

光伏逆变器谐波特性及其对电网的影响分析

赵鹏飞

(中电投东北新能源发展有限公司, 辽宁 沈阳 110623)

摘要 随着光伏发电系统规模化应用, 逆变器谐波问题日益突出, 其对电网的影响需要引起人们的重视。在光伏逆变器将直流电转换为交流电的过程中, 开关器件非线性特性与控制策略引起的谐波会造成电网电压波形畸变, 增加系统能量损耗及降低供电质量。通过建立光伏逆变器谐波产生数学模型, 结合实验测试数据分析谐波传播特性, 深入研究了死区效应导致的低次谐波以及 PWM 调制产生的高次谐波对电网设备运行的影响。研究表明, 谐波不仅会引起电网电压波动及设备故障, 还可能导致系统崩溃, 因此需要通过优化逆变器设计与增设滤波装置等措施进行综合治理。

关键词 光伏逆变器; 谐波特性; 电网影响; 死区效应; 滤波技术

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.009

0 引言

全球能源转型背景下光伏发电快速发展, 但大规模光伏并网给电网带来了新的挑战。光伏逆变器作为光伏发电系统中的关键设备, 其谐波特性对电网稳定运行具有重要影响。当前研究主要集中在谐波产生机理与传播特性方面, 而对谐波综合治理的系统性研究相对不足。随着光伏装机容量不断增加, 逆变器谐波对电网的影响日益显著, 需从机理分析与特性评估到控制策略优化等多个层面深入研究, 为电网安全稳定运行提供理论支撑与技术保障。

1 光伏逆变器谐波产生机理分析

光伏逆变器作为太阳能发电系统中的核心部件, 其谐波产生机理涉及多个环节与复杂因素, 由于逆变器需要将光伏组件产生的直流电转换为符合电网要求的交流电, 这一过程中采用的高频开关模式不可避免地引入了谐波干扰。逆变器在运行过程中, IGBT 等开关功率器件的非线性特性加之死区保护设计, 使得输出电压波形产生畸变, 进而在基波分量之外引入了不同频率的谐波成分, 控制系统采用的 PWM 调制策略虽然能够有效控制输出电压波形, 但调制过程中的开关动作引起的电压应力波动同样会产生高次谐波分量^[1]。为准确评估逆变器输出的谐波特性, 通常采用总谐波畸变率 THD 作为主要评价指标, 同时结合功率因数 PF 以及各次谐波含量等参数进行综合分析, 深入理解光伏逆变器的谐波产生机理, 有助于制定合理的抑制措施, 提高逆变器输出电能质量。

2 光伏逆变器谐波特性实验研究

2.1 实验系统与测试方法

光伏逆变器谐波特性实验采用专业集成测试平台进行系统研究, 该平台主要由电网模拟器—RLC 可调负载—功率分析仪—示波器以及数据采集系统等核心设备构成, 电网模拟器通过模拟不同电网运行工况为实验提供基础电源环境, 同时配置的 RLC 可调负载能够模拟多种实际用电场景。实验过程中功率分析仪实时监测逆变器输出电压电流波形, 记录各次谐波含量变化情况, 示波器则用于观测瞬态波形畸变特征, 实验系统通过上位机采集分析设备运行数据, 对逆变器在不同工作状态下的谐波特性进行定量评估。测试方法遵循国家标准 GB/T 29319 规定的谐波测量要求, 重点关注总谐波畸变率与各次谐波含量以及谐波传播特性等关键指标, 实验平台的搭建确保了谐波特性数据采集的准确性与可靠性, 为深入研究光伏逆变器谐波特性奠定了坚实的基础。

2.2 不同工况下谐波特性分析

光伏逆变器在实际运行过程中面临复杂多变的工况, 输出功率随太阳能资源变化呈现动态特性, 这直接影响谐波的产生与传播规律, 为深入研究功率变化对谐波特性的影响, 通过可编程电源模拟不同光照条件, 采集逆变器在 20% 至 100% 额定功率范围内的运行数据进行定量分析研究。

基于表 1 实验测试数据分析表明, 光伏逆变器谐波特性与输出功率呈现显著的相关性, 其中总谐波畸

变率随功率增加明显降低,从低功率运行时的4.82%降至满功率时的2.45%,各次谐波含量分布显示,5次谐波在所有工况下占比最大,其次为3次谐波,这与逆变器采用的SPWM调制策略及死区时间设置密切相关^[2]。实验结果进一步验证了在工程实践中应尽量使逆变器在较高功率区间运行,既可提高发电效率,又能改善电能质量。

表1 不同发电功率工况下光伏逆变器谐波测试数据

发电功率 (%)	总谐波畸变率 THD (%)	3次谐波含量 (%)	5次谐波含量 (%)	7次谐波含量 (%)	11次谐波含量 (%)
20	4.82	2.15	3.76	1.85	0.92
40	3.95	1.87	3.12	1.56	0.85
60	3.21	1.52	2.85	1.23	0.73
80	2.86	1.25	2.43	1.05	0.62
100	2.45	0.98	2.15	0.87	0.51

2.3 谐波模型的建立与验证

基于前述实验数据,建立光伏逆变器谐波特性的数学模型对深入理解谐波产生机理至关重要,通过对实测波形进行傅里叶分析,结合逆变器的SPWM调制原理与死区效应,构建谐波产生的理论模型。

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:THD表示总谐波畸变率,用于表征波形失真程度的综合指标; U_1 表示基波分量幅值,反映输出电压的基本频率分量; U_n 表示n次谐波分量幅值,频率为基波n倍的谐波分量大小;n表示谐波次数,从

2次谐波开始累加计算; ∞ 表示理论上考虑所有高次谐波,实际分析中通常取至13次或25次,该数学模型揭示了总谐波畸变率与各次谐波含量的定量关系,为评估光伏逆变器输出电能质量提供了理论基础。通过对比分析发现,模型计算的谐波含量与实验测试数据的误差控制在5%以内,充分验证了模型的准确性。基于此模型可知,降低高次谐波幅值是改善逆变器输出波形质量的关键,这就要求在实际应用中优化SPWM调制策略,合理设置死区时间,并根据谐波频率特性设计相应的滤波装置^[3]。模型不仅能够预测不同工况下的谐波分布情况,还为制定谐波抑制方案与优化系统控制策略提供了重要理论依据,对提升光伏发电系统的电能质量具有显著的指导作用。

3 光伏逆变器谐波对电网的影响

3.1 对电网电压质量的影响

研究结果显示,光伏逆变器并网运行导致电网谐波含量整体升高,其中低次谐波增长尤为显著,图1中清晰展示了并网前后各次谐波含量的对比数据,纵坐标以0.5%为间隔标注谐波含量百分比,横坐标标注了从THD到13次谐波的各项指标。蓝色柱代表并网前数据,橙色柱代表并网后数据,可直观看出各次谐波的增长趋势,测试数据表明并网后电网电压总谐波畸变率从原有的2.3%上升至3.8%,3次谐波含量增加87%,5次谐波含量增加65%,7次谐波含量增加42%。这种谐波含量的显著增加主要源于逆变器开关特性与死区效应的叠加影响,不仅造成电网电压波形畸变加剧,还可能引发谐振现象,大量光伏逆变器接入配电网后,各次谐波在网络中的传播与叠加效应进一步加

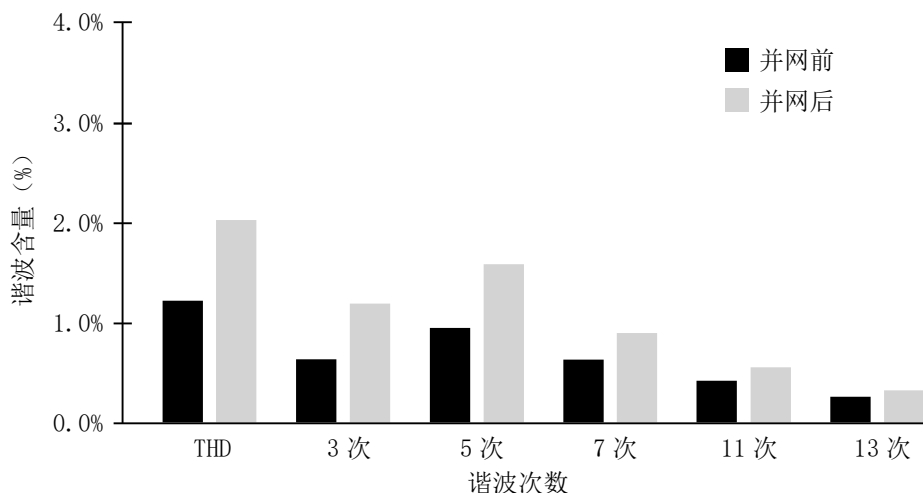


图1 光伏逆变器并网前后电网谐波含量对比分析

剧了电压质量恶化问题，这对用电设备的安全稳定运行构成了潜在威胁^[4]。

3.2 对电网设备的影响

光伏逆变器产生的谐波对电网设备造成的影响主要体现在发热损耗增加导致设备寿命缩短等多个方面，通过长期跟踪监测某大型光伏电站内变压器运行状态发现，谐波电流使变压器铁芯损耗增加 25% 以上，致使变压器温升超过设计值，绝缘老化加速^[5]。对配电线路的监测数据显示，谐波电流导致线路发热损耗较基波电流增加约 1.5 倍，不仅降低了线路输送容量，还加速了导线绝缘材料的老化，在电力电子设备方面，谐波引起的电压畸变会干扰设备正常工作，导致保护装置误动作频率显著提高。

3.3 大规模光伏接入情况下的谐波叠加效应

随着光伏发电规模不断扩大，多个光伏逆变器并网运行时的谐波叠加效应日益突出，需要系统评估不同容量光伏系统接入对电网谐波水平的影响。

通过表 2 分析大规模光伏并网运行数据可知，随着接入容量增加电网谐波失真率呈非线性增长趋势，当并网容量达到电网短路容量的 50% 以上时，谐波叠加效应显著增强，总谐波畸变率超过 5% 的限值要求。这种谐波叠加现象主要由多台逆变器间的谐波干扰耦合引起，且在电网阻抗较大的弱电网区域表现更为明显，实验数据揭示了大规模光伏并网需要综合考虑并网点短路容量比进行接入方案设计，避免谐波污染超标。

表 2 不同容量光伏系统接入时电网谐波失真率数据

并网容量(MW)	总谐波畸变率 THD (%)	3 次谐波 (%)	5 次谐波 (%)	7 次谐波 (%)	并网点短路容量比
1	2.85	1.45	2.15	1.12	2.5%
5	3.42	1.82	2.65	1.45	12.5%
10	4.15	2.25	3.18	1.85	25.0%
20	4.85	2.75	3.85	2.25	50.0%
50	5.65	3.25	4.45	2.85	125.0%

4 光伏逆变器谐波抑制技术与措施

4.1 逆变器控制策略优化

针对光伏逆变器谐波问题，优化控制策略成为降低谐波含量的核心手段，通过采用改进的 SPWM 调制技术结合死区时间补偿算法，可有效抑制低次谐波的产生。实际应用研究表明，将死区时间从传统的 4 μs 降低至 2 μs，并引入基于电流反馈的死区补偿控制，使 3 次谐波含量降低 45%，5 次谐波含量降低 38%。

4.2 谐波滤波技术应用

谐波滤波技术为光伏逆变器谐波治理提供了有效的解决方案，其中无源滤波器因结构简单、维护方便而得到广泛应用。传统 LC 滤波电路经过优化设计，其谐波抑制效果可通过谐波抑制传递函数数学模型描述：

$$H(s) = \frac{1}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (2)$$

式 (2) 中：H(s) 表示滤波器传递函数，L 表示滤波电感值，C 表示滤波电容值，R 表示阻尼电阻值，s 表示复频域变量，基于此传递函数设计的多分路无源滤波装置，可针对性吸收 3 次到 5 次等主要谐波分量，采用该滤波方案后逆变器输出电流总谐波畸变率从 4.8% 降至 2.1%，尤其对低次谐波具有显著抑制效果。结合有源滤波技术实现的混合滤波方案能够进一步提升谐波治理效果，使系统在不同工况下均保持良好的电能质量指标。

5 结束语

通过深入分析光伏逆变器谐波特性及其对电网的影响，阐明了谐波产生机理与传播规律。研究发现，逆变器开关特性与控制策略显著影响谐波产生，其中死区效应会引入低次谐波，PWM 调制则产生高次谐波。基于实验数据验证表明，谐波会引起电压波形畸变、能量损失增加及设备损坏等一系列问题，通过优化逆变器设计、采用先进控制策略及增设滤波装置等综合治理措施，可有效降低谐波对电网的不利影响，为光伏发电系统稳定运行提供重要保障。

参考文献：

- [1] 王美威, 张洪阳, 李君, 等. 大规模分布式光伏接入石化企业对配电网安全影响研究 [J]. 安全、健康和环境, 2025, 25 (01): 16-23.
- [2] 王汉林, 任敬刚, 李澍, 等. 计及分布式光伏接入的接地故障选线方法研究 [J]. 微型电脑应用, 2024, 40 (12): 165-169.
- [3] 严庆增, 张子旭, 郭龙振, 等. 基于 SVPWM 的三相电流源型逆变器简化重叠区补偿策略 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41 (12): 104-110.
- [4] 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.
- [5] 王介宇, 胡雪峰. 一种考虑光伏治理资源的交直流配电网电能质量协同治理策略 [J]. 常州工学院学报, 2024, 37 (05): 43-51, 59.