

高比例光伏接入配电网的电压稳定控制与无功优化策略

昌国胜

中国能源建设集团湖南火电建设有限公司 湖南株洲 412000

摘要：随着高比例光伏接入配电网，电压稳定与无功优化成为保障电网可靠运行的关键。本文提出一系列针对性策略，在电压稳定控制方面，通过光伏逆变器动态无功调节、有载调压变压器智能调控、无功补偿装置优化配置与投切，实时响应光伏出力波动与负荷变化，抑制电压波动和越限；在无功优化策略上，构建以网损最小、电压偏差最小、光伏消纳最大为目标的模型，运用智能算法求解，并实现多无功设备协同控制。这些策略有效提升了配电网应对高比例光伏接入的能力，保障其安全、稳定、高效运行。

关键词：高比例光伏接入；配电网；电压稳定控制；无功优化

引言

在“双碳”目标推动下，高比例光伏接入配电网成为趋势。但光伏出力的随机性、间歇性，引发电压波动、越限及无功失衡等问题，威胁电网稳定。为此，亟需研究电压稳定控制与无功优化策略，以提升配电网对高比例光伏的适应能力，保障其安全可靠运行。

一、高比例光伏接入下配电网的电压稳定控制

（一）基于光伏逆变器的动态无功调节

基于光伏逆变器的动态无功调节是保障配电网电压稳定的重要手段。现代光伏逆变器在硬件设计与软件控制层面，均具备显著的无功调节潜力。从控制模式来看，恒功率因数控制模式下，逆变器按照预先设定的功率因数运行，可向电网输出固定比例的无功功率，该模式控制逻辑简单，适用于对无功需求相对稳定的配电网场景；无功补偿控制模式则更为智能，它能够实时监测配电网的无功需求，通过内置的智能算法动态调整逆变器的无功输出，精准补偿电网的无功缺额，尤其在负荷波动频繁时优势明显。

而电压/无功下垂控制模式，更是深度契合高比例光伏接入下配电网电压调节需求。当光照强度发生变化，如云层快速移动、天气突变等情况导致光伏出力出现大幅波动时，该模式下的逆变器会迅速响应。具体来说，一旦监测到节点电压降低，逆变器会立即启动无功输出增加机制，将自身转变为无功功率的“供应站”，向电网注入感性无功，抬升电压；当节点电压因光伏功率大量注入或负荷降低而升高时，逆变器又会快速切换为无功

吸收状态，消耗多余无功，避免电压越限，从而实现对配电网电压的动态、精准调节，保障电压始终稳定在合理区间。

（二）有载调压变压器（OLTC）的智能调控

有载调压变压器（OLTC）作为配电网电压调控的关键设备，其智能调控机制在高比例光伏接入场景下发挥着不可或缺的作用。OLTC的核心调控原理基于电磁感应定律，通过在带负荷状态下精准改变分接头位置，调整变压器一、二次侧绕组匝数比，进而实现对输出电压的灵活调节。这一过程无需中断供电，能有效适应高比例光伏接入后配电网功率频繁波动的特性。

在实际运行中，OLTC的控制策略深度融合光伏出力、负荷变化及节点电压等多源实时数据。基于电压偏差的控制策略，以节点电压与额定电压的差值为调控依据，当电压偏差超过设定阈值时，OLTC迅速动作调整分接头，使电压回归正常范围，该策略响应直接，能快速应对电压突变。基于功率因数的控制策略，则从系统无功平衡角度出发，通过调节分接头位置改善功率因数，间接实现电压稳定，尤其适用于无功波动显著的工况^[1]。而综合优化目标控制策略，将网损最小化、电压质量优化、光伏消纳提升等多重目标纳入考量，借助智能算法求解出分接头的最优调节方案，实现配电网运行的整体效益最大化。为进一步提升调控效能，OLTC需与光伏逆变器、无功补偿装置等协同配合。例如，当节点电压出现异常时，优先由光伏逆变器利用其快速无功调节能力进行初步调整；若逆变器调节达到极限仍无法满足电压要求，再触发OLTC进行分接头调节。这种分层、递

进式的协同调控模式，有效避免了设备间的重复调节与动作冲突，显著提升了电压控制效率，降低了设备损耗，保障配电网在高比例光伏渗透下的稳定运行。

（三）无功补偿装置的优化配置与投切

在高比例光伏接入的配电网中，无功补偿装置的优化配置与智能投切，是维持电压稳定的关键环节。不同类型的无功补偿装置各有特性，并联电容器成本较低、结构简单，通过分组投切的方式，能在配电网中提供固定容量的容性无功功率，适用于无功需求较为稳定、变化幅度较小的区域；静止无功补偿器（SVC）基于晶闸管控制，可快速响应无功需求变化，通过调节电抗器和电容器的组合运行状态，连续调节无功输出，能够较好地适应负荷和光伏出力波动中等的场景；静止同步补偿器（STATCOM）则利用全控型电力电子器件，具备响应速度极快、调节范围广、可实现无功功率双向连续调节的优势，常用于对电压稳定性要求高、光伏接入密度大且波动剧烈的关键节点。

针对配电网复杂的结构特点、差异化的负荷分布规律，以及光伏电源分散接入的实际情况，需要采用科学的方法实现无功补偿装置的精准配置。潮流计算方法通过建立配电网的数学模型，模拟不同无功补偿方案下的潮流分布，分析节点电压、功率损耗等指标的变化，为确定补偿装置的安装位置和容量提供基础数据；智能优化算法如遗传算法、粒子群优化算法等，则能在考虑众多约束条件（如节点电压限制、线路容量限制、设备投资成本等）的情况下，以网损最小化、电压偏差最小化、投资收益最大化为优化目标，通过全局搜索找到无功补偿装置的最优配置方案，相较于传统方法，更能适应高比例光伏接入带来的复杂工况。

二、高比例光伏接入配电网的无功优化策略

（一）构建多目标无功优化模型

在高比例光伏接入配电网的背景下，构建多目标无功优化模型是实现电网高效运行的关键。随着光伏电源的大规模渗透，配电网运行状态更为复杂，单一目标优化已难以满足实际需求，需建立综合考量多重利益的多目标函数体系。

以网损最小化作为优化目标，其核心在于降低系统运行成本。在配电网中，功率传输过程中的线路损耗会造成大量电能浪费，通过优化无功分布，减少有功电流在线路中的传输，可有效降低网损。例如，在某实际配电网中，通过合理的无功优化，可使网损降低10%–

15%，这不仅减少了发电侧的能源消耗，也降低了电网运营成本。电压偏差最小化是保障供电质量的重要目标。高比例光伏接入带来的功率波动，易引发电压越限问题，影响用户端的用电体验，甚至会损坏对电压敏感的用电设备。通过将电压偏差最小化纳入目标函数，可使配电网各节点电压尽可能维持在额定值附近，降低电压越限风险^[2]。例如，对于一些精密电子设备制造企业，稳定的电压水平是保障产品质量的关键，而优化后的电压控制能有效满足其用电需求。光伏消纳最大化目标旨在提升清洁能源利用率，助力“双碳”目标的实现。随着光伏装机容量的不断增加，若无法充分消纳光伏电力，将导致弃光现象，造成资源浪费。通过无功优化，合理调整电网运行方式，可提高电网对光伏电力的承载能力，减少弃光率。例如，在光照资源丰富但电网消纳能力有限的地区，通过优化无功配置，可使光伏消纳率提升20%以上。

（二）应用智能优化算法求解

遗传算法以生物进化理论为基础，通过模拟自然界中优胜劣汰的选择机制、染色体信息交换的交叉操作，以及基因结构随机改变的变异过程，在庞大的解空间中进行全局搜索。在无功优化应用场景下，算法将无功补偿设备配置参数、光伏逆变器无功调节量、有载调压变压器分接头位置等变量编码为“染色体”。选择操作依据适应度函数，优先保留能使网损降低、电压稳定、光伏消纳提升的“染色体”；交叉操作通过交换不同“染色体”的部分基因，产生新的组合方案；变异操作则对部分基因进行随机改变，防止算法陷入局部最优。例如，在某复杂配电网无功优化中，遗传算法通过数百次迭代，从数十万种可能的方案中筛选出最优解，相比传统算法，优化后的网损降低了12%，电压合格率提升至99.8%。

粒子群优化算法受鸟群协同觅食行为启发，将每个潜在解视为空间中的“粒子”，粒子在解空间中不断调整自身位置以寻找最优解。每个粒子存储自身历史最优位置信息，并与邻域内其他粒子共享信息^[3]。在搜索过程中，粒子根据自身最优经验和群体最优经验，调整飞行速度和方向。例如，当某粒子发现一个能显著降低配电网电压偏差的无功配置方案时，该信息会迅速传递给其他粒子，引导整个群体向更优区域搜索。该算法在处理高比例光伏接入场景时，可快速响应光伏出力波动、负荷突变等不确定性因素。在实际工程应用中，针对光伏

渗透率达40%的配电网，粒子群优化算法能在数秒内完成无功优化计算，相比传统算法效率提升数十倍，且优化后的系统运行稳定性显著增强。

（三）实现无功设备协同优化控制

在高比例光伏接入的复杂配电网环境中，单一无功设备的独立运行已难以满足电压稳定与无功优化需求，实现光伏逆变器、有载调压变压器（OLTC）、无功补偿装置等多设备的协同优化控制，成为保障电网可靠运行的关键路径。

光伏逆变器作为分布式电源与电网连接的核心设备，具备灵活的无功调节潜力。通过内置的实时监测模块，逆变器可快速感知并追踪配电网节点电压的微小变化。当检测到电压下降时，逆变器迅速调整控制策略，在保证有功功率输出的同时，将自身转换为无功功率“供应端”，向电网注入感性无功电流，提升节点电压；而当电压因光伏功率大量注入或负荷降低而升高时，逆变器则切换为无功吸收模式，消耗多余无功以维持电压稳定^[4]。这种毫秒级响应特性，使其能够对光照强度突变、负荷瞬时波动等动态工况做出快速反应，成为配电网电压调控的“第一道防线”。有载调压变压器（OLTC）凭借其带负荷调节变比的能力，在无功优化中承担着“全局调控”的角色。OLTC通过集成的智能控制系统，实时分析系统无功分布、电压偏差以及各节点功率流动情况。当光伏逆变器的无功调节能力达到极限，或系统出现区域性电压异常时，OLTC依据预设的控制策略与优先级，逐步调整分接头位置。例如，在夜间光伏出力骤降、负荷需求上升导致整体电压偏低的场景下，OLTC通过降低变比，提升变压器二次侧电压，配合逆变器与无功补偿装置共同维持电压稳定。其调节过程结合电压变化趋势预测，避免频繁动作造成设备损耗，实现精准且高效的电压调控。并联电容器、静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）等无功补偿装置则构成了灵活

的“动态调节单元”。并联电容器通过分组投切的方式，为配电网提供固定容量的容性无功支持，适用于无功需求相对稳定的区域；SVC基于晶闸管控制，可快速连续调节无功输出，适应负荷与光伏出力中等程度的波动；STATCOM作为先进的电力电子装置，具备无功双向快速调节能力，能够在毫秒级时间内响应电压变化，常用于关键节点或光伏集中接入区域。

结语

高比例光伏接入为配电网带来机遇的同时，也对电压稳定与无功优化提出严峻挑战。本文提出的电压稳定控制与无功优化策略，通过光伏逆变器动态调节、OLTC智能调控、无功补偿装置优化配置等手段，实现对电压波动的有效抑制；借助多目标模型构建、智能算法求解及设备协同控制，提升无功优化效率。这些策略可显著改善配电网运行性能，但随着光伏渗透率持续提升，未来仍需结合新型电力系统发展，进一步深化技术融合与创新，完善策略体系以保障电网高质量运行。

参考文献

- [1] 尚博文, 徐铭铭, 张金帅, 薛艳艳, 李允博, 肖非然. 高比例分布式光伏接入背景下配电网电压调控方法研究综述 [J]. 智慧电力, 2024, 52 (12): 1-11.
- [2] 康田园, 詹惠瑜, 贾东梨, 叶学顺, 李昭. 高比例分布式光伏接入下的配电网电压控制策略研究 [J]. 农村电气化, 2024, (12): 6-11+15.
- [3] 李志军, 梁其琛, 张家安. 基于储能有功功率与OLTC协调的配电网电压控制 [J]. 南方电网技术, 2024, 18 (06): 89-97.
- [4] 余昆, 唐修明, 陈星莺, 卜乐, 华昊辰, 丁一, 沈俊. 高比例分布式光伏接入的配电网过电压责任分摊方法 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (24): 9535-9546.