高比例分布式电源接入对电压稳定的分析

蔡孝理

湖南亚泰电气设备有限公司 湖南长沙 410004

DOI:10.12238/ems.v7i7.14294

[摘要] 随着新能源的大规模发展与双碳目标的推进,分布式电源(DG)正快速接入我国各级电网,特别是在部分地区呈现出高渗透、高比例的趋势。这一变革对传统配电网的电压稳定性提出了全新挑战。本文以苏州地区典型10 kV配电网为例,构建多工况仿真模型,采用DIgSILENT PowerFactory平台对DG大规模接入情况下的电压运行特性进行分析。研究表明,高比例DG接入可能引发电压越限、波动放大及系统动态不稳定等问题。本文提出了包括智能逆变器电压调控、无功补偿优化、区域协调控制和数字孪生仿真在内的多种优化对策,并验证了其在提升电压稳定性方面的有效性。研究成果为高比例分布式电源友好接入提供了理论支撑和工程参考。

[关键词] 电压稳定; 配电网; 智能逆变器; 无功调控; 数字孪生

引言

随着我国能源结构持续向清洁化、分散化转型,分布式电源(Distributed Generation, DG)呈现出爆发式增长态势。尤其在“双碳”战略推动下,光伏、风电等分布式能源大量接入中低压配电网络,对传统配电系统运行机制提出了全新挑战。电压稳定性作为电网安全运行的关键指标之一,其动态特性在高比例分布式电源接入情形下表现出明显的脆弱性,已成为配电网运行及规划的核心技术难题。本文围绕高渗透率分布式电源接入背景下的电压稳定问题展开系统研究,从机理分析、典型场景建模、稳定性影响因素到优化控制策略展开深入剖析,结合典型工程案例提出具有可实施性的改进建议,旨在为我国主动配电网的规划与运行提供理论支撑与实践参考。

1 高比例分布式电源接入系统的特性分析

1.1 分布式电源类型与接入模式概述

分布式电源按照技术来源可分为太阳能、风能、生物质能、燃气分布式能源及小型水电等,其中太阳能光伏占比最高。根据《中国分布式光伏发展年度报告(2024)》数据显示,截至2024年底,我国分布式光伏装机容量已达2.6亿千瓦,其中江苏省装机容量超3500万千瓦,位居全国首位。

在配电网层面,分布式电源主要通过并网逆变器接入中低压母线,典型接入模式包括:

- 用户侧低压接入(220V/380V): 适用于户用光伏、商业建筑屋顶光伏等;
- 台区配变侧接入(10kV/20kV): 适用于分布式光伏电站、小型风电场等;
- 馈线末端独立并网接入: 分布式储能或微电网场景中常见。

这种“点多面广、分布无序”的接入方式打破了传统单向潮流模式,引发电压控制、无功调节及保护配合等一系列适应性问题。

1.2 高比例接入特性对配电网结构的影响

在传统配电网中,功率潮流沿固定方向自主变电站馈送至末端负荷节点,结构清晰、调控手段成熟。但高比例DG接入后,系统呈现出以下显著变化:

- 潮流反向性增强: 当本地DG出力超过负荷需求时,出现“电能倒送”,主变电站低压侧反送现象普遍;
- 电压剖面失衡: DG接入点附近节点电压偏高,远端节点可能因电流分流效应产生电压波动;
- 负荷特性混合化: 部分用户转为“源-荷一体”,传统负荷预测模型失效;
- 系统惯性削弱: 分布式电源大多为电力电子接口,其对系统电压/频率波动的惯量支撑能力弱于传统同步发电机。

1.3 典型分布式电源的功率波动特性分析

以苏州市工业园区某高新园区为例,集中接入屋顶光伏装机容量达45MW,年平均负荷水平约38MW,白天光照充足时段DG出力可覆盖90%以上负荷。

表1 为2024年6月典型晴天气的实际监测数据(数据经归一化处理):

时间(小时)	光伏出力(p.u.)	电网购电功率(p.u.)	节点电压(p.u.)
08:00	0.15	0.85	0.98
10:00	0.55	0.45	1.01
12:00	0.97	0.03	1.05
14:00	0.90	0.10	1.04
16:00	0.60	0.40	1.01
18:00	0.15	0.85	0.97

可见, 正午阶段 DG 出力接近满功率, 导致节点电压明显抬升, 甚至逼近运维限值 (1.05 p. u.)。若逆变器缺乏动态无功调节功能, 极易引发电压过冲, 影响周边用户供电安全。

2、电压稳定机理与影响因素分析

2.1 电压稳定的基本理论

电压稳定性是指电力系统在遭受扰动后, 节点电压能够恢复到原始或新的稳定值的能力。根据扰动类型, 分为:

(1) 静态电压稳定性: 小扰动 (如负荷缓慢变化) 条件下的稳定性;

(2) 动态电压稳定性: 较大扰动 (如短路、切负荷) 下的系统响应能力。

电压失稳通常表现为局部节点电压持续下降, 最终可能导致系统解列、保护误动甚至区域性停电事故。

2.2 电压稳定性评估指标与分析方法

目前常用的电压稳定性分析指标包括: 节点电压灵敏度指标 (Q-V 灵敏度), 电压裕度指数 (L-index), 最小特征值法 (Jacobian 矩阵特征值), 模态分析法等。在工程实践中, 配合 DIgSILENT PowerFactory 仿真平台进行潮流计算与动态响应模拟, 是当前主流的分析方法。

2.3 高比例分布式电源对电压稳定的影响机理

(1) 电源接入位置与数量的影响

DG 接入位置对系统电压剖面具有显著影响。靠近主变侧

接入的 DG 因线路阻抗小, 电压调节能力弱; 而接入中压末端的 DG, 在负荷低、出力高时易形成“尖峰电压”。

DIgSILENT 仿真结果显示: 在 10kV A1 线末端接入 3 组各 500kW 的光伏系统后, 晴天中午节点电压升至 1.078 p. u., 逼近允许上限 (1.10 p. u.)。

(2) 电压无功支撑能力变化

大多数分布式光伏系统采用恒功率因数模式运行 ($\cos \phi \approx 1$), 在系统电压波动时无法主动调节无功, 导致电压缺乏快速支撑能力。若无外部无功补偿设备介入, 系统易陷入电压不稳状态。

(3) 控制协调策略的作用

部分逆变器具备 Q-V 控制或 Volt-Watt 控制策略, 但目前仍缺乏统一协调标准。不同制造商间设备控制行为存在差异, 容易引发逆变器间“争夺无功”现象, 甚至形成控制环路震荡, 进一步加剧电压波动。

3、典型高比例DG接入运行场景分析

3.1 研究场景概述与模型设定

选取苏州工业园区 10kV A1 馈线为仿真模型基础, A1 馈线总负荷约 8.7MW, 接入光伏系统容量 6.3MW, 光伏出力与负荷呈典型昼夜错峰特性, 具备较强代表性。利用 DIgSILENT PowerFactory 搭建网络模型, 设置三种工况分析系统电压响应情况:

表 2 为三种工况分析系统电压响应情况

工况编号	DG 出力状态	负荷水平 (MW)	光伏出力 (MW)	分析重点
工况 1	高光照正午	7.1	6.2	电压上升风险
工况 2	清晨低光照	8.3	1.0	电压偏低风险
工况 3	云遮波动时段	8.0	4.0±1.5 (波动)	动态稳定性评估

3.2 工况 1: 高出力工况下的电压抬升

仿真结果显示, 工况 1 中 A1-15 与 A1-16 节点 (光伏集中并网点) 电压分别达到 1.076 p. u. 与 1.083 p. u., 超过无功补偿调节能力上限。此类“反送式电压抬升”现象, 已成为运行部门调度关注的重点问题。

分析发现, 若 DG 接入点集中在馈线末端, 在 DG 高出力时不仅抬升本地电压, 还会通过电流回送主干线造成系统“电压耦合”, 影响其他负荷节点运行, 具有明显的区域联动性风险。

3.3 工况 2: 清晨低出力时段的电压跌落

当 DG 出力不足、负荷陡增 (如清晨 8:00 工业用户批量投运) 时, 系统依赖主变供电能力, 且部分电缆线路电压下降加剧, 仿真显示 A1-17 节点最低电压降至 0.927 p. u., 逼近配网运行安全下限。

此外, 逆变器无法提供无功支撑的特性加剧了该问题,

若无配套 SVG 或 SVC 装置介入, 很容易引发低电压限值越界。

3.4 工况 3: 云层遮挡引发的动态电压波动

在真实运行中, DG 出力的不确定性和波动性是最为复杂的风险来源。仿真设置波动频率为 ±1.5MW/分钟, 评估系统短周期电压响应能力。结果显示:

(1) A1-15 至 A1-18 节点存在 ±0.043 p. u. 的电压波动;

(2) 控制延时与过电压保护滞后可能引发逆变器联动脱网;

(3) 快速波动对主变负载率冲击明显, 需配合动态电压调控机制。

这一场景突显了在缺乏协调控制策略与快速响应设备的条件下, DG 波动易触发链式扰动甚至“脱网-再送-超调”循环现象。

4、电压稳定控制策略与优化建议

针对高比例分布式电源接入引发的电压不稳定问题, 必

须从终端自适应、系统协调与仿真预测三个层面同步推进技术优化, 构建多级联动的电压控制体系, 为工程运行提供可靠支撑。

4.1 终端自适应能力提升

(1) 智能逆变器与电压响应策略推广

目前部分光伏系统采用恒功率因数运行, 缺乏对电网电压变化的响应, 容易在低电压时段支撑不足, 高电压时段无功注入过量。为此, 应推广具备 Volt/Var 控制功能的智能逆变器, 使其依据实时电压偏移自动调节无功输出。当母线电压低于 0.95 p. u. 时, 逆变器主动吸收无功; 当电压高于 1.05 p. u. 时则释放无功, 且响应时间须控制在 1 秒以内, 以实现快速调节与局部精准支撑。该策略在提升局部电压稳定性方面较传统方式更具鲁棒性和区域适应性。

(2) 分布式无功补偿装置应用

对于高分布式电源密度区域, 在台区边界或节点末端部署快速动态无功补偿设备至关重要。推荐采用模块化 SVG 或 STATCOM, 其具备毫秒级响应和双向调节能力, 能有效抑制电压骤变和谐振。以江苏某新建工业园区为例, 2023 年在 3 台配变下装设 SVG, 设备可在 10ms 内响应, 实现 ± 300 kVar 无功动态调节, 使电压合格率由 93.2% 提升至 99.1%, 显著抑制了云层变化引起的电压振荡。

4.2 系统协调调控优化

(1) 建立分布式电源电压协调平台

单一节点的被动调节已难以满足区域电压稳定要求, 应由地市级电网调控中心牵头, 构建集监控、预测、协调于一体的 DG 调控平台。平台通过统一接入协议 (如 IEC 61850 或 Modbus TCP) 实现与智能逆变器、无功补偿装置和可调变压器的实时双向通信, 依据负荷和气象数据实现主动预测和分层调控。苏州供电公司于 2024 年试点的 DG 主动调控平台, 覆盖 1500 余个接入点, 投运后电压越限事件同比下降 48%, 展示出较高的工程推广价值。

(2) 调压设备选型及位置优化

分布式电源多集中于配网末端, 传统变电站集中调压常存在区域响应不足问题。建议依据敏感节点分析, 合理布设具备自动无级调压功能的柱上变压器和分接装置。配合时序控制策略与负荷预测模型, 实现日内分时调压曲线匹配, 对广域馈线可采用分区式分接开关调控, 提升整体调压灵活性与响应效率。浙江温州龙湾区 2023 年的实践表明, 通过该策略, DG 接入率超过 60% 的主干馈线末端电压波动范围由 ± 0.07 p. u. 缩小至 ± 0.03 p. u., 有效缓解了分布式发电对电

压的冲击。

4.3 仿真驱动与数字孪生应用

借助 PSASP 或 DIgSILENT PowerFactory 等专业仿真平台, 并结合 SCADA 与 AMI 等实时监测系统, 可构建区域配电网的数字孪生模型, 实现对电压稳定性的动态评估与预警。该模型具有建模灵活、实时同步的特点, 可针对 DG 出力突变、负荷阶跃和控制器失效等典型扰动场景进行快速仿真。通过在线学习与多模型预测, 提前识别潜在不稳风险, 并为调度决策提供精细化方案支持。以苏州某工业园区 A1 馈线为例, 仿真结果显示, 优化前日内电压波动范围达 ± 0.06 p. u., 优化后缩减至 ± 0.02 p. u. 以内, 显著提升了系统动态稳定性。

综上所述, 分布式电源高比例接入下, 借助智能终端调控、系统级协同以及仿真预测技术, 可实现电压稳定性的大幅改善, 为新型电力系统的安全运行提供有力保障。

5、结论与展望

在高比例分布式电源广泛接入的背景下, 传统配电网电压稳定性面临深层次挑战。本文以苏州地区典型配电网为基础, 结合 DIgSILENT 仿真平台构建多工况模型, 系统分析了高出力、低出力及波动扰动下的电压运行特性, 明确了 DG 引发的电压上升、跌落及动态不稳定问题的成因及影响路径。通过引入智能逆变器、就地无功补偿、调控平台与数字孪生等多维优化策略, 显著提升了系统的电压稳定性与可控性。未来, 随着源网荷储深度融合趋势加快, 应进一步推进分布式电源的可调、可测、可控能力建设, 形成主动协同、分层控制的运行机制。同时, 基于大数据驱动电压预测与仿真评估体系将成为支撑调度决策智能化的重要抓手, 为构建新型电力系统提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1]王忠民, 马鑫, 李耀武. 高比例分布式电源接入对配电网电压稳定性影响分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 73-81.
- [2]国家能源局. 《关于推进分布式发电高质量发展的指导意见》[Z]. 北京: 国家能源局, 2021.
- [3]黄文亮, 王俊峰, 冯晓静. 分布式电源与配电网协调运行控制策略综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 1932-1942.
- [4]彭苏萍, 刘宝华. 中国能源转型战略路径与挑战[J]. 中国软科学, 2021(5): 1-11.
- [5]姚庆勇, 郭长清. 面向新能源场景的电网电压稳定控制关键技术研究[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 28-34.