

The influence and control of large-scale photovoltaic grid connection on regional power grid stability

Ziang Wei

State Power Investment Group Gansu Electric Power Co., Ltd., Lanzhou, Gansu, 730000, China

Abstract

With the advancement of new energy strategies, large-scale photovoltaic power station grid integration has become a crucial direction for energy structure transformation. However, the random and fluctuating nature of photovoltaic power generation poses significant challenges to regional grid stability. This paper systematically analyzes the impact mechanisms of large-scale photovoltaic grid integration on regional power grids from three dimensions of voltage stability, frequency stability, and transient stability, based on power system stability theory. Key issues include power fluctuations caused by sudden solar irradiance changes, voltage deviations induced by inverter control characteristics, and frequency fluctuations exacerbated by low inertia characteristics. On this basis, targeted control strategies are proposed: optimizing photovoltaic inverter control parameters, configuring energy storage systems to mitigate power fluctuations, constructing virtual synchronous generators to enhance system inertia, and implementing flexible transmission technologies to regulate voltage. These strategies provide technical references for ensuring safe and stable operation of regional power grids under large-scale photovoltaic grid integration.

Keywords

large-scale photovoltaic grid connection; regional power grid; grid stability; control strategy; energy storage system

大规模光伏并网对区域电网稳定性的影响及控制

魏子昂

国家电投集团甘肃电力有限公司, 中国 · 甘肃 兰州 730000

摘 要

随着新能源战略的推进,大规模光伏电站并网成为能源结构转型的重要方向,但光伏出力的随机性、波动性也给区域电网稳定性带来显著挑战。本文基于电力系统稳定理论,从电压稳定、频率稳定、暂态稳定三个维度,系统分析大规模光伏并网对区域电网的影响机制,包括光照突变导致的功率波动、逆变器控制特性引发的电压偏差、低惯量特性加剧的频率波动等问题。在此基础上,提出针对性控制策略,即通过优化光伏逆变器控制参数、配置储能系统平抑功率波动、构建虚拟同步机技术提升系统惯量、实施柔性输电技术调节电压,为大规模光伏并网背景下区域电网的安全稳定运行提供技术参考。

关键词

大规模光伏并网; 区域电网; 电网稳定性; 控制策略; 储能系统

1 引言

在“双碳”目标引领下,太阳能属于清洁、可再生的能源,其开发利用规模不断拓展,大规模光伏电站并入电网运行已成全球能源发展必然趋势。光伏能源的大量应用切实降低了化石能源消耗与碳排放,还带动了电力系统往绿色低碳转化。太阳能光伏发电呈现出明显的间歇性、随机性和波动性,其输出电量受光照强度、温度、天气等自然要素影响较甚,况且光伏电站多数借助逆变器接入电网,缺少传统同步发电机的旋转惯量与阻尼特性。这些特质引发大规模光伏

并网后,区域电网的运行特征出现深刻变动,对电网的电压稳定、频率稳定以及暂态稳定形成诸多挑战,甚至有概率引发电网振荡、电压崩溃这类安全事故,大幅降低区域电网的安全可靠水平。本文深度剖析大规模光伏并网对区域电网稳定性的作用机理,制订多维度控制策略格局,为化解大规模光伏并网导致的电网稳定问题给出理论支撑和实践借鉴。

2 大规模光伏并网对区域电网稳定性的影响机制

2.1 对电压稳定性的影响

电压稳定状况是区域电网安全运行的核心指标之一,大规模光伏并网主要借助功率波动和逆变器控制特性两个方面影响电压稳定。光伏出力的随机性与起伏不定是导致电压波动的主要成因。光照强度的猛然变化会让光伏出力在短

【作者简介】魏子昂(2000-),男,中国青海西宁人,本科,助理工程师,从事新能源风力发电、电气工程及其自动化研究。

时间内出现强烈波动,当发电出力突然上涨时,光伏并网点及其周边节点的电压会急剧升高;当输出能力突然下降时,电压就会急剧下降^[1]。这种电压波动倘若超出允许界限,会干扰用电设备的正常工作状态,情况严重时也许引发电压崩溃。若天气属于多云,云层的快速飘动会引起光照强度频繁改变,为区域电网的电压调节增添巨大压力。

在高渗透率光伏并网区域,这种波动还会借由电网传导,干扰更大范围的电压稳定性,尤其会对像精密电子设备、自动化生产线这样的电压敏感型负荷造成不良影响,大概会引起设备故障或生产中断。光伏逆变器控制特性也会对电网电压的稳定性造成影响,传统型光伏逆变器采用PQ控制模式,仅仅响应有功功率和无功功率的指令,对电网电压的支撑作用不强。当电网遇到电压扰动情形时,逆变器欠缺快速无功调节能力,难以迅速压制电压起伏。众多逆变器接入会对电网的等效阻抗特性改变,有概率引发电网出现谐振,进一步加重电压的不稳定性。尤其是在分布式光伏大量接入配电网的情形下,逆变器的集群效应可让电网阻抗呈现非线性变动,谐振风险显著上扬,严重情形下可能造成电力设备受损并引起大面积断电。

2.2 对频率稳定性的影响

频率稳定是支撑电力系统正常运行的关键要素,大规模光伏并网对频率稳定的作用效果主要是系统惯量降低和功率平衡被扰乱。传统电力系统中,同步发电机的旋转惯量能对频率波动起到有效抑制,当系统功率表现出不平衡现象时,旋转惯量放出或吸纳能量,减缓频率变动速度。光伏电站凭借逆变器接入电网,不存在旋转惯量,大规模光伏接入电网会造成区域电网的总惯量明显降低,系统抵御功率扰动的承受能力下滑^[2]。当光伏出力猛然大幅转变或负荷急剧涨落时,系统频率的改变速率变快,频率的偏离量增大,情况严重时可能触发频率保护装置开启,引起机组跳闸,促成电网频率崩溃。

光伏出力的间歇性会扰乱系统的功率平衡,日间阳光充沛时,光伏发出电量大,要是此刻负荷不高,系统将产生功率余量,引发频率提升;夜幕降临光照消失,光伏输出的功率瞬间下降,系统功率缺口呈增大态势,频率就会走低,这种频繁出现的功率平衡破坏,对电网频率调节造成巨大挑战,增添了频率不稳定的潜在风险。光伏出力预测的误差同样会加剧功率平衡方面的矛盾,就算采用先进的预测方法,短期光伏出力的预测误差依旧较大,给调度部门实施功率平衡调节带来极大影响。

2.3 对暂态稳定性的影响

暂态稳定性体现的是电网遇上短路故障、线路跳闸等突发扰动后,是否具备恢复至正常运行状态的能力。大规模光伏接入会改变地区电网的暂态特性,减低系统的暂态稳定程度。一方面,光伏逆变器的响应情况与同步发电机存在明显差别。短路故障出现时,同步发电机的电磁转矩会迅速产

生变化,而光伏逆变器会立即切断输出或调整控制方案,导致故障时期系统的有功功率跟无功功率支撑短缺,加重电网电压与频率的恶化,干扰系统的暂态恢复。不同型号的逆变器在故障局面下的响应措施存在差别,一些逆变器为保障自身设备会迅速脱网,进一步降低系统的功率支撑水平。

另一方面,大规模光伏连接到电网会改变电网故障电流的特性,光伏逆变器出现故障时电流峰值较低,而且衰减速度快,跟同步发电机的故障电流特性差异显著。这会对继电保护装置动作性能造成影响,引起保护装置误启动或拒启动,拖长故障切除时长,造成故障影响范围进一步扩大,减少系统的暂态稳定水平。故障电流出现畸变会影响到故障定位的精度,增添故障处理难度,增长电网恢复时段。

3 大规模光伏并网下区域电网稳定性控制策略

3.1 优化光伏逆变器控制策略

光伏逆变器为光伏电站接入电网的核心设施,改善其控制手段是提升电网稳定性的要点。采用虚拟同步发电机(VSG)的控制技术,利用模拟同步发电机的旋转惯量、阻尼特性与励磁调节相关功能,让光伏逆变器具备频率及电压支撑能力。VSG控制技术可根据电网频率与电压的变化,自行调节有功功率与无功功率的输出,缓和频率及电压的波动。若电网频率上升,VSG提升阻尼功率输出,收集系统剩余电量,在电网频率开始降低之际,VSG把惯量能量放出,补齐系统功率亏空,提升频率。

为再度提升控制绩效,可采用自适应控制算法,依照电网运行状态动态调控VSG的惯量和阻尼参数,促使系统在不同运行工况环境下都能保持良好的稳定水平。增强逆变器的无功调节能力,采用下垂控制抑或虚拟阻抗控制形式,让逆变器可以依据并网电压变动,及时调控无功功率输出。若电网电压升高,逆变器缩减无功功率的输出;要是电压降低了,增强无功功率输出,完成对电压的迅速调节和支撑。采用优化逆变器的参数设计方式,杜绝电网出现谐振,强化系统的电压稳定水平。可以采用主动阻尼控制手段,凭借逆变器送出特定的阻尼信号,抑制电网中谐振模态,保障系统平稳运作。

3.2 配置储能系统平抑功率波动

储能系统呈现快速充放电的能力,可以切实抑制光伏出力起伏,维持系统功率稳定,是保障区域电网稳定性的有效手段。采用锂电池、液流电池等储能设施,跟光伏电站联合运作,当光伏所发电力过多时,储能设施汲取多余电能,当光伏所发电力不足时,储能装置释放电力,填充功率亏空^[3]。依靠这种“削峰填谷”作用,稳定光伏出力涨落,降低其对电网电压和频率的干扰。就不同样式的储能装置,应优化其控制方案,锂电池储能可以采用定功率控制模式,及时响应功率调控需求;液流电池适宜长时间功率调节,能采用恒电流控制方式保障运行的稳定性。

储能系统还可增进系统的暂态稳定水平,故障出现之际,储能系统可迅速作出响应,赋予有功功率及无功功率支持,管控电压和频率的急剧起伏,助力系统迅速恢复稳定运转。储能系统可作为备用的电源,倘若光伏出力骤然降低或系统出现故障时,维持重要负荷的稳定用电。为增进储能系统的利用效率,可以采用储能容量优化配置举措,结合光伏出力特点、负荷变动情形和电网运行要求,判定最优的储能容量及充放电办法。

3.3 应用柔性输电技术调节电压

柔性输电技术具备迅速、精准的无功功率调节能力,可以切实提升区域电网的电压稳定水平。选用静止同步补偿器(STATCOM)、静止无功发生器(SVG)等柔性输电设施,安设于光伏并网点及电网关键节点,这些设备可实时监控电网电压的变化,立即输出或汲取无功功率,实时调整电网电压数值^[4]。当光伏输出功率波动引起电压变动时,STATCOM/SVG可在毫秒级的时段内做出响应,稳定电压起伏,保障电压平稳。在大规模光伏电站并网点设置STATCOM,可以把电压波动幅度限定在 $\pm 2\%$ 以内,符合电网电压质量标准。

STATCOM同样具备低电压穿越能力,在电网故障引起电压下降时,可以不断给予无功扶持,协助电网恢复电压。柔性输电技术可进一步优化电网潮流分布,减少线路电能损耗,加大电网的电力输送水平。凭借合理安排柔性输电设备,可以切实解决大规模光伏并网引发的电压稳定问题,为光伏能源的高效消纳提供后盾。可以选用多目标优化算法,全面考量电压偏差、线路损耗、设备投资等要素,核定柔性输电设备的最优装设位置和容量安排。对柔性输电技术和储能系统实施协同控制,可进一步增进系统的电压调节能力和功率平衡能力,达成长处互补。

3.4 完善电网调度控制体系

周全的电网调度控制体系是保障大规模光伏并网后电网平稳运行的重要支撑。构建光伏出力预测体系,联合气象数据、过去出力数据等,采用机器学习、神经网络等计算方法,精确预估光伏短期与超短期的出力^[5]。依靠预先掌握光伏出力变动趋势,调度中心可规划合理的发电计划与负荷调

度办法,事先调整常规机组电量,留存备用电量,处理光伏出力涨落,保证系统功率平稳。为提高预测准确度,可以融汇多种预测模型,采用加权平均法算出最终预测数值,同时构建预测误差校正机制,按照实际出力情形动态调整预测模型参量。

搭建实时监测与预警体系,对光伏并网点的电压、频率、功率等运行参数实施实时监测。当发现参数呈现异常时,系统迅速发出警示信号,调度人员迅速实施管控手段,如调节逆变器的输出、投入使用储能系统、断开负荷等,阻止故障扩散。增强电网的协同调控,做到光伏电站、常规机组、储能系统等多主体的协同作业,加大系统的整体稳定水准。可以设立分布式协同控制架构,各主体按照本地运行情形和调度指令,自主调节运行策略,取得全局最优管控。

4 结论

大规模光伏实现并网在带动能源结构优化的同时,也使区域电网稳定性面临了诸多挑战,主要呈现为电压波动增强、频率稳定风险增多、暂态稳定状况变差等情形。这些问题的出现归因于光伏出力存在间歇性、随机性以及逆变器具备控制特性。为维持区域电网安全稳定运行,必须采用综合控制手段,涉及优化光伏逆变器控制策略、布置储能系统平抑功率起伏、应用柔性输电技术调节电压值、完善电网调度管控体系等。未来,随着光伏装机规模的持续发展,仍要进一步深度探究光伏并网对电网稳定性的影响机制,带动新能源领域持续健康前行。

参考文献

- [1] 方熙程.考虑不确定性的光伏并网优化调度模型研究[J].中国新技术新产品,2025,(19):17-20.
- [2] 王展澳,任东朝.光伏并网对电力系统影响及光伏并网柔性控制[J].农村电工,2025,33(10):33-34.
- [3] 全凯.大规模光伏电站并网后电网电流谐波问题研究[J].电力设备管理,2025,(17):87-89.
- [4] 于心泽,宋金祥.基于改进一致性算法的大规模分布式光伏并网调压控制[J].电工技术,2025,(16):141-144.
- [5] 芮卓凡.大型光伏风电场并网稳定性的关键问题分析[J].集成电路应用,2025,42(08):310-311.