

风电场集电线路故障定位与保护整定优化研究

杨军，丁树常，孙启利，黄其军，王辉

华北油田电力分公司新能源工区 河北任丘 062550

摘要：风电场集电线路采用电缆-架空线混合结构且分支众多，传统故障定位与保护整定方法因风机限流特性及过渡电阻影响而精度不足、选择性差。本文分析集电线路故障特征，提出基于行波双端测距与阻抗-暂态融合的定位方法，并给出考虑拓扑差异的分区整定原则及基于电流分布的自适应协同优化策略，以提升定位可靠性与保护动作选择性。

关键词：风电场、集电线路、故障定位

引言

风电场集电线路承担风机电能汇集任务，其混合拓扑与变流器限流特性导致故障电流幅值受限、相位偏移，传统工频量定位误差大，阶段式电流保护易拒动或越级跳闸。因此，需研究适应双侧供流、过渡电阻多变及运行方式波动的故障定位与保护整定优化技术。本文从故障特征出发，探讨行波与阻抗融合定位方法，并优化保护定值配合原则，为提升集电线路故障处理能力提供理论依据。

1 风电场集电线路故障特征分析

风电场集电线路的故障类型主要包括单相接地故障、两相短路故障、两相接地短路故障及三相短路故障，其中单相接地故障发生概率最高。与传统输电线路不同，集电线路的故障电流来源具有双侧甚至多侧特性，即故障点两侧分别由系统侧和风电机侧提供短路电流。当风电机采用变流器并网时，其提供的短路电流受到电力电子器件过流能力的限制，通常被限制在额定电流的 1.2 至 1.5 倍，且故障电流相位受控制策略影响呈现非工频偏移特征。此外，集电线路多采用电缆与架空线混合结构，不同介质波阻抗差异导致故障行波在连接点处发生复杂的折反射，增加了行波波头辨识难度。过渡电阻的存在会使故障电流幅值显著减小，尤其在高阻接地故障情况下，传统过电流保护可能无法启动，同时阻抗法测距结果受过渡电阻影响产生较大误差。风机出力的随机波动性使得集电线路在不同运行方式下的故障电流分布呈现时变特性，保护定值若按最大运行方式整定，在小方式下可能出现灵敏度不足问题。上述故障特征决定了风电场集电线路的故

障定位与保护整定必须采用区别于常规电网的专门化技术方案。

2 集电线路故障定位方法研究

2.1 基于行波原理的故障定位技术

行波故障定位利用故障产生的暂态电压或电流行波在线路上的传播时间与波速关系计算故障距离，具有不受过渡电阻、系统振荡等因素影响的显著优势。针对风电场集电线路分支多、混合线路波阻抗变化复杂的特点，可采用双端行波测距法消除波速不确定性的影响，通过在集电线路首端和末端分别安装行波采集装置，记录故障行波到达两端的时间，利用时差与线路全长计算故障点位置。为解决混合线路波速差异问题，可引入分段波速校正策略，即根据电缆与架空线的长度比例及各自波速建立分段传播时间方程，通过求解时间方程组得到故障点所在区段及精确距离。对于多分支结构，单纯的时差法难以区分故障位于主干线还是分支线，此时可结合各分支末端行波反射特征进行拓扑辨识，利用反射波到达首端的时间与主干线行波传播时间的对应关系判定故障分支。实际应用中需注意行波信号的可靠捕捉，采用小波变换模极大值法提取行波波头，选择适当的小波基函数和分解尺度以抑制噪声干扰，同时利用高速数据采集装置保证微秒级的时间同步精度。

2.2 基于阻抗分析与暂态信号融合的定位方法

阻抗法故障定位通过测量线路首端的电压和电流计算故障回路阻抗，进而根据单位长度阻抗参数得到故障距离，该方法实现简单且无需额外设备，但受过渡电阻和负荷电流影响较大。针对风电场集电线路过渡电阻不可忽略的特点，可采用改进型阻抗算法，利用故障后不同时刻的电压电流相量构建方程组消去过渡电阻影响，或者引入故障分量网络，将故障分量电压与电流的比值作为测距阻抗。为进一步提高定位精度，可将阻抗分析与暂态信号特征相融合，即在阻抗法给出初步测距结果后，以该距离为中心设定一个有限搜索区间，在该区间内对暂态电压或电流信号进行时频分析，提取与故障位置相关的特征频率分量，通过比对实测特征频率与仿真数据库中的理论频率-距离映射关系完成精确定位。对于单相接地故障，还可利用暂态零序电流的高频分量能量分布特征判断故障区段，不同分支线路对高频信号的衰减特性差异可作为区段识别的依据。

3 保护整定优化策略

3.1 考虑集电线路拓扑结构差异的整定原则

风电场集电线路的保护配置通常采用阶段式电流保护作为主保护，但由于集电线路各分支长度差异大且部分分支末端可能连接多台风机，传统按线路全长整定的原则难以保证上下级保护的选择性。优化后的整定原则应根据集电线路的具体拓扑结构分级分区设置定值，将集电线路划分为主干线保护区和分支线保护区，主干线保护按躲过所有分支线末端故障的短路电流整定，同时校验本线路末端故障时的灵敏度；分支线保护则按保证本分支末端故障有足够灵敏度且与下一级风机箱变高压侧保护配合进行整定。对于采用环网结构的集电线路，保护整定需考虑故障电流的双向流动特性，引入方向元件辅助判断故障方向，使保护装置仅对正方向故障动作，从而解决环网中短路电流可能反向流经保护的问题。不同电压等级集电线路的保护配合时间级差应适当放宽至 0.3 至 0.5 秒，以克服风机故障电流非工频分量导致的保护动作延迟。此外，对于靠近升压站首端的重要集电线路，可配置加速段保护，其定值按保证本线路 80%处故障可靠动作且与下级保护限时配合的原则整定，以缩短近区故障的清除时间。

3.2 基于故障电流分布特征的保护定值协同优化

风电场集电线路的故障电流分布受运行方式变化影响显著，当部分风机因风速不足或检修退出运行时，线路末端短路电流可能下降至最大运行方式下的百分之四十以下，按最大短路电流整定的定值在小方式下可能出现拒动。协同优化策略要求保护定值在满足选择性的前提下，根据风电场实际运行状态进行自适应调整，具体可采用基于实时短路电流计算的分段整定方法，即根据风电场并网点电压、投入风机台数及出力水平在线估算各集电线路在不同位置的短路电流值，动态调整过流保护的启动定值和动作时限。对于多级串联保护，可利用故障电流的分布差异性建立定值配合矩阵，当线路末端发生故障时，首端保护应感受到比分支保护更大的短路电流，据此可将分支保护的速断定值设置为首端保护速断定值的 1.1 至 1.2 倍，确保分支故障时分支保护优先动作。同时，应充分考虑风机变流器的限流特性对故障电流幅值的影响，在整定计算中引入电流削减系数修正传统短路电流公式，避免因高估短路电流导致保护定值偏大而降低灵敏度。对于时限配合，可采用反时限特性曲线替代定时限方案，使保护动作时间随故障电流增大而自动缩短，既能保证选择性又能加快近区故障切除速度。

4 结语

风电场集电线路的特殊结构及风机变流器的限流特性使得传统故障定位方法与保护整定策略面临严峻挑战。本文从故障特征分析入手,明确了集电线路故障电流双侧供给、幅值受限、过渡电阻影响显著等关键问题;在故障定位方面,行波法可解决高阻接地与混合线路测距难题,而阻抗与暂态信号融合方法兼顾了实用性与精度;在保护整定优化方面,基于拓扑结构的分区整定原则与基于故障电流分布特征的协同优化策略能够有效提升保护的选择性和灵敏性。后续研究可进一步探索故障定位结果与保护动作信息的联合利用,构建集电线路故障诊断与保护自适应的闭环系统。

参考文献

- [1]白通,王慧芳,杨林刚,等.海上风电场集电海缆故障区段定位方法[J].电力自动化设备,2025(5).
- [2]李永丽,辛双乔,李涛,等.基于多端信息的风电场集电线路单相接地故障定位算法[J].电力工程技术,2022(005):041.
- [3]佚名.风电场35kV混合型集电线路故障原因分析及定位探究[J].经济技术协作信息,2020(13):95-95.