

SiC与Si混合调制逆变器国产化集成技术

卢 盈

爱士惟科技股份有限公司 上海 200000

摘 要: 面向复杂电网与高功率密度应用需求, 构建基于SiC与Si功率器件混合调制的国产逆变器集成系统, 提出以高频高效驱动为核心的控制策略, 实现栅源参数自适应与开关频率提升, 优化国产SiC MOSFET驱动电路突破低短路比电网运行稳定性控制瓶颈, 提升系统对电网阻抗变化的适应范围。构建支持正负序无功支撑的智能集成平台, 集成远程监控、设备识别与故障溯源功能, 实现器件国产化率95%以上, 整机转换效率达98.8%, 基于多场景实验验证兼容性与高频驱动性能, 完成整机并网适配与稳定性评估, 确认系统集成效率与可靠性达标。

关键词: SiC功率器件; Si基器件; 混合调制, 国产化集成

引言

在全球能源转型和碳达峰碳中和目标的推动下, 光伏发电作为清洁能源的重要组成部分, 具有广阔的市场前景, 光伏逆变器作为光伏系统的关键设备, 其性能直接决定了整个系统的运行效率与稳定性。我国在光伏逆变器的技术研发和产业化过程中面临多个挑战, 尤其是在SiC功率器件与Si器件的混合调制技术上, 仍然存在国产化率低、驱动技术不成熟以及控制策略不完善等技术瓶颈。SiC功率器件具备优越的高频、高压、低损耗特性, 能够显著提升逆变器的性能, 但其高成本和复杂的驱动要求限制了其大规模应用, 为推动逆变器技术的国产化与高效集成, 本项目重点研究SiC与Si功率器件混合调制技术, 致力于突破现有的驱动技术与控制策略, 提升逆变器的稳定性与适应性, 特别是在低短路比电网条件下的表现, 该项目的实施不仅将推动光伏行业技术创新, 也将为我国光伏设备的自主可控提供有力支撑。

一、关键问题分析

(一) SiC与Si器件混用的技术挑战

SiC功率器件在高效逆变器中具有优越性, 但与Si器件存在显著差异。SiC MOSFET需更高栅极电压驱动, 对 dv/dt 和 di/dt 更敏感, 要求驱动电路具备更好性能^[1]。Si器件在动态关断中有更强容性缓冲和过电压承受能力, 而SiC器件易产生寄生振荡和局部尖峰, 可能导致器件

过热等问题。混合应用时, 驱动电路要协调两类器件的响应速度, 确保触发时序一致和动态电流共享合理。调制策略需结合特性差异, 构建多频协同调制逻辑, 动态控制器件状态与负载分配。系统集成时要控制热阻匹配等关键参数, 保证混合调制系统高效输出与长期稳定性。

(二) 国产驱动与控制技术薄弱

国产逆变器应用高频高压SiC器件时, 驱动系统需满足高电气性能与控制精度要求, 但国产SiC驱动技术在响应速度、抗干扰能力与保护机制上存在短板。SiC MOSFET对驱动电压波形完整性要求极高, 需快速上升沿与下降沿控制及负压关断能力以抑制米勒效应^[2]。国产驱动芯片在输出电流、死区时间控制精度与保护机制集成方面滞后, 难以支持60kHz以上高频驱动。其控制策略多为固定调制, 缺乏自适应调制机制, 无法实现多器件并行控制优化。在低短路比电网条件下, 控制系统频率锁定能力不足, 易引发波形失真与脱网风险。现有控制平台采样带宽与反馈速率不足, 限制了栅极驱动参数在线调整能力。驱动电路需配置高隔离度、宽带宽、高精度保护的芯片架构, 集成数字信号处理功能, 构建本地调制逻辑与软关断策略动态部署机制, 以提升系统高频调制性能与稳定性。

(三) 复杂工况下运行不稳定

分布式光伏系统运行环境复杂, 逆变器需应对电网电压波动、阻抗不确定、负载剧烈变化及高频电磁干扰等挑战。复杂工况下, 功率器件需快速动态响应, SiC与Si器件开关行为差异易引发输出纹波、谐波畸变及直流偏置问题。弱电网环境下, 逆变器适应阻抗变化能力下

作者简介: 卢盈(1984.11-), 男, 汉族, 江苏常州人, 硕士学历, 工程师, 研究方向: 电气自动化。

降，易产生电流环振荡和电压扰动。国产逆变系统对三相不平衡、频率漂移、电压突变等工况响应缓慢，在高并发并网、集群运行或多节点互联模式下稳定性欠佳。

此外，器件间热分布不均、控制环路调节滞后及EMI干扰耦合现象突出，进一步压缩系统安全运行裕度。传统控制策略在负载突变或电网扰动瞬间失效概率高，导致输出失稳或保护机制频繁触发。复杂工况下稳定运行需依赖智能调制策略与多环并联控制结构，结合动态阻抗建模与前馈滤波补偿，提升扰动抑制与输出自平衡能力。硬件层面需具备高带宽、高隔离度的信号采集与电力电子开关能力，以快速适应极端运行条件。

二、核心技术路径

(一) 混合调制控制策略设计

混合调制控制策略是提升SiC与Si功率器件混用逆变器性能的关键。传统PWM调制方法无法兼容不同器件的开关特性，混合调制控制策略需具备自适应能力，根据不同器件的开关特性、负载情况和电网变化动态调整调制频率与占空比^[3]。针对SiC器件的高频、高效率特点，设计双PWM频率切换与多级调制方案，优化功率传递效率，减少功率损耗和电磁干扰。

控制策略核心是实时监控电网状态与负载特性，计算最优调制频率与占空比，优化每个器件的开关周期。SiC器件可采用基于载波移调的PWM技术，保持高频开关时的低损耗与低谐波输出；Si器件则使用传统低频PWM调制方式，确保高效率与稳定性。混合调制策略设计还涉及控制环路优化，保证系统迅速响应电网变化与负载波动，避免电压与电流扰动。该策略最大化发挥SiC与Si器件优势，提升逆变器在复杂工况下的稳定性和效率。下图1为混合调制控制策略系统架构图：

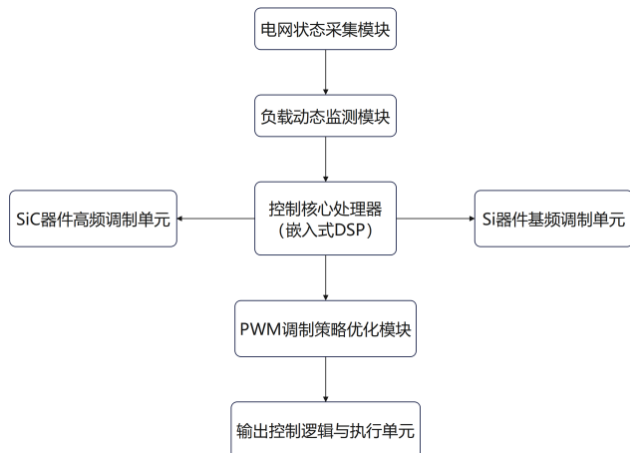


图1 混合调制控制策略系统架构图

(二) 国产SiC驱动电路优化

国产SiC MOSFET驱动电路优化是实现高效、稳定逆变器的关键技术。与传统硅MOSFET相比，SiC MOSFET对驱动电路的栅极电压、开关响应时间和抗干扰能力要求更高。传统硅驱动电路在高频（如高于60kHz）和大电流下，容易出现驱动延迟、过电压保护失效及噪声问题，影响系统稳定性和效率。

优化的核心是提升栅极驱动电流能力和响应速度，采用高精度、大功率驱动IC与低功耗栅极驱动芯片，以承受高开关频率和电流，降低栅极驱动延迟。引入智能隔离技术，确保驱动信号在高压环境下的传输稳定性，并增强抗电磁干扰能力。通过优化驱动时序，减小死区时间和关断延迟，降低开关损耗和电磁辐射。

优化后的驱动电路应具备高精度的过压、过流及热保护功能，确保在高频、高功率环境下的长期稳定运行。这些措施可有效提升SiC MOSFET驱动电路的性能，更好地适应光伏逆变器对高效、高稳定性驱动的需求。

(三) 智能集成与溯源平台研发

智能集成与溯源平台是推动国产逆变器产业化的重要支撑。随着光伏系统规模扩大和分布式电站增多，逆变器的运行监控与故障诊断成为提升系统稳定性和运营效率的关键。智能集成平台集成数据采集、设备监控、运行诊断与预警、远程运维等功能，通过云平台与物联网技术实现全方位智能管理。平台实时采集逆变器运行数据，结合大数据分析机器学习技术，快速定位故障并提供精准操作指导。

溯源平台则记录设备从生产到使用的全过程信息，确保可追溯性。其核心采用区块链技术，保障数据安全性和完整性，实时追踪设备运行状态、维护历史和故障记录。通过与智能集成平台结合，溯源平台还能预测潜在故障，降低故障率和运维成本。

这些平台的研发不仅提高了逆变器的管理效率和可靠性，还为设备升级与国产化替代提供了数据支持与技术保障。随着平台的完善，光伏系统的运行更加智能化、透明化，能够有效提升系统性能，降低整体运维成本，确保光伏电站的长周期稳定运行。

三、实验测试与性能验证

(一) 器件兼容性与驱动频率提升

本项目的关键是SiC与Si功率器件在混合调制架构下的稳定性与兼容性测试。测试平台基于模块化逆变拓扑，采用国产SiC MOSFET与Si IGBT组合，分配高频段

与基频段任务^[4]。在标准阻性负载下，SiC驱动电路在60kHz频率下稳定工作，波形无畸变，尖峰电压与反向恢复时间均在额定指标内。栅极驱动电压设定为-5V至+15V，器件响应延迟控制在50ns以内。动态负载扰动测试表明，不同温升条件下，Si与SiC器件电流分配无偏置漂移，导通损耗控制良好，热稳定性符合集成化逆变器需求。搭配高速DSP控制器件进行混合调制调频策略实测，切换时间控制在10μs以内，满足复杂应用场景下的频率动态调整需求。

（二）电网适应性与稳定性评估

在电网阻抗突变和三相电压不平衡条件下验证逆变器性能。实验模拟电网短路比1.5~5变化时，输出电流波动不超5%，频率漂移抑制率超90%^[5]。系统采用电压反馈补偿与动态电流前馈控制策略，确保不同阻抗下波形不失真、不断网。同步采样算法评估系统在LVRT/IVRT故障穿越动态性能，在50%跌落幅度故障电压下，系统维持无功支撑输出与电流畸变控制。电网不稳定或弱网时，输出THDI控制在3%以内，符合国家并网标准。系统采用实时阻抗自学习模块，提高适配复杂并网环境能力。72小时高频运行测试未现保护触发或输出失稳，验证了系统的高适应性和稳定性。

（三）整机集成与效率测试

整机集成后在全功率段内进行高精度转换效率与功率密度测试，在室温25℃标准测试环境下，最大转换效率达到98.8%满载效率维持在98.5%以上，整机结构优化采用多通道母线压缩布线方式，结合散热路径优化与热源隔离设计，将系统功率密度提升至0.72kW/L。整机输出在并网工作状态下直流偏置电流DCI稳定控制在0.5%以下，有效避免对并网点造成直流侵蚀风险，整机噪声测试表明在20kHz~100kHz频带内电磁辐射水平低于CISPR-22标准限值。整机电气绝缘与热响应测试结果显示，系统在过载125%工作条件下运行1小时，外壳温升不超过30℃，热管理系统响应时间小于3s热均衡状态维持稳定，表明热设计与驱动调制节奏实现了有效耦合，在整机长期带载与循环电压扰动工况下未发现软故障触发或栅极信号漂移，验证了控制逻辑与硬件集成系统的

长期稳定性与抗干扰能力。如上测试结果集中反映于下表1：

表1 实验性能测试指标表

测试项目	测试结果	性能标准
器件国产化率	95%以上	≥ 90%
最大转换效率	98.80%	≥ 98.0%
功率密度	>0.7kW/L	≥ 0.6kW/L
电网阻抗适应范围	>3mH	≥ 2mH
输出THDI	<3%	≤ 5%
直流偏置电流DCI	<0.5%	≤ 0.5%

结论

本研究面向光伏逆变器在复杂电网环境下的高效稳定运行需求，构建基于SiC与Si功率器件混合调制的国产集成系统，完成驱动频率提升、控制策略优化与智能平台构建三项关键技术突破，解决了器件协同驱动、电网低短路比适应与系统集成度不足等核心问题。实验结果表明系统具备良好的器件兼容性与调制稳定性，驱动频率达到60kHz，输出THDI低于3%，DCI控制优于0.5%，整机效率达98.8%，全面满足高密度并网运行与国产化率提升双重目标，研究成果为光伏发电装备的高端国产替代与智能化运营提供了技术支撑，具备推广与产业化价值。

参考文献

- [1] 付皓瑜.SiC功率MOSFET器件温度循环可靠性研究[D].陕西：西安电子科技大学，2024.
- [2] 周浩.SiC功率器件动态参数测试平台的设计和实现[D].北京：北方工业大学，2024.
- [3] 阳治雄.Si/SiC异质结功率器件设计与研究[D].湖南：湖南工业大学，2024.
- [4] 贝斌斌，乐程毅.Si/SiC混合并联功率器件开关模式优化及特性分析[J].固体电子学研究与进展，2023，43（04）：289-295.
- [5] 杜隆纯，何勇，刘洪伟，等.SiC功率器件先进互连工艺研究[J].机车电传动，2023，（04）：152-157.