故障分量驱动下配电线路保护灵敏度的提升

王子月
国网江苏省电力有限公司扬州供电分公司　江苏 扬州　225000

摘　要　配电线路运行方式变化频繁，分布式电源接入后，故障电流幅值和方向更易受潮流状态影响，传统工频全量保护在高阻故障、弱馈入场景下容易出现灵敏度不足。本文围绕故障分量的形成机理、提取方法和动作判据展开研究，分析过渡电阻、运行方式变化以及分布式电源接入对保护灵敏度的影响，提出基于自适应启动门槛、状态感知整定、多电气量融合和高阻故障连续识别的优化方法。通过建立含逆变型光伏电源的10 kV配电线路仿真模型，对不同故障位置、过渡电阻、负荷水平以及分布式电源运行状态下的保护性能进行验证。结果表明，改进方法能够有效降低负荷变化和故障电流衰减对保护动作的影响，在500 Ω高阻接地故障条件下仍保持较高灵敏系数，同时具备区外故障方向制动能力，可提升复杂运行环境下配电线路继电保护的可靠性。

关键词　故障分量；配电线路；继电保护；灵敏度；高阻故障

Improvement of Distribution Line Protection Sensitivity Driven by Fault Components

Wang Ziyue
Yangzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu Province, China

Abstract　Distribution lines frequently change their operating modes. After the integration of distributed generation, the amplitude and direction of fault currents are more susceptible to power flow states, making traditional power-frequency full-quantity protection prone to insufficient sensitivity under high-resistance faults and weak-infeed scenarios. This paper investigates the formation mechanism, extraction methods, and operating criteria of fault components, analyzes the effects of transition resistance, operating mode changes, and distributed generation integration on protection sensitivity, and proposes optimization methods based on adaptive starting thresholds, state-aware setting, multi-electrical-quantity fusion, and continuous identification of high-resistance faults. By establishing a simulation model of a 10 kV distribution line containing inverter-based photovoltaic sources, the protection performance is verified under different fault locations, transition resistances, load levels, and distributed generation operating states. The results show that the improved method can effectively reduce the impact of load variations and fault current attenuation on protection operation, maintain a high sensitivity coefficient under 500 Ω high-resistance grounding fault conditions, and possess directional blocking capability for out-of-zone faults, thereby enhancing the reliability of distribution line relay protection in complex operating environments.

Key words　Fault Components; Distribution Lines; Relay Protection; Sensitivity; High-Resistance Faults

配电网由单电源辐射结构向多电源主动网络演变后，短路电流的来源和流向会随运行状态变化，光伏、储能等逆变型电源的限流控制又削弱了故障电流增量。在线路末端发生高阻接地时，故障特征可能接近负荷波动范围，固定定值保护难以兼顾灵敏性和选择性。故障分量反映故障前后新增的电气变化，能够削弱负荷电流和正常潮流的基值影响。由此，从故障分量中提取有效信息，再依据运行状态调整启动和动作判据，可为提升配电线路保护灵敏度提供基础。

1　基于故障分量的配电线路继电保护原理

1.1 故障分量形成机理

线路发生短路或接地后，可将故障状态看作故障前正常网络与故障附加网络的叠加[1]。正常负荷电流前后变化连续，而故障点附加电源引起的电压、电流突变量会在故障瞬间出现，这部分新增量即为故障分量。例如，某测点故障前负荷电流为120 A，故障后升至260 A，则电流增量约140 A。若直接以全量作为动作依据，负荷增大时整定值也要抬高；改用新增量后，判据主要面对故障变化。即使分布式电源使故障前潮流双向变化，同一测点前后量值相减后，稳定运行成分仍可大部分抵消。

1.2 故障分量提取方法

数字保护可利用一周波差分提取故障分量。设采样频率为f_s，工频为f_N，当前采样点为k，一周波采样点数$N=f_s / f_N$，则电

流故障分量可按式（1）获得：

$$\Delta i(k)=i(k)-i(k-N),\ N=f_s/f_N \quad (1)$$

式中，$\Delta i(k)$—故障分量；$i(k)$—当前采样值；$i(k-N)$—前一周波同相位采样值；N—一周波采样点数；f_s—采样频率；f_N—额定频率。仿真参数取f_s=10 kHz、f_N=50 Hz，因此N=200。稳态时一周波差分量很小；故障后差分量可在1～2 ms内抬升。为减小CT暂态误差和高频噪声影响，保护装置可对差分序列再采用2 ms滑动均方根计算，既保留突变信息，又避免单点尖峰触发。对含逆变型分布式电源的线路，还可同步提取正序、负序和零序故障分量，为后续方向判别提供输入。

1.3 保护动作判据

故障分量提取完成后，还要把灵敏启动与选择性判断分开。正常运行时，一周波差分量通常只占额定电流的1%～3%；金属性短路后，动作量可在数毫秒内升至额定电流的数倍。若单纯降低启动值，负荷突变和采样误差可能造成误启动，因此采用“低门槛启动+方向确认”的两级逻辑：故障分量连续3个采样窗超过启动值后进入故障状态，再利用正序电流故障分量方向、零序增量极性及电压突变量确认故障[2]。具备通信条件时可比较两端故障分量方向；无同步通信时，则利用本地电压、电流相位关系识别方向，使低门槛只负责发现故障，选择性由后续判据保证。

2 配电线路继电保护灵敏度影响因素

2.1 过渡电阻影响

过渡电阻是限制动作裕度的直接因素。以10 kV系统相电压约5.77 kV为例，当故障回路自身阻抗较小、过渡电阻由10 Ω增加至200 Ω时，故障电流会明显下降；达到数百欧姆后，电流全量可能与重负荷电流处于同一数量级。传统过电流保护必须躲过最大负荷并留出安全裕度，高阻故障电流便可能低于动作定值。故障分量去除了故障前负荷基值，启动门槛无须随负荷电流同步提高，可以更多依据噪声、测量误差和最小故障增量确定[3]。因此，过渡电阻越高，新增量判据的优势越明显，也越需要稳定的启动门槛。

2.2 系统运行方式变化

系统运行方式变化也会改变保护安装处看到的故障量。算例中主电源短路容量设为250 MVA，轻载时线路负荷约80 A，重载时提高至180 A。采用固定全量定值时，为躲开180 A负荷电流，动作门槛必须随负荷上限提高，弱电源方式下容易损失灵敏度。故障分量在两种负荷状态下的故障前基值均接近零，受负荷水平影响较小。不过，线路转供还会改变故障分量方向和相邻保护配合关系，因此定值与方向判据仍需随运行状态校核。

2.3 分布式电源接入影响

分布式电源接入会使动作边界更加复杂。逆变型电源受器件过流能力限制，故障期间输出电流通常被控制在额定值附近，序分量也会随控制策略变化[4]。分布式发电（distributed generation，DG）位于保护下游时可能向故障点提供助增电流，位于相邻馈线时又可能形成反向电流。算例在距母线8 km处接入2 MW光伏电源，其额定线电流约115 A，按1.2 p.u.限流后最大输出约138 A，足以改变局部潮流方向。由此可见，过渡电阻主要造成故障量变小，运行方式和DG接入则会引起动作边界变化。

3 基于故障分量的继电保护灵敏度提升方法

3.1 优化故障分量启动判据

固定门槛在噪声较低时偏保守，在负荷波动或谐波增加时又可能过低。针对这一矛盾，利用故障前200 ms数据计算故障分量背景标准差，并设置额定电流比例下限，构成式（2）所示自适应启动值：

$$I_{set}=\max(k_\sigma\cdot\sigma_{pre},\ k_b\cdot I_N) \quad (2)$$

式中，I_{set}—启动值；σ_{pre}—故障前背景标准差；I_N—额定电流基准；k_σ—噪声裕度系数；k_b—比例下限系数。仿真中k_σ取4，k_b取0.02，额定电流基准按一次侧300 A计算。若背景波动为1.2 A，则$4\sigma_{pre}$为4.8 A，低于$0.02I_N$=6 A，因此由比例下限控制，启动值取6 A；当噪声增大到2 A时，启动值自动提高至8 A。该设计可使门槛随测量环境变化，又不因短时平稳数据降得过低。启动后20 ms内冻结门槛，防止故障量反向抬高定值。

3.2 构建故障分量自适应整定方法

进入故障状态后，动作定值还要适应系统方式。装置可利用母线电压、线路负荷、开关状态及DG运行标志形成简化状态量，每1～5 min刷新稳态参数，并在故障触发时冻结最新值。电源短路容量下降、线路转供或DG退出时，应以最低故障分量估计值作为主要约束，同时保留区外故障所需的安全裕度。灵敏系数取最小故障分量有效值与动作定值之比，算例以1.5作为校核目标。低于1.5时，不再继续降低单一电流定值，转入电压突变量和序分量联合判别，使动作裕度随运行状态重新分配。

3.3 引入多电气量融合判别机制

运行状态整定改善了弱馈入方式下的动作裕度，但高阻故障或逆变电源限流时，单一电流故障分量仍可能偏小，因此还需利用不同电气量的互补响应。正序电流增量作为主动作量，

相电压突变量、负序电流增量和零序电流增量作为辅助量[5]。三相短路时正序增量占主导，单相接地时零序、负序特征更明显；过渡电阻增大后，相电流幅值下降，但故障相电压突降仍可提供有效信息。主动作量超过定值时直接进入方向确认；位于0.6～1.0倍定值的弱特征区间时，若电压突变量超过额定相电压的8%，且对应序分量方向满足区内条件，则允许动作，以弱特征补足单一电流判据的不足。

3.4 优化高阻故障识别策略

对于故障电流持续偏小的高阻接地，仅靠瞬时幅值仍可能漏判，因此还需利用故障特征的连续性。启动后前10 ms计算故障分量短窗峰值，随后在20 ms窗口内计算能量累计值。若峰值未达到主动作定值，但累计能量连续两个窗口上升，且故障相电压持续下降，则列为弱故障候选，再通过零序故障分量方向排除相邻馈线外部接地。低阻故障仍可在10～15 ms内完成判别，高阻故障则将观察时间延长至30～40 ms。电容投切冲击持续时间短，电压恢复快，差分量能量通常不会连续增长，可在第二个窗口排除[6]。至此，启动、整定和融合判据在高阻场景下形成连续识别过程。

4 继电保护灵敏度提升效果验证

4.1 仿真参数设置

为检验各环节配合后的效果，在PSCAD中建立10 kV单母线辐射配电线路模型，并在馈线中部接入逆变型光伏电源。系统频率50 Hz，主电源短路容量250 MVA，线路总长12 km，正序电阻0.27 Ω/km，正序电抗0.35 Ω/km，采样频率10 kHz。故障点设置在距母线2 km、6 km和10 km处，模拟三相短路、两相短路及单相接地。单相接地过渡电阻由0 Ω逐步增加至500 Ω，同时切换80 A、180 A两种负荷水平以及DG投入、退出状态。主要参数如表1所示。

表1 配电线路仿真主要参数

参数	取值
额定电压	10 kV
系统频率	50 Hz
主电源短路容量	250 MVA
线路长度	12 km
正序参数	R_1=0.27 Ω/km，X_1=0.35 Ω/km
光伏接入容量	2 MW，故障限流 1.2 p.u.
采样频率	10 kHz
故障位置	2 km、6 km、10 km
过渡电阻	0 ～ 500 Ω

4.2 不同故障条件下保护性能对比

在相同模型和故障条件下，对传统固定定值保护与改进保护进行比较。低阻故障时两种方法均能可靠识别，差异主要出现在高阻故障和DG状态变化后。过渡电阻达到300 Ω时，传统保护灵敏系数降至1.08；500 Ω时进一步降至0.86，而改进保护仍保持1.72。DG退出后，末端两相故障的传统保护灵敏系数降至1.31，改进保护仍为1.83。

4.3 灵敏度提升效果分析

传统固定定值保护的灵敏系数随故障电流衰减持续下降，300 Ω以后已接近或低于1.5校核线；改进保护去除故障前负荷基值，并利用自适应门槛和辅助电气量补足弱特征，下降速度明显放缓。500 Ω时灵敏系数仍为1.72，传统方法仅为0.86，前者约为后者的2倍。负荷由80 A提高至180 A后，改进保护灵敏系数仅下降约6.1%，固定全量保护下降超过20%，与运行方式影响分析相吻合。区外故障测试中，正序方向判据始终保持制动，未出现因门槛降低而导致的误动。可见，灵敏度的改善来自故障信息提纯、状态更新和弱特征融合。

5 结束语

故障分量将故障新增信息从负荷全量中分离后，可为配电线路弱故障提供更低、更稳定的动作基准。围绕高阻、运行方式变化和分布式电源接入场景，采用一周波差分、自适应启动、状态整定、多电气量融合和高阻能量累计判别，使故障发现、动作裕度调整和属性确认形成连续过程。10 kV仿真结果显示，过渡电阻增大、负荷变化及DG退出时，改进保护仍保持较高灵敏系数，区外方向制动有效。后续可结合实际录波数据继续校核CT暂态误差、通信延迟和电弧非线性影响。

参考文献

[1]郑玉平,吕鹏飞,李斌,等.新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J].电力系统自动化,2023,47(22):3-15.

[2]袁兆祥,张翼,聂铭,等.分布式新能源接入的10kV配电网保护适应性分析[J].电力建设,2024,45(2):49-57.

[3]张政伟,陈谦,牛应灏,等.基于实时生成定值的高比例新能源电网自适应电流保护[J].电力建设,2024,45(2):137-146.

[4]韩兆儒,石访,张恒旭,等.考虑电容投切扰动的配电网高阻接地故障检测方法[J].电力系统自动化,2024,48(21):180-191.

[5]罗国敏,吴梦宇,谭颖婕,等.考虑高比例逆变型分布式电源接入的阻抗差动保护[J].电力系统保护与控制,2025,53(7):75-87.

[6]杨鹏辉,钱国超,白浩,等.参数不对称配电网高阻接地故障感知与辨识方法[J].中国电力,2025,58(2):22-32.

（本文编辑 杜宇琪）