

含高渗透率分布式电源的配电网拓扑重构与故障快速定位自愈控制

刘淼

河南袍尔电气有限公司，河南省许昌市，461001；

摘要：随着分布式电源在配电网中的渗透率不断提高，传统配电网的结构和运行方式面临着诸多挑战。为了应对这些挑战，需要对配电网进行拓扑重构，以提高其可靠性和稳定性。同时，故障的快速定位和自愈控制也成为保障配电网安全运行的重要手段。本文将围绕这些关键问题展开讨论，探索有效的解决方案。

关键词：含高渗透率；分布式电源；配电网拓扑重构；故障快速定位；自愈控制

DOI：10.64216/3080-1508.25.08.021

引言

随着能源结构转型和可再生能源发展，分布式电源在配电网应用渐广。但高渗透率分布式电源接入改变传统配电网潮流分布，对系统稳定性、可靠性和经济性提出更高要求。因此，研究优化配电网运行模式成电力系统重要课题。本文探讨含高渗透率分布式电源的配电网在拓扑重构与故障快速定位自愈控制方面的创新策略，为提升配电网整体性能提供理论与技术参考。

1 配电网拓扑重构与故障快速定位自愈控制的重要性

1.1 提升配电网运行经济性的核心路径

传统配电网拓扑结构固定，在高渗透率 DG 接入后，潮流分布易偏离最优状态——例如，DG 出力高峰时多余电能需远距离传输至主网，导致线路损耗激增；而负荷高峰时 DG 出力不足，又需主网额外输送功率，进一步增加网损成本。拓扑重构通过动态调整开关状态（如分段开关、联络开关），可优化网络节点连接关系，实现“就近供电”：将 DG 出力直接分配至周边负荷，减少跨区域功率传输，降低线路电阻损耗；同时，通过拓扑调整规避重载线路，平衡各线路负荷率，避免因局部过载引发的设备损耗加剧。从经济性维度看，合理的拓扑重构可使高渗透率 DG 配电网的网损率降低 10%-20%，显著减少电力系统的运行成本。

1.2 保障供电可靠性的关键手段

高渗透率 DG 的波动性不仅影响潮流稳定，还会增加故障发生概率——例如，风电出力骤降可能导致电压跌落，光伏逆变器故障可能引发谐波超标，而传统配

网的故障处理依赖人工巡检，定位时间通常超过 30 分钟，停电范围覆盖整个辐射分支，严重影响用户供电可靠性。故障快速定位自愈控制通过实时监测与自动决策，可实现“故障隔离-负荷转移-系统恢复”的闭环处理：快速定位技术能在秒级内锁定故障区段，避免故障扩大；自愈控制则通过拓扑重构联动，将故障区段的负荷转移至备用电源（如其他 DG、主网联络线），缩短停电时间至分钟级甚至秒级。对于医院、数据中心等重要负荷，这种快速自愈能力可将供电中断风险降至最低，是配电网满足用户可靠性需求的关键保障。

1.3 维持系统运行稳定性的必要支撑

高渗透率 DG 接入后，配电网从“无源网络”转变为“有源网络”，DG 的间歇性与随机性会破坏系统的功率平衡——例如，正午光伏出力骤增可能导致电压越上限，夜间 DG 出力骤降可能引发频率波动，若缺乏有效的拓扑与控制手段，可能触发保护装置误动，甚至引发连锁故障。拓扑重构通过调整网络结构，可优化 DG 与负荷的匹配关系：例如，将波动性强的风电接入负荷波动反向的区段，利用负荷变化抵消风电出力波动；自愈控制则通过实时调整 DG 出力、切换联络开关等方式，维持电压、频率在额定范围内。此外，当系统发生小扰动（如 DG 出力波动）时，拓扑重构与自愈控制的协同作用可抑制扰动扩散，避免系统从稳定状态转入失稳状态，是高渗透率 DG 配电网维持动态稳定的必要技术支撑。

2 高渗透率分布式电源与配电网技术

2.1 高渗透率分布式电源的技术特征与影响

高渗透率分布式电源(DG)指DG总装机容量占配电网最大负荷比例超过30%的配置场景,其核心技术特征包括出力波动性、接口多样性与控制复杂性。从类型上看,高渗透率DG以光伏、风电为主,辅以储能与微型燃气轮机:光伏出力受光照强度、温度影响,日内波动幅度可达80%以上;风电出力受风速影响,小时级波动幅度可达50%;储能虽能平抑波动,但容量与充放电效率限制了其调节范围。从接口技术看,DG多通过电力电子逆变器接入配电网,逆变器的控制策略(如PQ控制、V/f控制)直接影响配电网的电压与频率特性——例如,PQ控制模式下DG仅输出额定功率,无法参与电压调节;V/f控制模式下DG可维持局部电压稳定,但易与其他DG产生控制冲突。这些特征对配电网的影响主要体现在三方面:一是潮流双向流动,传统单向潮流计算方法失效;二是短路电流幅值变化,DG的故障电流通常小于同步发电机,导致传统过流保护误动或拒动;三是谐波污染加剧,逆变器开关动作会产生2次、3次等谐波,叠加后可能超过国标限值。

2.2 配电网的技术特性与传统模式局限

配电网作为电压等级在110kV及以下的电力网络,传统技术特性以“辐射型拓扑+集中式控制”为主:拓扑结构采用辐射分支设计,从主变出线延伸至用户,无冗余联络线,结构简单但灵活性差;控制模式依赖主网集中调度,配网侧仅具备基础的保护功能(如过流保护、重合闸),缺乏自主决策能力。在高渗透率DG接入场景下,传统配电网的技术局限凸显:一是拓扑灵活性不足,固定辐射型结构无法适配DG出力波动,导致DG消纳困难——例如,某分支DG出力超过负荷时,多余电能无法通过其他分支消纳,只能弃光弃风;二是量测与通信能力薄弱,传统配电网的量测节点覆盖率不足50%,且通信依赖有线方式,数据传输延迟超过1秒,无法满足故障快速定位的实时性需求;三是控制协同性差,传统配电网的保护装置与DG控制单元独立运行,缺乏信息交互——例如,DG接入点的保护装置未考虑DG故障电流特性,易在故障时误断开DG,导致系统失去重要电源支撑。此外,传统配电网的自愈控制依赖人工操作,无法实现故障后的自动恢复,难以适配高渗透率DG带来的复杂运行场景。

3 含高渗透率分布式电源的配电网拓扑重构与故障快速定位自愈控制策略

3.1 基于多目标优化的拓扑重构策略

含高渗透率DG的配电网拓扑重构需突破传统“单目标(网损最小)”优化思路,构建兼顾网损、可靠性与DG消纳的多目标优化模型。其核心理论在于通过数学建模与智能算法,在满足网络约束(如线路容量、电压限值、DG出力约束)的前提下,寻找最优开关组合。从目标函数设计看,网损最小目标采用潮流计算中的支路功率损耗公式($P_{loss}=I^2R$),可靠性目标采用停电时间与停电范围的加权值,DG消纳目标采用DG弃电率(弃电率=(DG额定出力-实际出力)/DG额定出力);从约束条件看,需考虑线路电流不超过额定电流、节点电压在 $\pm 7\%$ 额定电压范围内、DG出力不超过最大允许值。在算法选择上,传统遗传算法、粒子群算法需针对高渗透率DG的波动性进行改进——例如,引入自适应权重因子,根据DG出力波动幅度调整算法搜索步长,避免优化结果因DG波动失效;同时,采用多目标优化算法(如NSGA-II),生成Pareto最优解集,供调度人员根据实际需求(如负荷重要性、DG消纳优先级)选择最优拓扑方案。这种多目标优化策略可在网损降低、可靠性提升与DG消纳之间找到平衡点,适配高渗透率DG的复杂需求。

3.2 基于信息融合的故障快速定位策略

高渗透率DG配电网的故障快速定位需解决“量测数据冗余度低、故障特征复杂”的问题,核心在于通过多源信息融合,提升定位精度与速度。其技术逻辑是整合配电网的量测数据(如电压、电流、功率)、状态信息(如开关状态、DG运行模式)与环境数据(如风速、光照),通过数据融合算法消除信息不确定性,实现故障区段的精准定位。从信息源看,量测数据来自智能电表、馈线终端单元(FTU)与DG控制器,采样频率可达1kHz,能捕捉故障瞬间的暂态特征;状态信息来自配网自动化系统,实时更新开关与设备运行状态;环境数据则用于修正DG出力波动对故障特征的影响(如排除因风电出力骤降导致的电压跌落误判)。从融合算法看,常用方法包括卡尔曼滤波与D-S证据理论:卡尔曼滤波可消除量测噪声,提高数据准确性;D-S证据理论则通过融合多源证据(如电压跌落证据、电流突变证据),计算各区段的故障概率,概率最高的区段即为故障点。这种信息融合策略可将故障定位时间缩短至1-5秒,定位精度提升至95%以上,避免传统单一量测定位的误判

问题。

3.3 考虑 DG 出力波动性的自愈控制时序优化策略

高渗透率 DG 的出力波动性会导致自愈控制过程中出现“功率不匹配”问题——例如，故障隔离后转移负荷时，DG 出力骤降可能导致转移后的负荷无法获得足够功率，引发二次故障。自愈控制时序优化策略的核心在于根据 DG 出力预测，合理安排“故障隔离-负荷转移-DG 重启”的时间顺序，确保每个环节的功率平衡。其技术要点包括三方面：一是 DG 出力短期预测，采用机器学习算法（如 LSTM）基于历史数据与实时环境信息，预测未来 5-15 分钟的 DG 出力趋势，为时序安排提供依据；二是时序步骤优化，若预测 DG 出力呈上升趋势，优先隔离故障区段，待 DG 出力上升后再转移负荷，避免功率不足；若预测 DG 出力呈下降趋势，先转移重要负荷，再隔离故障区段，减少负荷损失；三是动态调整机制，实时对比实际 DG 出力与预测值，若偏差超过 10%，立即调整时序步骤——例如，DG 出力实际下降幅度大于预测值时，暂停非重要负荷转移，优先保障重要负荷供电。这种时序优化策略可避免自愈控制过程中的功率失衡，提升系统恢复的稳定性与成功率。

3.4 基于分布式通信的协同控制策略

传统集中式控制依赖主站统一决策，通信延迟与主站故障会导致控制失效，无法适配高渗透率 DG 配电网的分布式特征。基于分布式通信的协同控制策略通过构建“节点-区域-全局”三级通信网络，实现各控制单元（如 DG 控制器、开关控制器）的信息交互与自主决策。其技术逻辑是将配电网划分为多个区域，每个区域设置区域控制器，区域内的控制单元通过本地通信（如 ZigBee、LoRa）实时交换数据，区域间通过光纤或 5G 通信实现信息共享。在拓扑重构中，各区域控制器根据本地 DG 与负荷数据，计算局部最优拓扑，再通过区域间协同调整，形成全局最优方案，避免集中式决策的延迟问题；在故障自愈中，故障区段的控制单元可直接与相邻区域的控制单元通信，快速协商负荷转移方案，无需等待主站指令。此外，分布式通信采用冗余设计，某一节点或区域通信故障时，可通过其他路径传输数据，避免单点故障导致的控制中断。这种协同控制策略可将控制响应时间缩短至毫秒级，提升高渗透率 DG 配电网的控制灵活性与可靠性。

3.5 含储能的拓扑重构与自愈协调策略

储能系统（ESS）具备充放电灵活的特点，可平抑 DG 出力波动、提供备用电源，是高渗透率 DG 配电网拓扑重构与自愈控制的重要支撑。其协调策略的核心在于将储能的充放电控制与拓扑重构、故障自愈过程深度融合，实现“削峰填谷-故障备用-系统恢复”的多场景适配。在拓扑重构中，储能的充放电可优化 DG 与负荷的功率匹配：DG 出力高峰时，储能充电，减少多余电能的远距离传输，降低网损；DG 出力低谷时，储能放电，补充负荷需求，避免主网功率过度输送，此时拓扑重构可将储能接入负荷集中区段，提升功率调节效率。在故障自愈中，储能可作为备用电源，在故障隔离后立即向重要负荷供电，为负荷转移争取时间——例如，当某分支发生故障时，储能先向该分支的重要负荷供电，同时拓扑重构调整联络开关，将负荷转移至主网或其他 DG，待转移完成后储能停止供电，避免负荷中断。此外，储能还可参与故障定位，通过充放电产生特征信号，辅助识别故障区段（如向疑似故障区段注入特定频率的电流，根据反馈判断是否存在故障）。这种协调策略可充分发挥储能的调节能力，提升高渗透率 DG 配电网的韧性与抗干扰能力。

4 结语

含高渗透率分布式电源的配电网拓扑重构与故障快速定位自愈控制是应对现代电力系统复杂性的重要手段，该技术体系为配电网运行提供全方位支撑。未来，随着分布式电源渗透率提升和新型负荷普及，配电网将面临更多挑战与机遇。技术上，引入人工智能与大数据分析有望优化拓扑重构与自愈控制的精度和效率；实践中，政策支持与标准制定是推动技术落地的关键。总之，通过持续技术创新与机制完善，含高渗透率分布式电源的配电网将实现更高效、可靠、智能的运行模式，为能源转型与可持续发展奠定基础。

参考文献

- [1] 肖扬. 基于分布式电源的配电网拓扑重构方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 16(10): 2232-2239.
- [2] 李娜. 含分布式电源的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 17(12): 2619-2625.
- [3] 张建伟. 分布式电源接入配电网的自愈控制策略研究[J]. 电力系统自动化, 2024, 41(9): 2375-2381.