

低压线路漏电的常见原因及排除技巧总结

吴培享

金华永和氟化工有限公司, 浙江 金华 321000

[摘要]随着电网负荷增加以及设备老化,传统的漏电检测手段逐渐无法满足现代电网的要求。尽管漏电保护器(RCD)能够在漏电流超过预设值时切断电源,但在复杂电网环境下,故障定位的准确性及响应速度仍存在一定问题。为了弥补这些不足,新的漏电故障检测技术逐步得到应用,尤其是剩余电流特征分析、Hausdorff 距离算法以及拓扑自动识别技术等方法,凭借其较高的灵敏度与实时响应能力,已在漏电故障检测领域展现出较大的潜力。本篇文章将探讨这些新技术在低压线路漏电故障检测中的应用及其优势,旨在为电力系统的故障诊断提供更加可靠的技术支持。

[关键词] 低压线路; 漏电故障; Hausdorff 距离算法; 拓扑自动识别

DOI: 10.33142/hst.v8i1.15140

中图分类号: TM642

文献标识码: A

Conclusion of Common Causes and Troubleshooting Technology for Low Voltage Circuit Leakage

WU Peixiang

Jinhua Yonghe Fluorine Chemical Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang, 321000, China

Abstract: With the increase of power grid load and equipment aging, traditional leakage detection methods are gradually unable to meet the requirements of modern power grids. Although residual current devices (RCD) can cut off power when the leakage current exceeds the preset value, there are still certain issues with the accuracy and response speed of fault location in complex power grid environments. In order to compensate for these shortcomings, new leakage fault detection technologies have gradually been applied, especially residual current feature analysis, Hausdorff distance algorithm, and topology automatic recognition technology. With their high sensitivity and real-time response capability, they have shown great potential in the field of leakage fault detection. This article will explore the application and advantages of these new technologies in low-voltage line leakage fault detection, aiming to provide more reliable technical support for fault diagnosis in power systems.

Keywords: low voltage lines; leakage fault; Hausdorff distance algorithm; topology automatic recognition

引言

传统的漏电检测方法虽能够对部分故障进行监测,但面对日益复杂的电网结构,传统技术的精度及响应速度已无法满足需求。设备老化、运行负荷过大及外部环境变化等因素,常使得漏电故障变得隐蔽且复杂,传统的检测手段无法快速识别这些潜在故障,从而影响电网的稳定运行。因此,如何提升漏电故障的检测精度及响应速度成为电力系统亟待解决的问题。近年来,借助现代信号处理技术及智能算法,新的检测方法逐渐得到应用,这些方法通过对电流波动、频率成分变化等特征的精准分析,能够有效识别电网中的潜在故障,避免问题的扩展。

1 低压配电网管理模式的发展与现状

1.1 TN-C 系统的发展与局限

在我国低压配电网发展的早期阶段, TN-C 系统(即前苏联的“接零”系统)被广泛采用,其主要通过零序保护实现接地故障的防护。由于 TN-C 系统为了节约成本,未设置单独的 PE 线,零序电流互感器只能包绕三根相线而无法包括 PEN 线。在正常情况下,零序电流互感器检测到的是三相不平衡电流,而接地故障发生时会增加接地故障电流。因此, TN-C 系统的零序电流保护整定值需要设

置较高,通常达到数十安培甚至数百安培。由于整定值过大,该系统在实际运行中无法有效防护接地电弧火灾,也难以对人体触电提供足够保护,仅在某些情况下具备高于过电流保护的灵敏度。

1.2 IEC 标准引入后的改进

随着国际 IEC 标准的引入,我国低压配电网逐步推广 TN-S、TN-C-S、TT 及 IT 系统,这些系统引入了单独的 PE 线,极大地改善了接地故障的防护效果。同时,配电网中大量应用剩余电流动作保护装置(RCD)。与 TN-C 系统相比,这些系统的 RCD 电流互感器包绕相线和中性线,而不包绕 PE 线。RCD 的整定值仅需避开被保护回路的正常对地泄漏电流,这使得动作灵敏度显著提高,其整定电流可以低至数十毫安甚至数百毫安。此外,额定动作电流不超过 30mA 的高灵敏度 RCD 可以用作直接接触电击的附加防护,为人体触电和电气火灾的防护提供了更加有效的手段。

1.3 剩余电流动作保护装置技术发展

剩余电流动作保护装置(RCD)的工作原理从最初的电压动作型逐渐被电流动作型所取代,主要发展出四种方法。第一种是幅值比较法,RCD 通过检测剩余电流的幅度是否超过整定值来动作。这种方法被广泛应用,但由于正

常线路中存在一定的剩余电流,导致保护死区较大,整定值较高,难以满足人体触电保护的灵敏度要求^[1]。第二种是电流脉冲法,通过检测剩余电流的突变幅值来触发保护动作,减小了死区问题,但该方法对电流相位差较为敏感,在实际应用中容易发生拒动或误动。第三种是鉴相鉴幅法,该方法综合剩余电流的幅值变化和相位变化来判断故障,进一步减少了保护死区,但其设备构成复杂,整定难度较大,且在剩余电流相位变化较小时仍可能出现拒动现象,实际运行效果不够理想。第四种是相量突变量法,该方法通过计算故障前后剩余电流的相量变化来作为动作判据,能够有效克服正常运行时剩余电流的影响,灵敏度较高。然而,该方法对测量误差和线路负荷变化较为敏感,容易受到干扰,在实际应用中仍存在一定局限性。

1.4 当前管理模式的挑战与前景

目前,我国低压配电网管理模式已从传统的零序保护发展为多种系统并存,并且通过大规模应用剩余电流动作保护装置(RCD)提高了配电网的安全性。然而,随着电网和负荷复杂度的提升,漏电故障形式呈现多样化和复杂化,传统基于工频信号检测的保护技术在某些情况下难以全面满足实际需求。未来,低压配电网管理模式的发展需要重点提高RCD的灵敏度和可靠性,降低拒动与误动概率,同时针对非工频信号的漏电故障研发更加智能化的检测与保护技术。此外,结合大数据和人工智能技术,构建低压配电网的智能管理模式,将进一步提升系统的安全性和运行效率,从而更好地适应现代社会对电力系统的高安全性和高可靠性要求。

2 低压线路漏电的常见原因分析

2.1 绝缘老化与破损

随着使用时间的延长,低压线路中的绝缘材料逐渐退化,尤其在高温、湿润或紫外线强烈照射的环境下,老化现象更加明显。绝缘层的介电强度随着时间逐步降低,使得电流泄漏的风险大幅提升。当线路遭受机械损伤、化学腐蚀或发生过载时,绝缘层破损的几率增大,从而加剧漏电问题^[2]。绝缘退化不仅使漏电的可能性增加,还可能引发设备损坏或短路,严重影响电力系统的安全与稳定。

2.2 潮湿环境与污染因素

潮湿环境和污染物的积聚是低压线路漏电的重要诱因。高湿度条件下,水汽凝结在绝缘材料表面,形成导电膜,从而大幅降低绝缘电阻,使漏电现象更为频繁。同时,灰尘、油污及盐分等污染物长期沉积在电缆表面,容易形成导电通道,进一步加剧电流泄漏。在沿海及工业区,恶劣的环境条件使污染积累更加严重,进而影响线路的长期稳定性与运行可靠性。

2.3 线路敷设不当

低压线路的安全性受到敷设质量的直接影响。接地线未按技术标准布设、线路接头绝缘处理不到位等问题,均

会导致线路绝缘性能的下降,增加漏电的概率。若线路弯曲半径过小或线路间距不足,电气间隙就会受到压缩,进而提高漏电风险。在工程施工中,赶工可能导致工艺细节被忽视,隐性故障因此逐渐积累,增加了事故发生的几率,危及系统稳定性。

2.4 接地系统缺陷

接地系统的设计不足或长期运行中的老化问题常是漏电事故发生的关键因素之一。若接地电阻过大,故障电流无法有效引流,剩余电流保护装置的作用将受到限制。在实际运行中,接地网可能因腐蚀、断裂或接触不良而失效,从而无法提供足够的故障电流引导。在一些地质条件较差的地区,接地装置往往难以满足标准要求,从而加大了电网漏电的风险,且延迟了故障电流的释放,进一步危害电力系统的安全。

2.5 用电设备内部故障

低压线路所连接的用电设备出现内部故障时,往往会导致隐蔽的漏电现象。设备绝缘层因老化或裂纹损坏,或电路板因受潮产生异常泄漏电流,均可能引发漏电事故。元件的过载、焊点脱落或设计缺陷等问题,也会引发短路,威胁到线路的稳定性。

2.6 外力破坏或人为因素

在施工中,挖掘等外部因素可能导致线路绝缘层损坏,进而引发漏电。同时,若操作人员未按规范执行或设备维护过程中出现失误,也可能导致线路的绝缘损伤^[3]。外部破坏与人为疏忽,通常会导致接地系统的连接不良,从而使漏电风险加大,影响电力系统的安全运行。

3 低压线路漏电故障的检测与诊断技术

3.1 低压配电系统线路剩余电流特征分析

在低压配电系统中,剩余电流特征的分析为漏电故障检测提供了至关重要的依据。随着线路或设备绝缘性能的退化,漏电流开始逐步显现。在漏电流超过预设值时,漏电保护器(RCD)会迅速切断电源,避免更严重的电气事故,有效地确定故障的具体位置及其严重程度。漏电问题的检测,依赖于对电流特征的精确监测。在实际运行中,电流的波动、频率成分变化以及峰值的变化都能反映出电网潜在的故障问题。通过分析这些电流特征的细微变化,漏电故障可在初期被识别。波动特征通常在漏电问题的发生初期出现,频率特性变化则常常意味着更复杂的故障模式。对这些变化进行有效的监控,可以尽早发现问题,避免故障蔓延,确保电网的稳定运行。电流峰值变化的细致分析同样是故障定位的重要依据,进而提高了排查的准确性。

3.2 基于 Hausdorff 距离的漏电流故障监测方法

Hausdorff 距离算法在漏电流故障监测中的应用具有显著优势,能够准确识别电流波形的变化并快速定位故障。①算法概述: Hausdorff 距离(Hausdorff Distance)作为一种常见的集合差异度量方法,广泛应用于漏电流故

障的监测。在电流波形的正常运行与故障状态之间，算法通过比较几何特征的差异来识别故障。通过计算电流分布在不同状态下的偏差，能够迅速确定故障点。相较于传统监测方法，Hausdorff 距离算法对电流波形中的微小变化具有更高的敏感度，能够及时识别细微波动，进而准确定位漏电流故障的位置。这种特性使得电力系统在故障初期就能够采取有效措施，避免故障进一步扩展。同时，算法对不同电网环境的适应能力较强，能够在多变的工作条件下维持高效的监测精度。②计算公式：Hausdorff 距离的计算公式如下所示：

$$d_H(A, B) = \max \left(\sup_{a \in A} \inf_{b \in B} \|a - b\|, \sup_{b \in B} \inf_{a \in A} \|a - b\| \right)$$

在该公式中， A 与 B 分别代表正常运行状态与故障状态下的电流波形； a 与 b 是集合 A 与 B 中的点； $\|a - b\|$ 表示点 a 与点 b 之间的欧几里得距离。Hausdorff 距离通过计算集合 A 中每个点与集合 B 中最近点之间的最大距离，以及集合 B 中每个点与集合 A 中最近点之间的最大距离，来度量两种电流波形之间的最大偏差。③算法流程：在实际应用中，电流信号首先通过传感器进行采集，得到正常运行状态与故障状态下的电流波形。采集到的数据将经过噪声滤波与标准化处理，确保信号的清晰度与稳定性。随后，系统会计算电流波形的 Hausdorff 距离，并将两者进行比较。若计算得到的 Hausdorff 距离超过预设阈值，系统会判定发生了漏电流故障。④算法优势：Hausdorff 距离算法对电流波形的微小变化具有高度敏感性，可以快速响应并识别漏电流故障。这种高灵敏度使得电力系统能够在故障发生初期快速识别问题，防止故障扩展。算法具备较强的适应性，能够在复杂的电网环境中稳定运行，并提供准确的监测结果。

3.3 拓扑自动识别技术

随着低压线路漏电故障检测与诊断技术的发展，电力系统中潜在问题的应对能力得到显著提升，特别是在漏电故障的早期识别方面，起到了关键作用。漏电故障检测中的剩余电流特征分析至关重要。当设备或线路的绝缘性能下降时，漏电流便开始出现，这时漏电保护器（RCD）会切断电源，以防止故障的蔓延。通过对电流波动、频率变化及峰值波动进行分析，可以在故障发生的初期就准确定位故障的地点及严重程度，进而提高排查效率，保障电网的安全性。Hausdorff 距离算法在漏电流故障监测中得到了广泛应用。该算法通过对比不同工作状态下电流分布的几何特征，能够迅速识别漏电故障。与传统方法不同，Hausdorff 距离算法对电流波形变化的敏感性较高，甚至可以检测到微小的波动，并迅速精确地定位故障点。在实际应用中，监测系统通过历史数据设定判据，基于正常运行状态来设定适当的监测阈值。若电流波形超出设定范围，系统会自动触发报警，从而提示可能的故障。监测过程包

含数据采集、特征分析、距离计算及故障判断等步骤，确保故障能够在短时间内被准确定位。Hausdorff 距离算法的实际应用需要依赖多种设备，包括智能电表、漏电保护装置以及电流传感器等。这些设备实时采集电流数据，并将其传输至中央处理系统进行分析。常见的设备如智能漏电保护器（RCD）、数字电流传感器及数据采集模块，配合算法的使用，能够自动识别电流波形的差异，及时发出漏电故障的警报。随着电网数据量的不断增加，Hausdorff 距离算法的精度也在不断提升，监测系统的灵敏度与适用性随之增强。不仅提升了漏电故障早期检测的能力，也为电网智能化管理提供了有力的技术支持。

4 低压线路漏电的排除技巧总结

4.1 漏电故障的预防措施

低压线路漏电故障的发生，不仅影响电力系统的稳定运行，还可能对设备及人员安全构成严重威胁。为了有效预防漏电问题，必须采取一系列针对性的措施。定期检查线路的绝缘性能，是防止漏电故障的基础。随着时间的推移，电缆及接头处的绝缘层会逐渐老化，从而形成漏电隐患。借助兆欧表等专业设备，对线路进行周期性测试，有助于及时发现绝缘层的异常，避免故障的发生。此外，优化线路敷设及接地设计至关重要。在设计线路时，需保证电缆布设合理，避免过度弯曲或受外力损伤。接头部位的绝缘材料应符合严格标准，以确保长期使用中的安全性。接地系统的设计同样不能忽视，应满足相关规定，特别是在长线路的配置中，要合理布置接地电极和接地网，确保接地电阻处于合规范围。环境因素对低压线路的影响不容忽视。潮湿或污染严重的环境，会加速线路绝缘层的老化，从而导致漏电隐患。因此，在电缆的选材及敷设过程中，应尽量选择具有较高耐湿性和抗污染性的材料，并避免将电缆暴露在不利的环境中。

4.2 漏电故障的快速排查与处理方法

在漏电故障发生时，迅速定位故障点并采取有效处理措施，是恢复电力系统正常运行的关键。利用漏电保护器进行故障定位，是一种行之有效的方法。漏电保护器能够在漏电发生时自动切断电源，通过分段断开各个回路，可逐步排查，精确定位故障区域，从而提高故障排查效率。针对长线路的漏电故障，通过将线路分为多个检测段，逐段测试，不仅能够快速缩小故障范围，还能有效减少重复检测的工作量。此外，使用万用表、兆欧表等测量工具进行精确测试，能够帮助定位漏电点。通过对电流、电压及绝缘电阻的精确测量，及时发现微小的电流泄漏，从而更快地找到故障源，减少漏电对系统安全的影响。

4.3 针对特殊场景的漏电处理技巧

在潮湿环境下，水分的积聚会导致线路绝缘性能下降，形成漏电隐患。对于缺乏接地线的情况，可以通过浇湿地面作为接地参考点，利用其自然的导电特性进行漏电

检测。在高温环境中,绝缘材料容易受到热老化的影响,导致其性能下降,从而引发漏电故障。为此,检查高温环境下线路的绝缘状态尤其重要。除了常规检查外,还应特别关注因温度升高导致的绝缘层老化现象。及时修复或更换老化部件,能够有效降低漏电风险。在设计阶段,适当选择耐高温的电缆材料,或者合理规划线路布设位置,可以从根本上减少高温对线路的负面影响。对于老旧线路,漏电问题往往更为复杂。由于长期使用,线路中的电缆、接头等组件的老化现象非常常见,造成绝缘失效或接地不良。针对这一问题,进行线路的改造和升级是解决漏电隐患的关键。通过更换老化的电缆部件,优化接地系统,确保接地电阻符合标准,能够有效消除长期以来的漏电隐患。此外,借助智能监控系统对线路进行实时监测,不仅能在早期发现问题,还能提高整个电力系统的安全性。

5 结语

在低压线路漏电故障检测领域,随着新技术的应用,检测精度与响应速度已有了显著提升。剩余电流特征分析不仅能够监测电流波动,还能通过频率及峰值变化及时发

现潜在的漏电问题。Hausdorff 距离算法能够敏感捕捉电流波形的微小变化,从而快速定位故障源,防止事态进一步恶化。结合拓扑自动识别技术,故障定位的精度得到进一步提高。这些技术在电力系统中的应用,显著提高了故障检测的效率。然而,当前技术仍面临实时数据处理、误报率控制等问题,未来的研究应侧重于优化检测精度、降低误报率、提升系统实时响应能力。

[参考文献]

- [1]姚毅杰,张森. 低压线路漏电故障定位仪的设计[J]. 通信电源技术,2020,37(3):149-150.
 - [2]王珂柯,陆森森. 探究低压线路常见电气火灾原因的分析认定及预防措施[J]. 中国建材科技,2021,30(5):188-189.
 - [3]李晓东. 低压线路常见故障与运行维护管理措施探析[J]. 电工技术,2024(1):209-211.
 - [4]吴克祥,邹艳丽. 基于源荷节点对供电效率的分布式电站并网选址研究[J]. 计算物理,2024,41(4):515-522.
- 作者简介:吴培享,男,目前就职单位:金华永和氟化工有限公司,职务:电工。