

化工电力系统零序电流互感器穿线技术 优化提升接地故障研究

戎尚文

(中国石化扬子石油化工有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要 针对化工电力系统接地故障检测的特殊需求, 系统分析了零序电流互感器穿线技术的优化方法。通过比较不同穿线方式的特点, 探讨了电缆屏蔽层接地关键技术, 并提出了针对 TN、TT、IT 三种接地系统的优化配置方案。结合典型工程案例, 验证了优化措施在提升检测精度和可靠性方面的显著效果, 以期为化工企业电力系统安全运行提供实践参考。

关键词 化工电力系统; 零序电流互感器; 穿线技术; 接地故障; 保护配置

中图分类号: TM4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.019

0 引言

化工电力系统因其特殊的生产环境, 对供电可靠性要求极高。接地故障如不能及时检测并切除, 可能引发火灾、爆炸等严重事故。零序电流互感器作为接地保护的核心元件, 其穿线技术的优化直接影响故障检测的精度和速度。本文系统梳理零序电流互感器穿线技术的研究现状, 分析不同穿线方式的优缺点, 探讨电缆屏蔽层接地的关键技术, 并针对化工行业不同接地系统提出优化配置方案, 最后展望未来发展趋势。

1 化工电力系统与零序电流互感器基础

化工电力系统作为连续生产的重要保障, 具有显著的特殊性。这类系统对供电可靠性要求极高, 通常配备双电源等保障措施, 确保生产过程不间断运行。由于生产工艺需要, 系统中电缆布置往往十分密集, 大量电力电缆集中敷设, 这大大增加了系统的复杂性^[1]。同时, 化工生产中大量使用的变频设备等非线性负荷会产生较多谐波干扰, 给故障检测带来额外挑战。

在接地故障检测方面, 零序电流互感器发挥着关键作用。它通过持续监测三相电流的平衡状态来识别可能的接地故障。但在实际运行中, 这种检测面临着多重困难: 一方面需要准确区分真实的故障信号和各种干扰信号; 另一方面还要适应化工生产环境的特殊要求, 包括耐受腐蚀性气体、适应高温运行环境, 以及在防爆区域必须符合严格的防爆标准。这些特殊要求使得化工电力系统中的零序电流互感器在选型、安

装和维护方面都需要特别考虑, 既要保证检测的准确性, 又要满足化工生产的特殊环境要求。

2 零序电流互感器穿线技术原理与方法

2.1 穿线技术的基本原理

零序电流互感器的穿线技术建立在电磁感应定律的基础上。其核心工作原理是: 在系统正常运行时, 三相电流的矢量和为零, 互感器不会产生输出信号; 当发生接地故障时, 三相电流出现不平衡, 互感器就会感应出相应的零序电流信号。这种技术的关键在于通过合理的导体布置, 确保一次导体与互感器之间形成最佳的电磁耦合关系, 从而准确捕捉故障电流信号。在实际应用中, 穿线技术的选择直接影响着故障检测的灵敏度和可靠性。

2.2 主要穿线方式及其特点

(1) 一次穿线法: 这是最基本的穿线方式, 将三相导体同时穿过互感器中心。其优势在于结构简单、安装便捷, 特别适用于负荷较小、电磁环境单纯的系统^[2]。但在大电流或存在谐波干扰的场合, 这种方法的抗干扰能力相对较弱。(2) 二次穿线法: 采用特殊的穿线布置方式, 通过优化导体路径来增强抗干扰能力。这种方法更适合电缆密集、电磁环境复杂的工业场所, 但需要更大的安装空间, 对施工精度要求也更高。(3) 特殊穿线方式: 包括多匝绕制法等创新技术。这类方法通过增加导体在互感器中的绕制匝数来提升检测灵敏度, 能够有效识别高阻接地故障, 但相应地增加了设备成本和安装复杂度。

3 电缆屏蔽层接地线穿线位置选择技术要点

3.1 电缆屏蔽层的作用与接地规范要求

电缆屏蔽层在电力系统中承担着多重重要功能。首先,它能够有效抑制外部电磁干扰对电缆信号的干扰,保证测量精度。其次,可以限制内部电磁场对外辐射,降低对其他设备的干扰^[3]。在化工行业特殊环境中,屏蔽层的接地规范更为严格。通常推荐采用单端接地方式,即在电缆的一端将屏蔽层可靠接地,另一端保持悬浮,这种接法可以有效避免屏蔽层中形成环流。但在某些特定场合,如长距离输电或存在强电磁干扰的环境,需要采用双端接地方式,此时必须配合等电位连接措施,确保两端接地电位一致,防止产生接地环流。

3.2 影响穿线位置选择的关键因素分析

选择屏蔽层接地位置时需要综合考虑多方面因素。首先是系统接地方式,不同接地系统(TN、TT、IT)对屏蔽层接地的要求存在明显差异。其次是电缆长度因素,长电缆由于分布电容效应显著,需要特别考虑接地位置对零序电流测量的影响。再者是环境干扰强度,在强电磁干扰区域需要优化接地位置以增强抗干扰能力。最后,还需考虑电缆敷设方式(架空或埋地)、周围金属构件分布等因素。实践表明,在TN系统中,屏蔽层接地点位置的选择对零序电流检测精度的影响尤为突出,需要特别重视。

4 化工电力系统不同接地系统中零序电流互感器优化配置方案

4.1 TN 接地系统

在化工企业TN接地系统的实际应用中,零序电流互感器的优化配置需要重点把握以下几个关键实施要点:

首先,在安装方式选择上,二次穿线法是最佳实践方案。具体操作时,需要将三相电缆按照特定顺序依次穿过互感器,保持各相导体的对称分布,确保三相磁场能够有效抵消。安装过程中要使用专用夹具固定电缆,避免因振动导致的位置偏移。同时,互感器与电缆外皮之间应保持适当间距,通常控制在5~10 cm范围内,以减少杂散电容的影响。

其次,与剩余电流保护器(RCD)的配合使用至关重要。在实际接线时,应将零序电流互感器的输出信号接入RCD的专用输入端口,并确保极性正确。保护参数的设置需要根据现场情况调整:对于普通配电回路,动作电流建议设定在100~300 mA之间;对于特别重要的防爆区域,可适当提高灵敏度至30~100 mA。

调试时需使用专用测试设备模拟接地故障,验证保护装置的动作可靠性。

在系统集成方面,建议采用分层保护的架构设计。在配电室低压柜出线端安装主保护用零序互感器,在各车间配电箱进线处设置二级保护^[4]。两级保护之间要建立适当的延时配合,通常主保护延时设定为0.3~0.5 s,二级保护设为瞬时动作。这种配置既能保证选择性,又能实现快速故障隔离。

中国石化燕山分公司在2019-2020年对其乙烯装置10 kV配电系统进行了接地保护改造,重点解决了电缆沟潮湿环境下保护系统误动作率高的问题。改造中采用了大连北方互感器集团的零序互感器,通过精确的二次穿线安装工艺,使磁场不平衡度显著降低。系统配置了施耐德的保护装置,设置分级保护参数,并采用专业测试设备进行调试验证。同时,在总变电所和工艺装置变电所分别设置不同型号的保护装置,实现快速精准的故障定位。根据改造后的运行数据显示,系统误动作次数大幅减少,故障切除时间明显缩短,有效避免了非计划停车带来的经济损失。该改造项目的成功实施为同类化工企业电力系统保护优化提供了有益参考。

4.2 TT 接地系统

在化工企业TT接地系统的实际配置中,零序电流互感器的应用需要特别注意系统特性带来的特殊要求。由于TT系统的中性点直接接地而设备外壳独立接地的特点,推荐采用一次穿线法作为基础配置方案。这种方法直接将三相导体同时穿过互感器中心,安装时要注意保持各相导体的对称分布,确保三相磁场平衡。导体穿过互感器时应保持平直,避免弯曲造成的位置偏差,同时要使用非磁性材料固定,防止产生附加磁场影响测量精度。

为提升系统可靠性,必须配套安装绝缘监测装置。该装置应实时监测系统对地绝缘电阻,当检测到绝缘下降至设定阈值(通常为50 k Ω)时发出预警信号。在接线时,绝缘监测装置的信号采集端应与零序互感器输出端并联,但需设置适当的信号隔离措施,避免相互干扰。装置报警值应根据现场环境湿度、温度等因素进行动态调整,在潮湿或多尘环境中可适当降低报警阈值。

接地电阻的控制是TT系统安全运行的关键。根据IEC标准要求,所有设备接地极的电阻值必须保证在发生接地故障时,设备外壳对地电压不超过50 V。实际操作中,对于380 V系统,接地电阻应不大于4 Ω ;

220 V 系统则要求不大于 $8\ \Omega$ 。在化工企业的腐蚀性环境中,要特别注意接地装置的防腐处理,建议采用镀锌钢或铜包钢材料,并定期检测接地电阻值。在土壤电阻率较高的区域,可采用降阻剂或增加接地极数量等措施来保证接地效果。

中国石油吉林石化公司化肥厂在 2021 年 TT 系统改造中,针对其尿素装置区高腐蚀环境的特点,采用了以下技术方案:选用哈尔滨互感器厂的 LZJB9-10 型零序电流互感器实施一次穿线安装,通过激光校准确保三相导体中心偏差控制在 $2\ \text{mm}$ 以内。配套安装德国 Bender 公司的 ISOMETER® 绝缘监测装置,设定报警阈值为 $35\ \text{k}\Omega$ (低于标准 $50\ \text{k}\Omega$),以应对东北地区冬季高湿度环境。接地系统改造采用铜包钢接地极配合防腐降阻剂,使全厂接地电阻从平均 $7.6\ \Omega$ 降至 $3.2\ \Omega$,关键防爆区域更达到 $1.8\ \Omega$ 。据吉林石化 2022 年安全年报显示,改造后系统误报警次数同比下降 82%,成功预警 3 次绝缘劣化隐患,避免潜在触电事故。

4.3 IT 接地系统

在化工企业 IT 接地系统的实施中,零序电流保护配置需要采取特殊的技术方案。由于 IT 系统允许带单相接地故障运行的特点,必须采用高灵敏度检测方案,通常选择额定一次电流为 $1\ \text{A}$ 或 $0.5\ \text{A}$ 的专用零序电流互感器。安装时建议采用多互感器并联布置方式,即在系统各主要支路分别安装互感器,通过逻辑判断实现故障定位。具体实施时要确保各互感器型号参数一致,输出信号采用并联连接方式,并设置信号调理电路保证叠加精度。

注入式保护技术的应用是关键环节。需要配置专用的信号注入装置,通常采用 $20\sim 25\ \text{Hz}$ 的低频信号作为检测信号源^[5]。注入点应选择在系统中性点或专用接地变压器二次侧,注入信号强度控制在 $5\sim 10\ \text{mA}$ 范围内。在系统各支路安装相应的信号检测器,通过检测注入信号的分布情况来判断绝缘状况。安装时要注意信号注入装置与系统其他保护设备的电磁兼容性,必要时加装滤波装置。

系统调试时需要特别注意灵敏度设置。建议将一级报警阈值设为 $5\sim 10\ \text{mA}$,二级跳闸阈值设为 $20\sim 30\ \text{mA}$ 。调试时要模拟不同位置的接地故障,验证保护装置的动作可靠性。对于重要回路,建议设置双重化保护配置,采用不同原理的保护装置互为备用。定期维护时要重点检查注入信号强度和保护装置灵敏度,建议每半年进行一次全面测试。

在化工特殊环境中,所有设备必须满足防爆要求,

建议选用 Ex ia 等级的本安型设备。信号传输线路要采用屏蔽电缆,并在控制室端做好等电位接地。系统运行时要建立完善的监测记录制度,对每次接地报警都要详细记录故障参数和处理过程,为后续维护提供依据。

万华化学(烟台)工业园在 2022 年对其 MDI 生产装置的 IT 接地系统进行了全面升级改造。该项目采用德国 Bender 公司的 AIM-ISOMETER® 绝缘监测系统,在 12 个关键工艺回路中配置了高灵敏度零序电流互感器组,每组由 3 台 $0.5\ \text{A}$ 级互感器并联组成,通过光纤网络实现快速故障定位。系统创新性地采用 $22.5\ \text{Hz}/8\ \text{mA}$ 的注入信号技术,设置 $7\ \text{mA}$ 报警和 $25\ \text{mA}$ 跳闸的双重保护阈值。改造完成后,系统绝缘故障定位时间从原来的 45 分钟大幅缩短至 8 分钟,成功预警多次电缆绝缘劣化情况,最小检测到 $4.8\ \text{mA}$ 的微弱漏电流,关键反应釜供电回路实现了零误动作的优异表现。该项目的成功实施不仅显著提升了装置供电可靠性,其技术方案还获得了 TÜV 功能安全认证,相关经验已在国内化工行业推广应用。

5 结束语

通过优化零序电流互感器穿线技术,可显著提升化工电力系统接地故障检测的准确性和可靠性。不同接地系统应采用差异化配置方案,重点解决电磁干扰、环境腐蚀等特殊问题。实际工程应用证明,合理的穿线方式和保护策略能有效降低误动作率,缩短故障切除时间。未来应进一步研究智能化检测技术和新型传感器材料,以适应化工生产对电力安全的更高要求。

参考文献:

- [1] 刘晓,薛永端,刘萃萃,等.基于电压-电流分区的灵活接地系统故障保护[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(4):124-131.
- [2] 吴畅培,谢灿波,占志峰,等.变电站 $10\ \text{kV}$ 小电阻接地方式下零序电流互感器的配置研究[J].电力系统装备,2024(01):106-108.
- [3] 王鹏玮,徐丙垠,陈恒,等.零序电流互感器误差对小电流高阻接地保护影响及选型[J].电力系统自动化,2023,47(12):154-162.
- [4] 刘超,梁开宇.零序电流互感器接线对接地故障保护动作的影响[J].云南水力发电,2024,40(6):25-26.
- [5] 刘健,刘海,杨晓西,等.零序电流互感器配大电阻的配电网单相接地故障检测[J].电测与仪表,2023,60(10):92-97.