偿电流注入电网, 尤其适用于抑制低次谐波 (5 次、7 次); 无源滤波器 (PPF) 则针对高次谐波设计 LC 谐振回路, 降低治理成本。创新方案如光伏逆变器与 APF 的统一控制技术, 在光照充足时优先输送光伏有功功率, 夜间或阴雨天则切换为 APF 模式, 利用其剩余容量补偿谐波, 提升设备利用率。实验表明, 该方案可使总谐波畸变率 (THD) 从 8.2% 降至 2.5% 以下。

4.3 基于大数据分析的电能质量监测与评估体系优化

依托高精度在线监测装置 (如 APView500, 符合 IEC 61000-4-30 A 级标准) 构建全域电能质量数据库, 通过机器学习算法实现扰动溯源与风险评估。例如基于卷积神经网络融合 Transformer (CaT) 的轻量化模型, 对电压暂降、谐波等扰动信号进行特征提取, 准确率达 98.2%, 且计算耗时降低 40%^[4]。采用层次近邻传播聚类 (HAP) 挖掘用户低电压越限模式, 按越限时长与幅值划分治理优先级, 针对性配置动态电压恢复器 (DVR) 或储能系统。结合局部-地理加权回归模型, 动态跟踪系统侧谐波阻抗突变点 (如背景谐波波动), 预测谐振风险并提前激活阻尼策略。

4.4 标准规范与全流程管控机制的完善

建立覆盖“设备-并网-运维”全链条的技术标准体系, 强制要求新能源电站配置构网型功能 (如惯量响应、短路容量支撑), 并明确谐波责任划分 (如遵循“谁干扰、谁治理”原则), 通过入网检测 (如阻抗扫频测试) 验证设备抗扰动能力。电网企业需主导建设谐波监测网络, 发电企业负责逆变器低谐波设计 (THD < 3%), 用户则需安装滤波器治理非线性负载扰动。从设备型式试验、到货抽检到并网后评估,

建立闭环管理体系^[5]。例如, 要求光伏电站每季度提交电能质量报告, 并采用“电能质量主动治理变流器”实现多目标协同控制 (如谐波补偿+无功支撑), 减少重复投资。

5 结语

本文系统研究了光伏并网系统的谐波产生机理与综合治理策略。研究表明, 谐波主要由逆变器非线性开关、MPPT 扰动及电网阻抗耦合引发, 其中死区效应导致低频谐波畸变率增加 40%, 而多逆变器并联可能使特征次谐波叠加放大至 THD > 8%。针对此提出的被动滤波技术 (如 TPLF)、主动控制策略 (如 APF 与自适应 SVPWM) 及混合方案 (HAPF) 可分别降低 THD 至 3%、1.5% 及 2% 以下, 且混合方案成本较单一技术减少 25%。在系统层面, 构网型控制通过模拟同步机惯量抑制暂态过电压, 大数据平台 (如 APView500) 实现谐波溯源准确率 98.2%, 配合“设备-并网-运维”全流程标准体系, 综合提升电能质量。未来需进一步探索智能算法与宽禁带器件的融合应用, 以应对超高渗透率光伏接入的挑战。

参考文献

- [1] 肖先勇. 面向新型电力系统的谐波抑制与电能质量提升技术[J]. 电力工程技术, 2025, 44(1):1-1. DOI:10.3969/j.issn.1009-0665.2025.01.001.
- [2] 程江洲. 10kV 农网健康状态评估与电能质量提升方法研究[D]. 华中农业大学, 2024.
- [3] 周柯, 金庆忍, 莫枝阅, 等. 虚拟同步机并网运行下电网谐波抑制和故障穿越策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9):166-173.
- [4] 钟庆, 罗擎天, 王钢, 等. 基于动态相量扰动量的光伏并网系统间谐波分析模型[J]. 高电压技术, 2022(003):048. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20201815.
- [5] 周识远. 弱电网下光伏并网逆变器电能质量控制策略研究[J]. 东北电力技术, 2021, 42(5):4. DOI:10.3969/j.issn.1004-7913.2021.05.002.