

电力系统单相接地故障特性及电阻接地保护技术分析

秦 光

(山东中茂实业集团有限公司禹城分公司, 山东 禹城 251200)

摘 要 随着电力系统规模的不断扩大, 供电可靠性和安全性越来越受到人们的重视。在电力系统运行过程中, 中低压配电网故障类型多样, 其中单相接地故障较为常见。本文从单相接地故障的形成原因及特征表现出发, 研究故障发生时电压、电流的变化情况以及对设备的潜在影响, 并对电阻接地保护技术在各方面的作用进行了探讨, 旨在为电力系统接地方式的选择和保护方案的制定提供参考思路, 进而提升配电网故障处理水平和运行安全性。

关键词 电力系统; 单相接地; 故障特性; 电阻接地; 保护技术

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.020

0 引言

在电力系统运行过程中, 单相接地故障由于出现频率相对较高、影响范围较广, 长期以来都是电网运维工作的重点关注对象。中性点接地方式与单相接地故障的特征表现及相应保护策略紧密相关, 其中电阻接地方式凭借在限制故障电流、抑制过电压方面的良好表现, 在国内外配电网建设与运行中获得了较为普遍的应用。对单相接地故障特性展开深入探究, 并在此基础上持续优化电阻接地保护技术, 对于提升系统故障处置效能、降低停电造成的经济损失具有一定的积极意义。本文对故障特性与电阻接地保护技术之间的关联进行系统性剖析, 为实际工程应用提供理论层面的参考。

1 电力系统单相接地故障特性分析

1.1 故障成因与分类

单相接地故障作为相线与大地(或设备外壳)间的异常电气连通现象, 其发生机制与系统电压等级、绝缘状况及运行条件呈现出较为紧密的联系。从故障诱因层面探讨, 大致涵盖三个维度: 在外部环境影响方面, 10 kV 配电网的架空线路可能因雷击、树木接触、鸟类活动等因素致使绝缘子绝缘性能出现不同程度的降低, 电缆线路也可能由于施工环节的不完善、长期运行产生的老化问题, 或土壤环境的侵蚀作用, 对其绝缘结构造成一定的损伤; 设备自身存在的潜在风险不容忽视, 当设备检修、线路改造等作业未严格按照既定规程实施, 安全防护措施落实不够到位, 或接线工艺存在细微瑕疵时, 均有可能引发临时性的接地状

况。就故障类型而言, 可划分为金属性接地、电弧性接地和电阻性接地三种类型: 金属性接地在故障点呈现低阻抗特征, 接地电流往往会出现较为明显的增大, 这种情况多见于导线断裂落地或是设备遭受较为严重损坏的场景; 电弧性接地在中性点不接地系统中较为常见, 故障点的电弧会出现间歇性的燃烧与熄灭, 进而可能引发暂态过电压, 对系统绝缘造成潜在威胁; 电阻性接地由于故障路径中存在过渡电阻, 接地电流的大小与电阻值密切相关, 其暂态特性相对表现得更为平稳^[1]。

1.2 故障电气特性

单相接地故障出现后, 系统电压和电流的变化趋势通常具有一定规律可循, 且不同中性点接地方式下的表现存在较为显著的区别。在中性点不接地系统中, 故障相电压往往会大幅降低, 接近零值; 非故障相电压则会有所上升, 达到线电压水平(约为 $\sqrt{3}$ 倍相电压), 线电压基本维持对称状态, 弧光接地时非故障相可能产生 3~5 倍过电压。在中性点经电阻接地系统中, 故障相电压的下降程度与电阻大小存在关联, 非故障相电压的上升幅度会受到电阻的限制, 过电压一般不超过 2.5 倍相电压; 就电流特征而言, 故障电流是电容电流和电阻电流叠加的结果, 总电流能够根据实际需求进行调整(低阻接地时大概为数百安, 高阻接地时多为数十安)。

1.3 对电力系统的影响

单相接地故障的影响程度与系统接地方式、故障持续时间存在显著关联。就过电压影响而言, 中性点

不接地系统中,弧光接地产生的过电压或导致避雷器动作、电缆绝缘性能下降,甚至引发多相故障。从设备损耗角度分析,金属性接地产生的较大电流可能对故障点导线和杆塔造成影响,而长期小电流接地(如高阻接地)引发的局部发热现象,也会在一定程度上加速设备绝缘老化,对设备使用寿命产生不利影响。在供电稳定性方面,保护装置的误动作或拒动作情况,有可能使停电范围有所扩大;低阻接地系统的频繁跳闸现象,也可能对医院、工厂等重要负荷的持续供电造成干扰。此外,在故障点周边 8~10 m 范围内存在的跨步电压(数值可达数十至数百伏),也会给现场巡检人员带来一定的安全隐患^[2]。

2 中性点电阻接地系统原理与特性

2.1 电阻接地系统的基本原理

1. 故障电流控制:在电力系统发生单相接地故障时,系统内的容性电流会急剧增加,可能对设备造成严重冲击。中性点串联电阻器后,电阻器能够通过欧姆定律 $I=U/R$ 分担一部分电容电流。以低阻接地系统为例,其故障电流通常被控制在 50~1 000 A 范围,该区间既能保证保护装置可靠动作,又能避免过大电流引发设备损坏;而高阻接地系统的故障电流则稳定在 1~10 A,特别适用于对供电连续性要求极高的场所。这种电流控制机制,有效降低了短路电流对变压器、电缆等设备的热应力和电动力影响。

2. 抑制弧光过电压:当系统发生单相接地故障且存在间歇性电弧时,电弧的反复重燃会产生幅值极高的过电压,威胁设备绝缘。中性点接入的电阻能够通过焦耳定律 $Q=I^2Rt$ 持续消耗电弧能量,使电弧难以再次起弧。研究数据表明,采用电阻接地方式后,弧光过电压幅值可被限制在 2.5 倍相电压以内,相较于不接地系统或消弧线圈接地系统,该数值显著降低。这不仅能有效保护发电机、电动机等设备的匝间绝缘,还能延长电力设备的使用寿命。

2.2 电阻接地系统的优势与局限性

与中性点不接地或直接接地系统相比,中性点电阻接地方式在某些应用场景下展现出一定的技术特点,同时也存在可优化的空间。从技术优势来看,该接地方式对过电压的抑制效果较为明显,与不接地系统相比,过电压水平可降低约 40%~60%,有助于减缓设备绝缘老化进程;在故障处理方面,高阻接地系统能够在保障供电连续性的同时兼顾安全性,低阻接地系统则可以实现故障的快速隔离,能够较好地满足不同的负荷需求;在保护装置性能方面,较为稳定的故障电

流特性为零序保护装置的参数整定提供了便利条件,相比不接地系统,其保护装置误动作的可能性可降低 70% 以上。不过在实际应用中,也存在一些有待改进之处。例如:该接地方式的建設成本相对较高,对于中性点未直接引出的系统,需要额外配备接地变压器、电阻器以及相关保护设备,其初期建设成本相比不接地系统会增加 20%~50%;在高阻接地系统应用过程中,当故障电流低于 10 A 时,传统选线装置的检测效果可能不够理想,故障定位的效率会受到一定影响;而低阻接地系统对断路器分断能力要求更为严格(需承受数千安短路电流),并且可能会在一定程度上引起系统电压的暂态波动^[3]。

3 电阻接地保护技术分析

3.1 保护技术的核心要求

电阻接地保护技术在实际应用中,可着重从以下几个维度进行优化完善。在选择性层面,可考虑通过技术手段精准识别故障线路与非故障线路,在一定程度上规避保护范围出现过度延伸的情况,例如:在 10 kV 馈线保护场景下,优先对故障回路实施切除操作,从而尽可能减少对母线及其他馈线运行的影响。在灵敏性方面,针对高阻接地(故障电流<5 A)等较为复杂的工况,保护装置可通过优化参数设置,提高动作的可靠性,其动作电流整定值通常设置在故障电流的 0.5~0.8 倍区间。在速动性方面,对于低阻接地系统,可将跳闸时间控制在 0.5 s 以内,以此有效缩短设备承受异常电流的时长,而对于高阻接地系统,虽然允许其在一定时间内持续运行,但仍建议在 10~30 s 内及时发出报警信号。在可靠性方面,一方面可通过技术手段降低保护装置误动作的概率,避免因正常运行时的不平衡电流导致保护误触发;另一方面在面对弧光接地等特殊故障时,可增强保护装置动作的稳定性,降低拒动风险。

3.2 主要保护技术及原理

电阻接地保护技术通常基于故障电流、电压特征进行设计,常见的实施路径与策略可作如下探讨:零序电流保护技术的原理在于,当发生单相接地故障时,故障线路的零序电流往往由故障相电流与非故障相电容电流叠加形成,其数值相较于正常运行状态会出现较为明显的增大。一般通过电缆头或开关柜处的零序电流互感器进行实时监测,并将监测结果与动作阈值进行比较,从而触发保护动作;在低阻接地系统中,其动作电流整定值通常设定在 10~50 A,而在高阻接

地系统中,可能需要配备0.1级高灵敏度互感器,同时采用零序电流增量算法,以此在一定程度上区分不平衡电流与故障电流。零序电压保护技术的原理是,系统正常运行时,中性点或母线的零序电压通常近乎为零,接地故障发生后,该电压会迅速上升至数十至数百伏,通过实时监测并与动作阈值(一般为相电压的10%~20%)进行对比,进而触发动作;这种保护方式一般作为辅助保护手段,常与零序电流保护相结合,构建“电压启动+电流跳闸”的逻辑,从而在较大程度上避免单一判据可能导致的误动情况(例如因系统谐振过电压引发的电压保护误触发)。接地选线技术的原理是,在多出线系统发生接地故障时,故障线路与非故障线路的零序电流在相位和幅值方面往往存在较为显著的差异(故障线路零序电流与零序电压相位通常相同且幅值更大),通过对比各线路零序电流特征,有望实现精准定位;在技术发展进程中,早期的“信号注入法”是通过注入特定频率信号来判断故障线路,而如今基于小波变换、神经网络等智能算法的选线技术,较大程度地将高阻接地故障选线准确率从70%提升至90%以上^[4]。

3.3 保护配置方案与整定原则

保护配置通常需要综合考量系统电压等级、接地方式及负荷特性等多方面因素,以下为一些常见的典型方案与整定思路供参考:在10 kV低阻接地系统中,主保护可在每条馈线设置零序电流互感器搭配过电流继电器,动作电流的整定范围一般建议在50~100 A,通常以大于最大电容电流为宜,动作时间约为0.3~0.5 s;后备保护可考虑在母线侧配置零序电压保护,整定值多设为50 V,当馈线保护出现拒动情况时,可经0.5~1 s的延时跳开母线断路器;此外,还可配置接地变压器的过电流保护以控制长期故障电流,同时设置温度保护来预防设备过热损毁。而在35 kV高阻接地系统中,主保护的馈线零序电流保护可按5~10 A的灵敏度进行整定,一般动作后以发出信号报警为主,对于重要负荷线路,也可根据实际情况选择配置选择性跳闸功能,延时时间可设置在1~2 min;选线装置可采用“零序电流+零序电压+谐波分析”的多判据融合算法,并配合智能终端实现远程监控;另外,配置在线绝缘监测装置实时监测电缆和设备的绝缘电阻变化,以便及时发现潜在故障并预警。

3.4 保护技术的工程应用难点与对策

在工程实践中,电阻接地保护技术存在一些挑战,以下是对应的处理思路:当土壤处于干燥状态时,接地

电阻可能超过1 000 Ω ,故障电流小于1 A,受限于传统互感器的精度,高阻接地故障的检测存在一定难度。对此,可考虑选用宽量程零序电流互感器(测量范围0.1~10 A),配合数字滤波技术以减少谐波干扰的影响,并适当降低保护整定值(如0.5 A)。由于系统中电容、电感参数可能不匹配,进而产生铁磁谐振,致使零序电压升高,增加了保护误动作的风险。针对这一情况,可尝试在系统中安装与电阻并联的消弧线圈来抑制谐振,或者在保护算法中加入谐振识别逻辑(如监测电压频率是否偏离50 Hz)。随着光伏、风电等分布式电源的接入,故障电流路径变得更为复杂,电源侧反馈至故障点的电流会对选线准确性产生影响。为解决该问题,可在分布式电源接入点配置方向零序电流保护装置以判别电流方向,也可运用自适应算法根据实际情况实时调整整定值^[5-6]。

4 结束语

电力系统单相接地故障特性存在一定复杂性,其电流、电压特征受接地方式与故障点性质的影响较为明显。电阻接地保护技术能科学合理地选择电阻值,在限制故障电流、抑制过电压方面具有一定的效果,有助于在电阻接地系统安全性与供电连续性之间实现较好的平衡,在中低压配电网中具备不容小觑的应用价值。随着技术的不断革新,电阻接地保护技术在微电网、直流配电网等新型电力系统中将会展现更大的应用潜力。

参考文献:

- [1] 罗强.小电阻接地系统中的故障检测与定位技术分析[J].电子技术,2024,53(12):318-319.
- [2] 申金虎,苏振广.小电流接地系统单相接地故障的选线方法仿真与分析[J].电气技术与经济,2024(12):221-223,227.
- [3] 李帅霖,吴晋媛,王定俊,等.中性点经小电阻接地系统的单相故障分析[J].水电站设计,2024,40(04):58-62.
- [4] 汤向华,蔡成伟,陆未,等.基于改进聚类算法的通用小电阻接地系统高阻接地故障保护方法[J].自动化应用,2025,66(10):218-222,227.
- [5] 胡昀,吴丽,刘乔.基于电阻接地的电力系统保护方法[J].灯与照明,2025,49(01):154-156.
- [6] 薛永端,金鑫,刘晓,等.灵活接地系统中配电网接地保护的适应性分析[J].电力系统自动化,2022,46(05):112-121.