

配电网单相接地故障特征分析与选线保护策略优化

常娅莹

国网湖北省电力有限公司谷城县供电公司 湖北 襄阳 441000

【摘要】：配电网单相接地故障受高阻接地、间歇性电弧及分布式电源接入等影响，传统故障选线方法难以适配复杂工况，存在识别维度单一、判据适配性弱、可靠性偏低等缺陷。本文剖析不同故障工况下暂态与稳态电气量特征差异，阐明复杂运行条件对故障特征的作用机理，提出融合小波包能量、相位自适应、五次谐波比值与零序功率方向的多维复合选线算法，并搭建依托系统参数辨识和历史数据推理的自适应保护调整机制。经RTDS仿真、物理动模试验及现场应用验证，该方法可有效适配高阻接地、消弧补偿及通信异常场景，大幅提升故障选线准确率，减少保护误动与拒动，工程实用价值与运行鲁棒性突出。

【关键词】：单相接地故障；故障特征分析；选线保护；自适应策略；高阻接地

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.080

引言

随着新型电力系统建设加快，配电网架构趋于复杂，分布式电源高比例并网、电缆化率提高及运行方式多变，使单相接地故障演化机理与电气特征呈现强非线性和不确定性。该类故障虽不直接造成供电中断，却易引发过电压、电弧重燃及电磁干扰，危及设备安全与供电质量。中性点非有效接地系统故障电流微弱、特征隐匿，传统选线方法依赖单一稳态量与固定阈值，在高阻接地、间歇性电弧及混合线路场景下误判问题突出。为此需深入解析多工况下故障暂稳态特征规律，突破多源信息融合与自适应判据技术瓶颈，实现选线保护高灵敏、强鲁棒与智能化升级，保障配电网安全稳定运行。

1 配电网单相接地故障现状及核心问题分析

1.1 配电网单相接地故障典型发生场景及危害

配电网单相接地故障多发于多种典型运行环境中，包括雷雨天气下架空线路因雷电过电压导致绝缘子击穿、城市绿化树木生长侵入导线安全距离引发对地放电、老旧电缆因外力损伤或长期运行老化造成绝缘层破损形成高阻接地，以及配电变压器、开关柜等设备内部受潮、积污或制造缺陷诱发局部放电^[1]。在中性点经消弧线圈或不接地系统中，此类故障初期电流微弱，常呈现间歇性电弧特性，难以被传统保护装置有效识别。故障持续期间，非故障相电压升高至线电压水平，可能加速系统其他部位绝缘劣化，诱发多点接地或相间短路。电弧能量集中释放可烧蚀金属、熔断导线，甚至引燃周边植被或建筑构件，构成火灾隐患。同时，故障产生的高频暂态分量通过电磁耦合干扰邻近通信线路与自动化终端，影响配电网物联网设备正常运行，严重时造成用户侧精密仪器损坏或数据

异常，直接威胁供电可靠性与人身财产安全。

1.2 现有故障特征识别存在的核心短板

现有故障特征识别方法在应对配电网单相接地故障时暴露出显著短板。故障初期暂态信号虽具有辨识潜力，但其持续时间极短且频带宽，对采样设备的响应速度与精度提出极高要求，实际工程中常因硬件限制导致关键信息丢失^[2]。稳态零序电流受系统对地电容分布不均、线路长度差异及负荷波动影响，幅值与相位特征离散性大，难以形成稳定判据。高阻接地故障下，故障电流可能低于装置启动阈值，致使保护拒动，而弧光接地产生的非线性特性进一步扭曲电气量波形，增加识别难度。此外，分布式电源接入改变了传统配电网潮流方向与故障电流分布规律，使得基于单端口量测的传统选线逻辑失效。现有算法多未充分考虑噪声干扰、信号衰减及多源信息协同问题，特征提取维度单一，缺乏对复杂工况下故障模式的自适应辨识能力，导致在真实运行环境中选线可靠性难以保障。

1.3 传统选线保护策略的应用瓶颈

传统选线保护方案在当前配电网运行场景中存在诸多应用局限，基于零序电流幅值对比的比幅方案在高阻接地或线路长度相近场景下难以界定故障与非故障线路，受系统不平衡电流及谐波扰动影响，误判概率随之攀升，比相方案依托各线路零序电流相位统一性，经消弧线圈接地系统中故障与非故障线路零序电流相位差值缩小乃至反向，判据效能大幅降低。注入信号方案虽可增强检测灵敏度，却需额外硬件投入，复杂网络中注入信号衰减迅速且传播路径模糊，定位精度受到制约，传统方案大多仅采用单一电气量数据，缺乏暂态过程、高频分量及多维特征的融合研判

能力,在含分布式电源、电缆—架空混合线路或弱馈场景下适配性明显下滑。现有装置采样频次不足、同步精度欠佳,无法精准捕捉微秒级暂态特征,阻碍高灵敏度选线算法实际落地,保护定值整定多依托经验积累,未充分兼顾网架结构动态变迁,拓扑调整后方案性能随之劣化,难以契合现代配电网高可靠供电诉求。

2 配电网单相接地故障特征精准分析

2.1 故障暂态电气量特征提取与分析

配电网发生单相接地故障后,故障点会激发出幅值显著的高频暂态分量,其频率范围通常覆盖 300Hz 至数千 Hz,这一暂态过程的持续时间约为 0.5 至 1 个工频周期。暂态零序电流的幅值可达稳态分量的数倍至数十倍,且故障线路与健全线路的暂态零序电流极性相反,这一特征在中性点不接地和谐振接地系统中均稳定存在(见图 1)。暂态主谐振频率由系统等电感与对地电容共同决定,频率值随等效电感增大而降低、随对地电容增大而降低,衰减因子则与过渡电阻和线路参数中的电阻分量直接相关。当过渡电阻在 $10\ \Omega$ 至 $100\ \Omega$ 范围内时,暂态分量的衰减较慢,特征清晰可辨;而当过渡电阻升高至 $1000\ \Omega$ 以上时,暂态幅值显著衰减,高频成分被严重削弱,给特征提取带来困难。电弧重燃情况下的暂态过程更为复杂,重燃时刻故障相电压瞬时值决定了暂态电流的幅值大小,重燃后系统呈现非零初始状态下的暂态响应。

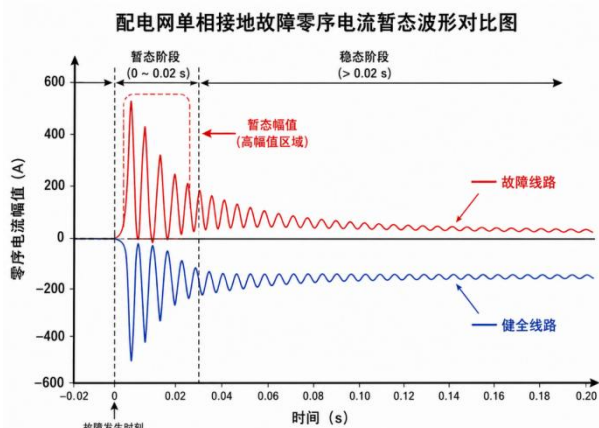


图 1 配电网单相接地故障零序电流暂态波形对比图

2.2 不同故障类型下特征差异对比

不同类型配电网单相接地故障的电气响应特征差异显著。金属性接地零序电流幅值大、波形平稳、谐波含量低,故障相电压近乎归零,特征辨识度高。过渡电阻大于 $1\text{k}\ \Omega$ 的高阻接地会造成零序电流大幅衰减,常低于 1A 且易被背景噪声掩盖,同时呈现非线性

性伏安特性,引发电流波形畸变并滋生偶次谐波。间歇性电弧接地受电弧周期性熄灭与重燃影响,产生周期性高频暂态脉冲,脉冲间隔与工频电压过零点关联,频谱呈离散峰值特性。树枝、建筑物等非线性介质接地,故障电流具备半波整流与波形不对称特点,零序电流含有大量直流分量及低频振荡成分。电缆护层破损接地常伴随局部放电信号,脉冲重复率与电压相位高度耦合,与架空线雷击闪络的宽频随机脉冲特征形成明显区分。各类故障差异化的电气响应与波形频谱特征,为故障特征指纹识别、类型划分及精准选线奠定了坚实物理理论基础。

2.3 复杂工况对故障特征的影响机制

配电网运行环境复杂多变,多种工况因素共同作用于单相接地故障特征的呈现形式。系统中性点接地方式的差异直接影响零序电流的幅值与相位特性,在谐振接地系统中,消弧线圈的补偿程度会显著改变故障点残流大小及暂态过程;而在小电阻接地系统中,故障电流幅值较大但高频分量衰减较快。线路结构亦构成关键影响因素,电缆与架空线混合线路因波阻抗不连续导致行波反射与折射,使暂态信号频谱分布发生畸变。分布式电源接入引入额外电势源,不仅改变原有潮流方向,还可能在故障瞬间注入反向电流,干扰选线装置对故障线路的判断^[3]。此外,高阻接地、间歇性电弧以及负荷波动等非理想条件进一步削弱故障特征的可观测性,造成零序电压与电流之间相位关系模糊,甚至出现特征量幅值低于保护整定阈值的情况。多重干扰耦合下,传统基于稳态量或单一暂态特征的判据难以保持稳定有效性,需深入揭示各类复杂工况与故障电气量之间的内在关联机制,为后续选线策略提供精准特征支撑。

3 配电网单相接地故障选线保护策略优化

3.1 基于故障特征的选线算法优化设计

针对配电网单相接地故障暂态与稳态特征差异显著的特点,选线算法优化需深度融合零序电流幅值、相位、谐波含量及暂态能量等多维故障信息^[4]。在高阻接地或间歇性电弧故障场景下,传统幅值比较法易受系统不平衡电流干扰,因此引入小波包变换对暂态零序电流进行多尺度分解,提取特定频带内的能量集中特征作为判据依据。同时,结合故障线路零序电流滞后电压 90° 而健全线路超前的相位特性,构建基于相位差阈值自适应调整的选线逻辑,提升抗过渡电阻能力。为增强算法鲁棒性,融合五次谐波分量比值与基波有功功率方向信息,形成复合判据体系,在消弧

线圈补偿工况下有效区分故障与非故障线路。此外，利用同步相量测量单元（PMU）实现多馈线零序电流的高精度时间同步采集，通过相关性分析剔除外部扰动影响，进一步提高选线准确率与动作速度。

3.2 保护策略的自适应调整机制构建

配电网运行方式多变、接地方式多样，要求选线保护策略具备动态适应能力。自适应调整机制依托实时采集的系统参数与故障特征，通过在线辨识中性点接地类型（如不接地、经消弧线圈接地或高阻接地）及线路分布电容变化，自动切换相应的选线判据权重。在消弧线圈调谐过程中，系统对地电容电流补偿度发生改变，此时引入残余电流相位角与脱谐度的关联模型，动态修正零序功率方向判据的灵敏度阈值。针对分布式电源接入引起的潮流双向性问题，构建基于本地与相邻馈线零序电流比值的自适应阈值算法，避免因反向馈电导致误判^[5]。结合历史故障数据与当前暂态波形相似度分析，利用模糊逻辑推理对不同选线方法输出结果进行可信度加权融合，在复杂工况下实现保护策略的智能重构。该机制还集成通信状态监测模块，当部分终端信息异常时，自动降级为基于本地量的主后备协同判据，确保保护功能持续有效。

3.3 优化策略的可靠性与有效性验证

为确保所提出的选线保护优化策略在实际系统中具备工程适用性，需构建多维度、高保真的验证体系。依托 RTDS（实时数字仿真系统）搭建涵盖不同接地方式、线路结构及分布式电源渗透率的配电网模型，

模拟各类单相接地故障场景，包括高阻接地、间歇性电弧接地及暂态扰动叠加等复杂工况。通过对比优化策略与传统方法在故障识别率、误动率及动作时间等关键指标上的差异，量化其性能提升程度。同时，在物理动模平台上部署保护装置原型，注入实测故障录波数据，检验算法在硬件资源受限条件下的实时性与稳定性。引入蒙特卡洛随机抽样方法对系统参数（如过渡电阻、负荷波动、CT 饱和特性）进行扰动分析，评估策略在参数不确定环境下的鲁棒性。此外，结合现场试点运行数据，统计连续 6 个月内的选线正确率与拒动/误动事件，验证其在真实运行环境中的长期可靠性。所有验证环节均遵循 IEC 61850 通信标准与继电保护整定规程，确保测试结果具备可比性与规范性。

4 结语

配电网单相接地故障精准辨识与可靠选线，是保障供电可靠和系统安全的核心关键。受高阻接地、间歇性电弧及分布式电源并网等复杂工况影响，传统选线方法已难以适配现代配电网运行要求。本文深入分析故障暂态与稳态电气特征差异及多工况演化规律，构建多维电气量融合优化选线算法，引入自适应调整机制适配电网结构与运行方式动态变化。经数字仿真、物理动模及现场试点综合验证，该策略在识别精度、抗干扰性与工程适用性上提升显著。伴随智能传感、边缘计算与数据驱动技术融合发展，配电网接地故障保护将朝着自主感知、协同决策与韧性运行方向持续升级。

参考文献：

- [1] 董轩,徐铭铭,王鹏,等.10 kV 配电网单相接地故障特征分析及选线方法[J].河南科技,2020,39(34):142-143.
- [2] 廖德辉,金鑫,田君杨,等.灵活接地配电网单相接地故障全过程特征分析[J].智慧电力,2024,52(05):90-97.
- [3] 王功臣.基于波形特征的小电阻接地配电网单相接地故障定位分析[J].仪器仪表用户,2024,31(04):84-86.
- [4] 马玓,牟龙华,张鑫.配电网单相接地故障特征分析软件设计[J].电气自动化,2021,43(01):1-3+9.
- [5] 肖文妍,郭谋发,林佳壕,等.基于多频带多特征融合的配电网单相接地故障选段方法[J].电气技术,2024,25(07):7-14.