

输配电线路故障选线新型高精度算法研究

陈立峰

内蒙古锡林郭勒盟阿巴嘎旗供电分公司, 内蒙古 锡林郭勒 011400

[摘要]随着电网规模的不断扩大, 输配电线路故障选线的准确性与响应速度成为保障供电稳定的重要环节。文中从现有选线方法的技术局限出发, 提出一种基于多参数融合与智能优化的高精度故障选线新算法。该算法结合电流突变量分析、小波变换特征提取和改进的支持向量机, 实现快速、准确的故障选线功能, 显著提升系统响应能力与鲁棒性, 为智能电网运维提供技术支持。

[关键词]输配电线路; 故障选线; 小波变换; 支持向量机; 高精度算法

DOI: 10.33142/hst.v8i5.16501

中图分类号: TM73

文献标识码: A

Research on a New High Precision Algorithm for Fault Line Selection in Transmission and Distribution Lines

CHEN Lifeng

Inner Mongolia Xilingol League Abaga Banner Power Supply Branch, Xilingol League, Inner Mongolia, 011400, China

Abstract: With the continuous expansion of the power grid, the accuracy and response speed of fault line selection for transmission and distribution lines have become important links in ensuring stable power supply. Starting from the technical limitations of existing line selection methods, this article proposes a new high-precision fault line selection algorithm based on multi parameter fusion and intelligent optimization. This algorithm combines current surge analysis, wavelet transform feature extraction, and improved support vector machine to achieve fast and accurate fault line selection function, significantly improving system response capability and robustness, and providing technical support for smart grid operation and maintenance.

Keywords: transmission and distribution lines; fault line selection; wavelet transform; support vector machine; high precision algorithm

引言

输配电系统作为电力网络的重要组成部分, 不仅承载着电能传输的重要任务, 更直接关系到整个电力系统的运行效率与安全稳定。在实际运行过程中, 一旦输配电线路发生故障, 若无法及时、准确地定位故障点, 不仅会导致大面积停电, 增加电网运行风险, 还会对设备安全和用户用电体验造成严重影响。传统故障选线方法如电流突变量法、行波法等, 在理想条件下具备一定适用性, 但在面对负载波动大、接地阻抗复杂、分布式电源接入频繁等复杂工况时, 常常出现误判、漏判等问题, 难以满足现代电网对选线算法在精度、稳定性与响应速度方面的高要求。

1 现有故障选线技术分析

1.1 基于电流突变的传统方法

传统故障选线方法多以电流突变量为核心, 通过检测电流在故障发生瞬间的幅值突变来判断故障相别及对应的故障线路。这类方法逻辑清晰、实现方式简便, 具备结构简单、计算量小、响应速度快等优点, 因此在早期输配电系统中被广泛采用。其基本原理是, 短路故障发生时, 电流波形会产生明显的突变, 系统通过采集母线各出线的电流波形并分析其突变量大小, 即可识别出电流突变幅值最大的线路, 从而推测该线路为故障线路。然而, 该类方法对系统中的非故障扰动、负荷波动、电气噪声等外界干

扰较为敏感, 尤其在多电源供电结构、接地电阻较大或高阻接地等复杂工况下, 极易出现误判、漏判等问题。此类算法常常忽略线路间耦合、互感效应及拓扑结构的影响, 导致在故障点距离变电站较远、线路阻抗较高的情况下, 电流突变量不再具有明显辨识度, 准确率显著下降。这些局限性严重制约了其在现代复杂电网环境中的适应性与实用性, 亟需更新和优化。

1.2 基于行波法的选线机制

行波法是一种基于电磁波传播理论的故障选线技术, 其基本原理是通过检测故障发生瞬间产生的高频电磁行波信号, 在输电线路中的传播路径与传播时间差, 来实现故障定位与故障线路的准确识别。由于电磁行波在导线中以接近光速的速度传播, 因此该方法具有极高的响应速度, 被广泛认为是一种高精度、快速响应的先进选线手段。其核心在于对故障引发的瞬态高频信号进行实时捕捉、滤波分析, 并通过差分法、时标对比法等技术手段确定行波到达各测点的先后顺序, 从而反推故障位置和线路。然而, 行波法对数据采集系统的硬件要求较高, 需配备高频率、高精度的同步采样设备, 系统构建和维护成本较大。同时, 该方法极易受到外部电磁干扰、信号反射与折射、线路拓扑复杂性等因素的影响, 导致行波信号到达时间不稳定, 选线精度下降。尤其是在中低压配电系统中, 由于线路距

离短、分支众多，行波传播路径复杂，时差微小，不利于形成有效判断，使得行波法的优势难以在该类系统中有效发挥。

1.3 智能算法在选线中的引入现状

随着人工智能与计算技术的进步，智能算法逐渐引入到输配电线路故障选线领域，成为当前研究与应用的热点。常见方法包括人工神经网络（ANN）、支持向量机（SVM）、模糊逻辑控制（FLC）以及深度学习模型等。这些算法通过对历史故障数据的学习与模式识别，能够有效挖掘电流、电压、零序量等信息之间的隐含关系，实现更具鲁棒性的故障选线判断。其中，SVM 凭借其良好的分类能力与小样本训练优势，被广泛应用于复杂工况下的多参数融合选线模型中；神经网络则擅长非线性建模，适合处理高度动态的输配电系统数据。然而，目前智能算法的选线方法仍存在一定局限，如训练样本依赖性强、模型泛化能力不均、参数选择对结果敏感等问题。智能模型在实际部署中对计算资源与嵌入式处理能力的要求也成为工程推广的重要瓶颈。如何提升模型的轻量化程度、增强对不同电网结构的适应能力，仍是当前智能选线算法需要重点攻克的技术难点。

2 新型高精度选线算法设计

2.1 故障信号特征提取模块设计

在高精度选线算法中，故障信号的特征提取是实现准确判断的前提。由于输配电系统在故障发生瞬间会产生大量高频瞬态信号，因此需要对电压、电流等原始信号进行时频域分析。小波变换因具备良好的局部分析能力和多尺度分解特性，被广泛应用于信号特征提取中。通过多尺度小波分解，可以有效区分正常运行状态与故障状态下的信号特征，提取出代表性强的特征分量。进一步地，在各尺度分解信号中提取能量、峰值、均值、频带能量比等统计特征，构成特征向量输入模型。为减少维度带来的计算压力，需结合主成分分析（PCA）或互信息方法对特征集进行筛选，提升特征质量，确保模型在后续训练阶段的判别能力。

2.2 模型训练与优化策略

特征提取后，需要借助机器学习模型对故障类型与线路进行分类与选线。在本算法设计中，选用改进型支持向量机（SVM）作为核心模型。SVM 在小样本、非线性、高维数据处理中表现优异，特别适用于电网故障数据样本不足、波动性强的情况。为增强分类效果，采用径向基函数（RBF）作为核函数，并引入粒子群优化（PSO）算法对 SVM 的惩罚参数 C 和核参数 γ 进行自动寻优。通过交叉验证获取最优参数组合，使模型在训练阶段达到较高准确率。同时，模型训练过程中需对样本进行标准化处理，防止各特征维度对模型收敛产生不均衡影响。为提升鲁棒性，采用集成学习思想，将多个 SVM 子模型通过加权投票集成，

提升对边界样本的识别能力，增强在实际电网中多种复杂工况下的选线适应性。此外，为进一步提升模型在训练过程中的泛化能力，训练样本采用 K 折交叉验证策略进行多轮评估，避免过拟合问题的出现。同时，在模型训练与优化阶段引入早停机制（Early Stopping），根据验证集性能动态控制训练轮次，确保模型在最优状态下终止训练。针对部分类别样本不平衡问题，还引入 SMOTE 过采样技术扩展小样本类别，提升模型对少数类故障的识别能力。

2.3 算法整体架构与实现流程

新型高精度选线算法整体结构由数据采集层、特征处理层、分类判别层和输出决策层组成，形成一个闭环智能诊断系统。在数据采集层，采集端实时获取各线路电流、电压及零序分量数据，并完成同步时标处理，确保时序一致性。数据进入特征处理层后，首先进行小波分解及特征提取，随后进入标准化与降维模块，形成模型输入向量。在分类判别层中，SVM 模型接收输入特征并输出故障线路判断结果；如集成多个模型，则通过集成框架完成综合决策。在输出决策层，系统将判断结果进行格式化，向保护装置或控制平台输出选线信号，并可根据配置生成告警信息或自动跳闸命令。整个流程具备实时性高、架构清晰、适配性强的特点，可无缝嵌入现有输电监控系统，实现对故障线路的快速、精准识别。系统具备一定的自学习能力，可根据实际运行中新增的数据样本持续优化模型，提高长期运行的选线准确性与可靠性。

3 算法性能对比与误差分析

3.1 多场景仿真验证设计

为全面评估所提出的新型高精度故障选线算法在多种实际工况下的性能表现，本文基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建了一个结构完整、参数真实的 10kV 配电网仿真模型，模拟配电系统在运行过程中可能面临的多类故障情形。具体设计了包括单相接地、两相短路、三相短路、金属性接地及高阻接地等典型故障类型，且融合了不同负载变化、分布式电源（如光伏、电池储能）接入、电缆线路短路阻抗等多样化运行条件，构建复杂工况环境。每组仿真均重复运行 30 次，以提升数据的统计稳定性和结果可信度。在仿真过程中，系统实时采集故障初期电流、电压等特征信号，并通过特征提取与判别算法进行线路识别。最终结果显示，该算法在各类干扰与复杂场景下均能稳定实现 90% 以上的故障识别准确率，充分验证了其高适应性与优良鲁棒性，具备工程实用价值。

3.2 与传统方法误差对比分析

为进一步验证算法性能，选取当前主流的三种故障选线方法：电流突变量法、行波法与基于神经网络的智能选线模型，分别与所提出的 SVM 融合算法进行对比测试。对比维度包括故障选线准确率、平均误差率、误判率与适应复杂工况能力等。测试结果见表 1。可以看出，在所有工

况下,新算法准确率最高,且误差率最低,尤其在高阻接地与弱信号故障中优势更为明显。传统突变变量法由于对负电荷波动较敏感,常出现误选问题;行波法虽在理论上响应快,但受终端设备采样精度限制,准确率下降较明显;神经网络模型在训练样本变化较大时稳定性差,而融合小波特征与SVM的算法在保持较低误差的同时,实现了稳定选线。如表1所示:

表1 传统方法误差对比分析数据

方法名称	平均准确率 (%)	平均误差率 (%)	高阻故障识别成功率 (%)	响应稳定性 (等级)
电流突变变量法	78.4	11.7	54.6	中
行波法	83.6	9.2	67.8	中偏高
神经网络模型	87.3	7.4	72.5	中
小波+SVM 算法	94.8	3.9	89.7	高

3.3 响应速度与硬件适配性测试

在实际工程应用中,选线算法不仅需要高精度,还必须满足响应及时、计算资源消耗低等要求。为测试算法响应性能,将小波+SVM 算法部署在嵌入式处理单元中进行实际运行仿真,采样率设定为20kHz,目标是在故障发生后200ms内完成信号采集、特征处理与输出判断。测试结果显示,该算法平均响应时间为74ms,最大响应时间未超过120ms,完全满足当前电网对故障定位300ms内完成响应的工程需求。在资源占用方面,算法整体运行所需RAM小于10MB,CPU负载控制在40%以内,适配性良好。尤其适合部署在现有的配电自动化终端、保护装置或馈线智能控制单元中。对比传统神经网络模型,其需要更多内存与处理器支持,小波+SVM模型在轻量化和嵌入式环境部署方面更具优势。

4 实际工程应用建议

4.1 系统集成与部署要求

将新型高精度故障选线算法投入实际工程应用,首要任务是完成其在现有配电自动化系统中的集成与部署。该算法结构清晰、计算复杂度适中,可与现有馈线保护装置、故障指示器及配电终端(DTU)实现无缝对接。在部署层面,需要配备高频率采样模块(建议 $\geq 20\text{kHz}$)、具备边缘计算能力的嵌入式处理器,并支持数据预处理和模型加载功能。系统应配置标准通信接口,如Modbus、IEC104或DL/T645协议,确保算法判断结果能够快速传输至主站系统或监控终端。为提升系统运行稳定性,建议配套部署本地故障录波装置,形成数据闭环,便于算法长期在校准与维护。在城市配电网与工业园区配电系统中,基于已有通信链路和保护架构,该算法可较为便捷地完成集成,适应现场运行环境。

4.2 推广应用的可行性探讨

该选线算法具备高准确率、低误差、响应快、可嵌入等优点,具备良好的推广基础。首先,在中压配电系统(6kV~35kV)中,该算法对常见单相接地、短路等故障

具备高度适应性,能显著提升运维人员故障判断效率,缩短停电时长。其次,其对复杂接地类型及弱信号故障识别能力强,可有效弥补传统保护装置识别盲区。再者,随着配电自动化系统覆盖率的提高,各区域配网终端硬件水平逐步提升,为该算法的部署提供了良好的计算与存储资源支持。值得一提的是,该算法具备可迁移性,既可部署于变电站保护系统,也可下沉至配电线路分支的智能控制终端,实现局部判断和分布式故障诊断,大幅降低通信依赖与中央计算负担。在新型电力系统发展趋势下,其在分布式电源接入场景中也具备广泛适用性。

4.3 后续优化研究方向

尽管该算法在当前版本中已展现出良好的技术性能,但为实现其在更复杂电网中的高效运行,仍需在多个方面持续优化。首先,在模型层面,可引入深度神经网络或图神经网络进一步提升特征识别的表达能力,尤其在非对称接地或低电压穿越场景中增强判断准确性。其次,在算法轻量化方面,可通过剪枝技术、模型压缩、知识蒸馏等方式,降低计算资源消耗,提升算法在低功耗设备中的部署效率。再次,结合边缘计算和5G通信技术,构建分布式智能判断体系,实现多终端协同选线、局部处理与全网融合响应。还可结合大数据技术建立线上故障库,不断优化模型参数,使其具备自学习能力,适应不同地域、不同电网结构下的特征变化。未来,该算法也可向特高压输电、高速铁路牵引网、风光储接入系统等特种电网推广,拓展其工程应用边界。

5 结束语

输配电线路故障选线的智能化与高精度化是构建安全、高效电网的关键环节。本文提出的新型算法,通过小波特征提取与支持向量机融合,实现了多种工况下的精准选线,表现出良好的鲁棒性与实用性。未来,可进一步探索其在特高压和分布式电网中的扩展应用,推动输配电保护系统向更高水平发展。

【参考文献】

- [1]郭威. 配电线路故障类型辨识及故障选线定位方法的研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2022.
 - [2]杨克剑,史建. 露天煤矿输配电线路的运行维护及管理措施研究[J]. 矿业装备,2020(6):118-119.
 - [3]吴星笑,张文雯. 电力输配电线路的运行维护与故障排除技术[J]. 湖北农机化,2020(16):16-17.
 - [4]吴同勇. 电力输配电线路中的运行与故障对策分析[J]. 中国设备工程,2024(24):142-144.
 - [5]苏超. 架空输配电线路无人机自主巡检关键技术研究与应用[D]. 杭州:浙江大学,2023.
- 作者简介:陈立峰(1978.7—),男,锡林浩特市,汉族,本科,工程师,就职于内蒙古锡林郭勒盟阿巴嘎旗供电分公司,从事电力领域方向的工作。