

Analysis of the Influence of Transmission Line Fault Characteristics on Relay Protection Performance

Jie Zhang Shengkai Lin Yuxiao Yang Yan Cheng Wanying Yao

Guangdong Saiyuan Electric Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 430200, China

Abstract

During long-term operation, transmission lines are influenced by factors such as power system structural adjustments, load fluctuations, and changes in the external environment, resulting in pronounced dynamic variations in fault characteristics. Alterations in fault current magnitude, phase relationships, and impedance characteristics directly affect the accuracy of protection criteria and the operational reliability of protective relays. Focusing on changes in transmission line fault characteristics, this study conducts a systematic analysis of the mechanisms by which such variations influence the performance of different types of protective relays, with emphasis on short-circuit faults, grounding faults, and comprehensive characteristics under complex operating conditions. By examining the intrinsic relationships between fault characteristic variations and protection sensitivity, selectivity, and stability, the major influencing factors faced by protective relays in complex operating environments are identified, providing a theoretical basis for the optimization of relay protection parameters and the enhancement of operational performance.

Keywords

transmission lines; fault characteristic variation; relay protection; protection performance; operational reliability

输电线路故障特性变化对继电保护性能的影响分析

张杰 林圣锴 杨宇肖 程艳 姚琬莹

广东塞远电气科技有限公司, 中国·广东广州 430200

摘要

输电线路在长期运行过程中,受系统结构调整、负荷波动及外部环境变化等因素影响,其故障特性呈现出明显的动态变化特征。故障电流幅值、相位关系及阻抗特征的改变,直接影响继电保护装置的判据准确性与动作可靠性。围绕输电线路故障特性变化这一核心问题,从短路故障、接地故障及复杂运行条件下的综合特性入手,系统分析故障特性变化对不同类型继电保护性能的作用机理。通过梳理故障特性变化与保护灵敏度、选择性及稳定性之间的内在联系,揭示继电保护在复杂运行环境下面临的主要影响因素,为继电保护参数优化与运行性能提升提供理论依据。

关键词

输电线路; 故障特性变化; 继电保护; 保护性能; 运行可靠性

1 引言

随着电网规模不断扩大和输电结构日益复杂,输电线路已成为电力系统安全稳定运行的重要组成部分。在多电源接入和运行方式频繁调整的背景下,线路故障表现形式和电气特性较以往更加多样,其变化规律对继电保护装置的正确动作提出了更高要求。传统继电保护多基于相对稳定的故障特性进行整定,当故障电流和电压特性发生偏移时,易引发保护拒动或误动等问题。深入研究输电线路故障特性变化对继电保护性能的影响,有助于全面认识保护装置在复杂运行条件下的适应能力。通过系统分析故障特性变化与保护性能之间的关系,可为继电保护方案的完善和运行可靠性的提升

提供必要支撑。

2 输电线路故障特性变化的基本类型与形成机理

2.1 短路故障特性变化及其电气特征

输电线路发生短路故障时,电气量的变化特征与系统结构、运行方式及线路参数密切相关。在不同电源配置条件下,短路点电流幅值呈现出明显差异,等值阻抗变化会导致故障电流分布不均。随着电网规模扩大,短路容量整体抬升,部分线路在近区故障时电流增长幅度显著,而远区故障则表现为电流衰减与相位偏移并存。线路长度、导线分裂方式及运行温度变化,也会对短路电流的暂态分量和稳态分量产生影响,使电流上升过程更为复杂。这类变化使短路故障的电气特征不再保持稳定模式,对继电保护的判别基础形成挑战。

【作者简介】张杰(1988—),男,本科,助理工程师,从事继电保护原理及计算软件开发研究。

2.2 接地故障特性变化及其演变规律

接地故障在输电线路运行中具有发生概率高、形式多样的特点,其特性变化受接地方式和系统中性点运行状态影响显著。不同接地电阻条件下,零序电流幅值和分布特征存在明显差异,弱接地故障时电流数值偏小且波动性较强。随着线路老化和环境温度变化,接地路径电阻呈动态变化状态,导致故障特征在时间维度上持续演变。多回线路并行运行时,零序耦合效应进一步放大接地故障特性的复杂程度,使故障判别难度增加,进而影响继电保护对接地故障的识别准确性。

3 输电线路故障特性变化对电流型继电保护性能的影响

3.1 故障电流幅值变化对保护灵敏度的影响

电流型继电保护依赖故障电流幅值作为主要判据,其灵敏度与故障电流水平直接相关。当系统运行方式变化导致短路电流下降时,保护装置接收到的电流信号可能接近整定阈值,动作可靠性随之降低。长距离输电线路在轻载或单电源运行条件下,故障电流衰减更加明显,容易出现灵敏度不足问题。相反,在高短路容量区域,故障电流快速增大,可能使保护动作范围扩大,增加误动风险。故障电流幅值的双向变化,使电流型保护在灵敏性和选择性之间面临更为突出的平衡压力^[1]。

3.2 故障电流相位特性变化对动作判据的影响

故障发生后,电流相位关系会随系统阻抗结构变化而发生偏移,这对基于相位判据的电流型保护产生直接影响。在多电源供电条件下,故障点电流相位由多侧电源共同决定,相位角差异增大,导致方向判据的判别边界变得模糊。暂态分量叠加会引起电流相位在短时间内剧烈波动,使保护装置在初始阶段难以准确识别故障方向。相位特性的变化增加了动作判据的不确定性,降低了保护对复杂故障工况的适应能力。

3.3 非稳定故障电流对保护可靠性的影响

非稳定故障电流通常伴随弧光波动、接地电阻变化及暂态过程延长等现象,其波形具有明显的不规则特征。电流幅值和相位在短时间内反复变化,使继电保护采集到的信号存在较大波动。对于依赖固定判据的电流型保护而言,这类非稳定特性容易引发误判,表现为拒动或延时动作。非稳定故障电流持续时间的不确定性,也增加了保护与重合闸配合的复杂程度,对继电保护整体运行可靠性构成不利影响。

4 输电线路故障特性变化对电压型与阻抗型继电保护性能的影响

4.1 故障电压特性变化对电压保护判据的影响

输电线路发生故障后,故障点及其邻近节点电压水平随故障类型和位置发生显著变化,该变化直接影响电压型继电保护的判据。在110 kV输电线路中,近区三相短路

时母线电压由额定1.0 pu迅速下降至0.35~0.55 pu,而同一线路在距离故障点80~120 km的远区短路条件下,母线电压仍可维持在0.70~0.85 pu范围内,电压跌落深度差异超过0.3 pu。负荷水平变化使故障前运行电压在0.95~1.08 pu之间波动,当低电压保护整定值设定为0.75 pu时,部分远区故障在20~40 ms内难以满足启动条件。接地故障条件下,非故障相电压可升高至1.20~1.35 pu,零序电压幅值在5~25 V之间变化,使电压型保护在多运行方式下出现判据漂移。故障电压恢复时间由40 ms延长至80 ms时,电压保护对瞬时性与永久性故障的区分能力明显下降,影响动作可靠性^[2]。

4.2 阻抗轨迹变化对距离保护整定的影响

距离保护以测量阻抗为核心判据,其整定基础依赖故障阻抗轨迹在R-X平面内的稳定分布。当系统短路容量由1800 MVA提升至3600 MVA时,线路等值电抗明显减小,故障测量阻抗整体向原点收缩,I段和II段阻抗边界间距缩小约10%~18%。在220 kV、线路长度300 km条件下,运行方式变化使阻抗角由75°偏移至90°,角度变化达到15°,阻抗轨迹在X轴方向产生明显旋转。重负荷运行状态下,线路负载电流由600 A升至1200 A,测量阻抗叠加负荷分量后偏差可达8%~12%。故障初期30 ms内暂态分量占比超过40%,阻抗轨迹呈现摆动状态,使距离保护在启动阶段出现越区或欠区风险,削弱整定参数的稳定适用性。

4.3 过渡电阻变化对阻抗型保护准确性的影响

过渡电阻是影响阻抗型继电保护测量精度的关键因素,其取值在实际运行中可由5 Ω增大至60 Ω以上。在220 kV输电线路单相接地故障条件下,当过渡电阻由10 Ω升至40 Ω时,测量阻抗实部增加幅度可达到线路正序阻抗的30%~45%,故障点等效阻抗超出I段整定范围。对于线路长度超过250 km的场景,过渡电阻与线路电抗叠加后,使测量阻抗偏移量达到15~25 Ω。弧光燃弧过程中,过渡电阻在20~50 ms内呈周期性波动,阻抗轨迹出现明显抖动现象,导致阻抗型保护对区内故障的判别准确性下降。在弱电源送端运行条件下,故障电流低于2 kA时,过渡电阻对阻抗测量结果的放大效应更加明显,保护拒动风险进一步增加^[3]。

5 输电线路运行条件变化叠加故障特性对继电保护的复合影响

5.1 系统运行方式变化对故障特性判识的影响

系统运行方式调整会引起输电线路等值结构发生改变,从而对故障特性判识形成直接影响。在220 kV输电系统中,由双电源运行切换为单电源运行后,近区短路电流可由8~10 kA下降至3~4 kA,电流衰减幅度超过50%,使基于电流和阻抗判据的保护灵敏度明显降低。潮流方向反转

时,线路两端电压相角差由 5° 扩大至 15° 以上,方向判据的判识边界随之发生偏移。系统解列或重构过程中,等值阻抗变化量可达 $20\% \sim 30\%$,导致同一故障在不同运行方式下呈现出差异明显的电压、电流特征。运行方式频繁变化使继电保护依赖的故障特性假设稳定性下降,增加误判和拒动风险。

5.2 线路参数变化对保护计算模型的影响

输电线路参数受环境温度、载流水平及运行年限等因素影响呈现动态变化特征。在导线温度由 20°C 升高至 70°C 条件下,线路电阻增加约 $15\% \sim 20\%$,直接影响故障测量阻抗计算结果。以 300 km 线路为例,电阻变化引起的阻抗测量偏差可达到 $6\% \sim 10\%$,使距离保护区段边界出现压缩现象。线路电抗受频率和分布参数影响,在重负荷运行时变化幅度可达 5% 。当保护计算模型仍采用额定参数时,实际运行参数与模型之间的偏差不断累积,影响阻抗、电压及方向等判据的计算准确性,削弱继电保护对复杂工况的适应能力。

5.3 互感器误差与暂态效应对保护性能的影响

互感器在大电流和暂态条件下产生的误差是影响继电保护性能的重要因素。在短路电流达到 $10 \sim 15\text{ kA}$ 时,电流互感器易进入饱和状态,饱和持续时间可达 $20 \sim 40\text{ ms}$,使二次侧电流幅值被削减 $30\% \sim 60\%$ 。电压互感器在故障初期同样受到暂态分量影响,电压测量误差可达到 $5\% \sim 8\%$ 。互感器比差和角差同步增大后,阻抗计算结果出现明显偏移,方向判据的相角判断精度下降。暂态分量衰减速度不一致,使继电保护在启动阶段获取的电气量存在失真,对动作速度、选择性和可靠性形成综合性不利影响^[4]。

6 适应输电线路故障特性变化的继电保护性能优化方向

6.1 继电保护整定参数的动态优化方向

在输电线路运行条件不断变化的背景下,继电保护整定参数若长期保持静态设置,难以有效匹配故障特性的动态演变趋势。系统运行方式调整、短路容量变化以及线路参数波动,都会导致故障电流和测量阻抗在不同工况下呈现明显差异。通过引入与运行状态关联的整定参数调整机制,可使保护动作门槛随电网结构和负荷水平变化进行适度修正。当系统由双电源运行转为单电源运行时,电流定值可根据故障电流水平变化进行同步调整,避免灵敏度不足问题。在重负荷条件下,对距离保护阻抗定值进行修正,有助于保持区段边界的合理间隔。整定参数动态优化有助于减小故障特性变化对保护性能的冲击,使继电保护在复杂运行环境中维持稳定、准确的动作特性。

6.2 多判据协同保护结构的应用方向

单一判据继电保护在面对复杂故障特性变化时易受到局限,多判据协同保护结构可通过信息互补提升判别可靠性。将电流、电压、阻抗及相位等多种判据进行综合应用,有助于降低个别电气量异常对保护判断结果的影响。在短路电流幅值下降而相位特征仍较为明显的情况下,相位与方向判据可为电流判据提供支撑。在过渡电阻较大导致阻抗测量偏移时,电压变化特征可作为辅助判据参与判断。多判据协同结构通过多维信息交叉验证,使保护逻辑更加稳健,减少误动与拒动发生概率,提高继电保护对故障特性变化的整体适应能力。

6.3 继电保护系统稳定性与可靠性提升路径

继电保护系统稳定性与可靠性提升需从装置性能、信号质量和运行管理等多个层面协同推进。通过优化采样算法和滤波策略,可有效抑制暂态分量谐波对保护判据的干扰,提高故障初期判断的准确性。强化互感器选型与配置管理,有助于减小饱和和测量误差对保护性能的不利影响。在运行管理层面,结合线路运行数据开展周期性评估,可及时发现整定参数与实际工况之间的偏差。通过技术措施与管理手段协同作用,继电保护系统在面对输电线路故障特性持续变化时,能够保持良好的稳定性和运行可靠性。

7 结语

输电线路故障特性在电网结构复杂化和运行方式多样化背景下呈现出明显的动态变化趋势,对继电保护性能提出了更高要求。故障电流、电压及阻抗特性的变化,不仅影响保护装置的灵敏性和选择性,也对其动作可靠性和稳定性产生持续作用。通过系统分析故障特性变化对不同类型继电保护的影响机理,可以更为全面地认识继电保护在复杂运行条件下面临的关键问题。在此基础上,从整定参数优化、判据结构改进和系统运行保障等方面加以完善,有助于提升继电保护对多工况故障特性的适应能力,保障输电线路安全稳定运行,为电力系统整体可靠性提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 许永治.柔性低频输电线路的故障特性分析与继电保护研究[D].导师:李海锋;李平.华南理工大学,2024.
- [2] 朱旭东,马宏博,张林,刘熠,辛业春.高压直流输电线路送端LCC换流站交流侧故障特性分析[J].吉林电力,2021,49(04):53-56.
- [3] 韩伟,杨睿璋,刘超,李程昊,孟沛或,孙仕达,刘磊,向往,文劲宇.混合三端直流输电系统线路故障特性及故障电流抑制策略[J].高压电器,2021,57(06):179-188.
- [4] 秦天洋.半波长交流输电线路故障特性及保护判据研究[D].导师:杨明玉.华北电力大学,2021.