

Impact of distributed photovoltaic power generation on power quality of distribution network and improvement measures

Jiahang Zhang

Datang (Shanghai) Electric Power Energy Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

Abstract

With the increasingly prominent environmental problems and energy crisis, distributed photovoltaic power generation, as a clean and sustainable energy utilization mode, is more and more widely used in the distribution network. However, the grid connection of distributed photovoltaic power generation also brings many challenges to the power quality of the distribution network. This paper deeply analyzes the distributed photovoltaic grid for distribution network voltage deviation, voltage fluctuation and flash, harmonic, three-phase imbalance power quality index influence mechanism, and on the basis of the corresponding improvement measures, including optimizing the distributed power access location and capacity, reactive power compensation technology, harmonic management technology and intelligent control strategy, aims to improve the distribution network power quality of distributed photovoltaic grid conditions provide theoretical support and technical reference.

Keywords

distributed photovoltaic power generation; power distribution network; power quality

分布式光伏发电并网对配电网电能质量的影响及改善措施

张佳航

大唐(上海)电力能源有限公司, 中国·上海 200000

摘要

随着环境问题和能源危机的日益突出, 分布式光伏发电作为一种清洁、可持续的能源利用方式, 在配电网中的应用越来越广泛。然而, 分布式光伏发电的并网也给配电网电能质量带来了诸多挑战。本文深入分析了分布式光伏发电并网对配电网电压偏差、电压波动与闪变、谐波、三相不平衡等电能质量指标的影响机制, 并在此基础上详细阐述了相应的改善措施, 包括优化分布式电源接入位置和容量、采用无功补偿技术、谐波治理技术以及智能控制策略等, 旨在为提高分布式光伏发电并网条件下配电网电能质量提供理论支持和技术参考。

关键词

分布式光伏发电; 配电网; 电能质量

1 引言

传统化石能源的大量消耗带来了严重的环境污染和能源短缺问题, 发展可再生能源已成为全球能源领域的共识。分布式光伏发电以其分布式布局、就地消纳、建设周期短等优点, 在能源转型中发挥着重要作用。然而, 由于分布式光伏发电的间歇性、波动性以及随机性等特点, 其大规模接入配电网后, 不可避免地会对配电网的电能质量产生影响。保障配电网的电能质量是电力系统安全、稳定、经济运行的关键, 因此, 深入研究分布式光伏发电并网对配电网电能质量的影响及改善措施具有重要的现实意义。

【作者简介】张佳航(1997-), 女, 中国黑龙江七台河人, 硕士, 助理工程师, 从事电力工程研究。

2 分布式光伏发电并网对配电网电能质量的影响

2.1 对电压偏差的影响

分布式光伏发电系统输出功率受光照强度、温度等因素影响, 具有明显的间歇性和波动性。当光伏发电功率较大且本地负荷较小时, 多余的电能会向配电网倒送, 导致线路首端电压降低, 末端电压升高, 产生电压偏差。尤其是在农村等负荷较轻且分布式光伏接入较多的地区, 电压升高问题更为突出。例如, 某农村配电网中, 分布式光伏装机容量较大, 在光照充足的中午时段, 部分线路末端电压超出允许范围, 影响了用户设备的正常运行。

根据电路原理, 线路电压降可表示为:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$$

其中, ΔU 为电压降, P 为有功功率, Q 为无功功率, R 为线路电阻, X 为线路电抗, U 为线路额定电压。当分布式光伏向电网倒送有功功率 P 时, 会使电压降减小, 导致线路末端电压升高。

2.2 对电压波动与闪变的影响

光照强度的快速变化以及分布式光伏逆变器的频繁启停, 会导致光伏发电输出功率的快速波动, 从而引起配电网电压波动与闪变。当多个分布式光伏系统同时发生功率波动时, 其叠加效应可能会使电压波动和闪变问题更加严重。在一些多云天气条件下, 由于云层的快速移动导致光照强度频繁变化, 分布式光伏发电功率波动剧烈, 使得配电网电压出现明显的波动和闪变, 影响了对电压质量要求较高的用户设备正常工作, 如精密电子设备、照明灯具等。

电压波动可通过电压变动频率和电压变动幅度来衡量。光伏发电功率的波动会导致电压变动幅度 ΔU 发生变化, 而光照强度的频繁变化则会使电压变动频率增加, 从而产生电压波动与闪变问题。

2.3 对谐波的影响

分布式光伏逆变器在将直流电转换为交流电的过程中, 会产生大量的谐波电流。这些谐波电流注入配电网后, 会使电网电压、电流波形发生畸变, 导致电能质量下降。谐波不仅会影响电气设备的正常运行, 增加设备损耗, 还可能引发继电保护装置误动作、通信系统干扰等问题。例如, 某分布式光伏电站附近的企业, 由于受到光伏逆变器产生的谐波影响, 其生产设备的电机出现过热、振动加剧等现象, 降低了设备使用寿命和生产效率。

逆变器产生的谐波主要集中在特定的频率段, 如 5 次、7 次、11 次等。根据傅里叶分析, 逆变器输出电流可表示为:

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

其中, I_n 为第 n 次谐波电流幅值, ω 为基波角频率, φ_n 为第 n 次谐波电流相位。大量的谐波电流注入电网, 会导致电网电流谐波含量增加, 引起电压畸变。

2.4 对三相不平衡的影响

分布式光伏发电系统通常采用单相接入配电网的方式, 由于各相负载的随机性以及光伏发电出力的不均衡, 容易导致配电网三相不平衡。三相不平衡会使变压器、电动机等设备产生额外的损耗, 降低设备利用率, 同时还会影响继电保护装置的动作准确性。在一些居民小区, 分布式光伏分散接入不同相, 由于各相光伏出力和居民用电负荷的差异, 导致三相电压和电流不平衡, 影响了小区内电气设备的正常运行。

三相不平衡度可通过负序电压(电流)与正序电压(电流)的比值来衡量。分布式光伏的单相接入方式以及各相出力和负荷的不均衡, 会导致配电网中出现负序分量, 从而增大三相不平衡度。

3 改善分布式光伏发电并网条件下配电网电能质量的措施

3.1 优化分布式电源接入位置和容量

合理选择分布式光伏的接入位置和容量是改善配电网电能质量的重要前提。通过对配电网潮流计算和电能质量分析, 确定分布式光伏的最佳接入点, 使光伏发电功率能够在本地有效消纳, 减少对电网的影响。同时, 根据配电网的负荷特性和承载能力, 合理规划分布式光伏的装机容量, 避免因过度接入导致电能质量问题。

例如, 利用配电网潮流计算软件, 对不同接入位置和容量的分布式光伏进行仿真分析。在一个典型的辐射状配电网中, 通过计算不同节点接入不同容量光伏时的电压分布、功率损耗等指标, 发现将分布式光伏接入负荷中心附近的节点, 且控制其容量在一定范围内, 能够有效降低电压偏差和功率损耗, 提高电能质量。

3.2 采用无功补偿技术

无功补偿是改善配电网电压质量和降低功率损耗的有效手段。对于分布式光伏发电系统, 可采用静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)等无功补偿装置, 根据光伏发电功率和电网电压的变化, 动态调整无功补偿量, 维持配电网电压稳定。

以 STATCOM 为例, 其工作原理是通过电力电子器件将直流侧的电能转换为交流侧的无功功率, 快速补偿配电网的无功需求。STATCOM 能够实时跟踪电网电压和负荷的变化, 快速响应并输出所需的无功功率, 具有响应速度快、补偿效果好等优点。在分布式光伏接入的配电网中, 安装 STATCOM 后, 可有效改善电压偏差和电压波动问题, 提高电能质量。

3.3 谐波治理技术

3.3.1 安装滤波器

针对分布式光伏逆变器产生的谐波, 可安装滤波器进行治理。滤波器分为无源滤波器和有源滤波器。无源滤波器由电容器、电抗器和电阻器组成, 通过调谐至特定的谐波频率, 对谐波电流进行分流, 达到滤波的目的。有源滤波器则是通过检测电网中的谐波电流, 产生与之大小相等、方向相反的补偿电流, 注入电网以抵消谐波电流。

在实际应用中, 可根据谐波特性和电网情况选择合适的滤波器。例如, 对于谐波含量较低且主要为特定次谐波的场合, 无源滤波器具有成本低、结构简单等优点; 而对于谐波含量较高且谐波成分复杂的情况, 有源滤波器能够提供更好的滤波效果。在某分布式光伏电站, 安装了混合型有源滤波器, 该滤波器结合了无源滤波器和有源滤波器的优点, 有效降低了电网中的谐波含量, 使电压波形得到明显改善。

3.3.2 改进逆变器控制策略

通过改进逆变器的控制策略, 减少谐波的产生。例如,

采用多电平逆变技术,增加逆变器输出电压的电平数,使输出电压波形更接近正弦波,从而降低谐波含量。此外,采用脉宽调制(PWM)技术,优化调制策略,如空间矢量脉宽调制(SVPWM)等,也能够有效减少谐波的产生。

SVPWM技术通过对逆变器开关状态的优化组合,使逆变器输出的电压矢量更接近圆形旋转磁场,降低了谐波含量。同时,该技术还具有直流电压利用率高、开关损耗小等优点。在新型分布式光伏逆变器中,采用SVPWM控制策略,有效改善了逆变器输出电能质量,减少了对配电网的谐波污染。

3.4 智能控制策略

3.4.1 最大功率点跟踪控制

分布式光伏发电系统的输出功率与光照强度、温度等因素密切相关。采用最大功率点跟踪(MPPT)控制技术,能够使光伏阵列始终工作在最大功率点附近,提高光伏发电效率。常见的MPPT控制方法有扰动观察法、电导增量法等。

扰动观察法通过周期性地扰动光伏阵列的工作电压,比较扰动前后的功率变化,来判断最大功率点的方向,进而调整工作电压。该方法原理简单、易于实现,但在光照强度快速变化时,容易出现误判和振荡现象。电导增量法根据光伏阵列的功率-电压特性曲线,通过检测电导的变化来跟踪最大功率点,具有跟踪精度高、响应速度快等优点。通过采用高效的MPPT控制技术,不仅能够提高光伏发电系统的发电量,还能减少因功率波动对配电网电能质量的影响。

3.4.2 分布式能源协同控制

将分布式光伏发电与其他分布式能源(如分布式储能、微型燃气轮机等)以及配电网负荷进行协同控制,可有效提高配电网的稳定性和电能质量。例如,当光伏发电功率过剩时,将多余的电能存储到分布式储能系统中;当光伏发电功率不足或负荷高峰时,释放储能系统中的电能,以平衡电网功率。同时,通过对分布式能源和负荷的实时监测与控制,实现分布式能源的优化调度,减少对配电网的冲击。

在一个包含分布式光伏、分布式储能和可控负荷的微电网系统中,通过建立智能协同控制模型,根据实时的发电、负荷和储能状态,优化各部分的运行策略。当光照强度下降导致光伏发电功率降低时,储能系统自动放电补充功率缺口,同时根据负荷的重要性对可控负荷进行适当调整,确保微电网的稳定运行和电能质量。

3.5 配电网升级改造

对配电网进行升级改造,提高其承载能力和适应性,也是改善分布式光伏发电并网条件下电能质量的重要措施。包括加强电网网架结构,提高线路的供电能力和可靠性;采用绝缘导线、电缆等新型输电材料,降低线路电阻和电抗,减少电压降;安装智能电表、分布式能源监控系统等设备,实现对配电网运行状态的实时监测和远程控制。

在某地区,通过对配电网进行升级改造,将部分老旧线路更换为电缆,并在关键节点安装智能电表和监控设备。

改造后,配电网的供电能力得到显著提升,能够更好地接纳分布式光伏发电,同时对电网运行状态的实时监测和分析,为及时发现和解决电能质量问题提供了有力支持。

4 案例分析

4.1 某工业园区分布式光伏发电项目

某工业园区建设了大规模的分布式光伏发电项目,总装机容量为5MW。该项目采用了多个分布式光伏阵列,通过逆变器接入配电网。在项目运行初期,由于分布式光伏的接入,配电网出现了明显的电压升高、谐波超标等电能质量问题。

针对这些问题,首先对分布式光伏的接入位置和容量进行了优化调整,将部分光伏阵列接入负荷较大的区域,减少了功率倒送。同时,安装了一套有源滤波器,对谐波进行治理。此外,还采用了STATCOM进行无功补偿,稳定电压。经过一系列的改进措施后,配电网的电能质量得到了显著改善,电压偏差控制在允许范围内,谐波含量大幅降低,满足了工业园区内企业对电能质量的要求。

4.2 某居民小区分布式光伏发电系统

某居民小区屋顶安装了分布式光伏发电系统,以户用光伏为主,总装机容量约为500kW。由于居民用电负荷的随机性以及分布式光伏的单相接入方式,小区配电网出现了三相不平衡问题,部分用户电压波动较大。

为解决这些问题,在小区配电室安装了三相不平衡调节装置,根据各相电流和电压的实时监测数据,自动调整各相的负荷分配,减小三相不平衡度。同时,对分布式光伏逆变器进行了优化控制,采用了先进的MPPT算法和PWM调制策略,减少了功率波动和谐波产生。通过这些措施,小区配电网的三相不平衡问题得到有效解决,电压稳定性明显提高,保障了居民的正常用电。

5 结论

分布式光伏发电作为一种重要的可再生能源利用方式,在配电网中的应用越来越广泛。然而,其并网对配电网电能质量带来的影响不容忽视。通过深入分析分布式光伏发电并网对配电网电压偏差、电压波动与闪变、谐波、三相不平衡等电能质量指标的影响机制,并采取相应的改善措施,如优化分布式电源接入位置和容量、采用无功补偿技术、谐波治理技术、智能控制策略以及配电网升级改造等,可以有效提高分布式光伏发电并网条件下配电网的电能质量。

参考文献

- [1] 大规模光伏发电对电力系统的影响探析[J]. 刘洲红. 流体测量与控制,2023(05)
- [2] 基于灰色预测的自动化太阳能光伏并网发电系统设计[J]. 孙安; 陈阳. 流体测量与控制,2022(06)
- [4] 应对继电保护多场景的数字仿真测试方法. 刘清泉;杨鹏;李铁成;王献志;文明浩. 中国电力,2025(02)