

分布式光伏接入配电网优化技术

李金泽

国网天津市电力公司城南供电分公司, 天津 300202

摘要： 随着新能源的快速发展, 分布式光伏作为一种重要的清洁能源形式被广泛接入配电网。然而, 光伏出力的波动性和不确定性对配电网的电压稳定性和能量管理带来了挑战。本文围绕分布式光伏接入配电网的优化技术展开研究, 分析了光伏并网对配电网的影响, 并构建了优化调度模型。该模型采用智能优化算法结合分布式控制策略, 旨在最小化网络损耗、提升电压稳定性, 从而优化光伏功率分配和无功补偿方案。仿真结果表明, 该优化方法能有效提升配电网的运行效率, 降低电能损耗, 提高光伏的消纳能力, 为分布式光伏的高效接入与运行提供理论支持和工程参考。

关键词： 分布式光伏; 配电网; 优化技术; 电压稳定性; 智能优化算法

Optimization Technology for Distributed Photovoltaic Access to Distribution Network

Li Jinze

State Grid Tianjin Electric Power Company Chengnan Power Supply Branch, Tianjin 300202

Abstract: With the rapid development of new energy, distributed photovoltaics have been widely integrated into the distribution network as an important form of clean energy. However, the volatility and uncertainty of photovoltaic output pose challenges to the voltage stability and energy management of the distribution network. This article focuses on the optimization technology of distributed photovoltaic access to the distribution network, analyzes the impact of photovoltaic grid connection on the distribution network, and constructs an optimization scheduling model. This model adopts intelligent optimization algorithms combined with distributed control strategies, aiming to minimize network losses, improve voltage stability, and optimize photovoltaic power allocation and reactive power compensation schemes. The simulation results show that this optimization method can effectively improve the operational efficiency of the distribution network, reduce energy loss, enhance the consumption capacity of photovoltaics, and provide theoretical support and engineering reference for the efficient integration and operation of distributed photovoltaics.

Keywords: distributed photovoltaics; distribution network; optimizing technology; voltage stability; intelligent optimization algorithm

引言

分布式太阳能发电因其绿色低碳特性而被广泛推广, 全球能源结构的转型对持续进步提出了更高要求。然而, 太阳能发电的波动性和难以预测性在电压波动、功率调度和能量平衡方面给配电网的运行带来了挑战。为适应太阳能普及率的变化, 现有的调度技术需要进行改进, 以确保配电网的平稳运行。本文旨在通过改善功率分配和无功补偿方案, 为分布式太阳能发电的有效运行提供理论和实践支持。为此, 我们提出了基于智能优化算法的配电网优化调度模型, 该模型以降低网络损耗、增强电压稳定性为目标, 对功率分配和无功补偿方案进行了优化。

一、分布式光伏接入配电网概述

(一) 分布式光伏的发展现状与趋势

近年来, 分布式太阳能作为一种重要的可再生能源得到了快速增长。借助太阳能进行发电的光伏技术, 与传统矿物能源相

比, 拥有清洁、可持续的环保优势。随着全球对可再生能源需求的增加, 光伏装置的技术革新和成本下降进一步推动了其应用范围的扩大。光伏组件效率的提升和生产成本的降低, 使得更多家庭和企业能够安装分布式太阳能系统^[1]。政策支持也促进了光伏产业的快速增长, 许多国家和地区出台了包括补贴、税收优惠、电网补

贴在内的刺激政策，推动了分布式光伏在城市和农村地区的广泛应用。随着技术的不断进步及政策的持续支持，分布式光伏有望在未来继续保持快速增长，为配电网的能源结构调整与优化提供更为广阔的空间。

(二) 配电网对分布式光伏的适应性挑战

在时代的潮流中，分布式光能的接入对传统电力分配网络带来了显著的适应性考验。太阳能设备的不连续性和变化性正给电力网络结构带来挑战，需要应对的是功率起伏对网络电流的影响。在轻负载情形下，大范围太阳能接入甚至可能导致电流等级不平衡，进而遭遇电能供给品质的考量。而原本集中化布局的电力网络基础设施，面对反向流动特点，传统安排和管控机制已显露出其无法高效处理的劣势。光伏系统在多样化及其不均匀分布下，使配电网的信息交流和协作能力面临考验。当下紧迫的任务是提升其技术和管理灵活性，以保障电力系统的稳定性。^[2]

(三) 分布式光伏优化技术的研究意义

分布式光伏优化技术的探索是电力系统现代化进程的重要一环。优化技术能够出色地完成合理分配光伏出力与电网资源的协同调控任务，通过构建精准模型和高效算法，使电网运转更加可靠、经济、稳定，表现因此卓越。该技术对于解决能源供需问题、加速清洁能源消纳以及减少碳排放具有重大价值。它是智能调控体系的理论基础，也是新型电力系统建设的重要支撑，是实现可持续能源发展的路径之一。

二、分布式光伏接入对配电网的影响

(一) 光伏出力特性及其对电网运行的影响

依靠日光辐射，太阳能发电总体而言具有随机波动性，变化显著且不连续。这一现象在时间和空间上都是如此，波动性主要受到日照强度、气象条件及季节更替的影响。这种变化性直接影响电压的稳定度与质量水平，可能由此诱发电压变化。大输出时局部电压过高是太阳能发电特有的现象。而系统经常面临稳定度不足的情况，若出现急剧下降，则在普及率较高的情境中，电网传统运行方式可能会失效^[3]。应针对光伏出力特性研究适应性强的优化调度策略，以增强分布式光伏在配电网中的运行稳定性和可靠性。

(二) 配电网电压稳定性与功率质量问题

在当前的技术格局下，分布式太阳能大范围接入使得配电网电压与功率品质受到显著影响。光伏发电的变动性与不连续性导致电压变得不稳定，频率因此波动。光伏系统对有功产生影响，借此扰乱平衡，导致电压异常变化。机器的耐久性与稳定性可能受电压削弱影响，从而引发故障。因此，电网的运行与功率品质问题都需要有效对策进行改善。在促进分布式光伏发电发展的同时，尤其是在电压与功率品质问题中，监测和治理都不可忽视。

(三) 高渗透率光伏接入带来的技术挑战

在电力网络中融入了光伏绿色能源后，高渗透率光伏的引入造成了许多技术上的挑战。光伏发力的不稳定性和随机性导致能源分布时具有无把握性。大幅的波动和超越极限的情况可能导致节点电压波动问题盛行^[4]。网络因显著的光伏并网容量增加而导致无功功率平衡难以保持。在现代电力体系中，电力稳定性因此遭到干扰。高随机性出力的光伏可能会引发保护设备的误动作与拒动作，导致防护协调性能在电力系统中下降。这更要求传统电

网络模型进行动态更新和调度。这些技术策略的挑战与瞬时输出调整需要制定光伏与负荷发电的应对策略来应对变化。为了最大化克服这些阻碍，急需加强调度技术和控制策略，以保障光伏的可靠有效利用。^[5]

三、分布式光伏优化调度模型

(一) 光伏功率分配优化目标与约束条件

增强电力网运作效能与稳固性，减少功率损耗至最低水平，以及改良太阳能电力布局的宗旨就在于此。这包括提高清洁能源的利用率，满足成本效益和工艺性的多项需求，降低能量传输损耗，提升接点电压水平，从而保障系统运作的安全与可靠性。约束条件的设计需综合考虑配电网运行特性与光伏系统特性。节点电压需维持在允许范围内，以确保电能质量；线路负载能力不能超出可承受范围，以保障设备安全运行；光伏出力需满足气象条件下的功率约束。此外，还需考虑无功功率平衡及并网逆变器容量限制，以确保分布式光伏的平稳接入及高效运行。模型的构建应注重约束条件的全面性与可操作性，确保优化方案能够在实际工程中得以应用。^[6]

(二) 无功补偿策略与电压调控方案

我们将无功调控方法和电压调整计划视为提升配电网电压稳定性的重要手段。分布式光伏接入配电网后，由于其波动性和不确定性，电压波动问题难以避免。我们通过无功调节来调整系统中无功功率的分布，以此稳定电压水平，减小电压偏差。我们还利用静态同步补偿器或动态电压调整器等动态无功补偿设备，结合光伏逆变器的智能调整，显著提升系统对电压波动的应对能力。我们以实时反映并调整的方式应对波动性和不确定性，以保持电网电压的稳定。这一过程实际上显著提升了电网运行的安全性和可靠性。

(三) 多目标优化建模思路

多目标优化建模旨在满足多个优化目标，将分布式光伏接入配电网的效能最大化。为了应对光伏功率分配和无功补偿这两个核心问题的复杂性，多目标优化模型需要兼顾电压稳定性与网络损耗最小化。据此，我们建立数学模型，并通过目标函数将不同优化指标进行量化评估。约束条件包括光伏出力的变化特性及电网运行参数。在优化过程中，我们采用 Pareto 前沿来寻找最佳权衡方案，确保各目标之间的协调发展，进而促进配电网的高效运行与稳定。

四、智能优化算法与分布式控制策略

(一) 典型智能优化算法概述

一般的智能优化算法在诸多光伏发电系统接入配电网的改良技术中扮演着核心角色。如粒子群优化算法 (PSO)、遗传算法 (GA)、蚁群算法 (ACO) 等，这些都是常用的智能优化算法。这些算法因其在求解复杂非线性优化问题中的优越性能而得到广泛应用。粒子群优化算法在小规模或实时性要求较高的问题中表现突出，因为它模拟了群体动物的协同行为，能够实现快速的全局搜索。遗传算法基于自然选择和遗传机制，通过种群的进化能够求解出全局最优解，对于多维度复杂问题求解非常有用。蚁群

算法模拟了蚂蚁觅食过程中的信息素传递机制，非常适合解决组合优化问题^[7]。这些智能优化算法采用启发式寻优策略，能够有效避免传统优化算法容易陷入的局部最优问题。为应对光伏接入的动态变化与分布式特性，这些算法往往与分布式控制策略结合应用，以提升优化的效率和精确度。它们在提升配电网运行效率、优化电能管理方面具有显著优势，为探索更为复杂的调度优化策略提供了理论支持。

(二) 分布式控制在光伏优化中的应用

优化技术在多点式控制改进中占据重要地位，实现多点式光伏接入各单元的自律协同改进是关键。信息共享系统可提高稳定性和适应性，避免通信瓶颈和单点故障问题。基于多个地方子问题，区域功率分配和无功补偿等复杂计算问题在多点式控制中被独立分解，并通过地方信息交互逐步接近总体最优答案。这种策略降低了通信成本和计算复杂性，结合了光伏发电的瞬态特性，重点控制节点电压波动和功率质量，并提高功率因数，确保配电网运行的安全性与高效性。分布式控制的应用为提高光伏消纳能力及优化运行效率提供了重要支持，是应对高渗透率光伏接入挑战的重要技术途径。^[8]

(三) 智能优化与分布式控制的融合机制

智能优化与分布式控制的融合机制综合利用先进算法和控制策略，实现光伏出力的高效管理。通过智能算法优化光伏功率分配，并利用分布式控制调节电网电压与无功需求，以保证电网稳定性和优化能量调度。这提升了光伏消纳能力，助力配电网优化运行。

五、优化技术在配电网中的应用效果

(一) 典型配电网场景下的优化效果验证

在典型配电网场景下，针对分布式光伏大规模接入所引发的电能损耗增加及电压波动问题，我们应用了所提出的优化技术进行了验证。通过建立标准配电网模型，并模拟光伏高渗透率场景，结合智能优化算法与分布式控制策略，优化了光伏功率分配与无功补偿方案。仿真结果显示，该方法显著降低了有功功率的传输损耗，提升了配电网的整体运行效率。同时，电压水平得到了均衡，有效抑制了电压过高或过低的偏差现象，这证明了优化技术在改善电能质量方面的可行性和优越性。此外，验证结果还表明，在动态负载变化与光伏出力波动的条件下，该技术能够迅速调整网络参数，确保电压稳定性和光伏消纳能力。与传统调控

方法相比，优化策略在减少损耗、提升运行灵活性方面展现出显著优势，尤其在光伏渗透率达到50%及以上时，优化效果尤为突出。这些验证结果为配电网实际工程中推广类似优化技术提供了有力支撑。^[9]

(二) 运行效率与电能损耗的对比优化仿真分析

优化措施在配电网中的应用，在提升运行效率和降低电能损耗方面表现出了明显的优越性。结合智能优化算法，分布式控制策略得到了显著改善，网络的传输效率在优化调控模型中得到了提升。在不同光伏渗透率的情况下，通过有效调配有功功率输出和无功补偿，网络损耗得到了减少。在提升能量传输效率的同时，优化措施还降低了电压波动范围，保持在允许界限内。模拟结果显示，优化技术在各节点极大降低了线路负载的超载风险，并对高负荷时段的电网运行效率起到了保障作用。这为实现大规模分布式光伏的稳定并网提供了有效支撑，对提高配电网整体运行效益具有重要意义。^[10]

(三) 光伏消纳能力的提升分析

光伏消纳能力的提升分析主要评估了优化技术在高渗透率光伏场景下的表现。通过优化光伏功率输出与无功补偿调度方案，调整配电网电压稳定性，改善了区域光伏发电的接纳能力，有效减少了弃光现象。仿真结果显示，优化后的能量管理策略使光伏消纳率明显提高，配电网对波动性光伏出力的适应性增强，确保了能量转化效率的最大化。这为实现可持续能源利用提供了关键技术支持。

六、结束语

以减少网络损耗和增强稳定性为目标，我们研究了太阳能接入电网的优化技术，构建了相关模型并分析了影响因素，有效地提升了电网的运行效率，降低了能量损耗，并提高了太阳能的应用能力。本研究为分布式太阳能提供了理论上的支持以及实践上的指导。虽然研究已取得一定进展，但受限于环境和条件，分布式太阳能技术的深入问题依然存在。我们认为，随着科技和算法的进一步发展，以上问题有望得到更好的解决。同时，未来的研究还需在实地测试的基础上，进行更为深层次的探索和研究，以推动分布式光伏接入配电网优化技术的进一步发展，为我国新能源的高效、稳定接入电网提供更有力的支持。

参考文献

- [1] 宋星辰, 顾成成, 王贺. 含分布式光伏接入的配电网无功优化 [J]. 电子乐园, 2021, (08): 0218-0218.
- [2] 武晓滕, 杨明月. 分布式光伏接入的配电网无功优化研究 [J]. 现代电子技术, 2021, 44(17): 162-168.
- [3] 邹伟华. 分布式光伏接入对配电网电压稳定性的影响 [J]. 大众用电, 2021, (11): 76-77.
- [4] 李勇. 基于分布式光伏的配电网无功优化 [J]. 电气开关, 2023, 61(02): 63-66.
- [5] 张昕, 魏立明, 张师. 光伏分布式接入对配电网电压稳定性的影响研究 [J]. 吉林电力, 2021, 49(02): 12-15.
- [6] 王庆杰, 尚磊, 陈双印, 等. 分布式光伏电站接入配电网继电保护整定优化 [J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(04): 84-91.
- [7] 王斌, 张裕, 罗晨. 高比例光伏接入的配电网分布式运行优化技术 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(06): 121-130.
- [8] 周子豪. 分布式光伏规模化接入对配电网影响与优化研究 [D]. 东南大学, 2023.
- [9] 王镇烁. 分布式光伏电源接入配电网的设计方案与优化 [J]. 中国高科技, 2022, (18): 65-67.
- [10] 陈泽雄, 张新民, 王雪峰, 等. 分布式光伏电站接入配电网的分布鲁棒优化配置方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 30-42.