

配电网中性点接地方式对线路故障特性的影响及选择

马 超, 张建红, 白群波

(泸州老窖股份有限公司, 四川 泸州 646001)

摘 要 配电网中性点接地方式的选择直接影响线路故障特性与系统运行可靠性。不同接地方式通过改变零序回路阻抗特性, 显著调控单相接地故障时的电流幅值、过电压水平及电弧燃烧特性。不接地系统易引发高频振荡过电压, 经消弧线圈接地可有效抑制电弧重燃, 而电阻接地则能实现故障快速切除。接地方式的选择需综合考量故障电流限制、供电连续性、设备绝缘配合及系统适应性等多重因素, 特别需要结合电缆化率、负荷特性等实际参数进行差异化设计。

关键词 中性点接地方式; 故障电流特性; 暂态过电压

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.039

0 引言

随着新型电力系统建设的深入推进, 国家能源局《配电网高质量发展行动实施方案(2024—2027)》明确提出要提升配电网智能化和柔性化水平。中性点接地方式作为配电网结构设计的基础环节, 其选择直接影响故障自愈能力和供电可靠性。当前配电网正面临电缆化率持续攀升、分布式能源大规模接入的双重挑战, 传统接地方式已难以完全适应复杂故障特性^[1]。特别是在高电缆比例区域, 对地电容电流的急剧增大导致间歇性电弧过电压风险显著上升, 而分布式光伏的弱馈电特性又改变了故障电流分布规律。这些新形势要求接地方式设计必须兼顾故障电流主动控制、过电压抑制保护与供电连续性保障等多目标优化。

1 中性点接地方式下线路故障特性的基本表现

低压配电网中性点接地方式直接塑造线路故障时的电气行为特征。当系统发生单相接地故障时, 不同接地方式通过改变零序回路阻抗特性, 显著影响故障电流幅值、电压分布形态及暂态过程发展路径。不接地方式下, 故障电流受系统对地电容制约, 表现为 3 ~ 10 A 的容性电流, 故障相电压跌落至零电位, 非故障相电压升至线电压水平, 系统产生幅值达 3.5 倍相电压的暂态过电压, 伴随间歇性电弧持续燃烧现象^[2]。经消弧线圈接地时, 电感电流与电容电流形成补偿关系, 故障点残余电流控制在 5 ~ 10 A 范围, 非故障相电压保持正常线电压运行, 暂态过电压被限制在 2.5 倍相电压以内, 电弧重燃次数显著减少(见图 1)。经电阻

接地形成明确接地通路, 故障电流升至 50 ~ 300 A 较高水平, 故障相电压降至 $(1+R/X_c)$ 倍相电压(其中 R 为接地电阻值, X_c 为系统对地容抗), 非故障相电压升高幅度收窄, 暂态过电压峰值不超过 2 倍相电压, 但故障电流热效应加剧。这三种接地方式分别对应高电压小电流、电流型二型补偿以及大电流低电压三种典型故障特征模式, 其差异本质源于零序阻抗特性的根本性区别。

2 中性点接地方式对线路故障特性的具体影响

2.1 对故障电流分布与大小的决定性作用

中性点接地方式通过改变零序网络阻抗特性直接决定故障电流的分布模式与幅值大小。不接地系统形成高阻抗回路, 故障电流受限于线路对地电容参数, 呈现 3 ~ 10 A 的容性特征。这种小电流特性导致故障点电离程度不足, 易引发电流过零时的高频振荡现象^[3]。经消弧线圈接地时, 电感元件与系统电容形成并联谐振条件, 当补偿度接近 100% 时可抵消绝大部分容性电流, 使残余电流降至 10 A 以下。但实际运行中受电网参数波动影响, 常出现欠补偿或过补偿状态, 导致故障点存在 10 ~ 30 A 的残余感性或容性电流。经电阻接地方式构建明确接地通路, 故障电流幅值直接由电阻阻值决定: 采用 10 Ω 低阻值时电流可达 200 ~ 300 A, 100 Ω 高阻值对应 50 ~ 100 A 电流水平。这种大电流特性虽有利于保护装置检测, 但会加剧设备热应力, 需精确计算电阻参数以平衡检测灵敏度与设备耐受能力。

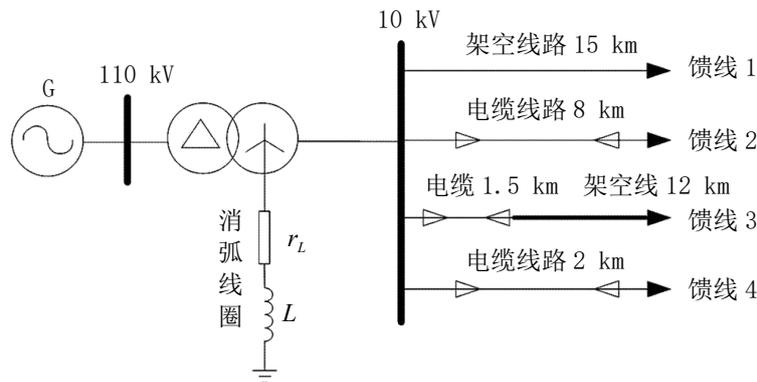


图1 消弧线圈接地原理图

2.2 对暂态过电压幅值与持续时间的调控效应

暂态过电压的激发强度与持续时间直接反映中性点接地方式的电压调控能力。不接地系统在单相接地故障时形成悬浮电位，非故障相电压跃升至线电压的同时，系统对地电容与电磁式电压互感器电感构成铁磁谐振回路，产生3.5倍相电压的过电压冲击，其持续时间达数十毫秒量级^[4]。经消弧线圈接地利用电感电流的相位补偿特性，在故障初期即抑制电压突变速率，通过阻尼振荡将过电压限制在2.5倍相电压以内。消弧线圈的调谐精度直接影响抑制效果，当补偿度偏离最佳值时可能引发二次过电压。经电阻接地通过提供确定性泄流路径，使故障相电压稳定在 $(1+R/X_c)$ 倍相电压水平，将暂态过电压峰值控制在2倍相电压以下。

3 基于配电网中性点接地方式对线路故障特性优化的选择对策

3.1 基于故障电流限制的安全性优先原则

中性点接地方式的选择在低压配电网中需首要考虑故障电流的控制能力，尤其是单相接地故障产生的电流幅值及其对设备绝缘与人身安全的威胁。在电缆化率较高的配电网中，电缆对地电容显著大于架空线路，当电缆占比超过60%时，对地电容电流常超过100 A。此时若采用中性点不接地方式，接地故障点易产生间歇性电弧，引发高频振荡过电压，幅值可达额定相电压的3倍以上，严重威胁电缆、变压器和避雷器等设备的绝缘强度^[5]。为抑制此类过电压，推荐采用低电阻接地方式，通过中性点接入 $10 \sim 50 \Omega$ ，将故障电流限制在 $100 \sim 300$ A范围内。这一电流水平既能够确保零序过流保护装置可靠动作，又可将故障切除时间控制在100 ms内，避免电弧持续燃烧导致故障扩大为相间短路。在保护配置上，需配合高精度零序电流互感器及微机保护装置，设定电流定值时应躲过系统

正常运行时的不平衡电流，并校验与上一级保护的配合关系，防止越级跳闸。

对于以架空线路为主的农村或郊区配电网，电缆化率低于30%，对地电容电流通常小于10 A，此时采用中性点不接地方式具有可行性。系统在单相接地后仍可短时维持运行，但需依赖绝缘监测装置实时检测零序电压。当零序电压超过设定阈值（如额定相电压的15%），应启动接地选线功能，并通过人工或自动化巡检定位故障区段。若系统电容电流介于 $10 \sim 100$ A之间，单纯不接地方式已不适用，因残余电流易导致接地电弧重燃^[6]。此时宜采用经消弧线圈接地方式，通过调节消弧线圈电感值，使感性电流与容性电流幅值相近、相位相反，将故障点残余电流补偿至 $5 \sim 10$ A以下。消弧线圈宜采用自动调谐式，配备备磁或晶闸管控制电抗器结构，以实现电容电流变化的实时跟踪。补偿度的选择需兼顾脱谐度和位移电压，避免因过补偿或欠补偿引发谐振过电压。

3.2 基于供电连续性的可靠性平衡要求

供电连续性指标直接关系到负荷等级及用户停电容忍度。中性点不接地系统在发生单相接地故障时，非故障相电压升高至线电压，系统可继续供电 $1 \sim 2$ h，适合对短时中断不敏感的普通负荷区域。但该方式依赖绝缘监察装置（如零序电压继电器或注入信号型选线装置）及时报警，若故障未在允许时间内排除，可能因绝缘薄弱点击穿引发相同短路。为提高可靠性，可在不接地系统中增设小电流选线装置，通过首半波法、谐波方向法或暂态能量法识别故障线路，但选线准确率受线路参数不对称和互感器精度影响较大，一般需结合人工排查。

经消弧线圈接地方式通过补偿电容电流促进电弧自熄，将故障存在时间从数秒缩至数百毫秒。配置自动选线跳闸功能，可在判定永久性接地后快速隔离故

障线路,减少停电范围^[7]。实际运行数据显示,该方式下因单相接地导致的用户平均停电时间较不接地系统降低约 60%,适用于城市中心区或工业园区的多回路环网结构。消弧线圈系统需配合零序功率方向保护或谐波电流保护,提高故障判别可靠性。经小电阻接地方式牺牲部分连续性,换取故障快速切除。保护动作时间通常设为 0.5 s,配合阶段式零序过流保护,可精准隔离故障区段,适用于电缆出线密集、对电弧危害敏感但对供电连续性要求不高的场合,如变电站 10 kV 出线首端。为缓解停电影响,可结合自动重合闸技术,在线路跳闸后延时 0.5~1 s 重合。若为瞬时性故障,重合成功率超 70%;若为永久故障,则闭锁重合并转由备用电源供电。在重要负荷区域,可采用电阻接地与母线分段开关联动方式,实现故障隔离与非故障区段快速转供。

3.3 基于设备绝缘配合的经济性优化准则

经济性分析需综合评估设备初投资、运维成本及故障损失。中性点不接地系统无需额外接地设备,仅需按线电压等级选择绝缘水平,初期投资最低。但其隐性成本较高:长期运行中需持续监测绝缘状态,定期校验零序电压互感器和选线装置;间歇性电弧可能引发氧化锌避雷器多次动作或绝缘累积老化,增加设备更换频次。相关统计表明,不接地系统的全生命周期成本随运行年限呈指数增长,特别是在电容电流大于 30 A 的系统中,过电压导致的电缆故障率显著上升。

经消弧线圈接地虽需投入可调电感装置及控制单元,初期投资较高,但在电容电流 10~100 A 的系统中,其运维成本较低。现代自动调谐消弧线圈具备远程监控功能,仅需定期校核补偿精度(如每两年一次),且电弧抑制能力可降低故障扩大概率,全生命周期成本较不接地系统降低约 20%。在设备选型时,需根据系统电容电流最大值选择线圈容量,并预留 10%~20% 的过补偿能力以适应网络扩展。

3.4 基于系统适应性的动态调整机制

低压配电网的拓扑结构与参数随负荷增长、线路改造及分布式能源接入动态变化,接地方式需具备灵活调整能力。新建配电系统宜采用混合接地结构,例如主变压器中性点经消弧线圈接地,分支线路或电缆主干线经小电阻接地。该结构可在母线侧利用消弧线圈抑制电弧过电压,在线路侧通过电阻接地实现故障快速切除,兼顾供电连续性与安全性。混合系统需配置零序互锁逻辑,确保不同接地区段的保护选择性。

在运行阶段,应实时监测系统对地电容电流,每季度通过注入信号法或暂态录波法校核当前值。若电

容电流年增长率超过 15%,需调整消弧线圈分接头或切换接地模式。当电容电流持续超过 100 A 时,应考虑将消弧线圈接地改为电阻接地,并重新整定零序保护定值。在分布式光伏大规模接入后,其逆变器的低短路电流特性会改变故障电流路径与幅值。尤其是经变压器隔离的分布式电源,其零序回路可能呈现高阻抗特性,导致接地故障电流小于保护启动值。此时需在校核计算中计入分布式电源的零序阻抗,并校验中性点电阻值的适应性。若原有电阻接地系统无法保证保护灵敏度,可改为经电抗接地或增设零序功率方向保护,以避免保护拒动。

4 结束语

中性点接地方式的优化选择是提升配电网故障防御能力的关键技术路径。不同接地方式通过零序阻抗的差异化设计,形成对故障电流、过电压及电弧特性的定向调控机制。未来配电网发展需建立接地方式的动态评估体系,结合电缆化进程、分布式电源接入规模等变量进行适应性调整。特别需要关注电力电子化配电网的故障特性演变规律,开发接地方式与保护控制的协同优化策略。通过构建“测量—决策—执行”一体化的接地管理系统,可实现配电网故障处理从被动响应向主动防御的转型升级,为新型电力系统建设提供基础技术支撑。

参考文献:

- [1] 邓涛,孙文林,杜波.配电网不同中性点接地方式接地故障检测原理及保护配置优化[J].电工技术,2025(15):146-149.
- [2] 庾雅琪.基于分布式电源的配电网单相接地故障重构技术研究[D].北京:华北电力大学(北京),2024.
- [3] 苏振霞,李娟,樊潇,等.用于浮式电站双电压等级的中性点接地保护装置及方法:CN202211406104.3[P].山东电力工程咨询院有限公司,2022-11-10.
- [4] 方振鹏.中性点接地 10 kV 线路故障查找方法研究[J].机电信息,2023(16):25-27.
- [5] 齐岳荣,马永翔,万家鹏,等.中性点非有效接地系统配电线路相继两重故障对电流保护的影响分析[J].电工技术,2025(10):150-154.
- [6] 曾祥君,李理,喻锐,等.配电网相电源馈入中性点的接地故障相主动降压消弧新原理[J].中国电机工程学报,2023,43(08):2953-2965.
- [7] 李政洋,曹一家,陈春,等.含直配式新能源的配电网接地故障协同处理与区域辨识[J].中国电机工程学报,2025,45(06):2145-2160.