

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)02-0166-05

# 基于暂态信号时频解耦技术的电缆故障定位方法

方蓬勃,姚陶,高云帆,刘甲林,何甜

(国网河北省电力有限公司信息通信分公司,河北石家庄 050000)

**摘要:**在电网一张图背景下,利用电缆信号数据对其进行故障检测成为新的研究重点。为此,研究首先利用实时监测的线路数据,提取得到暂态信号。然后利用S变换计算极性特征以及三相分量幅值数据。根据计算得到的信息对故障所在线路区段进行确定。最后,通过解耦技术实现故障准确定位。研究表明,研究设计方法的故障检测准确率为95.5%,故障定位误差为0.32 m,平均响应时间为0.18 s。且故障检测结果与实际结果的拟合度达到了0.89。充分证明了方法的有效性和实用性。能够为电力工作者提供更为有效的决策依据。

**关键词:**配电网;暂态信号;时域解耦技术;电缆;故障定位;S变换

中图分类号:TP277;TN75

文献标志码:A

文章编号:1003-7241(2026)02-0166-05

## Cable fault location method based on transient signal time frequency decoupling technology

FANG Pengbo, YAO Tao, GAO Yunfan, LIU Jialin, HE Tian

(Information Communication Branch State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

**Abstract:** Under the background of grid diagram, fault detection using cable signal data becomes a new research focus. For this reason, the transient signal is extracted by using real-time monitoring line data. Then the S-transform is used to calculate the polarity characteristics and the amplitude data of the three-phase components. According to the calculated information, the fault location of the line segment is determined. Finally, the fault location is realized by decoupling technology. The results show that the fault detection accuracy is 95.5%, the fault location error is 0.32 m, and the average response time is 0.18 s. The fitting degree between the fault detection results and the actual results reaches 0.89. The effectiveness and practicability of the method are fully proved. It can provide more effective decision-making basis for power workers.

**Keywords:** distribution network; transient signal; time domain decoupling technology; cable; fault location; S-transform

随着城市化进程的加快和电力需求的不断增长,电网规模也逐渐变大。配电网是直接服务于居民用电的关键环节,若配电网出现故障则会直接影响用户的用电体验,降低电力质量<sup>[1-2]</sup>。电缆作为配电网的主要组成部分,其故障定位的准确性对于提高整个电力系统的服务质量具有重要意义<sup>[3]</sup>。然而,配电网和电缆故障产生的暂态信号存在复杂性,实现精确的故障定位困难。传统的电缆故障定位方法主要依赖于人工巡检和信号注入法,这些方法存在定位精度低、响应时间长等缺点。近年来,随着电网一张图技术的发展,配电网的运行状态和管理水平得到了显著提升<sup>[4]</sup>。电网一张图技术通过对配电网的全面监控和数据采集,实现了配电网的可视化管理和智能化运行。然而,在电缆故障定位方面,电网一张图技术的应用还存在一些困难。智能监测得到用于故障定位的数据包括时域

反射以及频域反射数据,这些数据在应用过程中都展现出了各自的优点与局限性。时域反射数据能够直观地反映电缆中的信号传播特性,但其精度受到采样率和噪声等因素的限制。而频域反射数据则能提供更为丰富的故障信息,但处理过程相对复杂,需要一定的计算资源和时间。目前国内外对于电缆故障的检测主要利用电流、电压暂态和稳态特征。随着边缘计算的发展,国内外学者开始对高压电力电缆建模、解耦技术以及故障选线等展开研究<sup>[5-7]</sup>。为此,研究利用电网一张图技术和暂态信号时域解耦技术设计了一个新的电缆故障定位方法。该方法旨在通过利用智能信息技术及暂态模量时频特征实现配电网非稳定故障的精确测距,为电力工作者提供有效决策依据。

收稿日期:2024-05-10;录用日期:2024-06-06

基金项目:国家电网总部科技项目(1400-202213231A-1-1-ZN)

作者简介:方蓬勃(1991—)男,硕士,工程师,研究方向:通信与信息系统。

引用本文:方蓬勃,姚陶,高云帆,等.基于暂态信号时频解耦技术的电缆故障定位方法[J].自动化技术与应用,2026,45(2):166-169,188.(FANG Pengbo, YAO Tao, GAO Yunfan, et al. Cable fault location method based on transient signal time frequency decoupling technology[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(2):166-169,188.)

# 1 模型构建

## 1.1 暂态信号模型构建及故障识别

在电网一张图背景下,配电网系统开始使用智能技术构建对应的数据管理系统,并将数据以可视化的形式展现。基于此,研究基于电网一张图技术对配电网中的电缆故障进行检测并定位。配电网中的电力电缆主要为三芯电缆,

电缆中的电流分为 A 相电流、B 相电流和 C 相电流<sup>[8-10]</sup>。在日常使用中,电缆中 A、B、C 相的电流是相同且平衡的,否则将会导致电缆线路中出现感应电动势。这种电动势会进一步破坏线路,导致故障产生。因此,为了消除这种电动势,在配电网线路中 ongoing 增加了小电阻,利用其在电缆两端接地。三芯电缆的主要故障类型如图 1 所示。

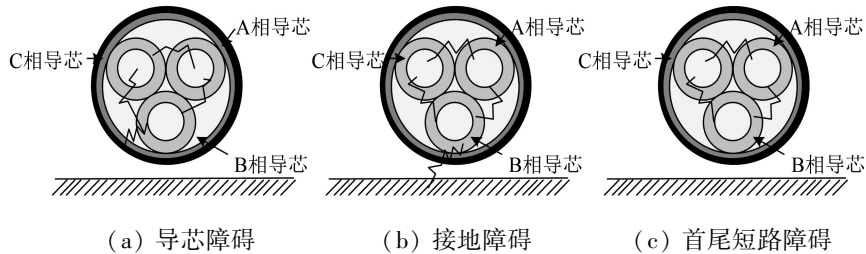


图 1 三芯电缆的主要故障类型

Fig. 1 Main fault types of three-core cables

如图 1 所示,三芯电缆主要有导芯故障、短路故障以及接地故障三种。为进一步细分故障类型,根据故障电阻情况将其分为稳定故障和不稳定故障。在进行故障识别之前,需要构建对应的等效电路模型,进一步对故障进行分析定位。对于稳定故障,采用非时变电阻对其进行模拟。对于非稳定故障,选择时变电阻进行模拟。结合三芯电缆的导体间存在电磁场耦合的特点,研究利用频域解耦技术构造得到稳态解耦矩阵,并将其应用到故障定位中。相较于频域解耦,时域解耦技术的要求更为宽松,且其能够准确反映电缆故障的特征。因此,研究选择时域解耦技术构建矩阵。配电网三芯电缆的传输方式为

$$\frac{\partial \mathbf{U}(x,t)}{\partial x} = -\mathbf{Z} \frac{\partial \mathbf{I}(x,t)}{\partial t}, \frac{\partial \mathbf{I}(x,t)}{\partial x} = -\mathbf{Y} \frac{\partial \mathbf{U}(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{Z}$  和  $\mathbf{Y}$  分别为阻抗矩阵和导纳矩阵,  $x$  为测点位置,  $\mathbf{U}(x,t)$  和  $\mathbf{I}(x,t)$  分别为电压时域信号向量和电流时域信号向量,  $t$  为测试时间。三芯电缆的屏蔽方式包括公共屏蔽和独立屏蔽两种,不同方式下故障前后的线路模量状态都有显著变化。对于公共屏蔽形式而言,在故障发生后,其电流模量出现突变。对于独立屏蔽形式而言,在故障前后,其电压与电流模量从无到有变化。因此,根据其变化特点,利用电压和电流的模量变化情况对电缆故障进行辨识。对于独立屏蔽形式电缆,研究获取三相首端的电压电流信号,进一步解耦计算得到对应的特征模量,计算方法为

$$\begin{cases} u(t) = -(u_A(t) + u_B(t) + u_C(t)) + 3\mathbf{R}_{sc} i_m'(t) \\ i(t) = i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) + i_m'(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $u(t)$  和  $i(t)$  为包含三相分量之和的电压及电流信号,  $u_A$ 、 $u_B$  和  $u_C$  为三相电压,  $i_A$ 、 $i_B$  和  $i_C$  为三相电流,  $i_m'$  为接地电流,  $\mathbf{R}_{sc}$  为电阻向量。通过判断电压与电流模量是否满足设定阈值范围,确定故障是否发生。

## 1.2 基于时频解耦技术的故障定位

在初步确定故障区段后,利用解耦技术对故障位置进行精确定位,以帮助工作人员快速将故障区域与非故障区

域进行隔离,同时及时维修<sup>[11-12]</sup>。为实现故障位置的精确定位,根据线路的暂态幅值比以及接地线电流分布情况进行分析。根据分析结果给出准确的定位结果。首先利用暂态幅值比进行故障的初步定位,之后利用接地线电流分布情况对定位结果作进一步优化。基于暂态复制比的故障定位方法流程如图 2 所示。

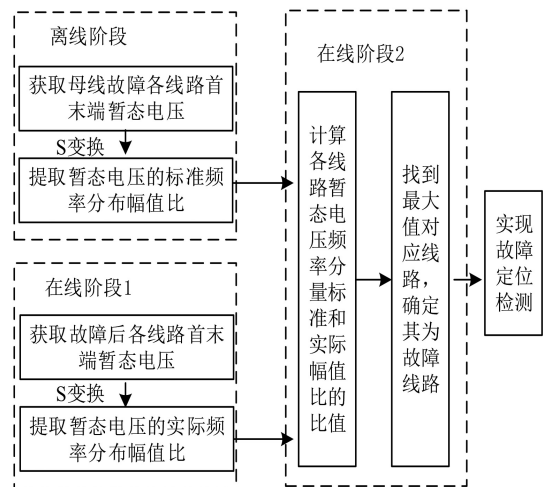


图 2 基于暂态幅值比的故障定位方法流程

Fig. 2 Process of fault location method based on transient amplitude ratio

如图 2 所示,研究将故障定位检测分为离线阶段和在线阶段。离线阶段,研究首先提取端点处的暂态电压,然后利用 S 变换方法计算其频率分量幅值。在线阶段,通过提取末端暂态电压,获得路线中的实际暂态电压时频分量幅值比。最后将两阶段的幅值比进行比较,找到两者的最大比值所在的路线,即可确定故障位置。在进行时频分量幅值比计算之前,需要选择合适的提取频率。提取频率过大或过小会影响计算的效率与精度,为此,研究在考虑计算成本和计算精度之后,将提取频率设置为 18 kHz。S 变换为

$$\begin{cases} S[m, n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[n+k] \cdot e^{-\frac{2\pi^2 k^2}{n^2}} \cdot e^{\frac{j2\pi km}{N}} \\ X[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \cdot e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \\ S[m, n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $x[k]$  为采集的离散信号,  $m$  和  $n$  分别为  $S$  变换频率值和采样点,  $k$  也是采样点,  $j$  为虚数,  $N$  为信号数据窗长度,  $S[m, n]$  为离散变换,  $X[n]$  为原始信号。研究发现, 由于存在分解混淆的情况,  $S$  变换的提取精度并不理想。为解决此问题, 研究将模极大值引入到特征提取中, 根据提取频率确定矩阵中对应的向量。需要准确获取母线障碍数据, 若不能提取则将直接影响故障定位精度。为此, 根据在电缆两端的接地电阻上的电流分布变化情况进行进一步确定故障位置。通过实时的监测数据, 获得电缆两端的接地电流数据, 并根据数据分析接地电流的分布特征。在分析之前, 这些数据存在噪声过大的情况, 为此, 采用高斯滤波器对数据进行过滤降噪处理。故障发生时, 接地电缆的电流会由均匀分布转向非均匀突变分布。因此, 研究可根据此时的电流分布特征以及配电网的具体结构情况进行判断, 进一步确定故障出现的具体位置。在实际应用中, 配电网中的电缆线路并不是单一一条的, 在电网线路中具有多个分节支点, 这些支点处, 一条线路会分为多个分支。故在确定具体的故障线路之后, 还需要确定是否是其中一个分支出现故障, 或者故障就在主线上。目前典型的电缆故障如图 3 所示。

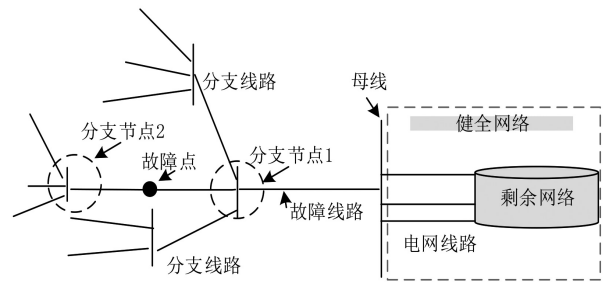


图 3 电缆故障示意

Fig. 3 Cable fault diagram

为进一步确定故障位置, 对测定得到的故障线路的支线以及主线、节点等进行编号。然后将测得的电流电压数据进行  $S$  变换, 获得每个编号节点的暂态信号数据。首先根据这两个数据选出频率分量幅值最大的三个编号测点作为初步筛选结果。然后利用 db6 小波提取出暂态信号的极性因子, 判断这些测点的极性分子大小, 进一步确定故障区域。

## 2 电缆故障定位模型性能分析

为检验电缆故障定位模型的性能, 设计了一系列实验对其故障检测效果进行分析。在模拟故障实验中, 人为地在电缆线路中引入不同类型的故障, 包括短路、断路和接地等故障, 以模拟真实的故障场景。评估指标包括故障检测准确率、故障定位精度和响应时间。故障仿真案例具体情况如表 1 所示。

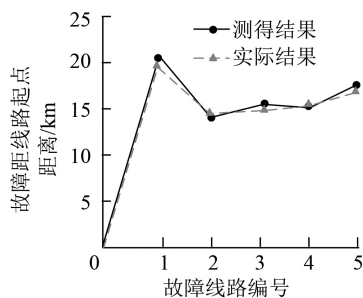
表 1 研究设计的故障仿真案例具体情况

Tab. 1 The specific situation of the fault simulation case designed in the research

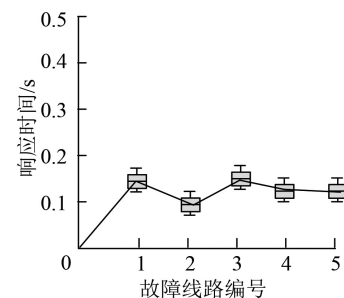
故障线路	故障类型	中性点接地方式	电压频率分量幅值比	故障位置
1	短路	不接地	1.634	分支节点
2	断路	经消小电阻接地	0.943	电缆出线
3	接地	经消弧线圈接地	0.823	电缆出线
4	短路	经消小电阻接地	0.678	电缆出线
5	断路	经消弧线圈接地	2.455	分支节点

由表 1 可知, 设计的故障仿真案例涵盖了不同类型的故障、不同的中性点接地方式以及不同的故障位置。为检验模型的故障检测精度, 利用其进行故障检测, 并将其与

实际故障情况进行对比分析, 故障定位和响应时间如图 4 所示。



(a) 故障定位拟合情况



(b) 响应时间

图 4 设计故障定位模型与实际故障结果的拟合情况

Fig. 4 The fitting situation between the designed fault location model and the actual fault results

由图4(a)可知,设计模型的故障定位结果与实际结果相差细微,且相差不超过0.32 m。设计方法的拟合度达到了0.89。如图4(b)可知,设计模型的平均响应时间不超过0.2 s,满足故障检测需求。为进一步验证设计模型(模型1)的性能,将其与目前较为流行的故障定位方法对五条故障路线进行检测。然后根据检测结果对比几个模型的性能。对比模型包括文献[12]的基于馈线自动化功能的配电网故障定位模型(模型2)、文献[13]中的基于改进象群算法的故障定位模型(模型3)、文献[14]中的基于行波衰减特性的电缆故障定位模型(模型4)、文献[15]中的基于反射系数谱相关系数的故障定位模型(模型5)。对比实验包括在线路故障出现变动前后,五种模型的测距误差,对比结果如图5所示。

由图5可知,随着故障线路的变动程度增加,各模型变化后的测距误差都有所增加,其中模型1的变动最小。在变动过程中,模型1的平均测距误差值为3.34%,明显低于其他模型。设计的方法具有较好的稳定性。为更加

全面比较各个模型的性能,研究选择短路和断路两类型故障进行分析,五个模型的对比结果如表2所示。

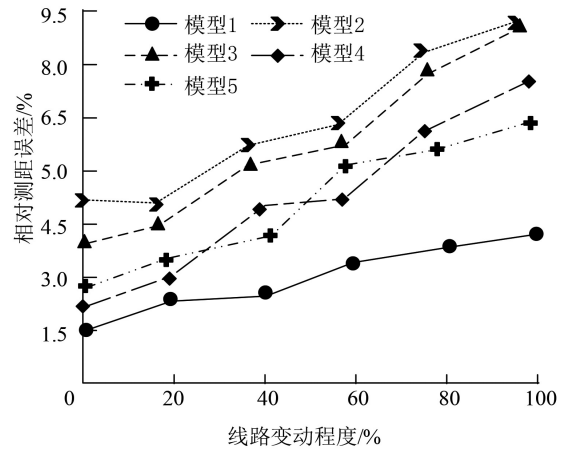


图5 线路参数变动前后各模型的测距误差变化  
Fig. 5 The changes in ranging errors of each model before and after the variation of line parameters

表2 设计模型与其他模型的对比结果

Tab. 2 Comparison results between the designed model and other models

模型	故障类型 1			故障类型 2		
	故障检测准确率/%	故障定位误差/m	响应时间/s	故障检测准确率/%	故障定位误差/m	响应时间/s
模型1	95.8	0.35	0.17	95.2	0.29	0.19
模型2	89.7	0.69	0.45	88.9	0.67	0.45
模型3	90.6	0.45	0.34	91.0	0.48	0.35
模型4	92.7	0.42	0.32	92.5	0.45	0.32
模型5	91.4	0.47	0.33	91.2	0.46	0.30

由表2可知,设计的电缆故障定位模型在故障检测准确率、故障定位精度和响应时间方面均优于其他对比模型。具体而言,设计的模型在故障检测准确率上平均值达到了95.5%,高于其他模型的平均值89.3%。在故障定位精度方面,设计的模型定位平均误差仅为0.32 m,远低于其他模型的平均值0.68 m。在响应时间方面,设计的模型平均响应时间仅为0.18 s,比其他模型的最快响应时间还要快0.12 s。这充分证明了设计的电缆故障定位模型在性能上的优越性。综上所述,设计的模型具有较高的故障检测准确率和定位精度,同时响应时间较短,能够满足实际配电网运行中对故障快速定位的需求。

### 3 结论

针对在电网一张图背景下配电网的故障检测存在精度低、效率不高的问题,研究提出了一种基于暂态信号时频解耦技术的电缆故障定位方法。研究利用S变换提取各测点暂态电流的频率分量幅值和极性因子,同时结合接地线电流的分布特征,实现了对电缆故障的快速准确定位。通过模拟实验,验证了所设计的电缆故障定位模型的有效性。提出的基于暂态信号的电缆故障定位方法具有较优秀的故障检测能力,能够满足实际配电网运行中对故

障快速定位的需求。在未来的工作中,考虑探索将该方法应用于其他类型的配电网故障定位问题,以进一步拓展其应用范围。

### 参考文献

- [1] 杨明嘉, 夏成军, 池梓斌, 等. 基于沿线电流故障分量差值的交叉互联电缆故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 54-66.
- [2] 梁睿, 彭楠, 张政一, 等. 暂态特征模量时频分析的电缆型配电网单相接地故障区段定位[J]. 中国电机工程学报, 2023(23): 9098-9114.
- [3] 李小燕, 党晔. 基于时变天牛群算法的分布式电源继电保护故障定位研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(12): 62-65.
- [4] 梁钟颖, 周凯, 孟鹏飞, 等. 基于频域反射系数谱的电缆故障定位与故障类型识别方法研究[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(8): 79-88.
- [5] 左娟娟, 朱红杰, 杨继党, 等. 基于半监督机器学习的复杂电网连锁故障诊断方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(12): 47-50.
- [6] IZADI M, MOHSENIAN-RAD H. Synchronous waveform measurements to locate transient events and incipient faults in power distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4295-4307.
- [7] WANG W, GAO X, FAN B, et al. Faulty phase detection method under single-line-to-ground fault considering distributed parameters asymmetry and line impedance in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 37(3): 1513-1522.
- [8] 贾科, 李英, 孔嘉靖, 等. 风光电源故障暂态解析及实用化短路电流峰值计算[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 830-838.