

光伏场站间谐波产生机理与新型滤波装置抑制策略

王闯

中广核新能源辽宁有限公司，辽宁沈阳，110000；

摘要：随着光伏产业规模化集群发展，光伏场站并网引发的谐波问题日益突出，尤其场站间谐波耦合交互严重威胁电力系统安全与电能质量。本文阐释光伏场站间谐波产生机理，重点剖析逆变器非线性、场站间阻抗耦合及电网背景谐波激励等核心因素；梳理现有滤波装置局限性，提出主动滤波协同抑制、混合滤波优化配置及智能自适应滤波三类新型策略；通过 MATLAB/Simulink 仿真验证策略有效性。研究为光伏场站集群谐波治理提供理论与技术支撑，助力光伏高质量并网。

关键词：光伏场站集群；谐波耦合；产生机理；新型滤波装置

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.009

引言

双碳目标下，太阳能开发规模持续扩大，光伏场站成为新型电力系统核心组成。但光伏输出功率存在天然波动与间歇性，核心设备逆变器为非线性负载，易产生大量谐波。多场站集群并网时，通过电网阻抗耦合导致谐波传播、叠加放大，形成跨场站谐波污染，不仅降低电能质量，还可能诱发变压器过热、保护误动等故障，威胁系统安全运行。

现有光伏谐波研究多聚焦单场站孤立治理，对多场站谐波耦合机理与协同治理关注不足。传统无源滤波器（PPF）、有源电力滤波器（APF）在应对集群复杂谐波与动态工况时，存在抑制效能有限、适应性差、易谐振等问题。因此，揭示场站间谐波产生与放大机理，研发新型滤波装置及抑制策略，是光伏集群并网领域的关键技术瓶颈。本文围绕该核心问题开展研究，为多场站谐波协同治理提供解决方案。

1 光伏场站间谐波产生机理

光伏场站间谐波由多因素耦合产生，核心诱因是光伏系统非线性，同时受场站间阻抗耦合、电网背景谐波激励及运行工况波动影响，形成复杂的谐波传播-放大机制。本节从逆变器非线性特性、场站间阻抗耦合效应、电网背景谐波激励及运行工况影响四方面，剖析谐波产生与耦合机理。其整体作用机制如图 1 所示。

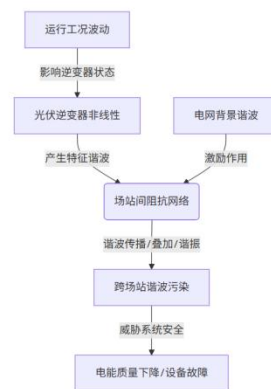


图 1 光伏场站间谐波产生与传播机理示意图

1.1 光伏逆变器非线性特性

逆变器是光伏交直流转换核心设备，其功率开关器件的高频通断是谐波产生的主要根源。逆变器采用脉冲宽度调制（PWM）技术，通过控制 IGBT 等器件通断调节输出参数，因开关行为的离散性与非线性，输出电流含开关频率及倍频特征谐波。

多场站集群运行时，不同场站逆变器开关频率差异导致特征谐波频率不同，这些谐波通过公共连接点（PCC）注入电网形成叠加；若频率相近还会引发干涉，导致局部谐波幅值放大。此外，逆变器死区补偿偏差、开关器件非理想特性等，会进一步加剧谐波畸变，使谐波频谱更复杂。

1.2 场站间阻抗耦合效应

多光伏场站通过输电线路、变压器接入公共电网，形成复杂阻抗网络，场站间阻抗耦合是谐波传播放大的关键路径。场站输出阻抗、线路分布阻抗、变压器漏抗

及电网等效阻抗构成耦合阻抗矩阵，为谐波跨场站传播提供物理通道。

某一场站产生的谐波电流通过耦合阻抗流向其他场站，经逆变器、负载等反射折射后反复振荡；若谐波频率接近阻抗网络固有谐振频率，将引发串并联谐振，导致谐波幅值骤增。例如相邻场站阻抗匹配时，5 次谐波可能被放大数倍，超出电能质量限值。

1.3 电网背景谐波激励

电网背景谐波会干扰逆变器锁相环（PLL）的相位频率跟踪精度，导致调制信号畸变，引入额外谐波；同时改变场站运行工况，使开关动作偏离理想状态，增加谐波产生量。在背景谐波共同激励下，多场站形成谐波协同放大效应，加剧耦合复杂性并扩大污染范围。

1.4 运行工况影响

光伏场站输出功率、光照、温度等工况存在显著波动性，直接导致逆变器运行状态变化，影响谐波特性。光照突变时，光伏输出功率大幅波动，逆变器需调整开关频率、调制比等参数，使谐波频率与幅值呈现动态波动。

多场站地理分布不同，工况存在异步性。某一场站功率波动通过阻抗耦合影响周边场站，引发谐波动态耦合。光照稳定时谐波产生量平稳；清晨、傍晚等过渡阶段，光照频繁波动导致各场站功率异步变化，谐波呈现不规则波动，增加治理难度。

2 现有滤波装置的局限性

现有光伏谐波滤波以无源滤波器（PPF）和传统有源电力滤波器（APF）为主，在单场站治理中成效有限，面对多场站集群的复杂谐波环境（多频率叠加、动态工况、跨场站耦合），存在显著治理短板，无法满足规模化光伏集群需求。

2.1 无源滤波器的局限性

无源滤波器由电容、电感、电阻构成，通过调谐特定频率实现谐波分流，具有成本低、可靠性高的优势，但存在明显短板：一是频率针对性强，无法适配集群复杂谐波频谱；二是易与电网阻抗谐振，放大谐波；三是动态响应慢，无法适应工况波动；四是体积庞大，规模化应用经济性差。

2.2 传统有源电力滤波器的局限性

传统 APF 通过生成反向补偿电流抵消谐波，具有滤波范围广、响应较快的优势，但存在不足：一是单台补偿容量有限，无法应对多场站谐波叠加；二是多台并列运行易协同失调，引发二次污染；三是对电网阻抗变化适应性差，滤波效果不稳定；四是成本高，规模化应用受限。

3 新型滤波装置抑制策略

针对现有装置短板，结合场站间谐波产生与耦合特性，本文提出三类新型滤波抑制策略，实现对复杂谐波的精准高效治理。

3.1 基于主动滤波技术的协同抑制策略

该策略采用多台新型并联有源电力滤波器（SHAPF）构建分布式架构，通过协同控制实现联合治理。新型 SHAPF 优化拓扑结构，集成储能单元与宽频带模块，提升补偿容量与响应速度；同时构建分布式协同控制系统，通过实时通信实现多装置信息交互与协调运行。其架构如图 2 所示。

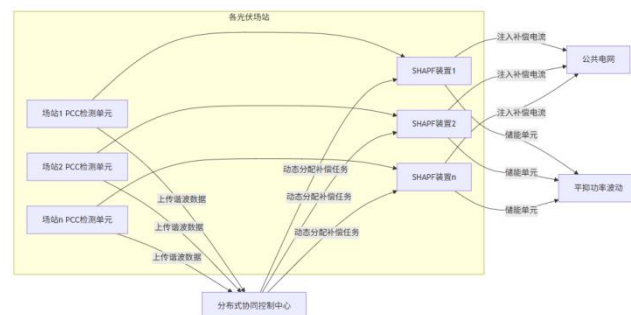


图 2 基于主动滤波的协同抑制策略架构图

具体流程：一是各场站 PCC 点部署检测单元，采集信号并提取谐波信息上传至控制中心；二是控制中心通过改进遗传算法动态分配补偿任务，避免重复与盲区；三是各 SHAPF 精准生成补偿电流，储能单元平抑功率波动，从源头减少动态谐波，实现全频谱精准抑制。

3.2 混合滤波装置的优化配置策略

混合滤波装置融合 PPF 低成本与 APF 宽频精准优势，通过拓扑与参数优化实现优势互补。核心是结合集群谐波特征与阻抗特性，设计装置拓扑与参数，确保全工况稳定运行。其典型拓扑结构如图 3 所示。

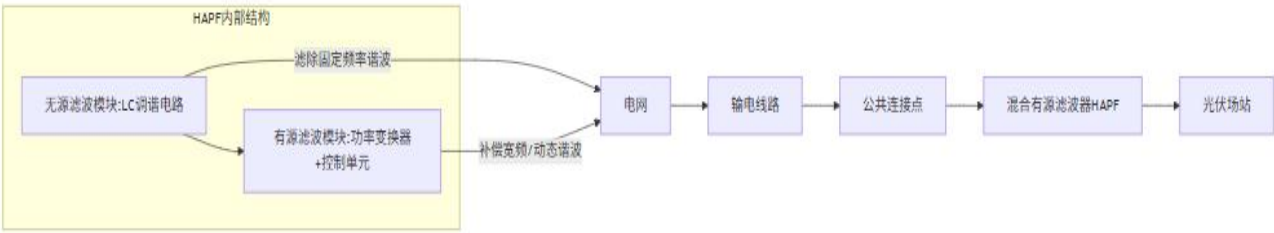


图 3 混合滤波装置拓扑结构图

配置方案：一是场站出口部署调谐式 PPF 组，预滤除 5 次、7 次等主导特征谐波；二是公共连接点部署新型混合有源滤波器（HAPF），通过无源+有源串联拓扑，分别滤除固定频率与宽频间谐波；三是优化参数并引入阻抗匹配校验，规避谐振。该策略兼顾效能与经济性，适用于大规模集群。

3.3 智能控制的自适应滤波策略

该策略采用改进变步长最小均方（LMS）算法结合模糊控制优化滤波策略。改进 LMS 算法通过动态步长解决精度与速度矛盾，快速跟踪谐波动态变化；模糊控制模块根据工况与谐波特征实时调整补偿参数。装置集成电网阻抗在线检测模块，可预判谐振风险并自动调整参数，提升适应能力与治理稳定性。其控制逻辑如图 4 所示。

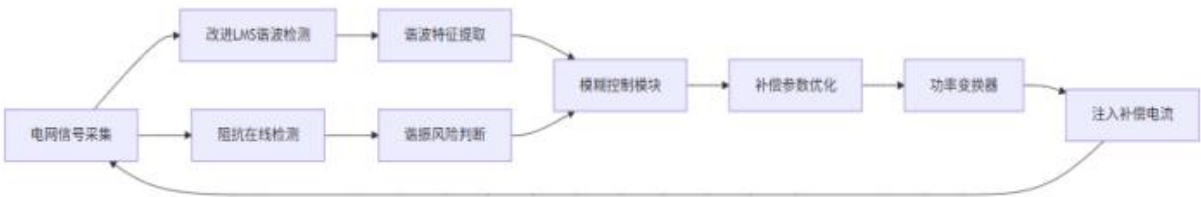


图 4 智能自适应滤波策略控制逻辑图

4 仿真分析

4.1 仿真模型构建

为验证本文提出的新型滤波装置抑制策略的有效性，基于 MATLAB/Simulink 仿真平台，构建包含 2 个 100MW 级光伏场站的集群并网仿真模型。模型关键参数设置如下：光伏逆变器采用三相桥式 PWM 拓扑，开关频率为 10kHz，调制方式为空间矢量脉宽调制（SVPWM）；输电线路采用 π 型等效模型，长度 10km，电阻 $0.05\ \Omega/\text{km}$ ，电抗 $0.3\ \Omega/\text{km}$ ；电网等效阻抗为 $0.01+j0.05\ \Omega$ ；分别配置传统无源滤波器、传统 APF 及本文提出的新型混合滤波装置（采用优化配置策略）作为对比组。仿真工况设置：额定光照强度 $800\text{W}/\text{m}^2$ （0~0.2s），0.2s 时光照强度突变至 $500\text{W}/\text{m}^2$ （模拟多云天气），电网电压等级 35kV，系统频率 50Hz，仿真

时长 0.5s。

4.2 仿真结果分析

仿真结果从谐波总畸变率（THD）和各次特征谐波幅值两个核心指标进行量化分析。未采取任何滤波措施时，光伏场站集群公共连接点的电流 THD 达 15.8%，远超 GB/T14549-93《电能质量公用电网谐波》规定的 5%限值，其中 5 次谐波幅值 1.2kA，7 次谐波幅值 0.8kA，存在严重的谐波污染。

采用传统无源滤波器时，电流 THD 降至 8.6%，5 次、7 次谐波幅值分别降至 0.5kA、0.3kA，但对 11 次及以上高次谐波抑制效果微弱，且因与电网阻抗耦合出现轻微谐振现象，导致 11 次谐波幅值从 0.2kA 升至 0.25kA；采用传统 APF 时，电流 THD 降至 6.2%，各次谐波幅值均有不同程度降低，但在 0.2s 光照突变瞬间，THD 骤升至 10.3%，动态适应性不足；

采用本文提出的新型混合滤波装置优化配置策略时, 电流 THD 降至 3.1%, 满足国家标准限值要求, 其中 5 次、7 次、11 次谐波幅值分别降至 0.15kA、0.1kA、0.08kA, 谐波抑制效果显著; 在 0.2s 光照强度突变时, THD 仅短暂升至 4.2%, 随后在 0.03s 内快速恢复至 3.1% 左右, 展现出优异的动态适应性。仿真结果充分验证了本文提出的新型滤波装置抑制策略的有效性与优越性, 能够实现光伏场站间复杂谐波的精准抑制, 显著提升电能质量。

5 结论与展望

本文深入分析光伏场站间谐波产生与耦合机理, 明确逆变器非线性为核心诱因, 阻抗耦合为传播路径, 背景谐波与工况波动为强化因素; 针对现有装置短板, 提出三类新型抑制策略; 仿真验证表明, 所提策略可显著降低 THD, 提升动态适应性, 效能优于传统装置。

未来研究可从三方面拓展: 一是优化新型滤波装置拓扑, 采用宽禁带器件提升功率密度与经济性; 二是开展光伏-风电-储能多能源协同场景的谐波治理; 三是引入数字孪生技术, 实现谐波实时监测、预测与精准调控, 推动治理技术升级, 保障新型电力系统安全运行。

参考文献

- [1] 周子翔, 赵世伟, 曹江华. 基于 ESO 的低载波比下 LC L-PMSM 电流控制策略[J]. 微电机, 2025(6).
- [2] 朱晓娟, 胡海涛, 陶海东, 等. 光伏并网系统的谐波不稳定产生机理及影响规律[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 9.
- [3] 尹代杰, 奚鑫泽, 高贯斌, 等. 三相不平衡光伏并网系统间谐波电流产生机理及控制研究[J]. 控制工程, 2024, 31(11): 2095-2103.