

铁道供电牵引变压器接触网断线接地故障识别方法研究

慕 飞

内蒙古东乌铁路有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017200

摘 要: 牵引接触网长期处于户外复杂工况, 断线与接地故障多发且特征易受环境干扰, 会直接影响铁道供电系统的运行稳定性。本文结合牵引变压器与接触网的结构特性和运行规律, 系统分析两类典型故障的产生机理与电气特征, 梳理不同负荷工况下故障信号的差异化表现, 总结现场干扰引发的特征畸变问题。结合现有识别技术的各类应用短板, 研究适配复杂供电工况的故障甄别思路, 搭建差异化判别逻辑, 优化故障特征提纯手段与整体识别体系, 可为铁道牵引供电故障辨识与设备运维工作提供理论参考。

关键词: 牵引供电; 接触网; 断线故障; 接地故障; 故障识别

引言: 铁路电气化建设规模持续拓展, 牵引供电系统的运行可靠性直接关系铁路行车安全与运输秩序。接触网作为露天开放式供电设施, 受机械磨损、气候侵蚀与负荷波动影响, 极易出现断线、接地等常见故障。各类干扰因素会弱化故障信号特征, 造成传统识别方式出现误判、漏判现象。完善故障识别技术体系, 精准区分不同故障类型、剥离现场工况干扰, 能够有效提升牵引供电系统故障处置效率, 保障电气化铁路供电网络安全稳定运行。

1 牵引供电系统设备构成与故障运行机理

1.1 牵引变压器设备结构与工作特性

牵引变压器是铁道牵引供电系统的关键变电设备, 承担电网电能降压与供电制式转换的主要功能, 整体结构设计适配铁路负荷的特殊运行需求。设备主体由铁芯、高低压绕组、绝缘结构及冷却组件组成, 各结构部件相互配合, 完成电能的稳定传输与电压等级变换。常规电力变压器仅适配平稳民用负荷, 牵引变压器需要适配机车行驶过程中产生的冲击性、波动性负荷, 运行工况波动幅度更大。设备运行过程中可以实现三相电网电能向单相牵引供电电能的转化, 有效平衡供电系统的负荷分布, 削弱单相供电带来的系统不平衡问题^[1]。特殊的结构设计与工作模式, 让牵引变压器可以长期适应高频次负荷波动, 维持牵引供电系统的基础供电稳定性。

1.2 牵引接触网系统运行架构与供电模式

牵引接触网系统是直接为电力机车输送电能的户外供电设施, 沿铁路线路全程布设, 构成开放式的架空供电网络。系统整体涵盖承力索、接触线、支柱、绝缘子及各类定位零部件, 所有结构共同组成完整的架空供电架构。这套供电架构直接暴露在自然环境中, 无封闭防护结构, 运行状态极易受到外界环境与线路作业的影

响。系统采用架空单相供电模式, 依托牵引变压器输出的电能, 通过接触线与机车受电弓的滑动接触完成电能输送, 满足机车持续行驶的用电需求。开放式的运行架构与动态取电的供电形式, 让接触网成为牵引供电系统中故障高发的薄弱环节。

1.3 接触网断线故障基本发生机理

接触网断线故障的产生源于设备结构损耗与外力作用的叠加影响。接触线长期与机车受电弓频繁摩擦, 表层结构会出现持续性磨损, 截面厚度逐步减小, 结构机械强度持续下降。极端气温变化会引发线缆热胀冷缩, 加剧线缆疲劳老化, 让局部薄弱位置出现裂纹、断股问题。雨雪、大风、覆冰等恶劣天气会对架空线缆产生持续外力拉扯, 超出结构承受阈值后就会引发线缆断裂。部分线路区域存在异物撞击、施工扰动等外部影响, 会直接破坏接触网结构完整性, 最终诱发断线故障, 造成供电线路中断。

1.4 接触网接地故障衍生演化机理

接触网接地故障是带电导体与接地结构形成非正常电气连接引发的故障类型。绝缘子长期运行出现积污、老化、破损问题后, 绝缘性能会大幅下降, 无法有效隔离带电体与接地部件, 形成漏电通道。线路覆冰、浓雾等潮湿环境会降低空气绝缘强度, 促使接触网对地产生闪络放电现象, 形成瞬时接地故障。故障初期多表现为间歇性轻微漏电, 运行时间增加后, 放电路径会逐步灼烧线路设备, 扩大故障影响范围。轻微绝缘缺陷会持续恶化, 最终发展为持续性接地故障, 造成供电系统参数异常, 干扰牵引供电系统的正常运行秩序。

2 接触网断线接地故障特征与故障类型

2.1 接触网断线故障电气特征表现

接触网出现断线故障后, 牵引供电回路的导通结构

遭到破坏,系统电气运行状态会发生明显改变^[2]。故障位置直接截断线路供电通道,造成故障区段后方线路失去电源供给,运行电压快速下降。回路负载电流逐步回落直至完全消失,电力机车无法正常取电工作,供电系统原有运行平衡状态被彻底打破,线路整体进入开路运行状态。故障发生瞬间,供电网络会产生短暂的暂态震荡,电压波形出现不规则畸变,谐波成分显著增加。断线故障仅中断供电回路,不会产生对地导通通道,设备对地绝缘结构不会受到影响,零序电气参数能够保持稳定。这类差异化的电气变化特点,可作为辨识接触网断线故障的重要依据。

2.2 接触网接地故障电气特征表现

接触网接地故障本质是线路带电部分与大地之间形成异常电气通路,参数变化特征区别于其他故障类型,具备较高辨识度。绝缘部件长期运行出现破损、表面积污受潮,或是户外潮湿环境影响,都会让带电导体与大地形成连通回路,持续产生对地漏电电流。系统零序电流明显增大,故障点位对地电位持续降低,母线供电电压出现偏移,稳态运行波形发生持续性畸变。故障程度较轻时,电气参数波动幅度有限,供电系统可维持短时正常运行。故障持续恶化后,漏电电流急剧上升,电气参数偏移范围不断扩大,供电系统稳定性大幅下降,直接干扰牵引供电网络的正常运行秩序。

2.3 不同工况下复合型故障特征差异

复合型故障同时包含断线故障与接地故障两种状态,线路负荷工况的变化,会让故障电气表现呈现出明显区别。机车处于空载状态时,系统整体负荷水平偏低,故障引发的电气参数波动幅度较小,故障信号特征不够突出,现场识别难度相对更大。机车处于重载状态时,系统承载负荷较高,故障触发后电压跌落幅度更深,电流波形畸变问题更为明显,故障信号特征更加清晰直观。线路负荷的动态变化,会直接改变故障电气量的波动范围与衰减速度。工况差异带来的特征变化,会直接影响故障判别精度,也是故障识别过程中需要重点考量的因素。

2.4 故障干扰因素与特征畸变规律

牵引供电设备长期暴露在户外环境中,复杂多变的运行条件会带来各类干扰,导致标准故障特征出现畸变失真。绝缘部件自然老化、天气环境动态变化、机车频繁启停带来的负荷波动,都会改变供电回路整体阻抗,对原始故障信号产生干扰。绝缘表面积污会削弱绝缘性能,弱化轻微故障对应的电气波动特征,让故障识别灵敏度有所下降。负荷波动会与故障波形相互叠加,造成

波形失真、特征偏移等问题。各类外部干扰会改变故障信号的幅值、波形形态以及持续时间,让实际采集的信号偏离标准故障特征。深入梳理这类畸变的形成规律,可以有效区分真实故障与环境干扰信号,进一步提升牵引供电系统故障识别的稳定性与准确性^[3]。

3 现有接触网故障识别体系存在的短板

3.1 传统故障识别方式的适配局限

现阶段主流的接触网故障识别方式多依托固定电气阈值判别逻辑搭建,适配场景相对固定,难以适配铁路牵引供电复杂多变的运行场景。这类识别手段依托稳态电气参数完成判别,对故障瞬间的暂态波形变化捕捉力度不足。铁路牵引负荷具备强波动性、冲击性的运行特点,常规判别阈值无法随负荷状态动态调整。负荷波动产生的电气扰动容易被误判为故障信号,真实故障也可能因负荷叠加作用被掩盖。固定化的识别逻辑适配性较差,无法适配不同线路、不同运行时段的差异化供电状态,现场应用过程中存在明显局限性。

3.2 微弱故障与隐性故障识别的精准度不足

接触网早期隐患引发的微弱故障、隐性故障电气扰动幅度低,参数变化特征十分微弱,现有识别体系很难实现有效捕捉。线路绝缘微损、局部轻微放电、线缆轻度断股等隐患,不会造成电气参数的剧烈波动。常规识别算法仅对大幅参数异变敏感,对细微、缓慢的电气变化识别能力不足。多数隐性故障处于间歇性发作状态,故障信号存续时间短、随机性强。现有识别体系难以稳定抓取有效特征,容易出现漏判、迟判问题,无法提前排查线路潜在安全隐患,不利于故障的前置防控。

3.3 复杂干扰工况下故障区分能力薄弱

牵引供电系统长期露天运行,外界环境干扰与设备运行扰动会大幅增加故障识别难度。气候环境变化、线路积污老化、机车频繁启停都会产生电气干扰信号,干扰波形与真实故障波形存在高度相似性。现有识别体系对于干扰信号的甄别能力有限,无法有效剥离噪声干扰与故障特征。复杂工况下的畸变信号会模糊故障固有特征,降低信号辨识度。现有技术难以精准区分正常负荷扰动、环境干扰与真实故障,大幅降低故障识别的抗干扰能力,制约识别结果的可靠性。

3.4 故障类型判别与故障定位匹配性偏差

当前故障识别体系存在类型判别与点位定位衔接不紧密的问题,两项工作的匹配度无法满足现场运维需求。系统完成故障类型判定后,定位算法无法依托精准故障特征完成点位锁定,故障类型与故障位置的对应关系出现偏差。不同故障的电气特征存在部分重叠,单一

依靠波形参数判别容易出现类型误判。错误的故障类型结果会直接误导定位运算,造成定位偏移。匹配性偏差会延长故障排查时长,降低运维检修工作效率,影响牵引供电系统故障处置的整体时效性。

4 牵引接触网断线接地故障优化识别方法

4.1 基于电气特征参数的故障甄别思路

固定阈值判别模式在牵引供电系统故障识别中存在明显短板,无法适配机车负荷频繁波动的运行场景,极易出现判别失效问题。全新的故障甄别思路跳出传统单一参数判定局限,依托多维度电气特征参数构建全新判别框架。重点挖掘故障暂态过程中的波形畸变规律、谐波变化特性与回路阻抗偏移特征,扩充故障判别所需的有效信息。结合牵引供电负荷冲击性强、波动幅度大的运行特点,筛选稳定性强、抗干扰性能优异的电气参数作为判别指标,搭建可自适应工况变化的判别标准。通过对各类电气参数的动态采集与深度分析,精准区分常规负荷扰动与故障异动的区别,大幅提升故障识别方式对不同线路工况的适配性能^[4]。

4.2 断线与接地故障差异化识别逻辑构建

断线故障与接地故障的电气演化机理互不相同,部分特殊工况下的信号特征存在重叠现象,增加故障误判的发生概率。针对性搭建分层递进的差异化识别逻辑,可有效解决类型判别混淆的问题。依据两类故障的电气演变规律,梳理断线故障回路开路、零序参数稳定的专属特征,提取接地故障零序电流激增、对地电压偏移的典型信号特点。设置由粗到细的多级判别层级,先完成基础故障类型划分,再拆解复合故障的混杂特征分量。细化单一故障与叠加故障的判别标准,通过专属特征区分故障类别,从逻辑架构层面提升故障分类的准确性。

4.3 复杂干扰工况下故障特征提纯方式

接触网露天运行的特殊环境会持续产生各类干扰信号,线路老化、气象变化、负荷波动都会造成故障信号掺杂大量噪声,弱化有效故障特征。引入多层次信号提纯处理手段,可有效解决信号失真问题。对现场采集的原始电气信号开展前置净化处理,剔除无规律杂波与无效数据,削减外界环境带来的信号干扰。通过智能筛选机制保留故障核心特征分量,去除畸变失真的干扰数

据。对早期隐性故障、间歇性故障的微弱信号进行放大增益处理,提升低幅值故障信号的辨识度,实现干扰信号与有效故障信号的彻底剥离,为精准故障判别提供纯净可靠的数据基础。

4.4 故障精准判别与分类识别体系优化

现阶段故障识别体系存在流程碎片化、数据衔接不畅的问题,故障分类结果无法高效匹配故障定位工作,现场应用效果受限。对整体识别体系进行整合优化,串联特征参数提取、干扰信号提纯、差异化逻辑判别等核心流程,形成完整闭环的故障识别体系。打通故障分类与故障定位的数据传输链路,保障判别结果可以直接服务于故障点位测算,消除数据衔接偏差。优化后的体系可覆盖常规显性故障、微弱隐性故障以及多类复合故障,适配各类复杂现场工况。整套优化方案能够降低误判、漏判问题的发生概率,全面提升接触网故障识别精度,为铁路牵引供电运维工作提供扎实的技术支撑。

结束语

接触网断线与接地故障的精准识别是牵引供电运维工作的重要内容,复杂工况干扰、微弱故障隐蔽性以及传统算法适配性不足,都是制约故障识别精度的关键因素。通过分析故障产生机理与电气特征差异,梳理现有识别体系的各类短板,从特征甄别、差异化逻辑构建、信号提纯、体系优化多个角度完善识别方法,可有效提升复杂场景下的故障辨识能力。整套优化思路能够切实提升牵引供电设备运维质量,保障电气化铁路供电系统平稳可靠运行。

参考文献

- [1]蒋忠浩.铁道供电牵引变压器接触网断线接地故障识别方法研究[J].工程机械与维修,2024(1):17-19.
- [2]聂逸杰,胡海涛,葛银波,等.基于牵引变压器分接头电压差的复线电气化铁路接触网在线防融冰方案[J].机车电传动,2025(4):162-169.
- [3]王冠英.高速铁路接触网供电安全问题分析与策略研究[J].模型世界,2024(8):46-48.
- [4]张丽艳,罗博,郑兴.新型电缆贯通供电系统短路特性分析[J].西南交通大学学报,2025,60(1):147-155.