

光伏并网逆变器谐波特性分析与滤波技术应用研究

吴帅江

陕西光伏产业有限公司 陕西 西安 710075

【摘要】：光伏并网逆变器谐波畸变严重影响电网电能质量与系统稳定运行，本文研究其谐波生成机理、抑制技术及性能验证。理想 SPWM 调制、功率器件非理想特性、死区效应及电网背景谐波耦合，决定谐波分布特征与生成路径。LCL 型无源滤波、有源阻尼、虚拟阻抗及谐振控制器，其原理与参数设计需结合实际工况。Matlab/Simulink 搭建 100kW 仿真模型，对比不同滤波工况抑制效果。复合滤波控制策略可将并网电流 THD 降至 0.7% 左右，抑制高低次谐波，提升电能质量，满足高比例分布式光伏并网要求。

【关键词】：光伏并网逆变器；谐波抑制；LCL 滤波器；虚拟阻抗；有源阻尼

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.104

1 光伏并网逆变器谐波生成机理与特性分析

1.1 理想 SPWM 调制逆变器谐波分布特征

自然采样双极性 SPWM 调制下，三相光伏并网逆变器输出电压经傅里叶分解，除基波分量外，主要呈现开关频率及其整数倍附近的边带谐波群^[1]。奇数倍载波频率处谐波集中于偶数阶边带，偶数倍载波频率处谐波集中于奇数阶边带，幅值随载波倍数提升与边带频率远离中心频率逐步衰减。高频谐波分量占比显著高于低次分量，无器件非理想因素时低次谐波含量极低，输出波形畸变源于开关调制本身的高频谐波分量，为后续滤波与控制策略设计提供理想谐波分布基准。

1.2 功率器件非理想特性引发的谐波机理

IGBT 等功率开关存在导通压降、开通关断延时与反向恢复非理想特性，开关过程无法实现阶跃式通断转换。导通阶段非线性压降造成输出电压幅值偏差，关断阶段拖尾电流与反向恢复电荷引发换流暂态畸变，打破理想 SPWM 对称调制规律，使输出电压波形偏离理论脉冲序列。工频附近衍生出低次谐波分量，高频开关谐波的幅值与频谱分布也发生畸变，实测中开关器件非理想特性会使并网电流 5、7 次谐波含量提升 1.2%~2.5%，是低次谐波生成的核心诱因之一。

1.3 死区效应与开关延时时对谐波的影响

防止桥臂直通需为驱动信号设置死区时间，叠加器件开通延时 t_{on} 与关断延时 t_{off} 形成总死区效应时间 T_d 。该时间内桥臂输出电压出现固定极性偏差电压，电流正向输出负偏差、反向输出正偏差^[2]。偏差电压经傅里叶分解，主要激发出 5、7、11、13 等 $6k \pm 1$ 次低次谐波，谐波幅值与 T_d 呈正相关。工程中死区时间每增加 $1 \mu s$ ，并网电流 THD 上升 0.3%~0.5%，100kW 三相逆变器 $T_d=4 \mu s$ 时，5 次谐波电压占基波比例达 3.8%，7 次达 3.9%，是低次谐波超标的主要因素。

1.4 电网背景谐波耦合下的谐波特性

实际电网存在工业负载、充电桩产生的背景谐波，光伏逆变器自身谐波与电网背景谐波在并网节点发生幅值叠加与相位耦合。两者频率重合、相位一致时谐波幅值显著放大，弱电网下电网阻抗增大还会引发谐波谐振。某分布式光伏电站实测显示，自身 5 次谐波 1.5% 与电网背景 2.0% 叠加后总畸变率达 3.5%，超出国标限值。背景谐波通过控制环路反馈至逆变器调制环节，加剧低次谐波畸变，形成谐波耦合放大的恶性循环。

2 光伏并网逆变器谐波抑制滤波技术

2.1 LCL 型无源滤波拓扑与参数设计

LCL 滤波器由逆变侧电感 L_1 、网侧电感 L_2 与滤波电容 C 构成，双电感-电容结构可实现 -60dB/dec 的高频谐波衰减。10kW 以上三相并网逆变器常用参数为 $L_1=1.2mH$ 、 $L_2=0.5mH$ 、 $C=30 \mu F$ ，能将开关频率附近高频谐波衰减 80% 以上。设计需控制谐振频率避开开关频率 1/6-1/2 区间，电容取值为额定电流的 0.5%-1%，避免谐振过电压与电容电流过大。某 500kW 光伏逆变器配套 LCL 滤波器，可使 2kHz 以上高频谐波衰减超 85%，满足高频谐波抑制需求。

2.2 有源阻尼滤波控制技术

LCL 滤波器固有谐振峰易引发系统振荡，电容电流比例反馈有源阻尼采集滤波电容电流，将反馈信号叠加至调制环节，等效在电容支路串联虚拟阻尼电阻，无需增加物理损耗元件。100kW 并网系统中反馈系数 $H_{i1}=6$ 时，谐振峰值可从 25dB 降至 8dB，不影响基波传输效率，解决无源阻尼损耗大、滤波性能下降的问题，适配大功率光伏并网系统的高频谐波抑制与稳定运行需求。

2.3 虚拟阻抗谐波抑制控制策略

虚拟阻抗控制通过并网电压前馈校正逆变器等效输出阻抗， $\alpha\beta$ 坐标系下将并网电压经前馈系数 $K_p_h(s)$ 叠加至调制信号，等效在输出端并联虚拟阻抗 $Z_p_h(s)$ 。增大谐波频率处等效输出阻抗，阻断电网背景谐波与死区误差电压对并网电流的扰动，虚拟阻抗趋近于逆变器等效输出阻抗负值时，谐波扰动被完全抵消。100kW 三相 LCL 型并网系统仿真验证，该策略可使并网电流 THD 从 3.24% 降至 0.74%，5、7 次谐波抑制率超 90%。

2.4 谐振控制器与陷波滤波技术

多比例谐振 PR 控制器在工频 50Hz 及 5、7、11 次谐波频率处设置谐振极点，实现特定次谐波无静差抑制，传递函数 $GPR(s)=K_p+2Kr\omega cs/(s^2+2\omega cs+\omega^2)$ 。配合陷波滤波器滤除特征谐波，某 100kW 光伏逆变器采用 PR+陷波复合控制，5 次谐波电流从 15A 降至 2A，滤波率达 86.7%。多谐振点参数设计复杂，截止频率设置不当会影响背景谐波抑制效果，常与虚拟阻抗、有源阻尼配合形成复合控制方案。

3 滤波技术仿真验证与性能分析

3.1 仿真模型搭建与系统参数设置

Matlab/Simulink 搭建 100kW 三相 LCL 型光伏并网仿真模型，主电路参数设定为直流侧电压 812V、交流线电压 400V、 $L1=1.2mH$ 、 $L2=0.5mH$ 、 $C=30\mu F$ ，控制参数为 $K_p=3$ 、 $K_r=200$ 、开关频率 10kHz、死区效应时间 $4\mu s$ 。模拟并网含 5 次 3.8%、7 次 3.9%、11 次 2.0%、13 次 2.1% 的背景谐波，设置纯 LCL 滤波、LCL+有源阻尼、LCL+虚拟阻抗、LCL+复合控制四种对比工况，开展谐波抑制效果仿真验证。

3.2 无源滤波效果仿真分析

纯 LCL 无源滤波可有效衰减开关频率附近高频谐波，10kHz 及倍频附近谐波衰减率超 80%，能快速削弱开关调制产生的高频干扰，保障高频段电能质量稳定。但其对死区效应与电网背景谐波引发的低次畸变无抑制作用，低次谐波成分在

并网电流中累积。仿真测试中，并网电流 THD 为 3.24%，5、7 次谐波占比分别达 3.8%、3.9%，虽未超出国标 GB/T 19964 规定的光伏并网电流 $THD\leq 5\%$ 的基本限值，却未达到优质并网要求。该滤波方式存在固有谐振峰，谐振频率易受电网阻抗变化影响，弱电网场景下电网阻抗增大，极易引发谐波放大现象，导致并网电流畸变加剧。实际应用中，复杂工况下死区效应波动、电网背景谐波含量变化，进一步凸显其局限性，单一无源滤波无法适配复杂工况下的低次谐波抑制需求，难以满足高比例光伏并网的优质电能质量要求。

3.3 复合滤波控制策略仿真验证

LCL+有源阻尼+虚拟阻抗+PR 谐振控制器的复合策略，LCL 抑制高频谐波，有源阻尼消除谐振峰，虚拟阻抗提升低次谐波频率处等效输出阻抗，PR 控制器补偿 5、7 次特征谐波。仿真中该策略下并网电流波形接近正弦波，FFT 分析显示低次谐波被大幅抑制，无明显谐振峰值^[3]。光照波动、电网电压畸变等动态工况下，THD 波动小于 0.2%，具备良好的鲁棒性与动态响应能力。

3.4 谐波抑制效果与电能质量对比

纯 LCL 滤波时并网电流 $THD=3.24\%$ ，加入有源阻尼后降至 2.15%，加入虚拟阻抗后进一步降至 0.74%，复合策略下稳定在 0.7% 左右。5、7、11、13 次谐波电流均低于国标限值，功率因数提升至 0.998。某 20MW 光伏电站工程应用中，该复合滤波技术使并网点谐波 THD 从 4.8% 降至 1.2%，满足并网要求，可全面提升光伏并网系统的电能质量，适配高比例分布式光伏接入场景。

4 结语

本文系统研究光伏并网逆变器谐波的生成机理、抑制滤波技术及性能表现，明确理想调制、器件非理想特性等不同因素对谐波分布的影响，对比多种滤波技术优劣。仿真与工程验证显示，单一 LCL 无源滤波仅能抑制高频谐波，LCL+有源阻尼+虚拟阻抗+PR 谐振控制器的复合策略，可实现高低次谐波全面抑制，显著降低并网电流 THD，提升系统鲁棒性。

参考文献:

- [1] 肖群星,张万鹏,杨瑶,等.单相光伏并网逆变器及其控制研究[J].电工技术,2025,(22):62-66+70.
- [2] 苏瑞,杨保晏.海上光伏并网逆变器检测要求分析[J].中国建材科技,2025,34(S2):75-77.
- [3] 陈全超.分布式光伏并网逆变器无功补偿技术的设计与应用研究[J].自动化应用,2025,66(21):98-100+104.