

The impact of distributed photovoltaic grid connection on voltage stability of distribution network and its control measures

Zhong Gao¹ Changcui Wang² Yuchen Dong¹

1. Liaocheng Guangming Electric Power Service Co., Ltd., Chiping Company, Liaocheng, Shandong, 252100, China

2. Liaocheng Guangming Electric Power Service Co., Ltd., Liaocheng, Shandong, 252000, China

Abstract

Distributed photovoltaics have the advantages of being clean and efficient, and can be widely connected to the distribution network. However, due to the influence of natural factors such as light and temperature on its output power, it exhibits intermittent and fluctuating characteristics, which poses significant challenges to the voltage stability of the distribution network. This article starts from the power characteristics of distributed photovoltaic grid connection, and deeply analyzes its impact mechanism on the voltage amplitude, voltage fluctuation, and three-phase voltage imbalance of the distribution network, in order to reveal the key problems such as voltage exceeding limits and transient instability under high penetration grid connection scenarios. Based on the analysis of the impact mechanism, comprehensive control measures including energy storage collaborative control, flexible load management, distribution network topology optimization, and advanced control strategies are proposed from the dimensions of active regulation and passive adaptation, in order to provide theoretical support for improving the voltage stability of distributed photovoltaic grid connected distribution networks.

Keywords

Distributed photovoltaics; Distribution network; Voltage stability; Regulatory measures

分布式光伏并网对配电网电压稳定性的影响及调控措施

高重¹ 王长翠² 董玉臣¹

1. 聊城市光明电力服务有限责任公司茌平分公司, 中国·山东·聊城 252100

2. 聊城市光明电力服务有限责任公司, 中国·山东·聊城 252000

摘要

分布式光伏因具备清洁且高效的优点, 于配电网中实现广泛并网。然而, 由于其输出功率会受到光照、温度这类自然因素的影响, 呈现出间歇性以及波动性的特征, 进而给配电网电压稳定性带来相当显著的挑战。本文从分布式光伏并网所具备的功率特性出发, 深入地分析其对配电网电压幅值、电压波动还有三相电压不平衡这些方面的影响机制, 从而揭示在高渗透率并网场景之下电压越限、暂态失稳等关键问题究竟是因何形成。基于对影响机制的分析, 从主动调控与被动适应这两个维度, 提出涵盖含储能协同调控、柔性负荷管理、配电网拓扑优化以及先进控制策略等在内的综合调控措施, 以此来为提升分布式光伏并网配电网电压稳定性提供理论方面的支撑。

关键词

分布式光伏; 配电网; 电压稳定性; 调控措施

1 引言

在“双碳”目标的驱动影响之下, 可再生能源发电技术得以迅猛发展, 其中分布式光伏凭借安装灵活以及能够就近消纳等特点, 成为配电网中可再生能源接入的主要形式之一。分布式光伏实现并网运行, 不但优化了能源消费结构, 还降低了输电过程中的损耗; 不过与此同时, 也改变了传统

配电网“单向供电”这样的拓扑结构以及功率流特性。由于光伏输出功率极易受到气象条件的影响从而产生剧烈波动, 当并网渗透率达到一定水平的时候, 配电网电压将会面临幅值偏移、波动加剧等一系列问题, 严重的情况下甚至有可能引发电压崩溃, 对配电网安全稳定运行构成威胁。所以, 深入探究分布式光伏并网和配电网电压稳定性之间的内在关联, 并且提出科学有效的调控策略, 对于推动分布式光伏规模化并网运行而言具有重要的现实意义。

【作者简介】高重 (1990-), 男, 中国山东聊城人, 本科, 工程师, 从事电力工程研究。

2 分布式光伏并网的核心特性及配电网电压稳定基础

2.1 分布式光伏并网的核心特性

分布式光伏的并网特性主要是由其发电原理以及运行方式所决定，其核心特性集中体现在功率输出具备波动性、间歇性以及并网接口呈现电力电子化。就功率输出特性而言，光伏电池的输出功率与光照强度、环境温度呈现非线性关系，比如在正午光照强烈的时候功率能够达到峰值，而在清晨、傍晚以及阴雨天气功率则会显著降低甚至变为零，这种日内存在的波动以及季节方面的差异，导致光伏功率很难进行精准预测。与此同时，云层遮挡等突发的气象变化，会引发功率出现短时的剧烈波动，其波动幅度能够达到额定功率的30% - 50%，并且波动频率较高。从并网接口特性来看，分布式光伏通常通过逆变器接入配电网，逆变器具有快速开关特性，使得光伏电源呈现出“电流源”特性，这与传统同步发电机的“电压源”特性存在本质上的区别，此种变化改变了配电网的故障电流特性以及调压机理，使得传统基于同步发电机的调压手段难以直接适用^[1]。

2.2 配电网电压稳定的核心内涵及评价指标

配电网电压稳定性，是指其在遭受扰动之后，凭借自身调节或者外部控制来让电压恢复至允许范围之内这样一种能力，此能力主要可被划分成静态电压稳定以及暂态电压稳定两方面；其中静态电压稳定关注的是配电网于稳态运行这样一种状态之下，去应对负荷缓慢出现变化或者光伏功率渐渐发生改变时对于电压的维持能力，而暂态电压稳定聚焦的则是在出现如短路故障、光伏功率突然发生骤变等突发扰动之后，电压所具备的快速恢复能力；与此同时，电压稳定所涉及到的核心评价指标包含有电压幅值偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡度等方面，其中电压幅值偏差需要被控制在额定电压的 $\pm 7\%$ 这一范围之内，电压波动值应当不超过0.02p.u.，三相电压不平衡度在正常运行的时候不应大于2%，这些指标是直接对配电网电压稳定水平进行反映的要素，同样也是判断分布式光伏并网对其影响程度的关键依据所在^[2]。

3 分布式光伏并网对于配电网电压稳定性所产生的影响机制

3.1 针对电压幅值的影响机制

分布式光伏并网对于配电网电压幅值所造成的影响，主要是通过功率流发生变化这样一种方式来实现，而这种影响的方向以及程度与并网的位置、渗透率以及负荷分布之间有着密切相关的联系；在传统的辐射型配电网当中，功率是从变电站母线朝着负荷进行单向流动的，电压会沿着供电线路逐步产生降低；当分布式光伏在负荷端附近实现并网的时候，光伏所输出的功率能够直接为本地负荷进行供给，使得线路的功率传输量有所减少，进而让线路电压降出现

减小，导致末端电压得以升高，这样一种“电压抬升效应”在轻负荷、高光伏渗透率这样的场景之下表现得尤为明显；当光伏渗透率达到过高的时候，如果光伏所输出的功率远远超出了本地负荷的实际需求，那么多余的功率就会朝着上级电网进行反向输送，从而导致并网点以及沿线的电压出现大幅升高的情况，甚至会超出允许范围进而形成“电压越限”；与之相反的是，当光伏功率因为诸如云层遮挡等原因突然发生骤降的时候，如果负荷依旧保持不变，线路所传输的功率就会突然出现增加，从而致使电压迅速下降，形成“电压跌落”；除此之外，不同并网位置的光伏对于电压所产生的影响也存在着一定的差异，靠近变电站母线的光伏对末端电压所造成的影响相对较小，而处于偏远负荷端的光伏对于局部电压的调节作用则显得更为显著^[3]。

3.2 针对电压波动的影响机制

电压波动其本质上是配电网当中有功功率或者无功功率出现了瞬时失衡的情况，分布式光伏功率所具有的波动性是引发配电网电压波动最为主要的诱因；当光伏功率出现短时剧烈波动的时候，配电网当中的有功功率平衡就会被打破，由于配电网线路本身存在着阻抗，有功功率发生变化就会通过“IR压降”对电压幅值产生一定的影响；举例来说，当云层快速对光伏组件进行遮挡的时候，光伏功率会在数秒之内从额定值快速降低至较低水平，要是配电网当中没有足够的有功备用电源能够及时地对功率缺口进行补充，线路所传输的有功功率就会迅速出现增加，从而导致电压快速下降；而当云层移开之后，光伏功率又会突然出现骤升，线路的有功传输量随之减少，电压又会快速出现回升^[4]。这种快速升降的电压所形成的电压波动，倘若其波动频率以及幅度超出了允许范围，便极有可能会对诸如精密制造设备、医疗仪器这类敏感负荷的正常运行造成极为严重的影响。2.3对三相电压不平衡的影响机制

配电网本身便存在着一定程度的三相负荷不平衡状况，而分布式光伏以单相或三相不平衡方式进行并网这一行为，会使得这一问题更加严峻，从而进一步对电压稳定性形成影响；在类似居民小区等场景当中，分布式光伏大多以单相的形式接入到220V配电网之内，要是单相光伏的安装位置集中出现在某一相上，那么就将导致该相的有功注入量远远高于其他两相，最终使得三相功率分布出现失衡现象；按照基尔霍夫定律来看，三相功率的不平衡会引发中性线电流增大，由此造成各相电压降出现差异，进而形成三相电压不平衡；打个比方来说，当某一相接入大量单相光伏之后，该相的电压抬升幅度要比其他两相大，这便致使三相电压幅值呈现不一致；与此同时，不平衡电流还会在线路阻抗上产生不平衡压降，更进一步地扩大三相电压的差值；三相电压不平衡这种状况，不仅会降低像电动机这类旋转设备的运行效率，还会让诸如逆变器等电力电子设备产生谐波，从而形成一种“不平衡-谐波”耦合效应，间接地影响电压的稳定性。

4 分布式光伏并网配电网电压稳定性调控措施

4.1 基于主动调控的技术措施

这类主动调控措施是借助对分布式光伏功率或者配电网运行状态实施主动干预,从根源上去抑制电压波动以及失衡等问题,其核心要点涵盖了储能协同调控、柔性负荷管理以及先进控制策略;储能系统具备充放电速度快以及调节精度高的特点,其与分布式光伏协同运行能够有效地平抑光伏功率波动;在采用“光伏+储能”联合运行模式的过程当中,储能系统会通过实时监测光伏输出功率以及配电网电压,在光伏功率过剩的时候进行充电操作,而在功率不足的时候实施放电操作,以此维持配电网有功功率平衡,进而实现电压稳定;为了提升调控效果,可以采用模型预测控制算法,根据光伏功率预测值以及负荷需求,提前规划制定储能充放电计划,达成“预测-调控”一体化的目的。

柔性负荷管理是通过引导负荷灵活调整其用电时间以及用电功率,实现与光伏功率的动态匹配;对于像空调、电动汽车这类可调节负荷,可以采用需求响应机制,在光伏功率处于峰值时段提高负荷用电功率,把多余的光伏电量消耗掉,以此避免电压抬升;在光伏功率低谷时段降低负荷功率,降低电压跌落的风险;通过构建负荷聚合商模式,将分散存在的柔性负荷整合成为虚拟电源,参与到配电网电压调节工作当中,提升调节的规模化效应。

4.2 基于被动适应的技术措施

被动适应措施凭借对配电网自身结构以及设备配置的优化,来提升对分布式光伏并网接纳能力,其主要涵盖的内容包括配电网拓扑优化、调压设备升级以及线路参数优化等;配电网拓扑优化经由对光伏并网位置以及线路连接方式的合理规划,以达成减少功率反向传输和电压波动之目的,例如采用环形拓扑取代传统辐射型拓扑,让配电网具备多路径供电能力,如此一来当某一区域光伏功率出现波动时,便能够借助环形网络达成功率率的均衡分配,进而降低局部电压波动幅度,同时,还可通过依据光伏功率和负荷变化对配电网拓扑结构进行调整的动态重构技术,使得电压始终维持在合理范围之内。

调压设备升级是鉴于传统调压设备所存在的调节速度慢、精度低的问题,故而引入柔性交流输电设备,于配电网关键节点安装诸如静止无功发生器和静止同步补偿器这类柔性调压设备,其中 SVG 能够快速跟踪电压变化情况,输出或者吸收无功功率,调节响应时间可达到毫秒级,从而有效抑制因光伏功率波动引发的电压闪变,而 SVC 则通过对电抗器和电容器投切容量的调节,实现无功功率的连续调

节,特别适用于光伏渗透率较高的区域,此外,还会将传统有载调压变压器升级为智能有载调压变压器,结合配电网电压监测数据达成远程自动调压,以此提升调压的及时性与准确性。

4.3 调控措施的协同应用策略

由于单一调控措施难以应对复杂场景之下的电压稳定问题,所以需要建立起“主动调控+被动适应”这种协同调控体系,以实现不同措施的优势互补;在调控时序方面,采用“分层调控”模式,底层由光伏逆变器和储能系统完成本地快速调节,用于应对短时功率波动,中层由 SVG、SVC 等柔性调压设备实现区域协同调节,以解决局部电压越限问题,顶层则由智能调压变压器和配电网拓扑重构达成全局优化调节,从而适应光伏功率的日内以及季节变化;在调控逻辑上,基于配电网数字孪生系统构建电压稳定评估模型,实时模拟不同调控措施所能产生的效果,通过多目标优化算法确定最优调控方案,最终达成“监测-评估-调控”的闭环管理。

5 结语

通过对配电网功率流特性以及电源结构的改变,对电压稳定性造成多维度影响,其核心影响机制呈现为功率波动性会引发电压幅值偏移和波动,单相并网会加剧三相电压不平衡,在高渗透率情况下会出现电压倒送和暂态失稳等特殊问题;针对这些影响,从主动调控和被动适应两个维度所提出的综合调控措施能够有效提升电压稳定性,诸如“光伏+储能”协同运行以及逆变器控制优化能够从源头平抑功率波动,柔性负荷管理达成供需动态匹配,配电网拓扑优化和柔性调压设备升级提升了电网接纳能力,而多措施协同调控体系则实现了不同场景之下的精准调压。研究表明,通过科学的影响机制剖析和针对性的调控措施应用,可显著提升分布式光伏并网配电网的电压稳定水平,为分布式光伏规模化并网提供保障。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 祁元.面向变电站综合控制的分布式光伏发电并网策略研究[J].山西电力,2025,(05):25-29.
- [3] 董延召.基于低碳视角下的分布式光伏电站并网控制方法研究[J].电气技术与经济,2025,(10):7-9+20.
- [4] 张志超,夏汝翔.并网型分布式光伏发电系统设计分析与研究[J].智能建筑电气技术,2025,19(05):34-39.