

考虑分布式电源接入的配电网集电线路拓扑优化与可靠性提升策略

吴辉煌

广西大唐桂冠新能源有限公司博白分公司 广西玉林 537000

摘要: 随着新能源的发展,分布式电源逐步成为配电网的重要组成部分。然而,大量分布式电源接入使传统配电网结构面临新的挑战,尤其是在集电线路拓扑设计与运行可靠性方面。本文从实际电网运行出发,分析分布式电源接入对配电网拓扑结构的影响,探讨集电线路优化配置策略与可靠性提升方法。结合典型应用案例,提出合理化建议与优化路径。研究结果对提升配电网运行效率与供电安全具有较强的工程指导价值。

关键词: 分布式电源; 配电网; 集电线路; 拓扑优化; 可靠性

近年来,以光伏、风电为代表的分布式电源快速发展,逐步改变了传统电力系统“单向输电、集中供电”的格局,电网运行趋向“源-网-荷”多点分布、双向互动的新模式。分布式电源大量接入中压配电网后,不仅引起电能潮流的不确定性,还对电压稳定性、保护配合、线路结构安全性等方面带来挑战。特别是在集电线路层面,传统径向型或树状配电网结构已难以满足柔性互联、多电源接入的技术需求。

因此,如何在保障供电可靠性的基础上,科学优化集电线路拓扑结构,实现分布式电源与配电网的协同运行,成为当前配电系统研究与实践的热点问题。本文拟通过对分布式接入特征、配网拓扑演化及运行瓶颈的分析,提出面向分布式电源友好的集电线路优化设计思路,进一步探讨可行的提升供电可靠性策略,助力配网智能化、高效化发展。

1 分布式电源接入对配电网结构的影响

1.1 潮流分布动态化

传统配电网以变电站为中心,电能以单向方式沿主干线路向各负荷末端输送,潮流稳定且方向明确。而在大量分布式电源接入之后,配电网原有的电能流动规律被打破,逐渐呈现出“源荷混合、潮流双向”的特征。一方面,分布式电源的就地发电特性使电流有可能从负荷末端反送至主干线路;另一方面,分布式电源多具有间歇性、波动性,如光伏随日照强弱变化、风电受风速波动影响明显,导致潮流方向与功率大小频繁变动。这种潮流分布的动态化对配电网的运行调控能力提出了更高要求。比如,在传统配电网中,保护装置多依赖电流方向来判断故障位置,但在双向潮流场景

下,方向性失效可能引发误判断。此外,潮流不稳定可能引起线路过负荷、电压越限,增加运行风险。特别是在集电线路规划阶段,如果未考虑分布式电源的动态输出特性,易导致线路容量设计不合理或运行效率偏低。因此,必须在拓扑结构设计和潮流控制策略中,引入对分布式电源输出特性的动态建模,提前预判各运行状态下的功率流向与节点状态,保障系统的稳定与安全。

1.2 电压波动与保护协调难题

分布式电源的广泛接入,尤其是光伏与风电等波动性强的电源类型,使得配电网的电压水平更易受到干扰。传统的电压调节策略多以主变压器分接头调节为主,调节周期长、覆盖范围大,而难以适应分布式电源带来的瞬时变化。尤其在用户侧就地接入的场景中,局部电压因分布式电源功率变化迅速升高或降低,可能造成末端设备损坏、电能质量下降等问题。

此外,配电网中的继电保护系统普遍基于单向潮流假设来设定定值与动作逻辑。一旦发生故障,保护装置依赖电流方向与幅值进行判断。但在分布式电源反送潮流或电流叠加的情况下,容易出现保护误动、拒动现象,甚至无法正确分辨故障点的位置,降低了供电安全性。例如,在一个具备双电源并联的节点,故障电流可能被多个分布式电源分担,导致单一保护装置动作电流不足,系统无法及时切除故障。

为应对上述问题,配电网需要引入更加精细化和分布式的电压控制策略,如无功补偿、分布式电容调节、微网控制器等方式。同时,在保护系统上,应逐步向自适应保护、

方向判别结合时间判据的复合型保护过渡，并加强对电源类型识别与潮流状态感知的实时化，实现“源感知、网协调、快响应”的智能保护新机制，从而适应分布式电源复杂接入带来的保护新挑战。

1.3 拓扑灵活性需求提升

分布式电源接入使得配电网不再是单一的供电结构，而成为多点并存、路径可变的复杂系统。与之相适应，配电网的拓扑结构也必须向更加灵活、可调节、具备冗余配置的方向发展。特别是在故障发生、负荷突变或运行策略调整时，传统“树状”或“放射式”结构很难实现快速重构与局部优化，限制了分布式电源接入的可用性与安全性。

在分布式电源广泛布局的场景中，不同区域可能存在供需错位、时段互补现象。如果拓扑结构缺乏灵活性，难以实现能量的跨区优化与互联互通。例如在光伏输出高峰时，部分支线可能电压越限、送电受阻，而临近线路仍在供电状态，造成资源浪费。此外，拓扑调整能力的不足也直接影响了电网故障自愈能力，一旦某一线路故障，如果缺乏可替代路径，便会导致大范围停电，不利于供电可靠性提升。

针对上述需求，集电线路的设计应更多采用环网型、开闭所组合或柔性连接结构，配合开关设备与自动化监控，实现局部网架的“分-合”灵活切换。同时，应结合分布式能源的空间布局，构建区域级能量管理单元，实现微网之间的互联互通。通过提升拓扑的灵活性，配电网可在面对运行扰动与调度指令时，具备更强的弹性与响应能力，为分布式电源的高效利用与运行安全提供可靠保障。

2 集电线路拓扑优化策略

2.1 拓扑结构从树状向环网型过渡

在传统配电网设计中，集电线路多采用树状或放射式结构，其优点在于施工简便、投资较低，运行路径清晰，便于管理与维护。然而，随着分布式电源的大量接入，单一供电路径的弊端日益凸显，特别是在电源输出不稳定或负荷出现突变时，易造成线路负荷不均、电压偏移甚至区域停电等问题。因此，从系统稳定性与灵活性角度出发，优化集电线路拓扑结构，逐步向环网型或柔性网架结构过渡，成为应对复杂运行场景的必然选择。

环网结构具有路径冗余特性，可在任一线路发生故障或维护时，通过切换开关实现电能绕行，保障电力持续供应，显著提升供电可靠性。同时，环网型线路便于分布式电源多

点并网，在不同区域间实现潮流平衡和负荷分担，缓解局部过载问题。此外，环网拓扑结构可灵活配合配电自动化系统（DAS）进行拓扑重构，在调度层面更具可控性与智能化。

从实施角度看，现有树状配电线路在改造时可采取“局部闭环、分段联络”的渐进式优化策略，避免一次性投资过大。通过在关键节点增加开关、联络线或储能装置，使其具备转环、转供的能力，逐步过渡至具备弹性供电能力的环网型结构，从而为分布式电源的安全、高效利用提供坚实基础。

2.2 综合考虑电源地理位置与负荷中心匹配

分布式电源的布局通常受制于自然资源（如风速、日照）、土地条件等外在因素，而负荷中心则多集中于人口密集、经济活动活跃的区域。这就造成一个典型的“源荷错位”问题，即电源与用电需求空间上不重合，导致能量传输路径过长、线路损耗增加，甚至在局部区域形成“电压孤岛”，不利于系统的稳定运行。因此，在集电线路拓扑优化设计中，必须统筹考虑电源的地理位置与负荷中心的空间关系，合理布局接入路径与功率分配方式，实现源-荷匹配最优化。

具体策略包括：在进行集电线路规划时，优先建立电源侧到负荷侧的“最短路径原则”，减少冗余传输环节；在具备条件的区域，鼓励就地消纳分布式电源输出，如光伏就近供给乡村住宅、风电优先支持工矿企业等，提升电能利用效率；同时，可在负荷密集区设置分布式储能或柔性变电设施，在源荷波动之间发挥调节缓冲作用，保障系统动态稳定。

此外，还可借助 GIS（地理信息系统）与配电网仿真分析工具，对电源位置、负荷分布、线路容量等多维信息进行可视化建模与综合评估，科学选址集电节点与走线路径，实现网络结构与运行效益的双重优化。只有真正做实“因地制宜、源荷协同”的理念，才能让拓扑优化从纸面设计落地为现实运行的可持续模式。

2.3 引入微网与区域能源管理机制

在分布式电源广泛应用的背景下，传统大电网集中调度模式已难以满足“多源多荷”的运行特性，系统面临调节迟滞、响应滞后等问题。此时，微网作为一种具有本地自治能力的能量单元结构，为配电系统提供了灵活调控的新思路。微网可将一定区域内的分布式电源、储能系统与负荷进行物理与信息集成，具备局部调节、电能优化与孤岛运行能力，为拓扑优化提供了新的组织单元。

通过引入微网机制，配电系统不再依赖统一的大范围

调度，而是分区自治、按需协调。微网内部可通过能量管理系统（EMS）实现“自发自用、就地平衡”，有效减少能量跨区传输与电网冲击。集电线路设计也可围绕多个微网中心进行“局部最优”的拓扑构建，形成点状分布、网状连接的混合网络模式，从而增强系统抗干扰能力与结构冗余性。

此外，区域能源管理机制的引入也十分关键。它能协调微网之间、微网与主网之间的运行状态，在负荷高峰、极端气候等条件下实现电力资源的合理分配与故障应急联动。配合智能监控与通信技术，可实现电网“分层控制、分布运行、集中监视”的精细化管理模式。未来，随着虚拟电厂、区块链能源交易等新技术的发展，区域化能源协同机制将进一步丰富拓扑优化的手段和模型。

3 提升配电网可靠性的关键措施

3.1 构建分层保护体系

随着分布式电源接入比例不断上升，传统依靠主干网集中保护的机制难以适应配电网运行中的复杂故障形态。为此，需构建分层化、区域化的保护体系，将保护机制从“全网统一”逐步转变为“层层响应、协同隔离”的新模式。在配电网层面，可设定主保护、备保护和微源保护三级响应系统：主保护主要负责主干线路故障检测与断路，备保护则处理区域内的非典型异常工况，而微源保护则专注于分布式接入点的快速识别与隔离。

这种分层结构使得配电网在发生故障时能根据故障位置、范围和等级进行有序分区切断，防止连锁反应导致大范围停电。同时，可通过方向保护、故障电流分析与时间判据等多种方式提升保护的准确性。考虑到分布式电源具有间歇性与反送潮流特性，保护装置应具备自适应设定能力，可根据实时潮流变化动态调整动作参数。最终实现“保护快、定位准、响应层次清晰”的新型保护体系，切实增强配电网在复杂运行环境下的故障处理与恢复能力。

3.2 应用智能化运维监测技术

传统配电网在运维层面依赖人工巡检与周期性维护，不仅效率低下，而且在面对分布式电源带来的系统波动性时难以做到精准预警和动态响应。因此，推动智能化运维技术的应用是提升配电网可靠性的关键突破口。一方面，应在配

电线路及关键节点布设在线监测装置，如电流互感器、电压传感器、局部放电探头等，实现电气参数、设备温度与局部异常的实时采集。另一方面，结合边缘计算与大数据分析平台，可实现对设备运行趋势的预测性分析，提前识别隐患并指导维护。

同时，智能化运维系统还应融入 GIS 地图、SCADA 系统及配网自动化终端，形成“图-数-端一体化”的数字运维平台，方便调度人员实时掌握全网状态，实现远程故障定位、快速故障隔离与自动恢复操作。此外，配合无人机、机器人巡检等先进手段，可在高风险区域或极端天气下替代人工作业，显著提升运维效率与人员安全保障水平。通过构建全生命周期、全覆盖的智能监测体系，配电网将更具自感知、自判断、自调节能力，为系统稳定运行提供坚实支撑。

4 结语

综上所述，面对以分布式电源为代表的能源变革趋势，传统配电网的拓扑设计、集电线路配置及运行控制方式均需进行系统性重构。本文围绕分布式电源接入对配电网运行特性的影响，提出优化集电线路拓扑、增强系统适应性与供电可靠性的策略。通过推动拓扑结构由树状向环网转型、引入区域微网机制、完善保护体系与智能运维手段，配电系统可更有效地应对日益复杂的运行环境，实现“多源互补、灵活调度、安全供电”的目标。在今后的工作中，仍需在工程实践中不断验证优化模型的适应性与经济性，推动我国智能配电网建设迈上新台阶。

参考文献：

- [1] 汪颖, 刘慧自, 胡文曦. 基于分布式电源关键控制参数辨识的配电网电压暂降评估方法 [J]. 电网技术, 2025, 49(2): 727-737.
- [2] 王杰, 贾宏杰, 靳小龙, 穆云飞, 李敬如, 胡诗尧. 基于电-氢-热 P2P 交易的分布式智能电网低碳优化运行方法 [J]. 电力系统自动化, 2025, 49(9): 40-51.
- [3] 张伟忠. 智能配电网中分布式电源接入与协调控制策略研究 [J]. 办公自动化, 2025, 30(8): 87-89.
- [4] 牛迪, 罗庚. 智能电网分布式电源自动控制建模技术研究 [J]. 中国新技术新产品, 2025(7): 37-39.