

大型光伏电站并网运行对区域配电网电能质量的影响及治理措施

赵文涛

浙江雷博人力资源开发有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i12.8600

[摘要] 基于“双碳”目标，新能源的开发和利用范围日益扩大，光伏作为新能源的代表，建立大型光伏电站，在区域配电网中占据重要地位。然而大型光伏电站存在间歇性和随机性，并且需要大量接入并网逆变器等电力电子设备，会影响到传统配电网的电能质量，对光伏的高效消纳和电网的安全稳定运行。本文分析了大型光伏电站并网运行对区域配电网电能质量的影响，提出了“源-网-储”协同的综合治理思路，建立分层治理策略，并通过实例验证其有效性。

[关键词] 大型光伏电站；并网运行；区域配电网；电能质量；治理措施

The impact of large-scale photovoltaic power station grid connected operation on the power quality of regional distribution network and governance measures

Zhao Wentao

Zhejiang Leibo Human Resources Development Co., Ltd

[Abstract] Based on the "dual carbon" goal, the development and utilization scope of new energy is increasingly expanding. As a representative of new energy, photovoltaics play an important role in regional distribution networks by establishing large-scale photovoltaic power stations. However, large-scale photovoltaic power plants have intermittency and randomness, and require a large number of power electronic devices such as grid connected inverters, which can affect the power quality of traditional distribution networks, the efficient consumption of photovoltaics, and the safe and stable operation of the power grid. This article analyzes the impact of large-scale photovoltaic power plants connected to the grid on the power quality of regional distribution networks, proposes a comprehensive governance approach of "source grid storage" collaboration, establishes a hierarchical governance strategy, and verifies its effectiveness through examples.

[Key words] large-scale photovoltaic power station; Grid connected operation; Regional distribution network; Power quality; governance measures

前言

基于国家“双碳”目标战略下，以光伏发电作为代表的清洁能源，开始被广泛的关注和使用，因而大型集中式光伏电站的规模也逐渐增加，成为了当前电力系统的重要组成部分^[1]。在区域配电网中的并网容量渗透率也呈现出增加的趋势。但是在实践应用中，光伏发电在环境因素的影响下，间歇性和波动性较为明显，同时电力电子逆变器作为并网核心设备，在进行直流交流变换中，会引入谐波等非理想特性^[2]。大型光伏电站的并网运行，可以提供清洁电力，但是也会对传统低配电网的电能质量形成一定影响，造成电气设备故障、设备使用时间缩短、供电可靠性降低等问题，基于此，需要进一步探索大型光伏电站并网对区域配电网电能质量的影响，形成高效的综合治理措施，确保电网的安全运行、新能源消纳能力提高，并加快新型电力系统建设。

1 大型光伏电站并网引起的电能质量问题分析

1.1 光伏电站并网系统

光伏电站并网系统为分层汇集、逐级升压的电力电子化系统。系统基本结构包括：光伏阵列、直流汇流和配电环节、并网逆变器、交流升压和汇集系统、并网接入点^[3]。

1.2 主要电能质量问题

光伏电站并网运行会影响到区域配电网的电能质量，主要表现为：

第一，电压出现波动和闪变。云层漂移会造成光照强度剧烈波动的情况下，光伏阵列的输出功率会在非常短的时间内形成变化，造成电网并网，甚至式临近线路母线电压的波动^[4]。当波动在一定幅度和频率的情况下，就会造成照明灯具发出快速闪变情况，影响供电的稳定。此情况多出现多云天气下，和天气情况变化密切相关。

第二，谐波和间谐波污染。目前，电站采用的并网逆变器以脉宽调制技术为主，在快速开关中，半导体器件在输出电流中形成大量高次谐波，进入到配电网后，造成电压波形畸变，使得变压器及电缆出现过热、继电保护误动，通信干扰等情况，同时受到谐振频率耦合的影响造成宽频带的谐波谐振，对系统安全性较大的影响^[5]。

第三，电压出现偏差。光伏发电的处理和日渐符合曲线不完全呈现出匹配的现象。中午光伏大发而区域符合比较轻的情况下，大量的盈余功率会倒送到电网，造成并网电和沿线形成长时间的电压越限。黄昏光伏出力突然降低，而负荷还是在高峰的情况下，受到无功支撑不足或者线路压降增加形成欠电压现象。

第四，三相不平衡的问题。电站三相输出电流不平衡现象的发生，是由于阵列部分出现严重的遮挡、局部组串故障或者是逆变器分组投切控制不足。当不平衡电流到配电网，则会造成配变机线路的三相电压不平衡。

第五，功率因数和无功调节的问题。配置的光伏逆变器，以单位功率因数运行，只输出有功功率，造成光伏在大发的时间短，电站难以动态提供系统所需要的无功支持，导致电网的电压水平恶化。逆变器存在无功调节作用，但器容量受到当前有功处理的限制，处理不当会造成部分电压失稳。

2 关键电能质量问题的产生机理与影响因素

2.1 逆变器控制策略和谐波/间谐波产生的机理

光伏电能转换的核心为并网逆变器，谐波和间谐波的形成，来自于电力电子开关中和为达到并网同分布和功率目标使用控制策略。脉冲宽度调制（PWM）技术会造成谐波的出现，逆变器经过高频开关斩波直流电压，合成期望的基波交流电压，在此期间，会形成特征谐波群，以开关频率和其整数倍次作为中心。锁相环的动态响应特性严重影响到谐波，电流同步

表1 光伏出力波动对PCC电压的影响

电网强度程度	短路容量（MVA）	短路比（50MW 光伏）	等效阻抗（标么值）	理论电压波动幅值	主要影响因素
强电网	500	0.1	小（0.02）	小（<0.5%）	无功波动为主
弱电网	100	0.5	较大（0.1）	显著（2%-3%）	有功、无功波动共同作用
极弱电网	50	1.0	大（0.2）	剧烈（可能>5%）	有功波动占主导

3 大型光伏并网的区域配电网电能质量综合治理策略

随着光伏电站的广泛应用，解决光伏并网带来的复合型电能质量问题，需要构建“主动防御结合被动补偿、多环节协同互动”的综合治理体系。协同治理体系构架，感知层为电能质量在线监测平台，利用通信网络集合光伏电站、电网调控中心、储能系统、补偿装置，形成控制层。

3.1 光伏逆变器的先进控制策略

光伏电站中逆变器是并网行为的决定性单元，对控制软件和算法进行升级后，能够从源头将电能质量进行改善。

第一，多谐振控制器和自适应谐波补偿，基于传统积分控制器，并联多个谐波的谐振控制器。通过利用频率自适应的谐振控制器，对谐波频率进行实时性的跟踪，保证全工况下的高效抑制，引入有源阻尼控制算法，以虚拟阻抗重塑逆变器的输出阻抗特点，可将和电网谐振风险进行主动性规避。利用先进算法，优化开关的状态，可达到电流快速、精准的跟踪，可使

注入的前提基础是对电网电压相位的精准、实时性跟踪。如果电网电压自身存在缺陷或发生不平衡，传统同步参考系锁相环的动态跟踪中出现相位及频率的瞬时误差，其误差经过电流控制器，造成逆变器输出电流中发生和扰动频率相关联的非特征次谐波、间谐波分量。为实现对指令电流的跟踪，控制器存在充足的带宽，对指令变化进行应对。但是，有限的宽带对指令中高频分类跟踪形成误差的风险较高，缺乏抑制电网背景谐波电压，对电流的谐波含量影响较大。

2.2 系统阻抗和宽频振荡的风险

光伏渗透率逐渐增加，电力电子设备和电网的动态交互引发宽频振荡。逆变器为实现对电流指令的快速跟踪，控制环路为一个受控电流源，基于高频段，输出阻抗特征较为复杂。当逆变器的负阻抗和电网的感性阻抗相碰的情况下，形成RLC谐振电路。电网阻抗的频率特性在某个频率的时候会出现峰值如此谐振频率正好在逆变器表现为负阻尼的频带之内，任何一个微小的扰动都会被放大，甚至造成发散的振荡。

系统阻抗和宽频振荡的风险，主要受到以下几个方面的影响，第一，电网拓扑和工况，线路投切、负荷的变化会对电网谐振点进行改变；第二，光伏电站运行点，逆变器输出功率水平影响其小信号阻抗模型；第三，控制参数。负阻尼的频段和程度受到电流环、锁相环的带宽及增益；第四，并联设备的数量。多台逆变器并联，会改变整体等效阻抗，并且引入新的谐振模式。

2.3 光伏出力波动对PCC电压的影响

光伏电站并网点电压变化的主要原因在于光伏出力的随机波动，其影响机理经过简化系统模型开展量化分析。光伏电站经过等效阻抗接入无穷大系统，电站输出有功功率和无功率。在不同强度的电网下，功率波动一致，对PCC点电压影响，如表1所示：

得电流谐波总畸变率明显下降。使其具有较好的动态响应性能。

第二，确保电网的稳定性，对同步发电机的转子运动方程进行模仿，赶往频率变化可通过逆变器进行感知，结合感知结果，对有功出力动态化调整，短时间内可以获得一定的支撑频率。在电压-无功曲线控制策略基础上，形成分布式的无功电源，可参与到部分的电压调节操作中，对中午过电压和黄昏欠电压的问题进行优化。

第三，多模式的运行。在中午的时候，电网电压超过限值的风险较高，需要将光伏有功出力降低，同时把剩下的容量作用到无功出力上，达到通过容量换取电压稳定的效果。改善锁相环和正负序分离算法，保证电网电压出现不平衡或者暂时故障的时候，逆变器还可以达到并网要求，为其提供无功支撑，预防发生脱网加剧系统扰动的情况。

3.2 优化和补偿配电网侧

通过网络侧强化措施，可确保电能质量。

第一，重构网络和优化接入点。重构网络采用智能开关和分段开关，实现动态化，潮流分布在光伏大发的时间段进行改变，可使其重在或电压超过限线路的压力减少。结合接入点短路容量和灵敏度的计算，接入点需要达到结构坚强、短路容量大的要求。协同优化控制你但其的无功调节和变电站有载调压变压器、电容器组的投切。为达到多时间尺寸和多控制设备的分层分区电压自动控制，需经过主站或分布式算法。

第二，电能质量补偿装置安装。采用精致无功发生器，响应可达到毫秒级，通常被用于光伏出力快速波动造成的电压闪变问题和电网故障时候提供动态电压恢复支撑。APF 能够达到实时性检测并注入谐波电流的补偿电流，可有效治理谐波污染。利用 APF 结合无源滤波器结构，无源滤波器除主要特征谐波，APF 补偿剩余谐波，对谐振形成一定的抑制，同时安装动态电压调节器，可使得关键负荷供电具有较好的品质。

3.3 储能系统的配置和调控策略

利用电化学储能，可深度治理电能质量，采用功率型储能用于秒级和分级的光伏出力波动，经过低通滤波、模型预测控制等算法，通过储能系统对功率差额进行吸收或释放，使得光伏电站的并网功率输出更加平滑可控，可对电压波动和闪变形成一定的改善。现代储能变流器，参与有功调节，并兼顾剩余容量或特定时段，快速的发出或者吸收无功功率，形成 SVG 的补充，稳定电压支撑。能量型储能系统用于日级电压偏差问题，

在午间光伏大发的情况下，可对多余的电能进行储存，反送功率下降，在傍晚光伏出力降低而负荷高等的时候放电，可对功率缺额补充，形成“削峰填谷”，可对一日的电压曲线改善。

4 实例验证

4.1 案例介绍

以某沿海工业园区 10kV 配电网为例，包括：变电站（110/10kV）、4 回 10kV 出线。主要负荷工业和商业，日负荷曲线为显著的“双峰”特征。光伏电站采用集中式逆变器，初始设置单位功率因数运行，没有采用高级控制功能。该电站的日照数据以当地气象年数据为依据，对实际出力特征进行模拟。

4.2 搭建仿真模型及场景设计

以 Dig SILENT Power Factory 2023 平台为基础，此平台有具体的光伏组件、逆变器和控制模型库，一般用于分析电能质量和稳定性。负荷利用恒功率（PQ）与恒阻抗（Z）混合模型，以实际参数为依据形成配电网模型。搭建光伏电站模型，利用两层模型结构，上层为电站集总模型，下层为详细电磁暂态模型。此模型可精确的模拟谐波产生的机理。搭建治理设备模型，分为“源”侧、“网”侧、“储”侧。

设计单个典型的日运行场景，仿真的时间确定为 24 小时，步长为 1s。三个场景分别为：基准场景、扰动场景、极端场景，具体设计如表 2 所示。

4.3 治理措施实施前后仿真结果对比分析

电能质量指标的改善效果，如表 3 所示。

表 2 仿真场景设计

场景名称	天气和光照条件	光伏出力特征	核心测试的目的
基准场景	晴朗，光照强度平稳	出力曲线平滑，没有剧烈波动	稳态电压偏差、背景谐波含量及功率因数等长期电能质量指标的分析
扰动场景	多云，采用实测快速变化光照序列	分钟级内发生 30%-70%额定功率的剧烈波动	对随机性功率波动的动态响应评估系统，对电压波动/闪变的严重程度及抑制成效进行考察
极端场景	晴朗，叠加瞬时故障	大发状态下，电网侧发生 150ms 三相短路故障	光伏逆变器的低电压穿越能力及故障清除后的系统暂态电压恢复特性的检验

表 3 关键电能质量指标治理前后对比

评估指标	国家标准限值	治理前	仅“源”侧治理	仅“网”侧治理	“源-网-储”协同治理
PCC 电压波动率	$\leq 3\%$	4.2%	2.8%	2.5%	1.5%
短时闪变 P_{st}	≤ 1.0	1.8	1.3	1.1	0.68
电流 THDi	$\leq 5\%$	8.5%	4.8%	5.2%	2.9%
最低功率因数	≥ 0.95	1.0（固定）	0.95（可调）	0.98	0.97（可调）

结合表 3 可发现，通过单一化的治理，虽然可得到一定效果，当时仍具有一定的局限性，而采用“源-网-储”协同治理方案，以逆变器为源头改善输出特征，SVG 和滤波器进行动态问题处理，储能系统采用能量尺度的调节。虽然初期具有比较高的投资，但具有长效性，可有效提高配电网电能质量和运行的韧性，示范价值较为显著。

5 结束语

大型光伏电站并网会造成电压波动、谐波等电能质量的问题，在电网强度和控制策略的因素下形成较大的影响，利用“源-网-储”协同治理体，改进控制逆变器、SVG 补偿及储能平抑等策略，使得电能质量得到系统性的提高，经过实例验证治理方案的有效性，确保配电网的安全运行。

[参考文献]

- [1]李哲.新能源发电并网对配电网运行的影响及应对措施[J].电气时代, 2022(6): 50-51.
- [2]蒋林梅.分布式光伏并网对配电网的影响及解决措施[J].光源与照明, 2024(8): 93-95.
- [3]孙鸣, 江宏彬.并网光伏逆变器输出特性分析及其谐波源建模[J].电气自动化, 2020, 042(001): 71-74, 78.
- [4]王彦龙.新能源并网对配电网电能质量的影响及其改善措施研究[J].光源与照明, 2025(4): 149-151.
- [5]舒锐.光伏并网对配电网的电能质量的影响[J].通信电源技术, 2022, 39(4): 137-139.