

新能源分布式光伏接入配电网的电气保护协调方案设计研究

余永英

440223*****0917

摘要: 随着新能源分布式光伏在配电网中的渗透率持续提升,其随机性、间歇性与双向潮流特性对传统配电网电气保护体系提出了严峻挑战。传统配电网保护基于单向潮流设计,难以适应分布式光伏接入后故障电流分布改变、保护配合关系紊乱等问题,易引发保护误动、拒动或越级跳闸等风险。本文系统研究新能源分布式光伏接入配电网的电气保护协调方案设计,首先分析分布式光伏接入对配电网电气特性的影响机制,明确保护协调面临的关键问题;其次从保护配置原则、整定计算方法及协调策略三个层面,提出适应高渗透率场景的电气保护协调方案;最后从通信技术、智能控制等维度提出实施保障措施,为提升配电网对分布式光伏的兼容性与运行可靠性提供理论参考。

关键词: 新能源; 分布式光伏; 配电网; 电气保护; 协调方案

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.043

引言

在全球能源结构转型与“双碳”目标驱动下,分布式光伏凭借其清洁性、灵活性与就近消纳优势,已成为配电网中重要的新能源供给形式。据行业统计,我国分布式光伏装机容量年均增长率超过30%,且呈现“点多面广、就地并网”的典型特征,大量光伏电源通过中低压配电网接入用户侧或公共连接点,使传统辐射状配电网逐步转变为“源-网-荷-储”多要素交互的复杂网络。然而,分布式光伏的间歇性发电特性(如受光照强度、云层遮挡影响导致出力波动)、逆变器控制策略(如低电压穿越期间输出电流受限)及双向潮流特性(如光伏在电网电压正常时馈送电能,在故障时可能转为吸收电能),从根本上改变了配电网的电气特性与故障特征。在此背景下,设计适应分布式光伏高渗透率的电气保护协调方案,成为保障配电网安全稳定运行的关键课题。本文通过理论分析与逻辑推导,深入探究保护协调的技术路径与实施方案,旨在为行业实践提供指导。

1 分布式光伏接入对配电网电气特性的影响机制

1.1 故障电流分布特性的改变

传统配电网故障电流主要由上级电源(如变电站馈线断路器)提供,呈现单向流动特征,故障点上游保护装置检测到的短路电流幅值大、方向明确,为电流保护的动作逻辑提供了清晰判据。然而,分布式光伏接入后,

故障电流来源扩展至光伏逆变器输出电流与传统电源电流的叠加。光伏逆变器基于电力电子器件(如IGBT)控制,其故障电流输出能力受限于直流侧电压、控制策略及保护定值(如通常设定短路电流倍数为1.0~1.5倍额定电流),显著低于传统同步发电机(可输出数倍额定电流)。这种差异导致故障点上下游的电流分布规律发生根本变化:在光伏接入点靠近故障点时,故障电流中光伏分量占比增加,可能使传统电流保护(如定时限过流保护)因电流幅值未达到动作阈值而拒动;在光伏接入点远离故障点时,光伏逆变器的电流限制策略可能导致故障电流幅值减小,进一步干扰保护装置的判断。此外,双向潮流特性使得故障电流方向不再固定(如光伏在电网电压跌落时可能从故障点吸收电流),传统方向保护(基于电流相位或功率方向判别故障区域)的可靠性显著降低^[1]。

1.2 保护配合关系的紊乱

配电网传统保护配合基于“阶梯式时限”原则,即上级保护动作时间大于下级保护动作时间(如馈线首端保护动作时间为0.5秒,末端保护为0.2秒),通过时间差实现选择性切除故障。分布式光伏接入后,这种配合关系因以下因素被打破:其一,光伏逆变器的低电压穿越控制要求其在电网电压跌落至一定阈值(如0.8~0.9倍额定电压)时维持并网运行并输出无功支撑,可能导致故障期间光伏侧电流持续输出,延长故障持续时间,干扰上级保护的故障检测与动作逻辑;其二,光

伏接入改变了配电网的等效阻抗分布（如并网点附近阻抗减小），使得故障电流幅值与分布规律与传统场景不同，原有时限配合参数（如动作时间差）可能无法满足选择性要求；其三，分布式光伏的随机性出力特性（如早晚发电高峰与夜间零出力）导致配电网运行方式动态变化，传统固定参数的保护配合方案难以适应实时工况调整^[2]。

1.3 逆变器控制策略的影响

现代分布式光伏普遍采用电力电子逆变器并网，其控制策略（如最大功率点跟踪 MPPT、电压/频率控制、低电压穿越 LVRT）对故障特性与保护响应具有显著影响。在正常运行时，逆变器通过 MPPT 算法动态调整输出功率，使光伏出力跟踪光照强度变化，但此过程可能导致输出电流的快速波动（如毫秒级变化），干扰保护装置的采样精度与故障判别；在故障发生时，逆变器的 LVRT 控制要求其在电网电压跌落期间维持并网并输出无功电流（如按电压跌落深度线性增加无功输出），此过程可能限制其有功电流输出能力（如将短路电流限制在 1.0~1.2 倍额定电流），导致故障电流幅值不足以触发传统电流保护；在故障清除后，逆变器的恢复策略（如软启动或延迟并网）可能影响配电网电压与频率的恢复特性，间接干扰后续保护的协调动作。

2 电气保护协调方案的核心设计要点

2.1 保护配置原则的适应性调整

针对分布式光伏接入后的电气特性变化，保护配置需遵循“分层分区、选择性优化、兼容性增强”的原则。分层分区原则要求根据配电网拓扑结构（如馈线分段、光伏接入点位置）与电压等级（如 10kV/0.4kV），将保护区域划分为网侧（变电站出口至光伏接入点）、光伏侧（光伏逆变器出口至并网点）及负荷侧（并网点至用户端），针对不同区域的功能需求配置差异化保护功能。例如，网侧保护需重点应对大容量故障电流，配置快速动作的电流速断保护；光伏侧保护需兼顾逆变器输出特性，配置限流保护与方向保护；负荷侧保护需保障用户设备安全，配置过流与接地保护。选择性优化原则强调通过保护动作时间的精准配合与故障区域的精确识别，避免越级跳闸或非故障区域停电。例如，采用

方向元件（如基于故障电流相位或功率方向的判据）区分故障发生在光伏侧还是主网侧，结合时限差实现选择性切除。兼容性增强原则要求保护装置具备适应双向潮流与间歇性出力的能力，例如支持电流反向检测、动态定值调整及与逆变器控制系统的通信交互功能^[3]。

2.2 整定计算方法的优化创新

整定计算是保护协调方案的技术核心，需针对分布式光伏接入后的故障电流特性重新构建计算模型。传统整定计算基于单一电源（如变电站馈线）的故障电流分布，而分布式光伏接入后需考虑多电源叠加效应（如光伏逆变器输出电流与传统电源电流的矢量合成）。具体优化方向包括：其一，故障电流计算模型的扩展，引入光伏逆变器的等效输出阻抗（如基于逆变器控制策略与直流侧电压估算）、最大输出电流限制（如 1.0~1.5 倍额定电流）及低电压穿越期间的电流特性（如故障电流幅值随电压跌落深度变化），建立多电源协同的故障电流分布模型；其二，保护定值的动态调整，根据光伏出力实时变化（如通过功率预测数据或在线监测数据获取当前光伏输出功率），动态修正电流保护的动作阈值（如将定时限过流保护的动作电流整定为 1.2~1.5 倍当前光伏最大输出电流）、方向保护的功率方向判据（如考虑光伏逆变器输出电流的相位偏移）及限时配合参数（如根据故障电流分布调整各级保护的动作时间差）；其三，灵敏度校验的强化，针对高阻抗接地故障（如配电网末端单相接地）等传统保护易失效的场景，通过提高电流保护的最小动作电流灵敏度（如将灵敏度系数从 1.5 提升至 2.0）或增设接地保护（如零序电流保护），确保故障检测可靠性。

2.3 保护协调策略的协同优化

保护协调策略是实现选择性切除与系统稳定的关 键，需从故障检测、动作逻辑及后备保护三个层面协同设计。故障检测层面，采用多判据融合技术提升故障识别的准确性，例如结合电流幅值（如超过 1.2 倍额定电流）、电流变化率（如 di/dt 超过阈值）、功率方向（如故障电流方向与正常运行方向相反）及电压跌落特征（如电压幅值低于 0.8 倍额定电压），综合判断故障类型（如相间短路、单相接地）与位置（如光伏接入点上

游或下游）。动作逻辑层面，基于分布式光伏的运行状态（如在网运行或离网状态）动态调整保护配合关系：当光伏在网运行时，通过方向保护优先切除故障点最近的电源侧保护（如光伏逆变器出口保护），避免主网侧保护误动；当光伏离网运行时，恢复传统单电源保护配合逻辑。后备保护层面，增设广域后备保护机制，通过通信网络（如光纤通信或无线专网）实现相邻保护装置的信息交互（如共享故障电流数据、动作状态），在主保护拒动时由相邻保护快速切除故障，防止故障范围扩大。此外，针对逆变器低电压穿越期间保护协调的特殊需求，设计“暂态保护模式”，即在电网电压跌落至阈值时，临时放宽电流保护的动作阈值（如将动作电流整定值提高20%），延长动作时间（如增加0.1~0.2秒），确保逆变器完成无功支撑后再切除故障。

3 电气保护协调方案的实施保障措施

3.1 通信技术的支撑作用

分布式光伏接入配电网的保护协调依赖实时、可靠的数据交互，通信技术是实现保护信息共享与协同控制的基础。需构建覆盖配电网全环节的通信网络，包括变电站与光伏接入点之间的主干通信（如光纤通信，带宽 $\geq 100\text{Mbps}$ ，延迟 $\leq 10\text{ms}$ ）、光伏逆变器与本地保护装置之间的本地通信（如RS485或以太网，带宽 $\geq 10\text{Mbps}$ ，延迟 $\leq 5\text{ms}$ ）及相邻保护装置之间的广域通信（如无线专网或电力载波通信，带宽 $\geq 1\text{Mbps}$ ，延迟 $\leq 50\text{ms}$ ）。通信协议需统一标准（如采用IEC 61850或DL/T 860），确保保护装置之间能够交换故障电流、电压、动作状态等关键信息。此外，需加强通信网络的可靠性设计，例如通过双链路冗余（如主备光纤通道）、自愈机制（如通信中断后自动切换至备用路径）及抗干扰技术（如屏蔽电缆、滤波装置），避免因通信故障导致保护协调失效。

3.2 智能控制技术的赋能

智能控制技术为保护协调方案的动态优化提供了技术支持。通过部署智能终端（如具备数据采集、分析

及控制功能的保护测控装置），实时监测配电网运行状态（如光伏出力、负荷需求、故障电流分布），并结合大数据分析与人工智能算法（如机器学习故障诊断模型），预测潜在故障风险（如某馈线段高阻抗接地故障概率升高）并提前调整保护定值。例如，利用历史运行数据训练故障电流预测模型，根据当前光伏出力与负荷水平动态计算故障电流幅值，优化电流保护的动作阈值；通过智能算法实时调整方向保护的功率方向判据，适应双向潮流变化。此外，智能控制技术可实现保护装置的远程维护与定值整定（如通过调度中心远程修改保护参数），提升运维效率与响应速度^[4]。

4 结论

新能源分布式光伏的高渗透率接入对配电网电气保护体系提出了新的挑战，传统保护方案因故障电流分布改变、保护配合关系紊乱及逆变器控制策略影响而难以适应。本文通过系统分析分布式光伏接入的电气特性影响，提出适应高渗透率场景的电气保护协调方案，包括分层分区的保护配置原则、动态优化的整定计算方法及多层面协同的保护协调策略，并从通信技术、智能控制及标准体系等维度提出实施保障措施。未来研究可进一步聚焦数字化技术（如数字孪生在保护协调中的应用）、新型保护装置（如基于电力电子技术的固态保护设备）及多能源融合场景（如分布式光伏与储能协同接入）的保护协调策略，为配电网的安全稳定运行提供更全面的支撑。

参考文献

- [1] 刘林. 分析分布式光伏接入对配电网继电保护的影响[J]. 建筑电气, 2023, 42(7): 15~19.
- [2] 余周斌, 方智浩. 高比例分布式光伏中低压配电网继电保护方法研究[J]. 电气工程, 2023(5): 61~68.
- [3] 张媛. 分布式光伏发电并网对继电保护的影响分析[J]. 电气工程, 2022(19): 129~131.
- [4] 陈晓乾, 秦文萍, 杨乐, 等. 逆变式电源接入下的配电网自适应距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 27~38.