

[光伏并网]

基于高比例光伏台区的无功电压优化策略

文/他悦蓉 任杰
国网上海市电力公司奉贤供电公司

提出一种基于高比例光伏台区的电压控制策略，旨在解决分布式光伏并网引起的谐波污染、电压越限和三相不平衡问题。通过构建分层协同体系架构，利用光伏逆变器的无功/有功调节能力，实现电压平抑和无功优化，以提高配电网的经济性和可靠性。

随着全球能源危机和环境污染的日益严峻，光伏作为清洁、可再生的能源之一，在分布式发电领域占据了重要地位。由于光伏发电的间歇性和不可预测性，其并网对配电网的电压质量、谐波污染和三相不平衡等问题产生显著影响。特别是在高比例光伏接入的配电网末端，电压越限问题尤为突出。

在德国，通过《可再生能源法》等法规的推动，分布式电源必须具备遥测、遥调能力，为电网的实时调控提供基础。同时，《电网加速扩建法》等政策，降低参与再调度的门槛，促进虚拟电厂运营商的参与，增强电网调度灵活性。我国对低压分布式光伏、充电桩和用户侧储能等设备的监测主要依靠电表事后统计分析，无法支持实时调控需要。技术标准层面对低压分布式光伏的遥测、遥调功能并没有明确规定，对其接入点电压偏差、功率因数控制方面的标准较低。

国内研究者提出一系列创新的电压控制策略和优化方法。文献[1]分析分布式光伏接入对配电网电压质量的影响，从单光伏和多光伏接入角度进行理论分析和仿真验证；文献[2-3]基于光伏逆变器的不

同运行状态，实现就地自适应控制，与配电网VQC控制相结合；文献[4-6]利用储能系统构建优化调压模型，以实现电压调节和提升储能运行经济性。这些研究成果展示了分布式光伏并网对配电网电压控制的多方面解决方案，为实现配电网的高效和稳定运行提供了有价值的参考。但其主要按照局部就地平衡策略进行无功调节或基于复杂参数全局优化策略，尚未完全发挥光伏逆变器、储能变流器等新型电力电子设备的无功调节作用。

本研究旨在解决由高比例光伏接入引起的低压配电网电压越限问题，提出一种针对高比例光伏台区全局优化的电压控制方法，充分利用光伏逆变器无功有功资源，构建“群内自治、群间协调”的分层协同体系，优化无功潮流，实现电压调整，提升供电电压质量。

策略研究

低压户用光伏通过具有无功调节能力的逆变器进行并网，具备无功发出和吸收的能力，可调无功容量与逆变器容量的关系为

$$Q_{PV}^{\max} = \pm \sqrt{S_{INV}^2 - P_{PV}^2} \quad (1)$$

基金项目：国网上海市电力公司科技项目（520923240004）

式中， Q_{PV}^{max} 为逆变器的最大无功输出容量； P_{PV} 为光伏发电的有功功率； S_{INV} 为逆变器的容量，可比额定有功容量增加0%~10%。

潮流单向流动是传统低压配电网的基本特征。低压配电网有以下两个显著的特点：①线路 r/x 较高；有功-相角和无功-电压的解耦关系不再存在，即有功和无功均能对电压造成比较显著的影响；②辐射状的拓扑结构，传统配网中电能从配电变压器输送到用户，潮流单向流动，户用光伏分散接入低压配电网各节点，其并网功率若不能完全由本地负荷利用将会导致反向潮流和电压升高。

如图1所示是一条含有 n 个节点的低压配电馈线，并网点有功、无功功率的变化会引起网络节点电压不同程度的改变，因此可以通过调节光伏逆变器的并网有功/无功控制节点电压。在 $r > x$ 的网络中，削减光伏并网有功可以有效抑制节点电压越上限，但通过调节光伏逆变器的并网无功实现电压控制则更为经济。控制策略的制定还需要充分考虑逆变器本身的容量限制。例如，典型的居民负荷峰值通常出现在夜间，此时网络容易出现电压越下限的风险，但光伏并网有功接近于零，逆变器的可控无功容量接近于逆变器容量，因此逆变器具备很强的电压控制能力，节点电压的控制比较容易；而正午时段的光照强度大，光伏接近满发的同时居民负荷通常维持在较低的水平，网络容易出现电压越上限的风险，逆变器的无功可控容量明显低于夜间，因此节点电压的控制难度大。

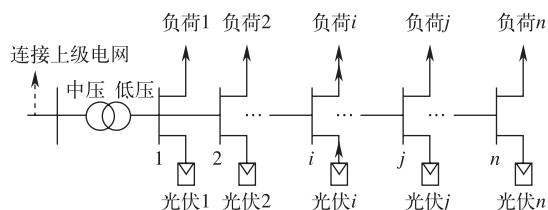


图1 含有 n 节点低压配电馈线

为兼顾控制的有效性和经济性，治理电压越限的控制策略是，首先评估台区内逆变器无功容量是否可以消除配电网中的过电压风险，在此基础上对控制策略进行进一步的设计：①台区无功裕度充足的情况下，仅采用逆变器的无功进行网络电压控制，并通过协调逆变器控制参数设计保证电压控制的有效性；②在网络无功裕度不足的情况下，优先采用逆变器的无功调节对节点电压进行控制，当无功可调容量达到极限后开始削减光伏的并网有功，并进一步利用光伏有功削减所释放的逆变器无功控制容量进行电压控制。

如图2所示，基于光伏逆变器可调容量的电压越限治理策略是以台区为单位的，可协调台区内不同节点间的功率输出，以网络中的电压-有功和电压-无功量化关系为基础设计逆变器控制参数，确定不同节点逆变器在极限条件下的最大无功输出和最大有功削减，确保网络电压控制的有效性。在此基础上，以减小网损电量和光伏削减电量为目标优化模型，对不同节点光伏逆变器的控制参数进行优化设计，尽量减少线路中不必要的无功流动以及光伏削减电量，提高网络运行经济性。

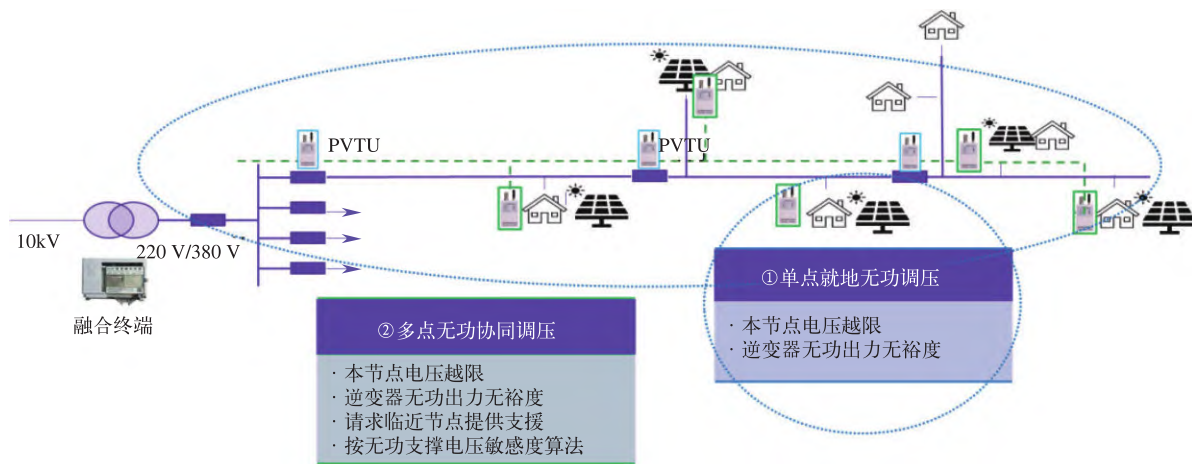


图2 高比例光伏台区无功优化策略

系统遵循“群内自治、群间协调”的分层协同体系架构,实现分布式光伏与台区内电能质量可调资源的分级互动,共同优化台区运行水平。该架构由主站、台区融合终端、光伏用户调控单元和逆变器四个层级组成。如图3所示。



1) 数据采集。安装在并网点的光伏用户调控

3) 无功电压控制。逆变器根据接收到的指令输出无功以调整有功功率,从而调节并网点的电压至允许范围内所需的水平。例如,当检测到节点电压过高时,逆变器会减少其输出的有功功率,增加无功功率输出,以帮助降低电压水平;反之亦然。

奉新五号新村配变容量为400 kV·A，共有两条出线，1回路长度为640 m，2回路长度为480 m，两条线路型号均为LGJ-50。共有普通用电用户151户，其中单相用户131户，三相用户20户。网架结构为单电源双射结构。共有光伏用户15户，装机容量87.96 kW，光伏渗透率22%，且都为单相并网。该台区存在光伏发电无法消纳，末端低压用户高电压问题突出，影响着客户安全有序用电。

该台区采用分布式光伏调控低压配电网各子节点的组网技术，成功实现无功电压的优化控制。基于HPLC/HRF通信技术，在并网点加装光伏用户调控单元（如图4所示），收集和监测用户的运行数据，并通过智能融合终端进行汇总和分析，调节光伏逆变器输出的无功及有功功率，有效解决由分布式光伏发电引起的电压越限问题。特别是在高峰时段，光伏出力超过接入线路或配电变压器额定能力时，系统能够通过调整无功功率输出，避免过电压的风险，保证电力设备的稳定运行和人

(下转第54页)

- 储能创新方向研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 444-451.
- [2] 程林, 齐宁, 田立亭. 考虑运行控制策略的广义储能资源与分布式电源联合规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 27-35+43.
- [3] 张忠会, 雷大勇, 李俊, 等. 基于自适应 ε -支配多目标粒子群算法的含SOP的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2199-2212.
- [4] 刘娇扬, 郭力, 杨书强, 等. 配电网中多光储微网系统的优化配置方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2806-2815.
- [5] 王航. 考虑储能的分布式光伏接入配电网规划与运行及其求解方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [6] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2187-2201+2.
- [7] 张诗杭. 高渗透率光伏并网消纳能力研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [8] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.

(上接第 45 页)

身安全。此外, 通过实施该策略, 还提升电网的稳定性和经济性, 减少不必要的无功流动和光伏削减电量, 为配电网提供一种高效、经济的无功电压管理方案。

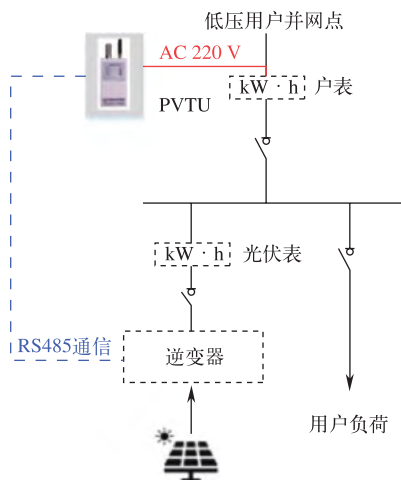


图4 光伏用户调控单元安装示意图

总结与展望

本研究提出一种基于高比例光伏台区的无功电压优化策略, 通过构建“群内自治、群间协调”的分层协同体系架构, 有效利用分布式光伏接入的分散性和逆变器的双向无功出力, 成功解决由大量分布式光伏接入引起的台区高电压等问题, 在提升电网运行经济性和可靠性方面具有显著的应用价值。

对特定环境下的适应性和泛化能力上存在局限, 例如对于不同地区、不同类型的配电网可能因具体条件的差异需要进一步调整优化, 以及在大规模部署和长期稳定性验证方面将面临挑战。EA

(收稿日期: 2024-05-17)

参考文献

- [1] 罗耀强. 配电台区高光伏渗透率下电压影响分析及治理策略[J]. 电力系统装备, 2022(3): 90-93.
- [2] 蔡永翔, 唐巍, 张璐, 等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 133-141.
- [3] 李征, 王文宾, 韩胜峰, 等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.
- [4] 李军徽, 孙大朋, 朱星旭, 等. 光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 47-56.
- [5] 杨涛, 曾国宏. 分布式光伏发电引起电压越限的储能解决方案[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4): 55-57.
- [6] 陈志华, 柯强, 胡经纬, 等. 含分布式光伏的有源配电网无功电压控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(2): 16-24.