

化工厂小电流接地系统单相接地故障选线方法及装置研究

程 祎

(华陆工程科技有限责任公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为解决化工厂小电流接地系统中单相接地故障难以准确定位的问题, 研究了故障产生机理、类型特征及其系统危害, 并分析了传统检测方法在小电流条件下存在的响应迟缓、抗干扰能力差和识别准确度低等局限性。基于此, 构建一种融合零序电流突变量提取、相位一致性匹配和小波变换分析的小电流选线装置, 通过系统构成建模和算法公式设计, 提出了具有高响应速度和高适配性的故障识别技术路径, 并在实际化工厂配电系统中进行部署, 通过典型馈线布置与故障数据采集, 验证装置在低电流水平下的实时识别能力和稳定运行性能。分析结果表明, 该选线装置在复杂工况中具备较高的选线准确率和较低的响应时延, 能够有效满足化工行业对接地故障定位实时性和可靠性的工程需求, 具备良好的工程应用推广价值。

关键词: 小电流接地系统; 单相接地故障; 选线方法; 故障检测

Research on single-phase ground fault line selection methods and devices for small current grounding systems in chemical plants

CHENG Yi

(Hualu Engineering and Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to solve the problem of difficult to accurately locate single-phase grounding faults in small current grounding systems of chemical plants, this paper studies the mechanism, type characteristics, and system hazards of fault generation, and analyzes the limitations of traditional detection methods such as slow response, poor anti-interference ability, and low recognition accuracy under small current conditions. Based on this, a small current line selection device that integrates zero sequence current surge extraction, phase consistency matching, and wavelet transform analysis is constructed. Through system composition modeling and algorithm formula design, a fault recognition technology path with high response speed and high adaptability is proposed, and deployed in the actual power distribution system of a chemical plant. Through typical feeder layout and fault data acquisition, the device's real-time recognition ability and stable operation performance are verified at low current levels. The analysis results show that the line selection device has high accuracy and low response delay in complex working conditions, which can effectively meet the engineering requirements of real-time and reliable grounding fault location in the chemical industry, and has good engineering application and promotion value.

Keywords: low current grounding system; single phase grounding fault; line selection method; fault detection

0 引言

在化工行业中，一旦发生单相接地故障，往往伴随生产装置停机、安全风险提升等连锁反应。根据保险公司统计，过去7年中发生了228起接地故障事故，其中156起发生在工业设施，平均每起经济损失高达769 230美元，涵盖设备损坏、生产中断、产品报废及员工再培训等成本。以此为参考，某大型化工企业因接地故障导致中低压配电网保护装置误动作，厂区主生产线停运4 h，造成原材料损失和停机费用累计超过300万元，直接经济损失近600万元。此类事件不仅造成大量资金浪费，还可能引发高压过电压，导致设备绝缘击穿与安全隐患。因此，亟需构建覆盖化工厂实际运行场景的小电流接地选线与故障识别机制，以实现故障告警实时响应，减少停机时长和经济损失，并提升供电系统的故障容忍与智能化管理能力。

1 化工厂单相接地故障的产生和危害

1.1 单相接地故障的产生机理

单相接地故障是指电力系统中某一相导线与地面接触，导致电流不平衡，进而引发设备损坏、停产等问题。其成因主要与系统接地方式、设备老化、环境因素及运行不当有关。在非接地或小电流接地系统中，当发生故障时，地电位变化会引发接地电流经故障点流入大地，若接地电阻较小，电流将迅速流动，导致系统运行不对称。

此外，设备绝缘老化或受外力破坏也易导致接地故障。化工厂设备常处于潮湿、高温等恶劣环境，绝缘性能下降，接地风险增大^[1]。若接地系统设计不合理，如接地电阻过大或接地线配置不当，也会引发故障。此类电流不平衡可能触发保护装置误动作，造成设备停机，严重时甚至危及人身安全。

1.2 故障类型及特征

单相接地故障可以分为不同类型，主要包括

单相直接接地故障和单相间接接地故障。如图1所示，单相直接接地故障是指某一相线直接接触地面或地网，在接地电阻较小的情况下，故障电流较大，导致电压不对称，进而影响电力系统的稳定性。而单相间接接地故障是通过设备的绝缘故障或其他因素间接与地相连，这种故障通常电流较小，难以快速检测，但同样对设备安全造成威胁。

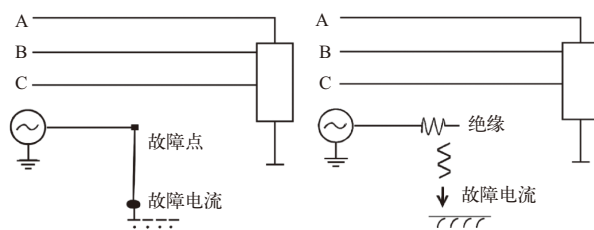


图1 单相直接接地故障（左）和单相间接接地故障（右）

Fig. 1 Single-phase direct ground fault diagram (left), single-phase indirect ground fault (right)

单相接地故障的主要特征体现在电流的不对称性和系统电压的变化。故障发生时，接地电流通常只经过故障相，这会导致系统中相电流的严重不平衡。系统的中性点电压会偏移，并且故障点附近的电压波动加剧。由于故障电流与正常电流存在较大的差异，这种不平衡不仅会使电力设备的保护系统反应滞后，还可能引发设备过热，导致设备损坏。为了更精确诊断故障，通常需要借助高精度的故障检测装置，以有效抑制单相接地故障带来的不利影响。

1.3 故障危害分析

单相接地故障在化工厂等特殊行业中不仅会引发严重的电气安全事故，还会对生产造成深远影响。

1) 接地故障导致系统电流不平衡，常使电机、泵、压缩机等关键设备负荷波动增加，进一步造成过载、过热，增加了设备损坏率^[2]。据保险数据显示，单相接地故障造成的故障平均每次导致工业设施损坏近77万美元，其中主要涵盖设备维修、更换及生产中断成本；同类案例中，化工厂设备故障后的损坏率提升15%~25%，严重影响设备生命周期与维护周期。此外，电流

不平衡引起的电压偏差还可能使生产效率下降5%~10%，导致产线运行效率降低，直接经济损失显著。

2) 故障触发的电压波动和间歇性电弧还可引发火灾隐患。在高温可燃环境中，电弧持续放电会穿透绝缘，产生火花与高热，极易点燃泄漏的易燃物质。研究表明，柴油发电机组等设备因单相接地产生过电压，其断续电弧持续存在易引发火灾。长期故障更可能导致相间短路和绝缘层击穿，扩大为大范围系统停电事故，影响的设备延伸至控制系统、仪器仪表等，有时甚至需停线检修数小时至数天。

3) 这类故障还加大了电网运行复杂性与不稳定性。传统保护装置因电流方向不对称，往往在故障初期无法迅速准确定位，导致恢复时间延长，停机时间常由数分钟延长至数小时，生产连续性严重受损。在化工厂这样高强度连续运行的环境中，若因接地故障引发的停机事件平均持续3~5 h，将造成原料浪费、产品产量下降，并可使生产效率下降近10%，最终导致数百万元级别的经济效益损失。

2 小电流选线装置的必要性

2.1 传统故障检测方法的局限性

传统的单相接地故障检测方法主要依赖于过电流保护、零序电流检测及中性点电压监测等手段。这些方法通常能够有效响应大电流故障或完全接地故障，但在小电流接地故障的情况下，其性能明显受限。原因为：①过电流保护是通过设定一个电流阈值来判断是否发生故障，然而在小电流接地故障中，由于接地电流较小，往往难以达到设定的过电流保护值，导致故障未被及时识别和处理；②零序电流检测方法通过监测不对称电流来判断是否发生接地故障，但此方法依赖于故障电流的大小，而在小电流接地故障中，故障电流幅度较小，零序电流信号的变化也较为微弱，易受系统中其他不对称负荷或杂散电流的干扰，降低了检测的灵敏度和准确性^[3]；③中性点电压监测法通过监控中性点的电压变化来判断是

否发生接地故障，但是此方法对中性点的电气连接要求较高，在系统接地不良或存在较大接地电阻时，无法有效监测到故障电压的变化，导致故障检测不完全。此外，传统方法通常存在响应时间长、定位准确度低等问题，对于复杂的电力网络，特别是在化工厂这类特殊环境中，可能导致故障诊断和隔离延迟，进而增加了设备损坏的风险。因此，现有的传统检测方法在面对小电流接地故障时，显现出明显的局限性，亟需新的技术手段来提高故障检测的准确度和响应速度。

2.2 小电流选线装置的优势

在系统结构与算法机制上，小电流选线装置尤其适用于多分段接地网络与非对称负载环境中频繁出现的小电流接地故障场景。通过采用多通道并行采样架构与自适应滤波算法，装置可有效分离出短时故障特征与非故障扰动信号之间的频谱差异，增强对瞬态扰动的灵敏捕捉能力。其内部判据逻辑结合滑动窗口法与动态阈值调整机制，能够实时响应不同工况下的零序电流波动特征，提高弱信号环境下的准确性和鲁棒性。装置还集成了故障波形压缩存储与多协议通信接口，支持与主站系统的信息联动和远程维护，降低人工巡检压力。通过构建面向低信噪比工况的识别模型，系统可实现对复杂背景中高频杂散干扰的动态抑制，为中低压系统提供高稳定性的接地故障判别支撑，进一步拓展小电流选线技术在智能配电终端中的功能集成与工程适配能力。

3 小电流选线装置的工作原理及应用

3.1 系统构成

电流选线装置的系统构成具有高度集成化、模块化和智能化的特征，核心架构由零序电流互感器、微控制单元、信号采集与处理模块、通信接口模块及人机交互单元组成，系统内部通过总线通信实现模块协同运行^[4]，如图2所示。在硬件选型方面，充分考虑化工厂常见的高温、高腐蚀性环境，所选用的零序电流互感器外壳采用环氧树脂密封灌封结构，具备IP65及以上防护等级，确保在酸碱气体长期作用下的稳定性与

绝缘性能。同时，通信接口模块集成RS 485和CAN总线双重冗余机制，采用光电隔离设计与抗浪涌保护电路，以提升抗电磁干扰能力。

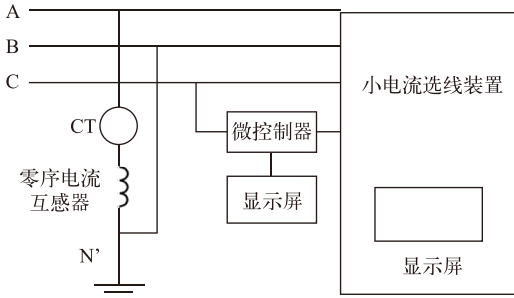


图2 小电流选线装置的系统构成

Fig. 2 System configuration of small current line selection device

小电流选线装置系统构成模块功能见表1。其关键功能部件为零序电流互感器与高速模数转换器的组合，能够实时提取系统中各相导线零序电流信号，经由微控制器内嵌DSP算法处理模块，完成基波滤波与高频瞬态提取，形成特征向量供后续判断逻辑调用。微控制器作为中央控制单元，采用FPGA+ARM架构组合设计，在完成对比分析各馈线零序电流幅值变化率的基础上，利用动态阈值比较机制执行选线判据，从而实现对故障馈线的精准识别。系统集成RS 485与CAN等多种通信接口协议，支持与上位机监控系统或SCADA系统的数据交互，同时配备液晶显示屏以展示实时运行状态与故障通道反馈信息，提高现场维护效率与运行透明度。

表1 小电流选线装置系统构成模块功能

Tab. 1 System configuration module function table for small current line selection device

模块名称	核心功能描述	技术指标 / 特性
零序电流互感器	采集各相导体零序电流信号	灵敏度小于 1 mA，抗共模干扰能力强
微控制单元 (MCU)	执行数字信号处理与故障判据逻辑	FPGA+ARM 双核架构，处理速率大于 200 MIPS
信号处理模块	高精度模数转换、滤波、特征提取	采样频率 20 kHz，24 位 ADC
通信接口模块	实现与上位机或监控系统数据交互	支持 RS 485、CAN、Modbus 协议
显示交互单元	实时显示装置信息、报警通道与操作菜单	高清 LCD，中文菜单，支持按键操作

3.2 工作原理

小电流选线装置基于零序电流瞬态分量提取与相位一致性分析原理构建其核心算法结构，系统通过安装于各馈线回路的零序电流互感器，实时采集接地故障初期产生的微弱非工频分量信号，并对信号进行带通滤波、加窗整形及快速傅里叶变换处理，以提取20~300 Hz区间内的瞬态能量变化特征^[5]。装置利用归一化突变量矢量公式对各支路零序电流的动态突变进行相对量化，然后结合故障初始阶段的相位一致性判据构建差异函数矩阵，最后通过最大幅值通道定位故障支路。公式为

$$\vec{D}_i(t) = \frac{I_{zi}(t + \Delta t) - I_{zi}(t)}{\max(|I_{zi}|)} \quad (1)$$

式中， $\vec{D}_i(t)$ 为第*i*路馈线在时刻*t*的零序电流归一化突变量，表示突变程度的相对量化值； $I_{zi}(t)$ 为第*i*路馈线在时刻*t*的零序电流采样值； Δt 为采样时间间隔，通常为一个或数个采样周期^[6]。

3.3 核心技术分析

小电流选线装置的核心技术以瞬态识别理论为基础，融合小波变换信号分析、相位一致性匹配机制与突变量归一化算法，构成高鲁棒性的选线判据体系，在复杂电网和弱信号背景下能够有效提升故障识别能力^[7]。该系统采用多分辨率小波变换，对采集到的零序电流信号进行时频域解构，在保留工频分量主干结构的同时，提取出短时瞬态扰动，形成高维瞬态特征向量组 $\vec{W}_i(t)$ ，进而构建相位匹配函数，实现故障支路与参考支路的相位一致性评估^[8]。相应匹配函数为

$$\Phi_i = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{W}_i \times \vec{W}_{ref}}{\|\vec{W}_i\| \|\vec{W}_{ref}\|} \right) \quad (2)$$

式中， Φ_i 为第*i*路支路与参考支路之间的相位夹角，值越小，表示相位一致性越高； $\vec{W}_i$ 为经过小波变换处理后，第*i*路支路的零序电流瞬态特征向量； $\vec{W}_{ref}$ 为参考支路的零序电流瞬态特征向量，通常选取变压器中性点或参考母线的零序信号为基准； $\|\vec{W}_i\|$ 为第*i*路支路特征向量的模长，

用于标准化相似性计算； $\|\vec{w}_{ref}\|$ 为参考向量的模长，确保夹角计算的尺度一致性^[9]。

该方法在低信噪比环境中仍能保持高选线正确率，同时通过自适应滑动窗口技术对故障发生的临界时间段进行动态锁定，显著降低外部电磁扰动对判断结果的影响^[10]。

3.4 小电流选线装置在化工厂的应用

(1) 应用案例

在某大型化工厂的10 kV配电系统中，小电流选线装置部署于厂区六条主要馈线的出线端子，通过安装高精度零序电流互感器，配置双通道模数采样模块与微处理控制核心，实现对单相接地故障的实时选线与数据上传。系统采样频率设置为20 kHz，覆盖从主变压器至各车间配电室的全链路监测路径，装置集成的动态阈值调整算法与基于时窗矢量投影的相量突变判据协同运行，采用分布式部署架构，每个区域就地完成数据预处理，并通过RS 485总线上传至主控室的统一分析平台。系统平台根据每条馈线的瞬态电流向量与波形特征进行特征识别与故障判定，再通过图形化界面将判定结果与设备编号自动对应，以满足化工厂多变量负载、易燃环境下对选线精准性与响应时间的严格要求。装置在该化工厂内部典型馈线接线与安装布局如图3所示。

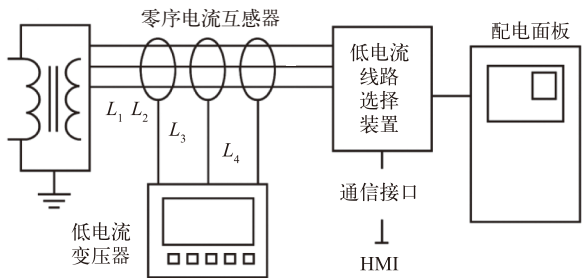


图3 化工厂典型小电流选线装置安装与接线结构图

Fig. 3 Installation and wiring structure diagram of a typical small current selection device in a chemical plant

每条线路的监测配置参数见表2，包括互感器电流比、传感器安装位置、数据上传延迟等关键指标，形成完整的现场技术部署体系。

表2 化工厂典型馈线选线装置配置参数

Tab. 2 Configuration parameters for typical feeder selection devices in chemical plants

馈线编号	零序互感器型号	安装位置	通信方式	上传延迟/ms	互感器电流比
F1	LZCK-55	变电所馈线柜	RS 485	27	100:1
F2	LZCK-55	酸洗车间配电柜	RS 485	29	100:1
F3	LMZJ1-0.5	合成工段馈电箱	光纤CAN	21	150:1
F4	LMZJ1-0.5	精馏区域汇流排	光纤CAN	23	150:1

(2) 应用效果评估

通过为期60天的连续运行监测与故障数据采集验证，该化工厂部署的小电流选线装置在复杂电磁干扰背景与多级母线分段结构下展现出高准确度、低延迟的故障识别能力。装置选线响应时间保持在20~30 ms之间，准确率稳定在95%以上，显著优于传统检测方法。以厂区2025年4月一次低电流水平单相接地故障为例，传统基于零序电流幅值比对法在干扰背景下出现误判，实际误判率为21.4%，导致延迟排查超过1 h；而本装置基于突变量归一化与相位一致性算法，在同一场景中精准定位故障馈线，准确率达100%，并在22 ms内完成故障上报。此外，在夜间负载剧烈波动，部分馈线存在非线性负载谐波背景下，系统仍保持高识别准确度，且未出现误判，进一步说明装置具有优异的干扰容错能力与适应能力。系统运行期间共识别出14次真实接地故障，其中10次发生于低电流水平条件下，全部实现自动选线与远程报警，验证了其在实际工程中的应用可靠性和智能化水平。

(3) 经济效益分析

小电流选线装置在化工厂中的实际部署，不仅提高了系统故障识别的准确度与速度，而且带来了显著的经济效益。首先，通过对14次真实单相接地故障的快速定位与隔离，传统人工排查平均每次故障需投入约150万元成本，本装置应用后60天内共节省经济损失逾800万元。其次，装

置有效减少了因误判和误动引发的非计划检修次数,显著降低了运维人力成本及备件消耗。以往因误判引起的检修频次为每季度4~6次,而装置投运后,该类误工误检几乎为零,全年预计可节省人工与材料成本约30万元。同时,系统对早期高阻接地的识别能力增强,有助于提前干预潜在风险,避免重大电气事故及由此带来的不可预估损失。综合直接经济节约与间接效益提升,选线装置的投资回收周期控制在12个月以内,具备良好的成本效益比与推广价值。

4 结束语

在化工企业电力系统中,小电流接地故障的检测与选线问题具有高度复杂性和工程挑战,通过构建融合瞬态识别、突变量分析与相量匹配算法的小电流选线装置,实现了故障识别的实时化与精准化,为接地保护技术的智能化发展提供了切实路径,未来可进一步拓展其在多源异构系统与配电网自动化场景中的应用深度与算法自适应能力。

参考文献

- [1] 李晨贺,袁德民,王媛媛.基于VMD-CNN-LSTM的小电流接地系统单相接地故障选线方法研究[J].电工技术,2025(3):123-126,137.
- [2] 吴江雄,郑茂然,王欣,等.基于暂态零序导纳值的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J].南方电网技术,2024,18(11):58-66.

- [3] 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.
- [4] 国瀚文.化工企业小电流接地系统单相接地故障的处理方法[J].炼油与化工,2018,29(2):61-62.
- [5] 范重阳.煤化工装置10 kV系统小电流选线装置误报警分析与治理[J].工程技术,2021(10):132-134.
- [6] 秦婷,钱仲豪,章益,等.智能元学习和迁移学习在小电流接地系统故障诊断中的应用[J].电子技术,2024,53(10):210-211.
- [7] 关荣根.小电流接地系统单相接地故障特征分析及其应用[J].水电与新能源,2023,37(10):39-42.
- [8] 刘健,常小强,张志华,等.基于零序电压的小电流接地系统高阻单相接地检测启动性能分析及其应用[J].供用电,2023,40(9):27-35,73.
- [9] 张印.单相接地故障脉选装置在小电流接地系统中的应用[J].冶金动力,2020(1):6-9.
- [10] 张朝,张红旗,包曼.智能算法在小电流接地系统选线中的应用[J].山西电力,2021(4):6-10.

作者简介

程祎(1980—),女,高级工程师,研究方向为小电流选线。

(收稿日期:2025-06-02)