

分布式光伏接入低压配电网的电能质量控制方法研究

彭淼 王蓉

内蒙古电力（集团）有限责任公司阿拉善供电分公司，内蒙古 阿拉善 750306

[摘要] 新能源技术快速发展，分布式光伏发电系统在低压配电网里的应用越来越广泛，不过其大规模接入低压配电网时电能质量受的影响很显著，像电压波动、电压偏差、谐波这些问题都急需解决，此文针对分布式光伏接入低压配电网时典型的电能质量问题分析产生机理并探讨相关控制方法，结合电能质量控制技术的发展趋势提出多维度的解决思路，其中有源滤波、动态电压调节、智能逆变器控制等都在里头并评估了各个方法的可行性和适用场景，这研究结果对提高配电网运行质量、推动光伏资源高效利用有积极意义。

[关键词] 分布式光伏；低压配电网；电能质量控制；电压波动；谐波抑制

DOI: 10.33142/ucp.v2i4.17321

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Research on Power Quality Control Methods for Distributed Photovoltaic Access to Low Voltage Distribution Networks

PENG Miao, WANG Rong

Alxa Power Supply Company of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Alxa, Inner Mongolia, 750306, China

Abstract: With the rapid development of new energy technology, the application of distributed photovoltaic power generation systems in low-voltage distribution networks is becoming increasingly widespread. However, the impact of large-scale access to low-voltage distribution networks on power quality is significant, and problems such as voltage fluctuations, voltage deviations, and harmonics urgently need to be solved. This article analyzes the mechanism of typical power quality problems when distributed photovoltaics are connected to low-voltage distribution networks and explores related control methods. Combined with the development trend of power quality control technology, multidimensional solutions are proposed, including active filtering, dynamic voltage regulation, intelligent inverter control, etc. The feasibility and applicable scenarios of each method are evaluated. The research results have positive significance for improving the operation quality of distribution networks and promoting the efficient utilization of photovoltaic resources.

Keywords: distributed photovoltaics; low voltage distribution network; power quality control; voltage fluctuations; harmonic suppression

引言

清洁能源里分布式光伏系统是重要形式，它有着灵活布置和低碳环保的特性，在居民区、工业园区等低压配电网广泛被应用，不过光伏发电有间歇性、不确定性，容易导致电能质量出问题，进而影响供电安全、设备运行稳定，在低压侧接入它后电压偏差、闪变、谐波干扰问题越来越严重，研究光伏并网后电能质量变化特性，探索高效、经济的控制策略成为当前电力工程领域重要的技术任务。

1 分布式光伏并网的电能质量影响分析

1.1 电压波动与电压偏差

分布式光伏系统接入低压配电网后，电压波动与电压偏差问题成了最直接的影响，光伏发电间歇性和波动性明显，太阳辐射强度、气温、阴影遮挡等因素对其输出功率影响显著，阳光强烈时大量有功功率被光伏系统注入电网会使电压升高，阴云密布或光照突变时输出骤降则会使电压下跌，而且用户侧负荷周期性变化与光伏出力叠加会加剧配电网电压不稳定，馈线末端线路阻抗较大时光伏出力引发的电压升高更明显甚至可能超电网允许上限值，传统配电系统集中控制方式居多，局部电压变化难以及时响应，局部过

压或欠压现象频发，终端电器运行寿命与安全受影响。

1.2 闪变与电压波动频率问题

光伏系统动态功率输出变化会引发闪变这一重要电能质量问题且在短小时内气候条件频繁变化时表现得更明显，像云层快速移动、光照强度短时间内频繁改变时光伏系统输出也快速变化，供电电压就会随之出现快速轻微变动从而形成电压闪变，闪变电压数值变化或许不大但频率与人眼感知敏感度相符，容易引发视觉疲劳、照明设备频闪且严重时会影响生产设备正常运行，对电压稳定性要求高的工业用户而言闪变会使生产质量降低甚至损坏设备，分布式光伏接入点又多又分散且功率还不大，传统集中调控的闪变抑制措施很难起作用，只有靠分布式检测和快速响应协同机制才能够有效控制瞬时电压波动频率以减少闪变现象。

1.3 谐波产生机理及传播路径

光伏系统接入配电网时通常靠逆变器把直流电变成交流电，而逆变器高频开关时必然会产生谐波，谐波信号叠加到电网基波电流上使电网电流成为失真波形，这会干扰系统设备，严重时电能表计量会出错、继电保护会误动作、电动机机会过热，光伏逆变器产生的谐波主要是低次和

高次的且奇次谐波成分最常见的是5次、7次的,低压配电网结构简单、线路短、负载多样,谐波容易在网络里传播扩散形成叠加效应,若好几个光伏系统并列接入同一条馈线,逆变器输出相互影响可能导致谐波共振,从而使谐波电压和电流幅值大大提高,若没有有效的滤波措施,电能质量会大大降低且用电设备运行的稳定性也会被破坏,要有效抑制谐波就得从逆变器设计、谐波源识别、滤波设备配置这些方面系统地入手构建谐波检测和主动抑制机制。

2 现有电能质量控制方法综述

2.1 有源电力滤波器(APF)技术

有源电力滤波器(ActivePowerFilter, 简称为APF)是一种高效的谐波治理设备,它能实时检测电网电流或者电压中的谐波成分,快速生成与谐波成分相位相反、幅值相等的补偿电流,注入电网就能动态抵消谐波。和传统被动滤波器比起来,APF优势明显,响应快、补偿频带宽且能适应负载变化,尤其适用于分布式光伏并网后产生的非稳定谐波信号控制。实际应用中,APF往往并联接入,通过隔离变压器或者电抗器与低压配电系统相连,像瞬时无功功率理论或者dq坐标变换方法这样的控制算法,能在毫秒级时间里精确识别谐波成分并进行补偿控制,而且APF还有无功功率补偿功能,可提升功率因数,增强系统电压稳定性。不过在应用时,APF存在成本高、维护要求高、功率容量受限等问题,只适合谐波源集中或者功率密度较高的配电环境。

2.2 动态电压调节设备(DVR)应用

一种串联型电压补偿装置是动态电压恢复器(简称DVR),它能广泛抑制由光伏出力波动等因素引起的电能质量问题像电压暂降、过压和闪变等,DVR的连接方式是在电源与负载之间串联连接。它在检测到电压异常后的几毫秒内就能输出相应补偿电压,与母线电压叠加后形成稳定的负载电压,从而保护重要设备不受干扰。电压源型逆变器、能量存储模块、控制器以及耦合变压器是其核心部件,DVR具有快速响应、动态性能优良、可调节范围广的优势,特别适合在电压波动频繁且负载敏感的场所像精密加工车间、医院手术室等使用。在低压配电网中有分布式光伏接入时,DVR能根据光伏输出预测模型提前介入调节,主动响应即将发生的电压扰动,不过由于设备造价高、能量支持时间短,它通常只用于关键节点或者重要负载前端局部保护,难以实现全网覆盖控制。

2.3 智能逆变器控制策略

在传统光伏逆变器的基础上加了控制智能化模块就成了智能逆变器,靠嵌入式算法就能实现有功、无功功率的灵活调配、电压-无功(Volt-Var)控制、电压-有功(Volt-Watt)下垂控制、频率响应控制等功能,配电网电压、电流一有变化这设备就能感知到自主调节输出状态从而实现电压偏差、闪变及谐波的局部控制,自适应性和协同性都非常强,与只输出最大功率的传统光伏逆变器不同,

它根据网络运行状态挑选输出策略,进而提高光伏系统并网质量并提升系统稳定性,电压-高逆变器就能自动吸收无功把电压降下来,频率一不正常就能主动降出力来响应,而且它还能和能量管理系统、监控平台通信以达成远程调度和群控管理,多台分布式光伏系统一起接入时设定好协调运行策略就能构建虚拟电厂概念从而有效整合光伏资源并提升整个配电网的调控能力,不过并网标准支持度、通信协议兼容性、控制算法稳定性这些因素限制着智能逆变器广泛应用,需要不断优化和验证。

3 电能质量优化控制策略设计

3.1 分布式协同控制架构

应对多点分布式光伏接入下电能质量问题,分布式协同控制架构是一种将局部自治和全局协调相结合、达成电能质量控制快速响应与系统级优化的高效解决方案。在这一架构里,每个光伏接入点都配有具备基本控制和感知能力的控制单元,借助本地采集终端的电压、电流、频率等运行数据做出实时判断并调节,且各控制单元还会通过通信网络跟区域协调控制中心交互信息,统一调度并执行优化策略以实现全局有序运行。协同控制架构能基于主从式、分布式或者分层式来设计,其中分层式架构在保证局部响应速度之时还能达成宏观控制目标的优势特别明显。控制算法方面,常引入多智能体系统模型,使各控制节点有一定的自治决策能力,经共识算法协同完成电压调整、谐波抑制以及功率平衡等任务,并且分布式协同控制得考虑通信网络的延时容错、数据同步一致性和控制命令安全性,以保证控制系统即便遭遇突发干扰,仍具有高鲁棒性和抗扰能力。

3.2 基于数据驱动的自适应控制

现代电能质量优化策略里,传统经验法则逐渐被基于数据驱动的自适应控制方法取代,这成了构建智能控制系统的关键,该策略深入分析大量在线监测和历史运行数据以提取电能质量问题的变化规律,再据此动态调整控制策略与参数设置来适应实际运行工况的不断改变。实现时需先部署高精度数据采集系统以实时获取电压、电流、功率因数、谐波含量等关键指标并构建多维度数据模型,接着引入随机森林、LSTM神经网络、支持向量机等机器学习或深度学习技术识别、预测电能质量状态和判断趋势,让控制系统能自我学习以优化响应逻辑,自适应控制较传统控制方式灵活性和前瞻性更强,可预先判断电压波动趋势或者谐波水平变化并主动调整无功补偿或者滤波策略以最大程度提高控制精度和效果,该方法还能根据长期数据积累不断修正模型来增强鲁棒性,在复杂、动态、高不确定性的低压配电环境特别适用,但自适应控制对数据完整性、时效性和算法稳定性要求更高,得保证数据质量和计算资源配置。

3.3 电能质量监测与反馈机制

实现优化控制闭环,基础环节是建立完善的电能质量监测与反馈机制,该机制不但给系统运行状态提供可视化

支撑,还为控制策略的迭代与校正给出关键依据,其有在线监测、数据传输、集中分析与反馈调节四大功能模块。在关键节点和光伏接入点部署在线监测设备,采用高精度传感器和智能采集单元,能以毫秒级周期采集各类电能质量指标如总谐波畸变率(THD)、电压偏差、三相不平衡度等,通过边缘计算或者本地缓存方式进行数据初步处理,处理后的数据经通信网络往监控平台或者云端服务器上并统一归档分析,结合历史趋势和预测模型评估系统稳定性和潜在风险。监控平台可设置阈值告警机制,当电压或者谐波水平超限时触发本地或者远程控制动作以实现快速响应调节。反馈机制向控制系统提供实时评价结果和调控建议以引导其优化控制策略,如调整逆变器功率因数设定、启动有源滤波器、配置无功补偿设备等,通过持续监测和动态反馈,既能实现电能质量实时调控,又能为运维决策、系统规划和故障分析提供数据支撑,从而提升配电系统运行的安全性、经济性和智能化水平。

4 工程应用与发展前景分析

4.1 控制系统集成与实施要点

分布式光伏电能质量控制工程化落地,控制系统集成设计与实施环节特别关键,这对控制策略实际效果和运行稳定性有着直接影响,系统集成时要充分考量配电网络结构的复杂性、多样性,按照光伏接入节点位置、电源容量、负载特性搞差异化设计,合理安排有源滤波器、动态电压调节器、智能逆变器这些控制设备,结合现场运行特点设定控制参数,并且硬件部署时要保证设备互联互通能力,用标准化接口和协议,让数据采集、控制信号传输、远程调度能兼容,而对于多控制对象协同工作的系统,得构建统一调度平台,集中管理、调度各控制节点状态,防止控制逻辑冲突、资源浪费,在施工和调试阶段,要重视通信网络稳定性、安全性测试,确保满足实时性要求、构建网络冗余机制,现场工程人员要有系统识别、参数调节、故障处置能力,这样系统运行初期才能及时应对各种突发状况,总体而言,控制系统集成工程既是技术问题又是管理问题,只有科学规划、分步实施、多方协作,系统才能高效运行、长期稳定。

4.2 标准与规范的完善方向

分布式光伏接入及其电能质量控制的技术标准与管理规范当下还处在不断完善的进程中,尤其在低压配电网场景里存在标准滞后、适应性差、执行尺度不统一等问题制约了技术推广和工程一致性实施,现有标准大多参照《光伏发电并网技术规定》《低压电能质量公共电网限值标准》等文件但在应对多类型控制技术协同应用、智能逆变器运行策略设定、电能质量动态指标评估等方面仍有欠缺,往后急需从三个方面推进标准体系建设,一是强化接入评估标准,细化并网点电压偏差、谐波限值与逆潮流容限的测评方法,推动并网前可行性论证朝着量化、规范化方向发

展,二是完善控制设备配置规范,确定各种类型控制装置的选型范围、响应时间、精度等级与通信要求,为工程应用中的设备配置和调试提供指导,三是建立电能质量持续监测与评价机制标准,明确数据采集周期、指标更新频率以及预警分级规则,提高配电网运行管理的科学性和精细化水平。

4.3 面向未来的智能化发展路径

新一代信息技术和电力电子技术深度融合之后,未来分布式光伏接入系统的电能质量控制就要全面走向智能化发展阶段,其核心特征为自动感知、自主决策、协同控制和远程运维。一方面,构建于物联网和边缘计算之上的电能质量感知网络能全面覆盖并实时获取电压、谐波、频率等多维指标,从而给智能控制提供数据支撑;另一方面,融合人工智能技术的控制系统具备模式识别、趋势预测和策略优化能力,在复杂运行环境下可做出最优控制响应以实现控制逻辑不断演进和自我修正。云平台和数字孪生技术引进后,系统远程运维和运行状态模拟成为可能,工程人员可在线进行系统评估、设备调度和异常处置,极大提高运行效率和管理智能化水平。未来,智能逆变器将不再是单一设备,而是作为“电网边缘控制节点”存在,与储能系统、电动汽车、智能用电终端等协同运行,形成源-网-荷-储联动的多能系统,在保证电能质量的提升配电系统灵活性和弹性,为构建新型智能电力系统打基础。

5 结语

分布式光伏大规模接入给绿色能源发展带来新动能,但也使低压配电网电能质量受到严峻挑战,系统分析其影响机理并综合运用有源滤波、动态电压调节、智能逆变控制等技术能有效缓解电压波动、谐波干扰等问题,结合分布式协同控制和数据驱动方法可提升系统响应的灵活性和智能化水平,往后要加强标准建设与工程实践的融合以推动智能化、平台化管控体系落地,为构建高质量电网提供坚实保障。

【参考文献】

- [1]李艳平,江丽丽,那泓,等.分布式光伏配电网承载力影响因素及提升方法综述[J].价值工程,2025,44(12):145-148.
- [2]王刚.分布式光伏接入对配电网电能质量的影响[J].光源与照明,2025(3):163-165.
- [3]倪野.光伏接入对配电网的影响及对策研究[J].光源与照明,2025(2):127-129.
- [4]蓝伟,郑丹.分布式光伏消纳下的低压配电网储能规划研究[J].光源与照明,2025(1):135-137.
- [5]周琦,袁宇波,张宸宇,等.分布式光伏直流汇聚接入拓扑及多级协同控制策略[J].供用电,2025,42(1):43-51.

作者简介:彭淼(1988.9—),女,毕业于大连理工大学,本科学历,中级工程师,研究方向:计算机通信;王蓉(1993.7—),女,毕业于大连理工大学,大学本科,中级工程师,研究方向:电气工程及其自动化。