

分布式电源接入对配电网继电保护的影响及应对策略研究

万羿辉

国网上海市电力公司市北供电公司 上海 201800

【摘要】：随着“双碳”目标推进与能源结构转型，分布式电源（DG）在配电网中的渗透率持续提升，深刻改变了配电网的潮流特性与故障电流特征，给传统继电保护体系带来严峻挑战。本文系统梳理了分布式电源接入的类型及规模现状，分析了其对配电网结构与运行工况的影响机制，重点从短路电流水平变化引发的保护误动、故障电流方向改变导致的保护拒动以及保护动作时限协调配合三个维度，深入剖析继电保护面临的核心问题，并引入短路电流叠加模型与方向判据公式加以量化阐释。在此基础上，提出保护定值动态自适应调整、基于电气量特征与智能算法的故障方向识别改进，以及面向分布式电源接入的保护时限协调优化三类应对策略，结合实际工程案例进行验证。研究表明，所提策略可有效降低继电保护误动率与拒动率，提升配电网安全稳定运行水平，为高渗透率背景下配电网继电保护工程实践提供参考。

【关键词】：分布式电源；配电网继电保护；短路电流；故障电流方向；保护动作时限；自适应保护

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.037

1 引言

在全球能源转型加速推进与“双碳”战略深入实施背景下，以太阳能光伏、风力发电、小型水力发电及生物质能发电为代表的分布式电源（Distributed Generation, DG）在配电网中的应用规模持续扩大。根据国家能源局统计，2023年全国分布式光伏新增装机容量超过1.1亿千瓦，累计装机规模持续领跑全球；部分地区分布式电源渗透率已突破30%^[1]。

分布式电源的大规模接入，从根本上打破了传统配电网“单一电源、辐射供电”的运行格局，使配电网由无源网络向有源网络转变。这一转变带来了潮流双向流动、电源出力随机波动及短路电流特性复杂化等一系列新问题，对原有继电保护体系产生深刻影响^[2]。继电保护作为电力系统安全运行的第一道防线，其准确性与可靠性直接关系到配电网供电质量与系统稳定。

现有研究在分布式电源对继电保护影响的单方面分析上已有一定积累，但在系统性归纳问题类型与提出综合应对策略方面仍有不足。本文基于当前配电网实际运行工况，从短路电流水平变化、故障电流方向改变及保护时限配合三个层面深入剖析核心问题，并引入定量分析模型加以支撑，进而有针对性地提出改进策略，为工程实践提供理论依据与技术参考。

2 分布式电源接入配电网的现状分析

2.1 分布式电源接入类型与规模

当前接入配电网的分布式电源类型呈多元化特征，主要涵

盖四类：一是太阳能光伏发电，受益于组件成本持续下降，近年来全球装机年均增长率持续保持在15%以上；二是风力发电，在沿海地区及内陆风资源丰富区域快速扩张，部分沿海省份装机容量已达数百万千瓦；三是生物质能发电，依托农林废弃物资源，在农业大省及林区稳步推进；四是小型水力发电，在河流落差适宜的地区提供稳定绿色电力^[3]。

从规模演变趋势看，以某典型区域配电网为例，分布式电源渗透率已从2015年不足10%增长至2023年35%以上，并保持上升态势。大量兆瓦级以下的小型分布式电源接入中低压配电馈线，形成广泛分布的多电源节点格局。各类电源出力特性存在显著差异：光伏发电受光照强度与时长影响呈周期性波动；风电具有明显的随机性与间歇性；生物质能发电受资源季节性供应制约；小型水电受来水变化影响较大。这些出力的不确定性与波动性，是影响配电网安全稳定运行的重要诱因。

2.2 分布式电源接入引起的配电网结构变化

分布式电源广泛接入从多个维度改变了配电网的拓扑结构与运行特性。

（1）网络拓扑复杂化。传统辐射状配电网在接入10个分布式电源节点后，网络分支数量增加约40%，节点数增加15%，拓扑复杂度大幅提升。

（2）潮流双向化。分布式电源出力较大时段，馈线功率出现逆向流动。研究表明，当某馈线光伏出力增加50%时，对应线路反向潮流可增大约25%~35%，末端节点电压升高约5%，并触发相邻线路潮流连锁重新分布。

(3) 系统惯量下降。分布式电源多经电力电子变流器并网, 缺乏传统同步发电机的惯性支撑, 高渗透率下频率波动范围可从 ± 0.5 Hz 扩大至 ± 1 Hz 左右, 对保护装置的频率响应能力提出更高要求。

2.3 分布式电源接入后配电网运行工况特征

分布式电源接入对配电网运行工况的影响主要体现在三个方面: 其一, 电压分布规律改变, 接入位置附近节点电压偏差加剧, 部分节点电压偏移可能超出国标允许范围($\pm 7\%U_n$), 给保护整定带来复杂性; 其二, 短路电流特性改变, 故障时短路电流由单一电网侧提供转变为电网侧与多台分布式电源共同馈入, 电流幅值、相位及衰减特性均发生变化; 其三, 系统运行方式多变, 分布式电源的投退及出力随时间变化, 使配电网处于频繁工况切换中, 给保护的定值整定与时限协调带来持续挑战。

3 分布式电源接入对继电保护影响的核心问题

3.1 短路电流水平变化引发的保护误动问题

在传统配电网中, 继电保护的电流整定值依据单一电源侧短路电流水平确定。分布式电源接入后, 故障点短路电流由系统侧电流与各台 DG 馈入电流叠加构成, 可用下式描述:

$$I_k = I_{sys} + \sum I_{DG_i} (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: I_k 为故障点总短路电流; I_{sys} 为电网侧贡献电流; I_{DG_i} 为第 i 台分布式电源馈入短路电流; n 为接入分布式电源总台数。

叠加后的 I_k 若超出保护整定值 I_{set} , 即便系统处于正常运行或轻微扰动, 保护亦可能误动。继电保护灵敏系数 K_{sen} 应满足:

$$K_{sen} = I_{k.min} / I_{set} \geq 1.5 \quad (2)$$

然而, DG 出力随机波动使 I_k 呈动态特性, 固定的 I_{set} 难以与之匹配, 保护误动风险显著上升。如图 1 所示, 误动概率与分布式电源渗透率呈显著正相关: 渗透率 10% 时误动概率仅为 1.8%, 升至 30% 时增至 8.3%, 而渗透率达 40% 时已升至 14.7%, 至 50% 时进一步攀升至 21.2%^[4]。据统计, 某时段 DG 出力波动引起的叠加短路电流变化幅度约为基准值的 24%~31%, 致使保护装置误动次数较接入前增加约 19%, 严重影响配电网供电可靠性。

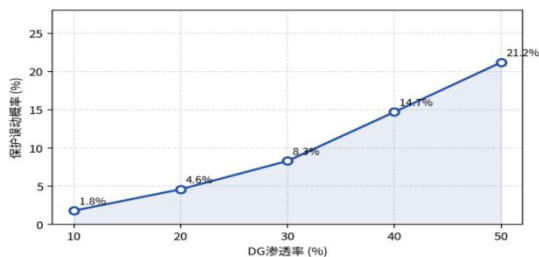


图 1 保护误动概率随 DG 渗透率变化曲线

3.2 故障电流方向改变导致的保护拒动问题

方向性继电保护的逻辑建立在“故障电流由电源侧流向负荷侧”的确定前提之上。分布式电源接入后, 当其位于故障点与传统保护装置之间、且容量足以提供反向短路电流时, 故障电流方向相对于部分保护安装处发生逆转^[5]。

设保护安装处测量阻抗角为 φ , 方向元件动作判据为:

$$\cos(\varphi - \varphi_{set}) > 0 \Rightarrow \text{动作} \quad (3)$$

分布式电源接入后, φ 的实际值可能与整定值 φ_{set} 偏差超过 90° , 导致式 (3) 不等式方向反转, 保护闭锁拒动。相关研究表明, 在高渗透率配电网中, 部分馈线故障时可能出现故障电流方向改变, 导致方向元件判据失效。某地区配电网在分布式电源接入后的半年内, 因故障电流方向改变引发的保护拒动次数较接入前增长约 31%; 其中一条馈线在连续 47 天内发生 3 次拒动事件, 每次均使停电范围明显扩大, 给用户造成较大损失。

3.3 保护动作时限配合失调问题

配电网继电保护时限配合遵循“上下级保护时间级差”原则, 以确保故障时最近级保护优先动作、上级保护作为后备。这一设计的前提是故障电流大小与方向具有充分的确定性与可预测性。分布式电源接入打破了上述前提, 带来三重挑战。

第一, 故障电流幅值不确定性使时限配合计算边界条件失准。分布式电源向故障点提供的短路电流与系统侧电流叠加, 在某些运行方式下故障电流幅值可达原来的 2.3~3.1 倍, 使原本按时间级差设计的保护整定逻辑出现错配。第二, 分布式电源接入位置分散性导致同一馈线不同区段故障特性差异显著, 现有基于整段馈线统一整定的时限方案难以兼顾。第三, 分布式电源低电压穿越 (LVRT) 控制的快速响应 (介入时间通常为 20~80 ms) 与继电保护动作时限产生时序冲突——LVRT 控制介入期间馈线电流特性可能发生显著变化, 使保护装置在动作时限窗口内无法获得稳定可判别的故障信号。以某配电网实际案例为例, 在分布式电源接入点附近发生故障时, 因各级保护时限配合失调出现越级跳闸, 健全区域非预期停电, 故障影响范围较未接入 DG 时的预设保护方案扩大约 38%。

4 应对策略

4.1 基于动态自适应的保护定值调整策略

针对短路电流水平动态变化引发保护误动的核心问题, 应建立动态自适应保护定值调整机制, 替代传统固定定值整定方式。策略实施流程包括四个环节: ①依托 DSCADA 实时采集配电网拓扑与分布式电源出力信息; ②采用序网分析法结合 Thevenin 等值原理, 动态计算各保护安装处最大/最小预期短路电流范围; ③以 PSO/GA 等智能优化算法在灵敏度与选择性双重约束下搜索最优定值组合; ④向保护装置推送更新定值并进

行灵敏度与选择性校验。

不同类型分布式电源（同步机型、逆变器型）的短路电流贡献模型应分别建立，以提升计算精度。同步机型 DG 在故障初期可提供较大的次暂态短路电流，而逆变器型 DG 受控制策略限制，短路电流通常不超过额定电流的 1.2~1.5 倍，二者特性差异显著，需区别对待。通过定值动态整定与实时监测联动，工程实践表明该策略应用后某区域配电网保护误动次数下降约 57%，有效验证了其工程价值。

4.2 基于电气量特征与智能算法的故障方向识别改进策略

针对故障电流方向改变导致保护拒动的问题，需从方向识别方法本身进行改进，构建适应多电源特征的方向判别新机制。

（1）故障分量方向判据。改进方案以故障前后电气量变化量（ ΔU 、 ΔI ）作为方向判别依据，替代传统稳态量，有效规避分布式电源正常出力电流对方向判别的干扰。结合故障瞬间电压跌落幅度与电流突变量进行综合判断，可显著提升复杂运行方式下的方向识别可靠性。

（2）LSTM 智能识别算法。利用历史故障数据与实时量测信息训练长短时记忆（LSTM）时序网络，使其具备在分布式电源不同运行状态下动态识别故障电流方向的能力，在传统判据失效时提供补充判别依据。

（3）广域保护协调机制。对于复杂多电源配电网，可引入基于 5G 通道的广域保护方案，通过各保护装置间实时信息共享综合全局电气量进行故障判别，从根本上突破单端保护的信息局限。工程应用数据显示，采用上述改进策略后，某区域配电网保护拒动次数显著下降，供电可靠性指标 SAIDI 改善约 17%。

4.3 面向分布式电源接入的保护动作时限协调优化策略

针对保护时限配合失调问题，应以分布式电源位置、容量及配电网拓扑为基础，构建分层分区的时限优化模型：靠近电源侧区域因短路电流幅值大，应适当延长保护动作时限以防止越级跳闸；远离电源侧的负荷端区域应缩短动作时限，以快速切除故障、减少停电时间。以最小故障影响范围与最短停电时间为优化目标，以保护选择性、灵敏度及速动性为约束条件，建立多目标优化模型，采用整数规划或启发式算法求解各级保

参考文献：

- [1] 陈茜,白晶,陈小月,等.分布式光伏并网对配电网的影响综述[J].科学技术与工程,2024,24(27):11491-11504.
- [2] 徐丙垠.现代配电网继电保护技术及其发展[J].供用电,2024,41(08):65-74+87.
- [3] 郭智源,李继宇,陈雪,等.分布式电源及负荷特性研究[J].电气开关,2025,63(01):25-31.
- [4] 易鹏.并网光伏对配电网电能质量及继电保护的影响研究[J].电气技术与经济,2025,(01):229-232+240.
- [5] 许耀琦,唐萃,陈天成,等.含分布式电源的配电网继电保护优化方案研究[J].电气应用,2024,43(11):60-66.

护的最优时限组合。

如图 2 所示，工程验证结果表明：A 地区配电网采用时限优化策略后，故障切除时间从 487 ms 缩短至 312 ms，降幅约 36%，年累计停电时长从 11.3 小时降至 6.8 小时；B 地区故障切除时间从 412 ms 缩短至 247 ms，降幅约 40%，年累计停电时长同步下降，经济效益显著，充分证明了该策略的工程适用性。

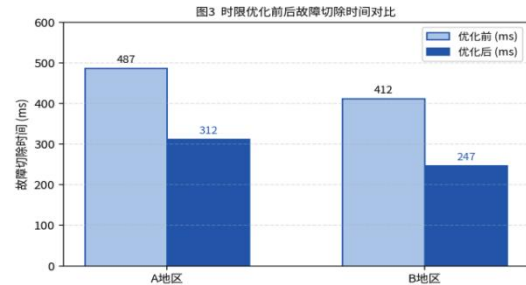


图2 时限优化前后故障切除时间对比

此外，应建立分布式电源控制器与继电保护装置之间的协同通信接口，确保故障发生时保护系统能在 LVRT 控制介入前准确采集到稳定的故障特征量，从机制层面解决时序冲突问题，保障时限配合的准确执行。

5 结论

本文围绕分布式电源接入对配电网继电保护的影响与应对策略开展了系统性研究，主要结论如下：

本文对分布式电源接入影响配电网继电保护的问题及应对策略进行了系统研究，主要结论如下：

（1）分布式电源接入使配电网转变为多源有源网络，拓扑结构、潮流特性与故障电流特征均发生根本性改变，传统继电保护体系亟需适应性提升。

（2）短路电流幅值增大是保护误动的核心诱因（渗透率 40%时误动概率达 14.7%）；故障电流方向逆转导致保护拒动次数较接入前增长 30%以上；LVRT 控制与保护时限的时序冲突可使故障影响范围扩大约 38%。

（3）所提三类应对策略经工程验证，误动次数降低约 57%，SAIDI 改善约 17%，故障切除时间缩短 36%~40%，配电网安全可靠显著提升。